

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Energétique et Installations Energétiques et Turbomachines

Titre :

**Optimisation des performances d'un
cycle frigorifique fonctionnant avec le
R717, cas de l'unité de Coca-Cola de
Rouiba**

Réalisé par :

TOUBAL Aymen

BENCHABA Samir Abderrahmane

Encadré par :

Dr. KETFI Omar

Mr. BITAM Kamel

Année Universitaire 2021/2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE



Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique

Option : Energétique et Installations Energétiques et Turbomachines

Titre :

**Améliorations des performances d'un
cycle frigorifique fonctionnant avec le
R717, cas de l'unité de Coca-Cola de
Rouiba**

Réalisé par :

TOUBAL Aymen

BENCHABA Samir Abderrahmane

Encadré par :

Dr. KETFI Omar

Mr. BITAM Kamel

Année Universitaire 2021/2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions Allah tout puissant qui nous a donné la foi, le courage, la force et la volonté de réaliser ce modeste travail.

Au début de ce mémoire, nous exprimons notre profonde gratitude envers tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à notre formation, et aux résultats auxquels nous sommes parvenus.

Nous tenons à remercier notre encadrant Monsieur KETFI Omar pour son soutien et ses orientations durant tout notre travail pour réaliser ce projet.

Nos sincères remerciements à notre encadrant Monsieur BITAM Kamel (FRUITAL-Coca Cola), pour nous avoir conseillé, dirigé pendant la réalisation de ce travail.

Nous tenons à remercier le Directeur Générale de la société FRUITAL-COCA COLA pour l'opportunité qu'il nous a donnée pour faire un stage au sein sa société.

Nous remercions vont également à tous les enseignants du département de Mécanique.

A la même occasion, nous remercions vivement Monsieur ROUDANE Mohamed qui a nous a donné quelques conseils lors le déroulement de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à tous les ingénieurs et les techniciens de FRUITAL-COCA COLA (Abdelatif, Saïd, Djamel, Kamel, Rabah, Hamoud, Adel, Amine, Nacer, Yahia, Makhlouf, Abdelkader et Mohamed), pour l'aide prodiguée pendant notre stage au société.

Nous tenons enfin à remercier Siffeddine, Mourad et Ali nos collègues de stage pratique, sans oublier tous nos amis et nos camarades de la promotion 2022.

- Aymen et Samir -

DÉDICACE

JE DEDIE CE TRAVAIL A MES TRES CHERES PARENTS QUE J'AIME POUR CEUX QUI M'ONT COMBLE D'AMOUR ET DE JOIE ET QUI M'ONT EGALEMENT PORTE ASSISTANCE, ET ASSURE LE CONFORT ET LA SECURITE.

A MES FRERES : ABDESSAMIE, ISMAIL.

A MES SŒURS.

A MES NEVEUX ET NIECES.

A TOUT MA FAMILLE (A MES ONCLES, MES TANTES, MES COUSINS ET MES COUSINES).

A MON BINOME BENCHABA SAMIR.

A TOUS MES AMIS ET PLUS SPECIALEMENT A: ILYES, CHAKIB, ISLAH, KHALED, ABDERAOUF, FAÏÇAL ET NOUREDDINE.

A TOUS LES ÉNERGETICIENS DE LA PROMOTION 2022.

A TOUS CEUX QUI ONT ETE A MES COTES JUSQU'A AUJOURD'HUI.

- AYMEN-

Dédicace

Du plus profond du mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont cher, ma chère maman et mes sœurs et mes frères, à toute ma grande famille, à tous mes amis et à tous ceux qui par un geste, une Doua contribuée à l'élaboration de cette œuvre.

Samir

Résumé :

Dans ce travail nous avons réalisé une étude sur une station frigorifique disponible au sein de l'unité de FRUITAL-COCACOLA qui fonctionne avec l'Ammoniac comme fluide frigorigène (R717). Notre travail concerne la simulation d'une installation de compression de vapeur fonctionnant avec le R717. L'étude de simulation a été réalisée à l'aide de l'outil EES (Engineering Equation Solver), une partie sur la modélisation thermodynamique des différents composants d'un cycle de compression à vapeur est présentée. Une étude paramétrique de l'installation est présentée ainsi l'intégration des données expérimentaux exploités lors d'un stage de 6 mois au sein de l'unité. L'étude des problèmes et améliorations proposés est aussi exposée en fin de ce mémoire.

Mot Clés : Fluide Frigorigène, Compression à Vapeur, Améliorations.

Abstract :

In this work we have carried out a study on a refrigeration station available within the FRUITAL-COCACOLA unit which operates with ammonia as a refrigerant (R717). Our work concerns the simulation of a vapor compression installation operating with R717. The simulation study was carried out using the EES (Engineering Equation Solver) tool, a part on the thermodynamic modeling of the various components of a steam compression cycle is presented. A parametric study of the installation is presented as well as the integration of experimental data used during a 6-month internship within the unit. The study of the problems and proposed improvements is also presented at the end of this thesis.

Keywords : Refrigerant, Vapor Compression, Improvements.

ملخص :

في هذا العمل أجرينا دراسة على محطة تبريد متوفرة ضمن وحدة FRUITAL-COCACOLA التي تعمل بالأمونيا كمبرد (R717). يتعلق عملنا بمحاكاة تركيب ضغط البخار الذي يعمل مع R717. تم إجراء دراسة المحاكاة باستخدام أداة EES (Engineering Equation Solver)، وقد تم تقديم جزء من النمذجة الديناميكية الحرارية للمكونات المختلفة لدورة ضغط البخار. يتم تقديم دراسة بارامترية للتركيب بالإضافة إلى تكامل البيانات التجريبية المستخدمة خلال فترة تدريب لمدة 6 أشهر داخل الوحدة. كما يتم عرض دراسة المشكلات و التحسينات المقترحة في نهاية هذه الأطروحة.

الكلمات المفتاحية : غاز تبريد، ضغط البخار، التحسينات.

Liste Des Matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Nomenclature	
Présentation de L'entreprise et Historique	
Introduction Générale	1
CHAPITRE 01 : Généralités sur le Froid	3
Introduction	4
I.1. Historique	4
I.1.1. Naissance de Froid Artificiel	4
I.1.2. Evolution des Utilisations	5
I.2. Systèmes de Production de Froid	6
I.2.1 Systèmes de Production du Froid par Sorption	6
➤ Systèmes à Absorption	6
• Définition	6
• Principe de Fonctionnement	7
➤ Système à Adsorption	8
• Définition	8
• Principe de Fonctionnement	9
➤ Système à Dessiccation	11
• Définition	11
• Principe de Fonctionnement	12
I.2.2. Système de Compression à Vapeur	14
➤ Définition	14
➤ Principe de Fonctionnement	14
➤ Les Composants de Base d'une Machine Frigorifique de Compression à Vapeur	16
• Le Compresseur	16

• Le Condenseur	16
• Le Détendeur	17
• L'évaporateur	17
I.2.2.1 Système de Compression à Vapeur Alimenté par Energie Renouvelable	18
• Définition	18
• Principe de Fonctionnement	18
• Diagramme PH d'une Installation Frigorifique de Compression à Vapeur	21
Conclusion	22
CHAPITRE 02 : Présentation de la Station	23
Introduction	24
II.1. L'Ammoniac (NH ₃)	24
II.1.1. Historique	24
II.1.2. Caractéristiques Physico-Chimiques	25
II.1.3. Toxicologie et Précautions	25
➤ Toxicologie	25
➤ Précautions Individuelles	25
➤ Précautions à la Mise en Service	26
II.1.4. Domaines D'application	26
II.1.5. Avantages de R717 comme Réfrigérant	26
II.1.6. Inconvénients de R717	27
II.2. Compresseur à Vis	28
II.2.1. Définition	28
II.2.2. Fiche Technique du Compresseur à Vis	30
II.2.3. Principe de Fonctionnement	31
II.2.4. Variation de Puissance	32
II.2.5. Variation de Volume	34
II.2.6. Circuit D'huile	36
II.3. Condenseur Evaporatif	38
II.3.1. Définition	38
II.3.2. Fiche Technique de Condenseur Evaporatif	39
• Composition	40

II.3.3. Principe de Fonctionnement	41
II.4. Vanne de Lamination	43
II.4.1. Définition	43
II.4.2. Principe de Fonctionnement	43
II.5. Bouteille Accumulatrice et Bouteille Séparatrice	44
II.5.1. Bouteille Accumulatrice	44
II.5.2. Bouteille Séparatrice	45
II.6. Echangeur à Plaques	47
II.6.1. Définition	47
II.6.2. Principe de Fonctionnement et Composition	48
• Composition	49
II.6.3. Caractéristiques Techniques	49
II.6.4. Lois Relier avec L'échangeur	51
II.7. L'eau Glycolée	52
II.7.1. Définition	52
II.7.2. Types d'eaux Glycolées	52
II.7.3. Propriétés Physique-Chimiques	53
II.8. PID	53
II.8.1. Définition	53
II.8.2. Principe de Fonctionnement	55
• Action Proportionnelle	55
• Action Intégrale	56
• Action Dérivée	57
Conclusion	58
CHAPITRE 03 : Résultats, Interprétations et Améliorations	59
Introduction	60
III.1 Etude Théorique	60
• Diagramme PH	62
III.1.1 L'influence de la Température du Bulbe Humide sur les Performances du Système	62

➤ Variation des Puissances du Cycle en Fonction de la Température du Bulbe Humide (TBH)	62
➤ Variation du COP du Cycle en Fonction de la Température du Bulbe Humide (TBH)	66
III.1.2 L'influence de la Température de la Source Froide sur les Performances du Système	67
➤ Variation des Puissances du Cycle en Fonction de la Température Froide (Te)	67
➤ Variation du COP du cycle en fonction de la température froide (Te)	70
III.2 Calcul des Performances étant par les Données Expérimentales	71
• Diagramme PH	73
III.2.1 L'influence de Débit de Réfrigérant sur les Performances du Système	74
➤ Variation des Puissances du Cycle en Fonction de Débit Massique de Réfrigérant	74
III.3 Amélioration	77
III.3.1 Problématique Générale	77
III.3.1.1 Partie 01	77
III.3.1.1.A Filtre Déshydrateur de type WDO	77
➤ Définition	77
➤ Principe de Fonctionnement	79
III.3.1.2 Partie 02	82
III.3.1.2.A Les Filtres Coalesceurs	82
➤ Définition	82
➤ Principe de Fonctionnement de ces Filtres	85
III.3.1.2.B Refroidissement D'huile	85
• Refroidissement D'huile par L'échange Thermique avec L'ammoniac	85
➤ Matériels à Ajouter	85
➤ Principe de Fonctionnement	85
• Refroidissement D'huile par le Phénomène de Thermosiphon	88
➤ Définition de Phénomène de Thermosiphon	88
➤ Matériels à Ajouter	88
➤ Principe de Fonctionnement	88
• Refroidissement D'huile par L'eau	91

➤ Matériels à Ajouter	91
➤ Application Numérique	91
➤ Principe de Fonctionnement	92
➤ L'influence de la Température de Sortie Chaude sur les Performances de L'échangeur à Plaques	95
Conclusion	97
Conclusion Générale	98
Références Bibliographiques	
Annexes	

Listes Des Figures

Figure 1.1 : Un schéma représente le principe de fonctionnement d'un système à absorption.	8
Figure 1.2 : Phénomène de l'adsorption.	9
Figure 1.3 : Cycle à adsorption.	11
Figure 1.4 : Représentation de l'évolution de l'air dans un diagramme de l'air humide.	13
Figure 1.5 : Cycle à dessiccation.	14
Figure 1.6 : Un schéma frigorifique montre le fonctionnement d'un cycle frigorifique classique.	15
Figure 1.7 : Passage des vapeurs frigorigènes de la BP à la HP.	16
Figure 1.8 : Passage de fluide frigorigène dans un condenseur.	17
Figure 1.9 : Passage de fluide frigorigène de la HP vers la BP.	17
Figure 1.10 : Passage de fluide frigorigène dans un évaporateur.	18
Figure 1.11 : Un schéma montre comment un système de photovoltaïque marche.	19
Figure 1.12 : Un schéma représente les chaleurs et les pressions dans le système.	19
Figure 1.13 : Diagramme PH d'une installation frigorifique classique.	21
Figure 2.1 : Une coupe d'un compresseur à vis birotor et ses composants intérieurs.	29
Figure 2.2 : La référence de compresseur à vis.	30
Figure 2.3 : Vues de dessus et de coté du compresseur à vis.	30
Figure 2.4 : Phase d'aspiration des gaz dans un compresseur à vis.	31
Figure 2.5 : Phase de compression des gaz dans un compresseur à vis.	32
Figure 2.6 : Phase de refoulement des gaz dans un compresseur à vis.	32

Figure 2.7 : Visualisation du mouvement du tiroir de capacité par commande hydraulique.	34
Figure 2.8 : Variation du rendement du compresseur en fonction du rapport de compression.	35
Figure 2.9 : Une vue réelle d'un compresseur à vis avec son moteur électrique et son séparateur d'huile.	36
Figure 2.10 : Un schéma de circuit d'huile de compresseur à vis.	37
Figure 2.11 : Une vue de face réelle d'un condenseur évaporatif.	38
Figure 2.12 : Une vue de côté réelle d'un condenseur évaporatif.	39
Figure 2.13 : Un dessin technique d'un condenseur évaporatif.	40
Figure 2.14 : Composition d'un condenseur évaporatif.	40
Figure 2.15 : Schéma de principe d'un condenseur évaporatif.	42
Figure 2.16 : Une vanne de lamination.	43
Figure 2.17 : Une vue réelle d'une vanne de lamination.	44
Figure 2.18 : Un dessin technique d'une bouteille à haute pression.	45
Figure 2.19 : Une vue réelle d'une bouteille accumulatrice HP.	45
Figure 2.20 : Un schéma d'une bouteille séparatrice BP.	46
Figure 2.21 : Une vue réelle d'une bouteille séparatrice BP.	47
Figure 2.22 : Ecoulement a contre-courant des fluides dans un échangeur de chaleur à plaques.	48
Figure 2.23 : Schéma d'un échangeur à plaques et sa composition.	49
Figure 2.24 : Un dessin technique d'un échangeur à plaques.	49
Figure 2.25 : Une vue réelle d'un échangeur à plaques.	51
Figure 2.26 : Schéma de fonctionnement d'un PID.	54
Figure 2.27 : Une vue réelle d'un appareil de régulation de l'installation.	54

Figure 2.28: L'influence de l'action proportionnelle sur la réponse du processus à un échelon.	55
Figure 2.29 : L'influence de l'action intégrale sur la réponse du processus à un échelon.	56
Figure 2.30 : L'influence de l'action dérivée sur la réponse du processus à un échelon.	57
Figure 3.1 : Programme de simulation de l'étude paramétrique.	60
Figure 3.2 : Schéma global du cycle à compression de vapeur.	61
Figure 3.3 : Diagramme PH du cycle à NH ₃ .	62
Figure 3.4 : Variation de la puissance du condenseur en fonction de température du bulbe humide.	63
Figure 3.5 : Variation de la puissance de l'évaporation en fonction de la température du bulbe humide.	64
Figure 3.6 : Variation de la puissance du compresseur en fonction de la température du bulbe humide.	65
Figure 3.7 : Variation du COP de la machine en fonction de la température du bulbe humide.	66
Figure 3.8 : Variation de la puissance du condenseur en fonction de la température froide.	67
Figure 3.9 : Variation de la puissance de l'évaporation en fonction de la température de froide.	68
Figure 3.10 : Variation de la puissance du compresseur en fonction de la température de l'évaporation.	69
Figure 3.11 : Variation du COP en fonction de la température de l'évaporation.	70
Figure 3.12 : Programme de calcul pour l'étude expérimentale.	71
Figure 3.13 : Schéma globale du cycle réel de l'installation frigorifique de Fruitai-Coca Cola (unité de Rouiba).	72
Figure 3.14 : Diagramme PH de cycle réel.	73

Figure 3.15 : Variation de puissance de compresseur en fonction de débit massique.	74
Figure 3.16 : La variation de puissance de condensation en fonction de débit massique.	75
Figure 3.17 : La variation de puissance frigorifique en fonction de débit massique.	76
Figure 3.18 : Une vue réelle de gauche d'un filtre déshydrateur de type WDO.	78
Figure 3.19 : Une vue réelle de droite d'un filtre déshydrateur de type WDO.	79
Figure 3.20 : Schéma d'une amélioration en ajoutant filtre déshydrateur de type WDO.	81
Figure 3.21 : L'emplacement des filtres coalesceurs ancien modèle au niveau de séparateur d'huile (une vue réelle).	83
Figure 3.22 : Filtres coalesceurs nouvelles génération.	84
Figure 3.23 : Un schéma d'une amélioration pour refroidir l'huile par l'échange thermique avec l'ammoniac contenant dans l'installation.	87
Figure 3.24 : Un schéma d'une amélioration pour refroidir l'huile par le phénomène de Thermosiphon.	90
Figure 3.25 : Un schéma d'une amélioration pour refroidir l'huile par l'eau glycolée.	94
Figure 3.26 : La variation de la puissance de chaleur cédée par l'huile en fonction de la température chaude de sortie.	95
Figure 3.27 : La variation d'efficacité en fonction de la température chaude de la sortie de l'échangeur.	95
Figure 3.28 : La variation de la surface d'échange en fonction de la température chaude à la sortie de l'échangeur.	96

Listes Des Tableaux

Tableau 1.1 : Bilan énergétique des composants du système de compression à vapeur.	20
Tableau 2.1 : Combinaisons nombre de lobes/nombre d'alvéoles utilisés.	29
Tableau 2.2 : Les spécifications de condenseur évaporatif.	39
Tableau 2.3 : Un tableau des propriétés de fluide de service et fluide refroidissement.	50
Tableau 2.4 : Un tableau des caractéristiques d'échangeur à plaques.	50
Tableau 3.1 : Résultats des calculs de cycle réel.	73
Tableau 3.2 : Températures de l'eau glycolée.	73

Nomenclature

Symboles	Nomenclatures	Unités
BP	Basse Pression.	Bar
C_p	Chaleur Spécifique à Pression Constante.	KJ/kg. °C
C_v	Chaleur Spécifique à Pression Constante.	KJ/kg. °C
U	Coefficient D'échange Globale.	W/m ² .°C
λ	Coefficient de Conduction.	W/m.°C
H	Coefficient de Convection.	W/m ² .°C
γ	Coefficient des Gaz Parfaits.	-
<i>m</i>	Débit Massique.	kg/s
Q_v	Débit Volumique.	m ³ /s
ΔT	Différence de Température.	°C
DTLM	Différence de Température Logarithmique.	°C
Efficacité	Efficacité D'échangeur.	-
Q, W	Energie.	KJ
h	Enthalpie.	KJ/kg
s	Entropie.	KJ/kg.°C
e	Epaisseur.	m
HP	Haute Pression.	Bar
ppm	Partie par Million.	-
PH	Potentiel Hydrogène.	-
P	Pression.	Bar
<i>Q̇, Ẇ</i>	Puissance.	KW
R_{th}	Résistance Thermique.	m ² .°C/W
S	Surface D'échange.	m ²
τ_i	Taux de Pression.	-

Vi	Taux de Volume.	-
w	Teneur en Humidité.	kg/kg air sec
T	Température.	°C
TBH	Température Bulbe Humide.	°C
TCe	Température D'entrée Chaude.	°C
TFe	Température D'entrée Froide.	°C
TCs	Température de Sortie Chaude.	°C
TFs	Température de Sortie Froide.	°C
X	Teneur en Vapeur.	-
V	Volume.	m ³ ou L

Présentation sur L'entreprise (Fruital-Coca Cola) et Historique

Introduction :

Embouteiller de Coca Cola depuis 1993, Fruital-Coca Cola filiale du groupe ECCBC est le plus important producteur et distributeur des produits de The Coca Cola Company en Algérie.

Fruital-Coca Cola SPA, filiale du groupe Espagnol ECCBC, une entreprise internationale spécialisée dans le métier de l'embouteillage présente dans 13 pays dont l'Algérie, 16 usines d'embouteillage, 43 lignes de production et un environnement multiculturel par excellence.

Fruital-Coca Cola avec un effectif de plus de 1300 collaborateurs, une usine à Rouïba comprenant 7 lignes de production dont 2 lignes RGB, 4 lignes PET et 1 ligne CAN, produit et commercialise plus de 56 références sous les marques Coca Cola, Fanta, Schweppes et Pulpy à travers son réseau de distribution qui compte parmi les plus performants de la zone pour le plus grand plaisir des consommateurs Algériens.

Profitant du support international de The Coca Cola Company, Fruital-Coca Cola enregistre d'excellentes performances et des taux de croissance importants sur le marché Algérien, grâce à sa marque et l'engagement de ses employés. Elle distribue ses produits dans 13 wilayas dont Alger, Blida, Boumèrdes, Tizi-Ouzou, Tipaza, Médéa, Ain Defla, Bouira, Bordj Bou Arreridj, Djelfa, Tamanrasset, Laghouat et Ghardaïa.

Fruital-Coca Cola offre à ses collaborateurs un excitant challenge avec un plan de développement ambitieux, en leur permettant de mettre toutes leurs aptitudes et expertises au service de l'une des entreprises qui compte parmi les plus dynamiques du marché Algérien.

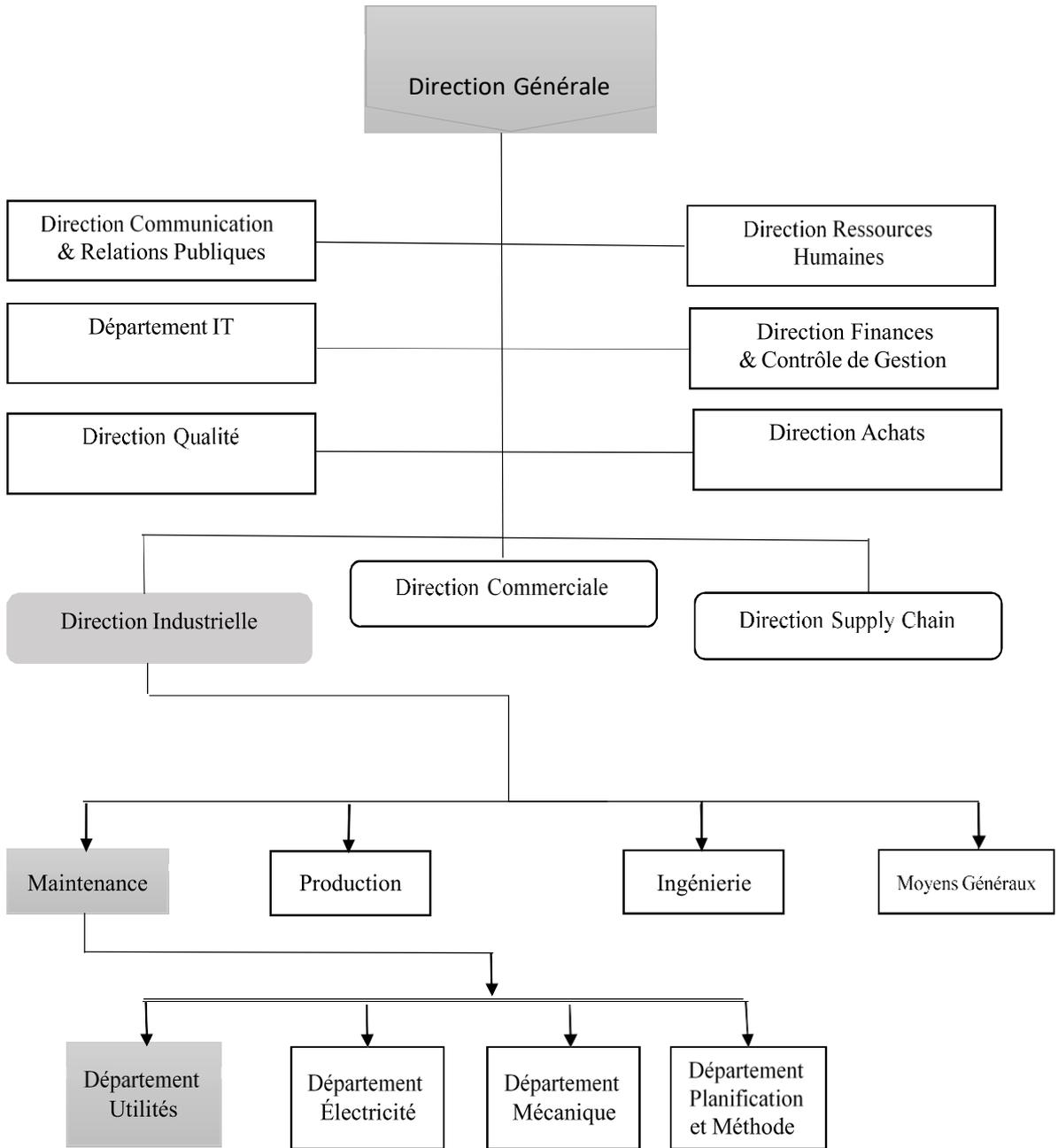
Description Service Utilités :

Le département utilités est considéré comme le cœur d'une usine. Il a le rôle de fournir des différentes énergies et fluides pour le fonctionnement d'une industrie. Le service utilités de la Fruital Coca Cola ECCBC est composée de :

- Une station de production d'air comprimé composée de 4 compresseurs à 7 bars et 4 compresseurs à a 40 bars.
- Une station de production de vapeur composée de 3 chaudières.
- Une station de stockage de dioxyde de carbone (CO2) composée de 4 citernes.
- Une station de froid industrielle composée de 5 compresseurs.
- Une station de traitement des eaux.

-Une station de Siroperie.

Organigramme Fruitai-Coca Cola ECCBC



Historique :

Après l'installation frigorifique est mis en place, plusieurs améliorations ont été fait pour protéger le matériel et optimiser les performances, ils sont comme suivis :

Le Constructeur York et Fruital-Coca Cola (2008) : Ont signalés des vibrations indésirables et plusieurs fois des fuites dans les évaporateurs détente directe, donc une amélioration a été fait par le remplacement de ces évaporateurs par les échangeurs à plaques.

Le Constructeur York et Fruital-Coca Cola (2008) : Ont mis en place une bouteille accumulatrice HP pour stocker une grande quantité de l'ammoniac et une bouteille séparatrice BP afin de protéger les compresseurs d'aspirer le liquide et une vanne de lamination entre ces deux bouteilles pour la faire la détente isenthalpiques.

Le Constructeur York et Fruital-Coca Cola (2015) : Ont mis en place un câblage électrique afin de relier le condenseur évaporatif avec le régulateur PID pour faire une variation de vitesse des ventilateurs en fonction de pression de condensation.

Le Constructeur York et Fruital-Coca Cola (2022) : Ont fait une révision mécanique de trois compresseurs à vis dans le cadre de rénovation de matériel frigorifique, en changeant tous les roulements intérieurs et vérifiant les tolérances de jeu des arbres intérieurs.

Le Constructeur York et Fruital-Coca Cola (2022) : Ont mis en place un variateur de fréquence et supprimer le montage électrique étoile-triangle afin de protéger le moteur électrique contre endommagement.

Introduction Générale

La production du froid est nécessaire dans ce monde. Il pèse totale 15% de la consommation de l'énergie électrique dans le monde. Le fonctionnement de ce système est basé sur le principe de la thermodynamique qui consiste d'utiliser l'énergie thermique produite par le changement de phase (liquide /vapeur) d'un fluide spécifique appelé fluide frigorigène. le froid s'élança tout d'abord a la conquête des industries alimentaires: conservation des produits d'origine carnée et d'origine végétale, ainsi que des produits de la pêche, d'abord par réfrigération, puis pour augmenter le temps de conservation, par congélation lente au début puis, au fur et a mesure des recherches, accélération de la vitesse de congélation en abaissant la température des tunnels utilises a cet effet pour en arriver à la « surgélation », et pour des produits particuliers a leur lyophilisation. Dans le domaine des boissons, le froid intervient pour leur fabrication (Jus, Boissons gazeuses).

L'usine que nous étudierons est destinée à la fabrication des boissons gazeuse et des jus fraiche, à travers ce travail il sera question, d'appréhender les exigences du secteur de la boisson, de calculer des besoins et dimensionnement des machines, pour le système de froid industriel.

C'est pour ces raison que nous somme orienter vers la conception des besoins énergétique dans une usine des boissons (Coca-Cola).

Ce travail est réalisé au sein du bureau d'entretien de département industrielle au niveau de société spécialisé dans la maintenance des machines frigorifique, nous avons choisir pour cela un projet en cours d'étude, qui nous as permis de traiter une problématique réelle en mettant en pratique les connaissances acquises lors de notre cursus universitaire.

Les deux paramètres principaux que nous prendrons en considération dans notre étude sont l'optimisation du rendement frigorifique et l'économie de la puissance électrique.

Pour atteindre notre objectif nous avons mise en place trois chapitres. Dans Le 1^{er} chapitre nous avons parlé sur la généralité sur le froid, les systèmes de la production de froid et les composantes de base d'une machine frigorifique de compression à vapeur.

Le 2^{ème} chapitre est dédié à la présentation de la station et les organes constitutifs de la station de production froid disponible à l'unité de Coca-Cola de Rouïba. Le principe de fonctionnement ainsi que les spécifications techniques des composants ont été abordés et les différentes caractéristiques physicochimiques de fluide frigorigène et le système de régulation.

Le 3^{ème} chapitre est traité les résultats, les interprétations ainsi les études paramétriques et l'étude expérimentale et bien sûr les améliorations que nous avons proposé d'après notre stage.

CHAPITRE 01 :
Généralités sur le Froid

Introduction :

Ce chapitre traitera la production de froid, son historique au cours des siècles, les systèmes existant soit par énergies renouvelables ou énergie électriques avec leurs principes de fonctionnement.

On va parler également dans ce chapitre sur les composants d'un système de production de froid classique ainsi le bilan énergétique de ces systèmes.

I.1. Historique :

I.1.1. Naissance de Froid Artificiel :

L'homme, dès son apparition sur Terre, a du constater que ses aliments se conservaient mieux en hiver qu'en été, et penser que, si l'on pouvait artificiellement obtenir en été des températures hivernales, la conservation de ses aliments serait obtenue dans les mêmes conditions qu'en hiver. Quand va-t-il songé à prélever en hiver la glace naturelle, à la conserver, puis à l'utiliser pour éviter l'altération de l'aliments ? On peut par contre affirmer que, Au Rome antique, ces prélèvements de glace étaient courants et que, gardée dans les grottes ou des carrières, cette glace servait ensuite, le moment venu, à la conservation des denrées. Cette pratique se répandit ensuite dans beaucoup d'autres pays au fil des siècles, et c'est ainsi que tout naturellement l'homme fut amené à fabriquer de la glace artificielle. En 1862, à l'Exposition universelle de Londres, Ferdinand Carre émerveilla les visiteurs en extrayant régulièrement d'énormes blocs de glace d'une machine aux dimensions imposantes. Cela frappait d'autant plus le public que Carre, utilisant une machine à absorption, produisait de la glace grâce à la chaleur.

À partir de 1869 que Charles Tellier développa la première installation pouvant servir à conserver les aliments. Charles Tellier est considéré comme l'inventeur de l'industrie du froid. Il s'est demandé comment faire face aux fortes chaleurs de l'époque et à développer en se basant sur les travaux de Faraday une machine frigorifique à circulation de gaz ammoniac liquéfié. Il participa même à la création d'un navire frigorifique pour faire passer les viandes d'un continent à un autre.

Ce n'est seulement qu'en 1911 que le premier réfrigérateur à proprement parlé voit le jour. C'est la société General Electric qui le commercialisa. Ce frigo utilisait un processus de refroidissement à l'aide de dioxyde de soufre. Cependant, le prix de ce réfrigérateur était incroyablement élevé. General Electric à continuer à améliorer son

produit. En 1925 proposé le premier réfrigérateur domestique hermétiquement fermé à un prix beaucoup plus abordable.

A la fin de la seconde guerre mondiale la production de masse de réfrigérateur s'impose notamment grâce à l'utilisation du fréon.

Le dégivrage automatique fait son apparition dans les années 50-60.

Des années 70 à nos jours les fabricants se focalisent afin d'augmenter toujours plus les capacités de refroidissement de nos frigos tout en ayant un objectif de réduction de consommation d'énergie et tendant vers un réfrigérateur toujours plus respectueux de l'environnement [1].

I.1.2. Evolution des Utilisations :

Le froid s'élança tout d'abord a la conquête des industries alimentaires: conservation des produits d'origine carnée et d'origine végétale, ainsi que des produits de la pêche, d'abord par réfrigération, puis pour augmenter le temps de conservation, par congélation lente au début puis, au fur et a mesure des recherches, accélération de la vitesse de congélation en abaissant la température des tunnels utilises a cet effet pour en arriver à la « surgélation », et pour des produits particuliers a leur lyophilisation. Dans le domaine des boissons, le froid intervient pour leur fabrication (boissons gazeuse). Conjointement a la conquête des industries alimentaires, le froid s'immisça dans les industries métallurgiques, mécaniques, chimiques, atomiques, spatiales, etc. Pour les industries chimiques et pétrochimiques le froid intervient dans de nombreux domaines : liquéfaction du chlore, rectification de l'éthylène en vue de son utilisation dans la fabrication des Matières plastiques, liquéfaction du gaz naturel en vue de son transport maritime, etc. Le génie civil lui-même fait appel au froid artificiel, soit pour refroidir le béton lors de sa prise, notamment dans la construction de barrages, soit pour congeler les sols aquifères permettant ainsi de travailler comme dans un sol plein.

Dans le domaine médical, le froid intervient directement pour l'hibernation artificielle, la cryochirurgie, la conservation du plasma. Sanguin, etc.

Pour la fabrication des médicaments le froid a été primordial, soit en assurant la conservation des produits utilises (produits opothérapiques) avant leur mise en œuvre, soit en intervenant directement au stade de la fabrication et lyophilisation de vaccins par exemple ou démoulage rapide de produits à base de beurre de cacao.

Dans un domaine parallèle la congélation et la conservation par le froid des semences animales et humaines en vue de l'insémination artificielle animale sont des techniques couramment utilisées.

En laboratoires d'essais ou de recherche, le froid, allié à la technique du vide, permet de réaliser les conditions rencontrées dans l'espace (caissons de simulation spatiale), ou d'étudier le comportement des métaux, de matériels élaborés, de matériaux dans les conditions où ces éléments peuvent être très utilisés et également d'étudier le comportement de la matière au voisinage du zéro absolu, ce qui a permis notamment de découvrir la supraconductivité des métaux.

Dans le domaine des transports, que ce soit par voies terrestre, maritime ou aérienne, le froid assure le maintien des denrées à la température désirée pour leur transport, soit sur de grandes distances, soit sur des distances beaucoup plus courtes pour les approvisionnements en denrées surgelées de différents points de vente à partir d'un entrepôt régional, ou encore la vente ambulante de denrées fraîches en milieu rural [1].

I.2. Systèmes de Production de Froid :

La production du froid est obtenue à partir de machines frigorifiques à compression de vapeur (systèmes classiques) ou par des machines dites à Sorption. Cette partie est consacrée à la présentation de ces deux systèmes.

Les éléments essentiels qui constituent ces systèmes sont détaillés pour chacun d'entre eux ainsi que leurs caractéristiques techniques et de performances.

Les systèmes de production du froid sont subdivisés en deux grandes familles :

I.2.1 Systèmes de Production du Froid par Sorption :

➤ Systèmes à Absorption :

- **Définition :**

L'absorption, est un phénomène volumique intéressant la totalité de la masse de l'absorbant en général le système par absorption, une source de chaleur est utilisée pour séparer un constituant volatil d'une solution, le plus souvent binaire. Ce constituant séparé sous phase vapeur est ensuite condensé, puis détendu. Le liquide issu de la détente s'évapore, absorbant ainsi de la chaleur et produisant du froid.

La machine à absorption est l'élément du système permettant de produire du froid et du chaud à tout niveau de température. C'est une technique connue et maîtrisée puisque son invention date de 1859. Elle a bien sûr depuis été considérablement améliorée. On distingue trois machines à froid à absorption:

- Machine frigorifique à absorption humide.
- Machine frigorifique à absorption sèche.
- Machine frigorifique à absorption solaire.

- **Principe de Fonctionnement :**

Les éléments majeurs suivants sont nécessaires pour produire froid dans le cycle à absorption (figure 1.1), nous mentionnons l'importance de chaque composant :

- Un **générateur** agit comme une "chaudière", et cet échangeur est utilisé pour séparer le liquide de refroidissement de la solution en fournissant de la chaleur.
- Un **condenseur** sert à condenser la vapeur de fluide frigorigène issu du générateur, le fluide de refroidissement servant à la condensation de cette vapeur sera en général de l'air ambiant.
- Un **évaporateur** afin de produire l'effet frigorifique, en d'autres termes le niveau de température du liquide à refroidir (par exemple de l'eau entrant à 12°C et sortant à 7°C) fixe la température d'évaporation.
- **L'absorbeur** est utilisé pour stabiliser la vapeur de liquide de refroidissement dans le liquide absorbant, c'est-à-dire concentrée dans la matière volatile inférieure, la chaleur dégagée lors de l'absorption doit également être évacuée, par exemple par l'eau, puis diffusée dans le refroidisseur d'air.
- Une **pompe** afin d'élever la pression du mélange et de la diriger vers le bouilleur.

[2][3][3]

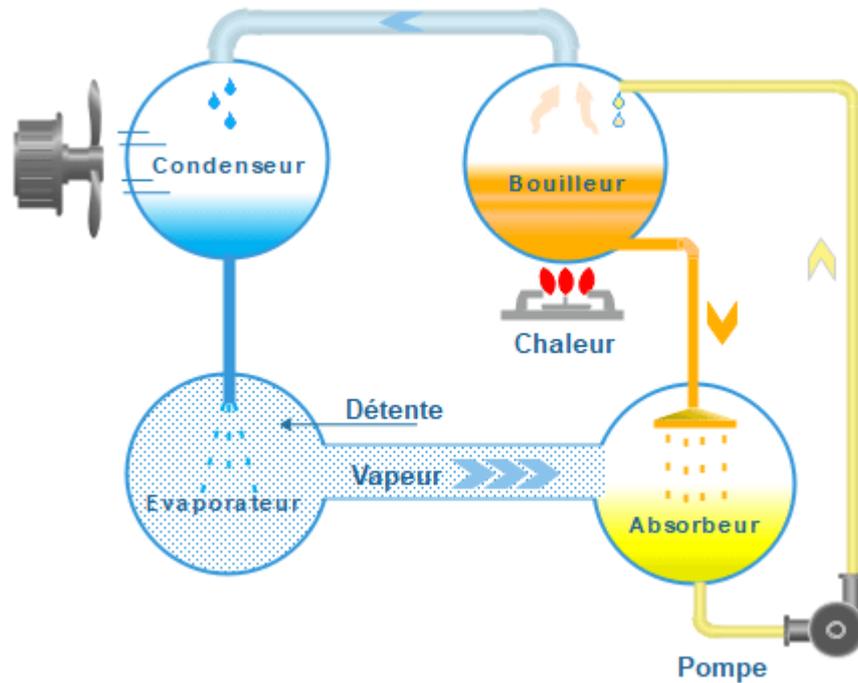


Figure 1.1 : Un schéma représente le principe de fonctionnement d'un système à absorption.

➤ **Système à Adsorption :**

• **Définition :**

L'adsorption est le processus par lequel les molécules d'un fluide se fixent sur les parois d'un matériau solide. Les molécules adsorbées ne subissent aucune réaction chimique mais perdent simplement de l'énergie lorsqu'elles sont fixées au lit d'adsorption, ce qui entraîne une production d'énergie exothermique. Dans le système d'adsorption, le compresseur est remplacé par un compresseur thermique qui est actionné par la chaleur au lieu de l'énergie mécanique. Le réfrigérant vaporisé est adsorbé dans les pores de l'adsorbant dans la chambre de réaction. En raison du chargement de l'adsorbant, le compresseur thermique fonctionne par intermittence. Un système d'adsorption simple se compose d'une chambre de désorption (lit d'adsorbant solide), d'un condenseur, d'une chambre d'adsorption et d'un évaporateur. Dans quelques systèmes, des vannes sont utilisées entre les différents composants et certains utilisent des détendeurs entre le condenseur et l'évaporateur. La figure 1.3 montre le système à adsorption. Le système à adsorption dépend de l'affinité du lit d'adsorbant pour attirer la vapeur de réfrigérant de l'évaporateur et ce processus crée une basse pression dans l'évaporateur.

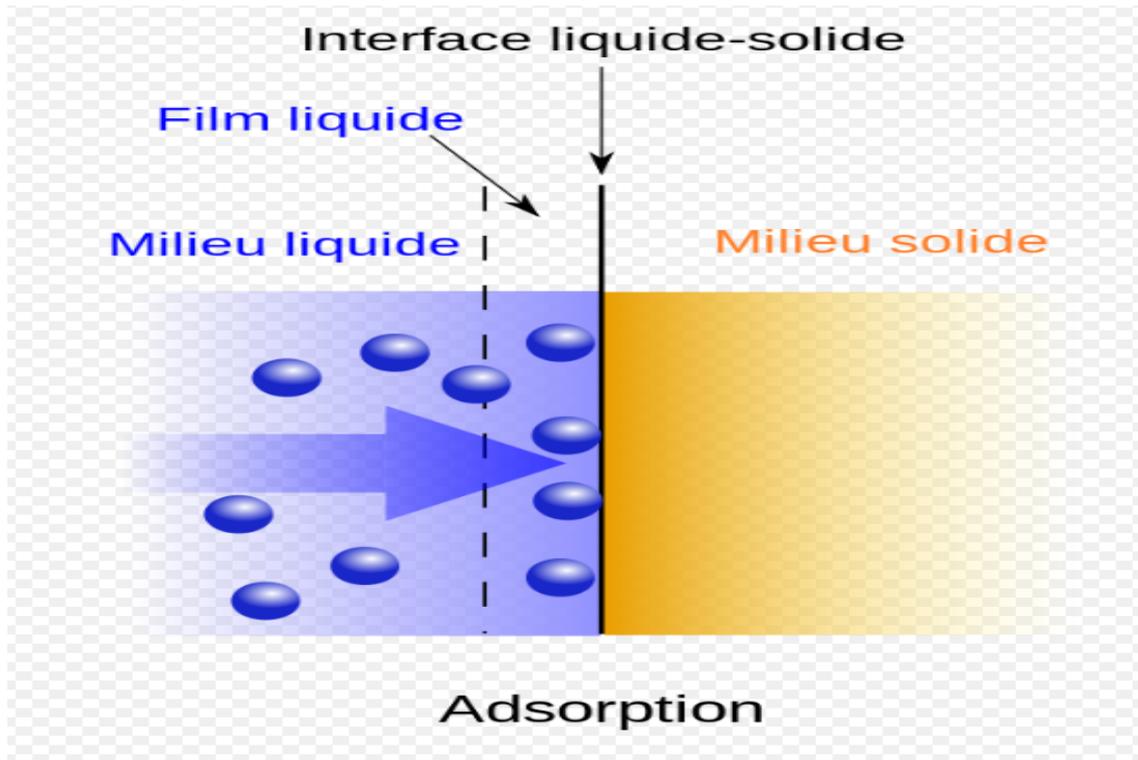


Figure 1.2 : Phénomène de l'adsorption.

- **Principe de Fonctionnement :**

Un cycle d'adsorption de base se compose de quatre processus thermodynamiques qui sont comme suivies :

- **Chauffage et pressurisation (1-2) :**

Au démarrage du procédé, l'adsorbant est froid et saturé de réfrigérant et cet état est représenté par le point 1. Lorsque de la chaleur est appliquée, l'adsorbant est chauffé, ce qui entraîne la désorption d'une certaine quantité de réfrigérant de l'adsorbant. Ce processus provoque une augmentation de la pression de la pression de l'évaporateur à la pression du condenseur, sans modifier l'absorption de réfrigérant et ce processus se poursuit jusqu'à ce que la température de désorption minimale soit atteinte. Ce processus est appelé préchauffage. La fin de ce processus est représentée par le point d'état 2. Ce processus est similaire à la compression dans un système de réfrigération à compression de vapeur. L'adsorbeur continue à recevoir de la chaleur et le processus de désorption commence à partir du point 2 et le réfrigérant est condensé à une pression constante dans le condenseur. Le processus de désorption se poursuit jusqu'à ce que la température de l'adsorbant atteigne la température de désorption maximale disponible et que l'absorption de réfrigérant atteigne l'absorption minimale du cycle et la fin de ce processus est

représentée par le point d'état 3. Ce processus est similaire à la condensation dans un système de réfrigération à compression de vapeur.

- Refroidissement et dépressurisation (3-4)

Après ce processus, la chambre de désorption est refroidie et l'adsorbant est pré-refroidi et devient capable d'adsorber la vapeur de réfrigérant. Il en résulte une diminution de la pression du système, de la pression du condenseur à la pression de l'évaporateur, sans modifier l'absorption de réfrigérant dans l'adsorbant. Lorsque l'échangeur de chaleur de l'adsorbeur est davantage pré-refroidi, une partie du réfrigérant préalablement désorbé et condensé est adsorbée et la chaleur latente de vaporisation est extraite du réfrigérant liquide restant dans l'évaporateur. Cela entraîne une diminution de la température du réfrigérant du point d'état 3 au point d'état 4. Ce processus est similaire à l'expansion dans un système de réfrigération à compression de vapeur.

- Refroidissement, adsorption et évaporation (4-1)

L'adsorbeur continue à dégager de la chaleur tout en étant relié à l'évaporateur. La température de l'adsorbant continue de baisser, ce qui induit une adsorption de vapeur. Cette vapeur adsorbée est vaporisée dans l'évaporateur. La chaleur d'évaporation est fournie par la source de chaleur à basse température. Le processus d'adsorption, dans lequel l'effet de refroidissement est produit, commence à partir du point d'état 4 et continue en refroidissant davantage l'échangeur de chaleur adsorbeur-désorbeur jusqu'à ce que toute la quantité de réfrigérant soit évaporée lors du retrait de la charge de refroidissement de l'espace environnant (cabine du réfrigérateur) et adsorbée dans l'adsorbant. Cela équivaut à "l'évaporation" dans les cycles de compression. [5] [6] [7] [8]

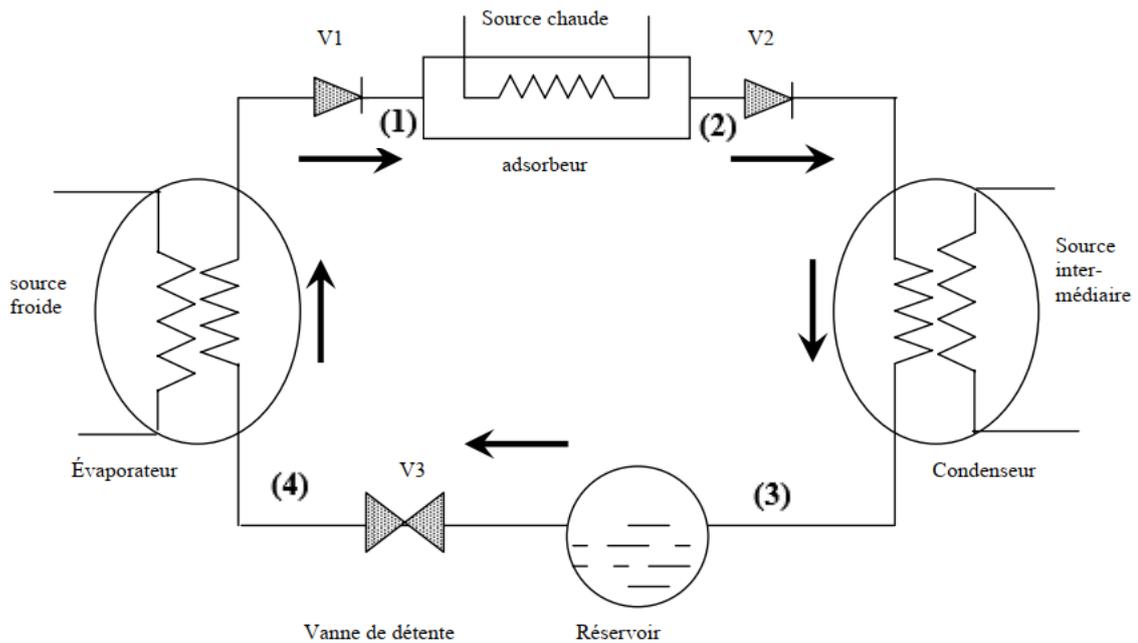


Figure 1.3 : Cycle à adsorption.

➤ **Système à Dessiccation :**

• **Définition :**

Les systèmes à dessiccation (DEC) sont des systèmes ouverts utilisant l'eau comme réfrigérant en contact direct avec l'air. Le terme « ouvert » signifie que le réfrigérant est évacué du système après qu'il a produit son effet refroidissant et qu'une nouvelle quantité de réfrigérant doit être injectée, le tout dans une boucle ouverte. Seule l'eau peut être utilisée comme réfrigérant puisqu'elle est en contact direct avec l'air ambiant.

La technique de climatisation par dessiccation/évaporation se base sur le principe que l'évaporation de vapeur d'eau dans l'air sec réduit sa température. Sous le climat, le taux d'humidité de l'air est généralement trop important et il faut d'abord déshumidifier l'air avant de le refroidir.

Le procédé de base est le suivant : l'air neuf provenant de l'extérieur, chaud et humide, traverse une roue à dessiccation où il est déshumidifié. Il est ensuite refroidi grâce à un échangeur thermique puis refroidi à nouveau grâce à un humidificateur qui permet d'ajuster le niveau d'humidité et de température souhaité avant d'être soufflé dans le local à refroidir.

En parallèle, l'air repris dans la pièce est humidifié pratiquement jusqu'au point de saturation pour bénéficier au maximum du potentiel de refroidissement dans l'échangeur

thermique avant de ressortir.

La technique de climatisation par dessiccation/évaporation utilise par conséquent un organe de dessiccation qui peut être soit une roue contenant un matériau déshydratant solide (gel de silice par exemple) soit un lit dessiccant liquide. Les matériaux dessiccants doivent ensuite être régénérés par chauffage (45 à 70°C) afin d'être disponible à nouveau, la chaleur solaire est utile à cette étape.

Les systèmes ouverts constituent actuellement une part relativement faible des installations existantes : de l'ordre de 10 à 15 %.

- **Principe de Fonctionnement :**

(1>2) L'air extérieur ou air pulsé (aussi appelé "air de procès") est aspiré au travers d'un filtre, puis traverse la "roue dessiccante" ou "roue à dessiccation". Cet échangeur rotatif contient un produit de sorption solide. Ce dernier absorbe la vapeur d'eau de l'air extérieur par adsorption. L'air extérieur est ainsi déshumidifié et en contrepartie, voit sa température augmenter.

(2>3) L'air extérieur est alors refroidi par échange de chaleur avec l'air intérieur extrait ou simplement l'air extrait (aussi appelé "air de régénération"). Cet échange se fait au travers d'un échangeur de chaleur rotatif (non hygroscopique).

(6>7) Pour augmenter l'échange de chaleur et donc le refroidissement de l'air pulsé, on rafraîchit au préalable l'air extrait en l'humidifiant jusqu'à saturation. On abaisse ainsi le plus possible sa température, et on bénéficie au maximum du potentiel de refroidissement dans l'échangeur.

(7>8) en passant au travers de l'échangeur de chaleur, l'air extrait se voit donc réchauffé.

(8>9) Pour pouvoir fonctionner en continu, la roue dessiccante doit être régénérée c'est-à-dire que l'humidité doit être évacuée du matériau adsorbant. Pour cela la portion de roue contenant l'humidité doit croiser le flux d'air extrait qui aura été préalablement réchauffé pour atteindre une température suffisante pour vaporiser les molécules d'eau retenues dans les pores de la roue.

(9>10) Enfin l'air chaud traverse et régénère la roue déssicante pour lui permettre de poursuivre le processus continu de déshumidification. Finalement, l'air rejeté, à l'aide d'un ventilateur, sort plus haute en température et plus chargé en humidité que l'air extérieur

(3>5) L'air pulsé peut encore être arrosé d'eau au travers d'un humidificateur. L'eau va absorber les calories restantes dans l'air avant que celui-ci soit propulsé dans le bâtiment à refroidir par un ventilateur. Cette alternative permet de refroidir l'air pulsé mais pas de le déshumidifier. Pour ce faire, il est alors nécessaire de remplacer cet humidificateur par une batterie froide.

(4>5): Ce système est dit réversible, car il peut aussi bien être utilisé en refroidissement qu'en chauffage. En hiver, cela correspond à un mode de fonctionnement normal de réchauffement par système centralisé à air, en utilisant la roue de sorption comme récupérateur de chaleur, tout en complément des apports de la chaleur solaire. La présence d'une batterie chaude permet ainsi la régulation de température de chauffe en hiver. [9] [10]

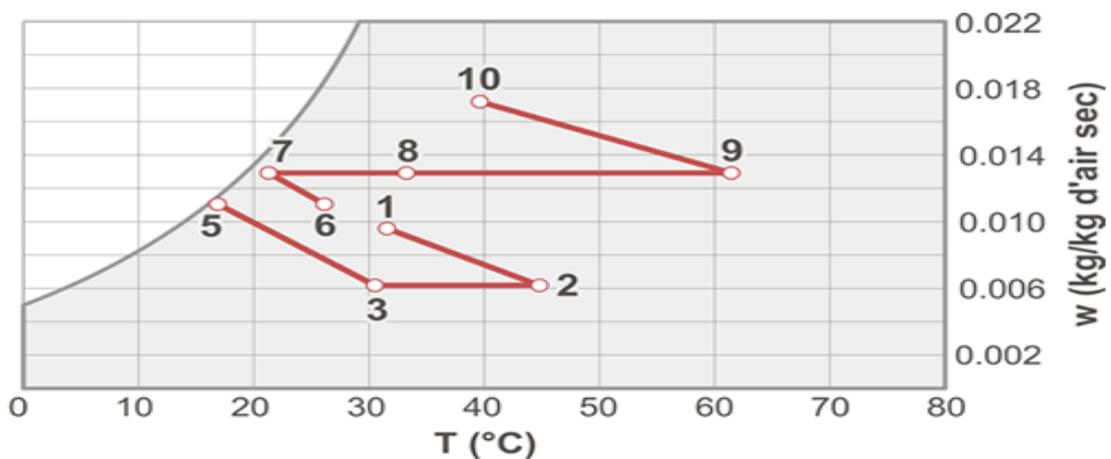


Figure 1.4 : Représentation de l'évolution de l'air dans un diagramme de l'air humide.

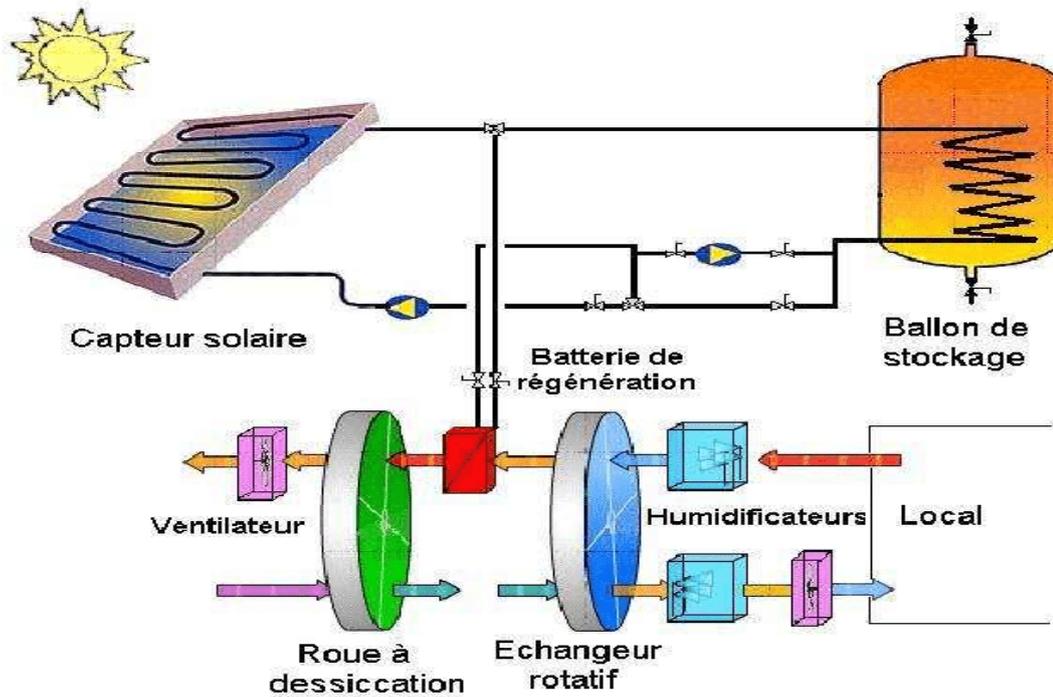


Figure 1.5 : Cycle à dessiccation.

I.2.2. Système de Compression à Vapeur:

➤ Définition :

Le cycle de réfrigération de compression à vapeur est le système de réfrigération le plus largement utilisé. Dans ce système, le fluide de travail est un vapeur. Il s'évapore et se condense facilement ou passe alternativement de la phase vapeur à la phase liquide sans quitter l'installation frigorifique (cycle fermé).

Lors de l'évaporation, il absorbe la chaleur du corps froid et cette chaleur est utilisée comme chaleur latente pour le convertir de liquide en vapeur, tandis que lors de la condensation ou du refroidissement, il rejette la chaleur vers les corps externes, créant ainsi un effet de refroidissement dans le fluide de travail.

➤ Principe de Fonctionnement :

Le système frigorifique de compression à vapeur le plus courant fonctionne grâce à un fluide frigorigène situé dans un circuit fermé comprenant un compresseur, un condenseur, un organe de détente, un évaporateur et des tuyauteries de raccordement (voir Figure 1.6).

La vapeur du fluide frigorigène comprimée à haute pression est condensée à la même pression dans le condenseur par transfert de chaleur (refroidissement dégageant

une puissance \dot{Q}_c) vers le milieu environnant. La pression du frigorigène à l'état liquide est réduite dans le détendeur. A basse pression, le frigorigène se vaporise, ce qui permet d'extraire la chaleur (puissance frigorifique \dot{Q}_f) de la substance à refroidir. Pour compléter le cycle, à la sortie de l'évaporateur, la vapeur du fluide frigorigène à basse pression est comprimée et portée à haute pression par le compresseur. La chaleur totale rejetée au niveau du condenseur correspond à la somme de la chaleur extraite à l'évaporateur et de l'énergie (\dot{W}_c) consommée par le compresseur.

Le cycle de fonctionnement d'un tel circuit se décompose en quatre étapes :

1-2 Le compresseur comprime le fluide frigorigène et élève donc sa pression et sa température.

2-3 En passant dans le condenseur, le fluide frigorigène réchauffé, cède une partie de ses calories au milieu chaud (dont la température est moins élevée) et se transforme au fur et à mesure en liquide.

3-4 Le détendeur fait baisser la pression et donc la température du fluide.

4-1 En passant dans l'évaporateur, et à cause de la basse pression, le fluide frigorigène change de phase en absorbant de l'énergie thermique du milieu à refroidir et en sort en état de saturation ou de surchauffe.

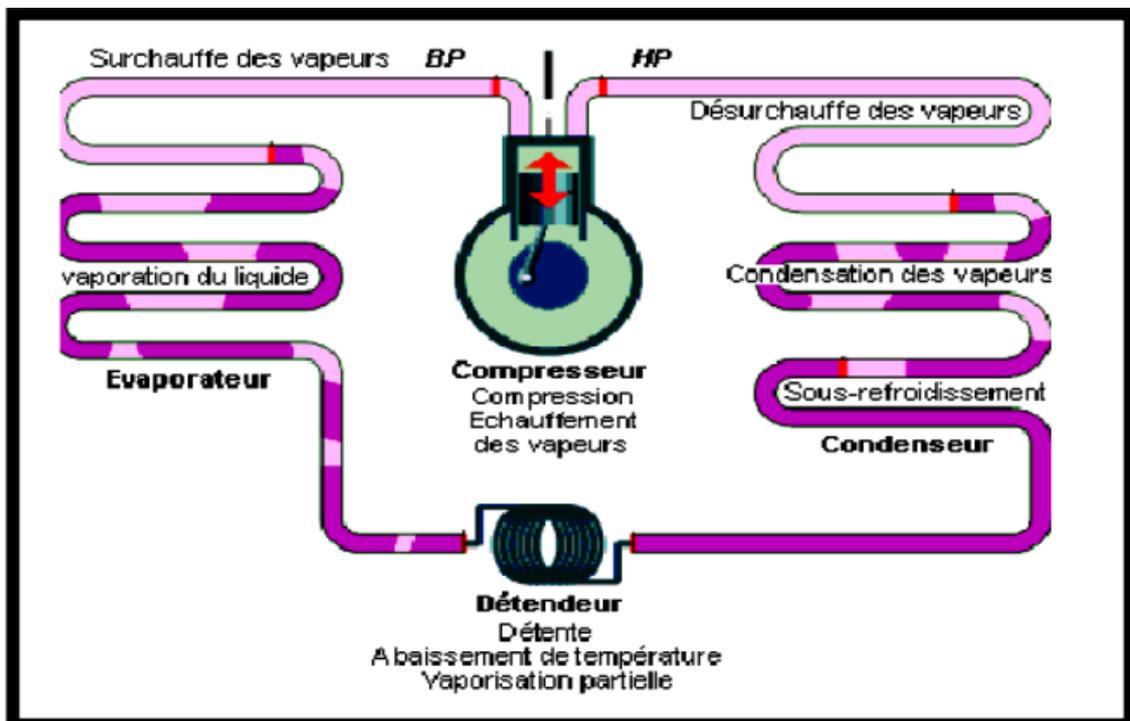


Figure 1.6 : Un schéma frigorifique montre le fonctionnement d'un cycle frigorifique classique.

➤ **Les Composants de Base d'une Machine Frigorifique de Compression à Vapeur :**

La machine frigorifique de compression à vapeur est composée de 4 organes principaux, à savoir, le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur.

- **Le Compresseur :**

Il aspire le fluide frigorigène gazeux (à bas niveau de température et de pression) issu de l'évaporateur, le comprime à un niveau plus haut de température et de pression puis le refoule vers le condenseur.

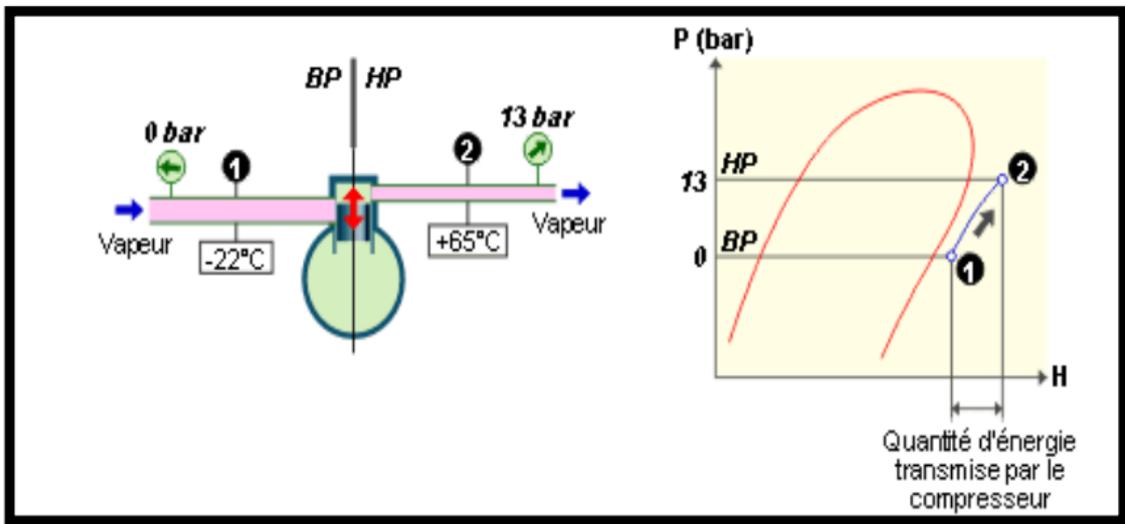


Figure 1.7 : Passage des vapeurs frigorigènes de la BP à la HP.

- **Le Condenseur :**

C'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 est obtenue par le refroidissement du fluide frigorigène par un médium qui peut être de l'eau ou de l'air.

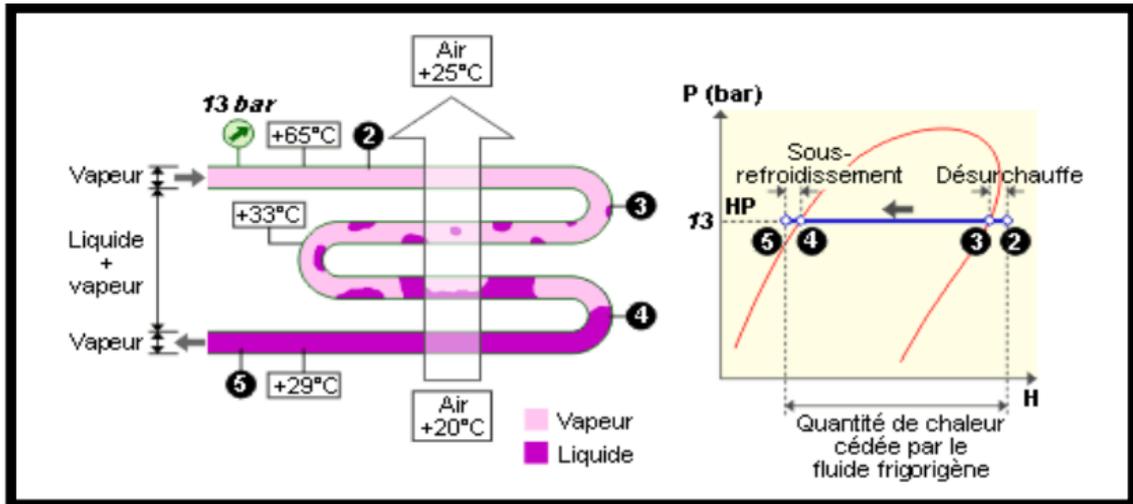


Figure 1.8 : Passage de fluide frigorigène dans un condenseur.

- **Le Détendeur :**

Il permet de réduire la pression du fluide frigorigène liquide (création de pertes de charge) issu du condenseur avant son introduction dans l'évaporateur. Il règle aussi la quantité de fluide frigorigène liquide arrivant à l'évaporateur en fonction des besoins de "froid" (uniquement pour les détendeurs thermostatiques).

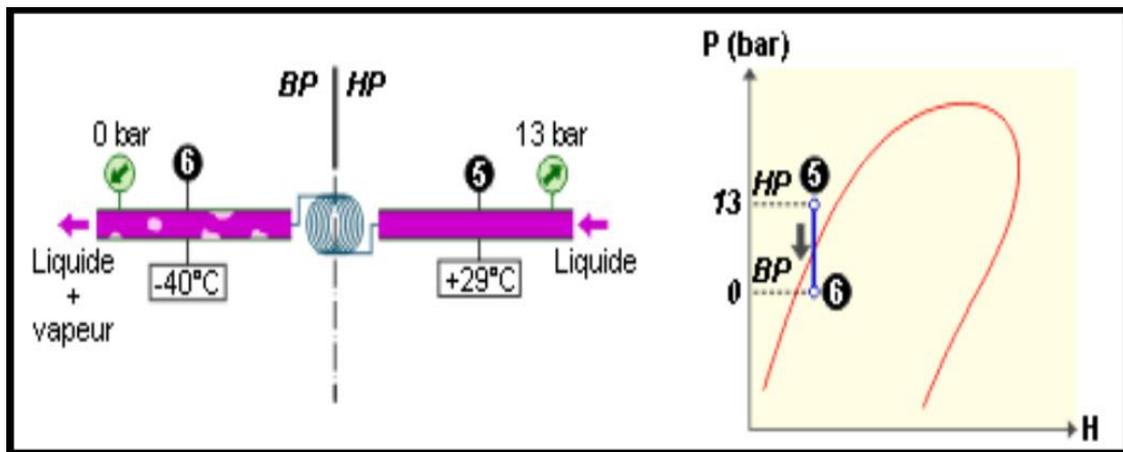


Figure 1.9 : Passage de fluide frigorigène de la HP vers la BP.

- **L'évaporateur :**

C'est un échangeur de chaleur qui va permettre l'absorption de la chaleur contenue dans le local ou de fluide de service qu'il cause l'évaporation de fluide frigorigène. Cette dernière étape (changement de phase) fait revenir le fluide frigorigène au point 1 (point d'aspiration) et début d'une autre tour de cycle.

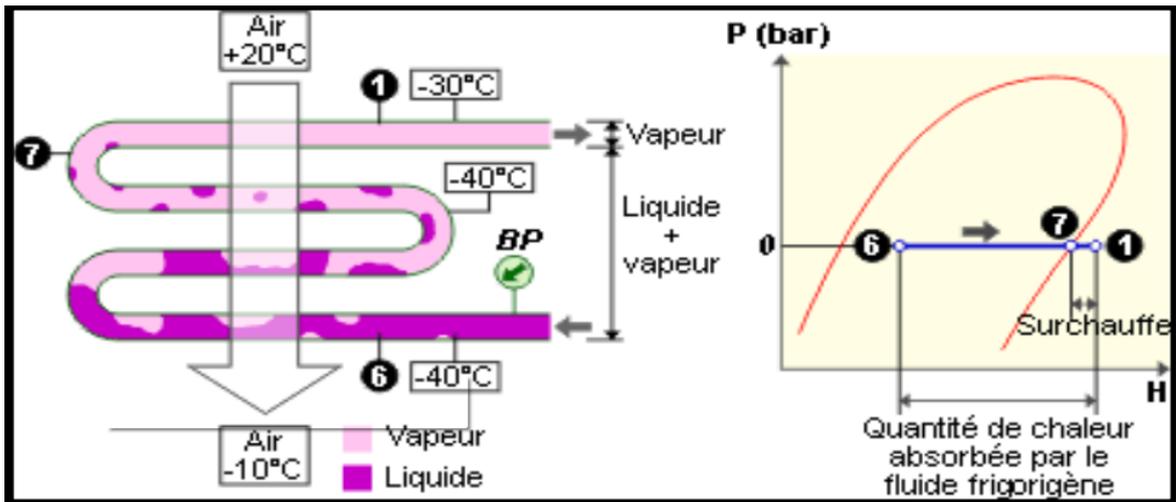


Figure 1.10 : Passage de fluide frigorigère dans un évaporateur.

I.2.2.1 Système de Compression à Vapeur Alimenté par Energie Renouvelable :

- **Définition :**

Le système photovoltaïque est l'une des méthodes d'exploitation d'énergie solaire, son principe est de convertir directement ces rayons en énergie électrique. Ainsi, l'électricité générée par les modules PV est en courant continu DC, ce qui signifie que soit ; on utiliserait un compresseur entraîné par un moteur à courant continu pour le cycle de compression à vapeur, ou on installerait un onduleur pour convertir le courant continu produit par les modules PV en courant alternatif pour alimenter le compresseur de vapeur.

Étant donné que le marché dispose normalement de compresseurs entraînés par moteur à courant alternatif, cette option a été envisagée pour le système à compression de vapeur. La puissance de crête totale du système de générateur photovoltaïque nécessaire pour alimenter la charge électrique du compresseur dépend du rayonnement solaire, de la température ambiante, de l'efficacité de l'onduleur et d'un facteur de sécurité pour compenser les diverses pertes du système dû à l'effet de la température. [11]

- **Principe de Fonctionnement :**

Les panneaux solaires absorbent l'énergie de rayonnement solaire et convertie cette dernière vers une énergie électrique de 12 volts ou parfois 24 volts de courant direct.

L'énergie électrique de courant direct est envoyée vers un onduleur qui la transforme vers un courant alternatif de tension 110 V ou 220 V qui est une tension similaire à celle des domiciles.

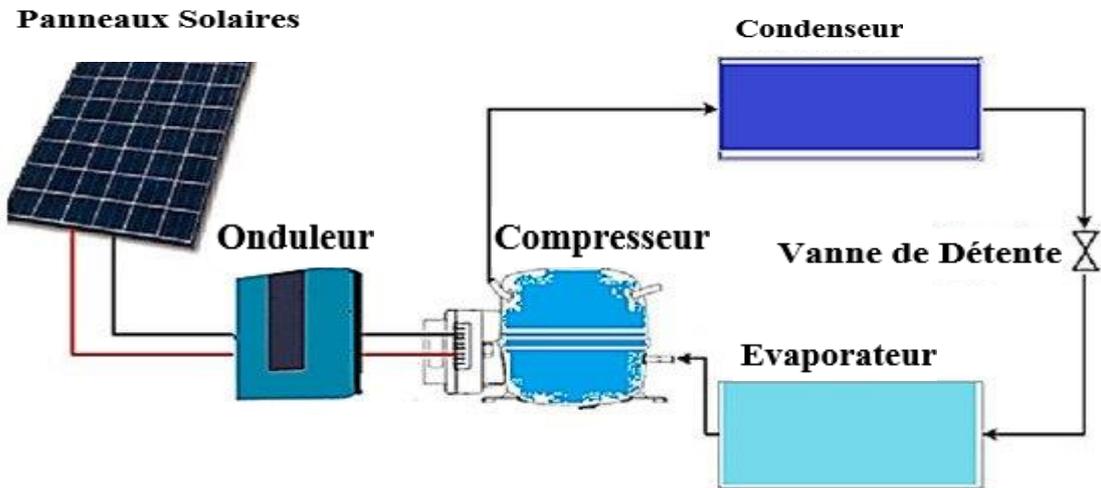


Figure 1.11 : Un schéma montre comment un système de photovoltaïque marche.

En résumé, ces systèmes sont similaires à ceux classique avec la seule différence de la source d'énergie électrique, à savoir, une énergie solaire PV.

I.3 Bilan Energétique :

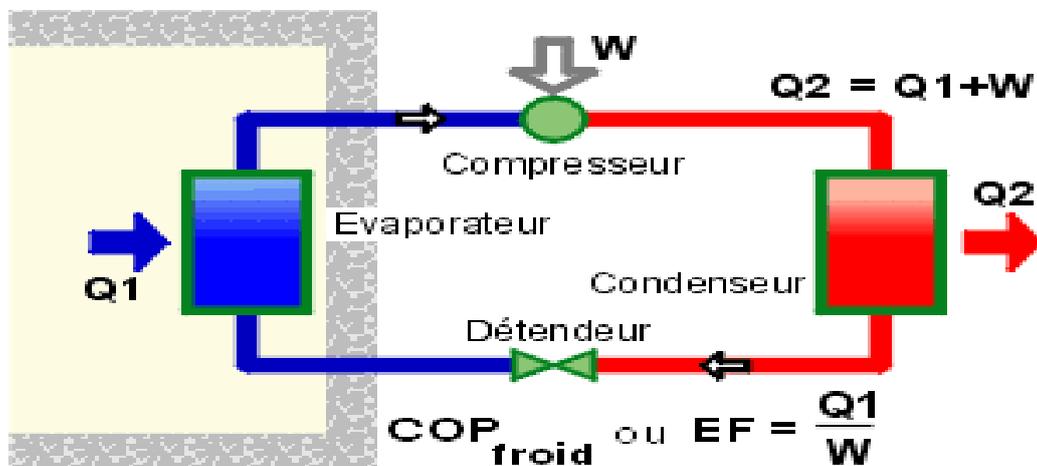
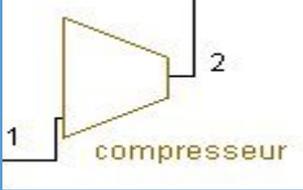
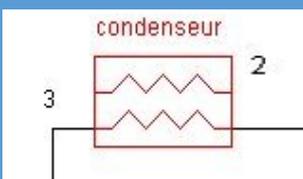
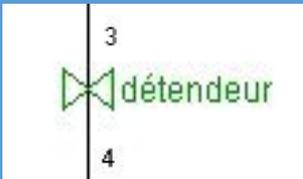
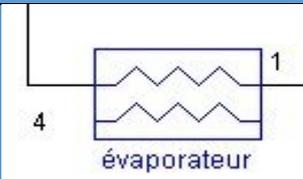


Figure 1.12 : Un schéma représente les chaleurs et les pressions dans le système.

En appliquant le premier principe de la thermodynamique sur l'ensemble des éléments du cycle, le bilan énergétique s'écrit par :

Tableau 1.1 : Bilan énergétique des composants du système de compression à vapeur.

Composants	Hypothèse	Conséquences	Bilan Energétique
	Adiabatique	$\dot{Q} = 0$ $S_1 = S_2$	$\dot{W}_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1)$ (1.1) $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$
	Isobare	$\dot{W} = 0$	$\dot{Q}_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3)$ (1.2) $\dot{m}_3 = \dot{m}_2$
	Isenthalpique	$\dot{Q} = 0$ $\dot{W} = 0$	$h_3 = h_4$ $\dot{m}_3 = \dot{m}_4$
	Isobare	$\dot{W} = 0$	$\dot{Q}_f = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4)$ (1.3) $\dot{m}_4 = \dot{m}_1$

Le coefficient de performance du cycle est exprimé par :

$$\text{COP froid} = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}_c} \quad (1.4)$$

$$\text{COP froid} = \text{COP chaud} - 1 \quad (1.5)$$

COP est le rapport entre la recette et dépense.

• Diagramme PH d'une Installation Frigorifique de Compression à Vapeur :

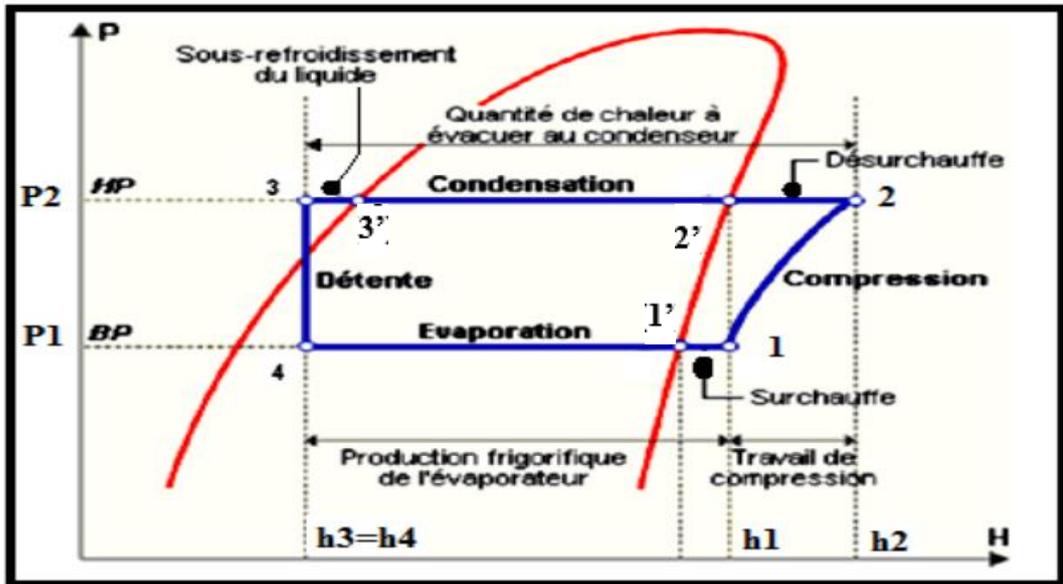


Figure 1.13 : Diagramme PH d'une installation frigorifique classique.

- (1) - Point BP entrée du compresseur (Etat du fluide : Vapeur Surchauffé BP).
- (2) - Point HP sortie du compresseur et entrée de condenseur (Etat du fluide : Vapeur Surchauffé HP).
- (2') - Point HP début de condensation (Etat du fluide : Vapeur Saturé HP).
- Zone de surchauffe de (1) vers (1') (Etat du fluide : Vapeur BP).

$$\Delta T \text{ surchauffe} = T_1 - T \text{ évaporation } (T_{1'}) \quad (1.6)$$

Zone de désurchauffe de (2) vers (2') (Etat du fluide : Vapeur HP).

$$\Delta T \text{ désurchauffe} = T_2 - T \text{ condensation } (T_{2'}) \quad (1.7)$$

Zone de condensation de (2') vers (3') (Etat du fluide : Passage de l'état vapeur saturé HP à l'état liquide saturé HP).

- (3') - Point fin de condensation (Etat du fluide : Liquide Saturé HP).

$$\Delta T \text{ sous - refroidi} = T \text{ condensation } (T_{2'}) - T_3 \quad (1.8)$$

- (3) - Point entrée détendeur (Etat du fluide : Liquide Sous-Refroidie HP).

- (4) - Point sortie détendeur (Etat du fluide : Mélange Liquide-Vapeur BP).

Zone d'évaporation de (4) vers (1') (Etat du fluide : Passage de Mélange Liquide-Vapeur BP à l'état vapeur saturé BP).

Conclusion :

Dans ce chapitre, un bref historique sur la naissance et l'utilisation du froid a été présentée ainsi les différents modes de production de froid, soit par systèmes classiques ou par nouvelles technologies, à savoir, à sorption ou classiques alimentés par des énergies renouvelables.

Les composants intervenants dans la construction de ces systèmes ont été définis.

Une modélisation suivant le premier principe de la thermodynamique a été élaborée afin de permettre le calcul des différentes puissances échangées par le cycle ainsi la détermination du coefficient de performance.

CHAPITRE 02 :

Présentation de la Station

Introduction :

Dans ce chapitre, on présentera la station frigorifique, les organes de cette station, leurs spécifications techniques ainsi que leurs principes de fonctionnement.

Les propriétés thermodynamiques et physiques du réfrigérant R717 ont été aussi décrites dans cette partie avec leurs critères de choix.

Une dernière partie dans ce chapitre est consacrée à l'étude des antigels (eau glycolée) utilisés dans la station.

II.1. L'Ammoniac (NH₃) :

II.1.1. Historique :

A l'antiquité, Les Romains appelaient les gisements de chlorure d'ammonium qu'ils collectaient près du temple de Jupiter Amon dans l'ancienne Libye « Sal Ammoniacus » (sel d'Amon) en raison de la proximité du temple voisin (aujourd'hui oasis Siwa en Egypte). C'est la plus ancienne source minérale connue d'ammoniac.

En Europe, avec l'essor de la pneumo-chimie à cuve à mercure, sa préparation et son isolement sont facilités par Joseph Priestley en 1774, par simple chauffage de sels d'ammonium avec de la chaux CaO (Oxyde de Calcium) ou du calcaire comme pierre à chaux avec une cuve à eau, on obtient par piégeage dans l'eau de la cuve, de l'ammoniaque ou eau ammoniaquée. [12]

Lors les années 1900, L'Europe a signalé une crise d'alimentation en fournitures naturelles car au diminution des sources de l'origine (Chile), La solution est rapidement venue par le scientifique allemand Fritz Haber, qui a découvert en 1909 que la réaction chimique de l'azote et de l'hydrogène produit de l'ammoniac (la synthèse de l'ammoniac catalytique) en laboratoire, le principal composant des engrais à base d'azote, mais la quantité d'ammoniac formée en un seul passage du gaz de synthèse sur le catalyseur est beaucoup trop faible pour présenter un intérêt pour une production économique.

Après 5 ans et à base des recherches de Fritz Haber, une équipe de recherche de la société **BASF** (Badische Anilin & Soda-Fabrik) dirigée par Carl Bosch a met au point la première application industrielle de cette procédé, avec une capacité de 30 tonnes par jour d'ammoniac. Cette procédé reste utiliser jusqu'à nos jours. [13] [14]

II.1.2. Caractéristiques Physico-Chimiques :

L'ammoniac est décrit comme un corps pur inorganique, de formule chimique NH_3 , incolore, d'odeur piquante.

- Température critique : $132,35^\circ\text{C}$.
- Pression critique : 113 bar.
- Température d'ébullition sous la pression atmosphérique : $-33,5^\circ\text{C}$.
- Masse volumique de la vapeur inférieure à la masse volumique de l'air : $0,86 \text{ kg/m}^3$ à $-33,5^\circ\text{C}$ et $0,73 \text{ kg/m}^3$ à 15°C .
- Solubilité dans l'eau : très soluble.
- Température d'auto-combustion : 630°C .
- Potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone : $\text{ODP} = 0$.
- Potentiel d'effet de serre global à 100 ans : $\text{GWP}_{100} = 0$.
- Fluide inflammable et explosif.
- Limites d'inflammabilité dans l'air à 20°C et 101kPa :
 - Inférieure : 15% en volume de gaz combustible.
 - Supérieure : 28% en volume de gaz combustible.
- Chaleur Spécifique à pression constant (1 bar), à volume constant et Coefficient des gaz parfait : $C_p = 2,2 \text{ KJ/Kg.}^\circ\text{K}$; $C_v = 1,6 \text{ KJ/Kg.}^\circ\text{K}$; $\gamma = 1,375$. [15] [16] [50]

II.1.3. Toxicologie et Précautions :

➤ Toxicologie :

Produit toxique par inhalation peut causer une irritation de la gorge et des voies respiratoire (effet à partir de 250 ppm), toux, larmoiements, maux de tête, nausées, vomissements, risques d'œdème et d'arrêt respiratoire. Les effets de contact avec la peau sont : corrosif, provoque de graves brûlures oculaires.

Groupe de sécurité : B2 (B : Toxique, 2 : Inflammable). [16] [17] [18]

➤ Précautions Individuelles :

La procédure de protection est comme suivie :

- Le système respiratoire : appareil de protection respiratoire d'un autonome isolant.
- La peau : gants de protection étanches pour les mains, lunettes de sécurité pour les yeux, vêtements imperméable pour le reste de corps. [16] [17] [18]

La manipulation et stockage de produit est :

- Eviter le contact avec les flammes et les surfaces chaudes (tenir à l'écart de la chaleur et défense de fumer).
- Eviter le contact direct avec le produit.
- Stocker dans un endroit frais, ventilé et à l'abri du rayonnement solaire direct.
- Matières incompatibles : les halogènes, les matières oxydantes, les acides, certains métaux (par exemple le cuivre). En présence d'humidité, l'ammoniac corrode le cuivre, le zinc, et de nombreux alliages. Danger d'explosion en contact avec l'or, argent et le mercure.
- Matériaux d'emballage : acier ordinaire.
- Détection des fuites : papier révélateur d'ammoniac (papier phénol), gaz soufré en bombe aérosol, baguette de soufre, détecteur électronique fixe en alarme (obligatoire en salle des machines). [16]

➤ **Précautions à la Mise en Service :**

Propreté poussée lors du montage, effectuer un tirage au vide poussé, éviter le contact avec les flammes et les surfaces métalliques porté au rouge, réaliser l'installation en acier. [16] [17]

II.1.4. Domaines D'application :

Les principaux domaines d'utilisation sont les systèmes à absorption, les machines industrielles à compression mécanique, les refroidisseurs de liquide. Il peut intervenir dans la fabrication de plastiques, tissus, pesticides et dans la préparation des boissons.

Le NH_3 est aussi le produit de base dans la synthèse de l'acide nitrique dans la fabrication d'explosifs, comme le TNT. [16]

II.1.5. Avantages de R717 comme Réfrigérant :

➤ **Efficacité Energétique**

L'ammoniac est l'un des réfrigérants les plus efficaces pour les basses températures. Étant donné l'importance croissante accordée à la consommation d'énergie, les systèmes à l'ammoniac constituent un choix sûr et durable pour l'avenir. Un système à l'ammoniac noyé est normalement 15 à 20 % plus efficace qu'un système marche avec R404A. Les innovations récentes dans la combinaison NH_3 et CO_2 ont contribué à

augmenter encore davantage cette efficacité. Le NH_3/CO_2 en cascade est extrêmement efficace pour les applications à basse et très basse température (moins de $-40\text{ }^\circ\text{C}$), tandis que les systèmes de saumure NH_3/CO_2 sont environ 20 % plus efficaces que les saumures traditionnelles. [16] [53]

➤ **Environnement**

L'ammoniac est le réfrigérant le plus respectueux de l'environnement. Il appartient au groupe des réfrigérants dits « naturels » et présente un potentiel de réchauffement global (PRG) et un potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone (PACO) tous deux nuls.

➤ **Tailles de tuyau plus petites**

Quelle que soit la phase, vapeur ou liquide, l'ammoniac nécessite des diamètres de tuyau plus petits que la plupart des réfrigérants chimiques.

➤ **Meilleur transfert de chaleur**

L'ammoniac possède de meilleures propriétés de transfert de chaleur que la plupart des réfrigérants chimiques, ce qui permet l'utilisation d'appareils dotés d'une surface de transfert de chaleur moins étendue, et donc de réduire les coûts de construction de l'installation. Ces propriétés profitant également à l'efficacité thermodynamique du système, l'ammoniac permet aussi de réduire ses frais d'exploitation.

➤ **Prix du réfrigérant**

Dans de nombreux pays, le coût de l'ammoniac (au kg) est bien moins élevé que le coût des HFC. Un avantage d'autant plus bénéfique que l'ammoniac présente une densité plus faible en phase liquide. Par ailleurs, toute fuite d'ammoniac se détecte très rapidement en raison de son odeur, ce qui réduit ainsi tout risque de perte de réfrigérant.

II.1.6. Inconvénients de R717 :

➤ **Cuivre**

Il n'est pas compatible avec le cuivre, il ne peut donc pas être utilisé dans un système avec des tuyaux en cuivre.

➤ **Toxique**

L'ammoniac est toxique à haute concentration. Cependant, deux facteurs atténuent ce risque : l'odeur caractéristique de l'ammoniac est détectable à des concentrations bien inférieures à celles considérées comme dangereuses, et l'ammoniac est plus léger que l'air. Par conséquent, en cas de fuite, il s'élèvera et se dissipera dans l'atmosphère.

➤ **Corrosive**

L'ammoniac classé avec les produits de grand nombre de PH (environ 13), donc il peut être danger pour la peau de l'être humaine.

➤ **Fatale**

Le R717 est un gaz considéré mortelle car l'exposition à des fortes concentrations peut entraîner : irritation de la peau, dommages à la cornée, toux, douleurs à la poitrine, difficultés respiratoires.

Dans les cas graves, les symptômes peuvent évoluer vers : œdème pulmonaire (accumulation de liquide dans les poumons), mort par suffocation.

➤ **Explosive**

Lors une fuite et avec une simple étincelle, la quantité de gaz va éclater comme une bombe et parfois peut causer des graves endommagements si la quantité est énorme.
[16] [19] [20] [53]

II.2. Compresseur à Vis :

II.2.1. Définition :

Le compresseur à vis est une machine rotative dans laquelle la variation du volume occupé par le fluide et son transfert sont obtenus par le déplacement relatif de deux mobiles en rotation continue à l'intérieur d'un « cylindre » de forme appropriée. Les deux mobiles ou rotors ont des profils conjugués, l'un formant des lobes (rotor mâle) l'autre formant des alvéoles (rotor femelle). Ces profils sont décalés le long de l'axe de la machine suivant une hélice à pas (constant ou variable), d'où le nom de la machine.

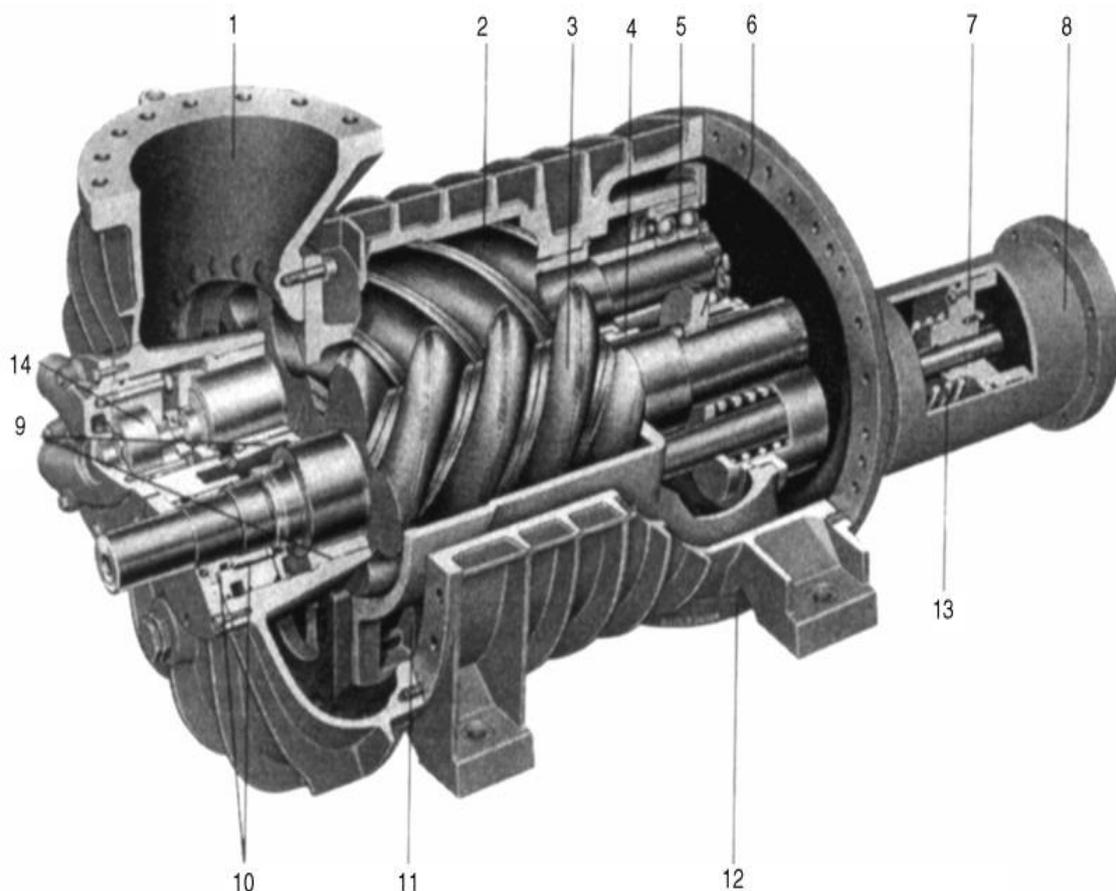
Le cylindre ou stator a une section formée de deux cercles sécants. Il entoure étroitement les deux rotors avec un jeu très faible tant sur la périphérie que sur les fonds. Aux deux extrémités du stator, sont aménagées deux lumières de sections différentes :

aspiration et refoulement du gaz. Les rotors peuvent être réalisés avec des nombres de lobes et d'alvéoles variables.

Les combinaisons couramment utilisées sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 2.1 : Combinaisons nombre de lobes/nombre d'alvéoles utilisés. [21]

	Rotor mâle Nombre de lobes	Rotor femelle Nombre d'alvéoles
Basse pression	3	4
Moyenne pression	4	6 (disposition courante à l'origine)
	5	7 (plus fréquent)
Haute pression	6	8



1 : aspiration. 2 : rotor secondaire femelle.
 3 : rotor primaire mâle. 4 : palier lisse. 5 : roulement axial. 6 : piston d'équilibrage.
 7 : piston de commande pour tiroir de régulation. 8 : cylindre de régulation. 9 : paliers lisses.
 10 : garniture d'étanchéité. 11 : retour des gaz en régulation de capacité. 12 : refoulement.
 13 : ressort de rappel. 14 : pompe à huile.

Figure 2.1 : Une coupe d'un compresseur à vis birotor et ses composants intérieurs.

II.2.2. Fiche Technique du Compresseur à Vis :

Marque : York. **Diamètre de Rotor :** 193 mm.
Famille : RWB II. **Longueur de Rotor :** S (small = petit).
Référence : TDSH 193 S. **Température d'entrée Min :** -60°C.
Puissance Absorbé Max : 175 KW. **Température d'entrée Max :** 93,3°C.
Capacité Thermique Max : 749 KW. **Température de sortie Max :** 121,1°C.
Fluides Compatibles : R717, R507. **Pression d'aspiration Max :** 10,3 Bar.
Vitesse de Rotation Max : 4500 Tr/Min. **Rapport des Volumes :** entre 5 et 2.2.
Vitesse de Rotation Min : 600 Tr/Min. **Capacité :** varie entre 10% jusqu'à 100%. [22]

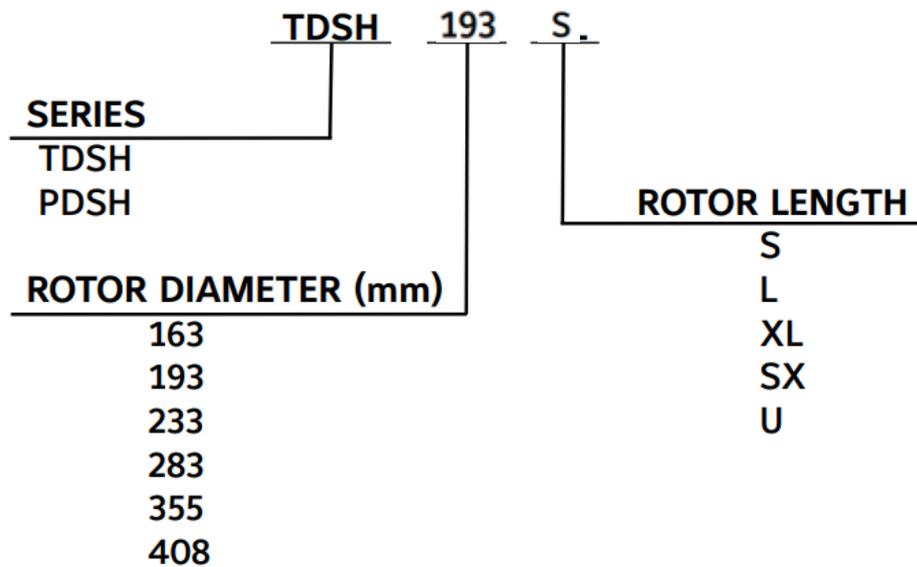


Figure 2.2 : La référence de compresseur à vis.

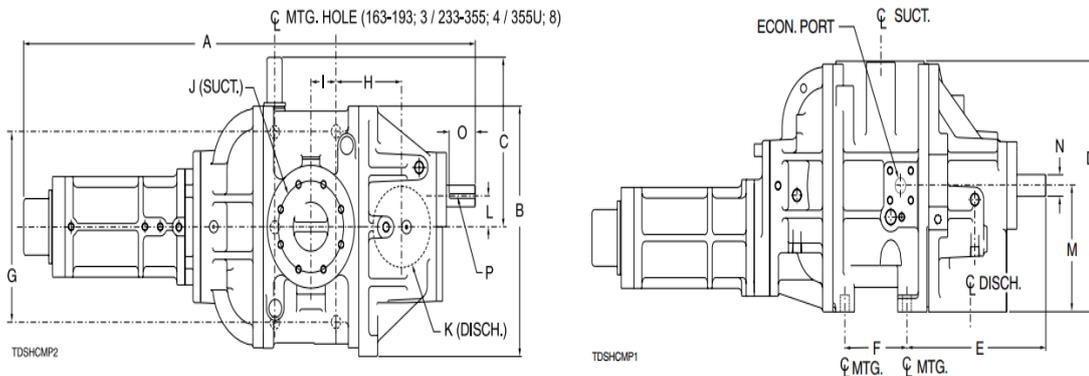


Figure 2.3 : Vues de dessus et de coté du compresseur à vis.[23]

II.2.3. Principe de Fonctionnement :

Le principe de compression est réalisé à partir de 2 vis usinées avec une extrême précision. Le rotor mâle comporte des lobes et le rotor femelle des alvéoles. Le positionnement radial et axial de ces rotors est assuré aux extrémités par des paliers à roulement. Le processus de compression s'effectue en flux continu.

Ces compresseurs sont du type « à piston rotatif » : l'effet piston est obtenu par l'engrenage de deux rotors à l'intérieur d'un carter. Le nom « compresseur à vis » provient de la forme hélicoïdale des rotors. La rotation des deux rotors emprisonne à l'intérieur du carter un volume de gaz qui est transporté d'un bout à l'autre des vis de façon continue et sans à coup. La compression est obtenue sans dispositif d'obturation. L'espace clos dans lequel évolue le fluide est appelé entredent. Pour éviter le retour du fluide à l'arrêt, les compresseurs à vis sont munis de clapets anti-retour. L'entraînement se fait par l'intermédiaire d'un moteur asynchrone triphasé incorporé dans le carter. [24]

Le cycle de fonctionnement est : aspiration, compression et refoulement comme suivie :

- **Aspiration :**

Le gaz est aspiré à travers les espaces inter-lobaires. En fin de remplissage de ces espaces, l'admission est fermée et la phase d'admission se termine avec une quantité de gaz enfermée dans le compresseur. [24]



Figure 2.4 : Phase d'aspiration des gaz dans un compresseur à vis.

- **Compression :**

La rotation continue, les espaces entre les lobes se réduit et le volume de gaz emmagasiné diminue, d'où une augmentation de la pression. [24]



Figure 2.5 : Phase de compression des gaz dans un compresseur à vis.

- **Refoulement :**

A une certaine position des rotors, le gaz comprimé atteint l'orifice de sortie et la phase de refoulement commence. Elle continue jusqu'à la complète évacuation des gaz.

[24]



Figure 2.6 : Phase de refoulement des gaz dans un compresseur à vis.

II.2.4. Variation de Puissance :

La variation de puissance représente de nombreux avantages et permet également de réaliser des économies d'exploitation non négligeables.

Les installations frigorifiques sont dimensionnées pour la charge thermique maximale. Leur fonctionnement est donc optimisé pour cette pleine charge, cela correspond à la puissance nominale. Le fonctionnement à ce régime nominal est exceptionnel. [25]

Les besoins frigorifiques sont variables dans le temps et dans la majorité des applications, les temps de fonctionnement à puissance réduite constituent l'essentiel des fonctionnements. [25]

Cette logique de dimensionnement implique que, la plupart du temps, les systèmes frigorifiques fonctionnent réellement à charge thermique réduite et donc hors du fonctionnement nominal pour lequel ils ont été optimisés.

Or tous les composants ont leur rendement maximum à la puissance nominale. Les systèmes de régulation des installations frigorifiques ont ainsi un impact essentiel sur les consommations d'énergie.

Le principe du tiroir de réduction de puissance est basé sur le contrôle du débit en jouant sur la longueur effective du rotor. Cette méthode repose sur la présence d'un tiroir, qui coulisse axialement à l'intersection des deux rotors. Ce tiroir permet ainsi de créer un passage de recirculation plus ou moins important vers l'aspiration d'une partie des gaz. Lorsque le tiroir est ouvert, la longueur effective de la cavité de compression est réduite, tout comme le volume aspiré. Le gaz en cours de compression est partiellement bipsé vers la chambre d'aspiration de façon à ce que le volume effectivement comprimé soit plus faible.

Les surfaces du tiroir de capacité sont parfaitement usinées pour épouser exactement la périphérie des rotors et ainsi minimiser les fuites.

La variation de capacité P_i et la variation du volume V_i sont toutes les deux assurées au moyen de pistons. Ces pistons sont commandés hydrauliquement par la pression d'huile et déplacent le tiroir selon le mécanisme illustré en figure 2.7. Lorsque le tiroir de capacité est poussé complètement vers le côté aspiration, tout l'espace de travail entre les profils est utilisé : le compresseur est rempli de gaz aspirés. La puissance est alors maximum, ce qui correspond au schéma de gauche de la figure 2.7. Lorsque le tiroir se déplace vers le côté refoulement, la quantité des gaz aspirés diminue et celle des gaz bipsés augmente. La puissance frigorifique décroît, ce cas est illustré sur le schéma de droite de la figure 2.7.

- Lorsque la puissance fournie correspond à la demande, toutes les électrovannes sont fermées et le tiroir reste dans sa position.

- Lorsque la vanne **X** est ouverte, la pression d'huile augmente dans la chambre de pression, ce qui déplace le tiroir vers l'aspiration : la puissance frigorifique **augmente**.
- L'ouverture des vannes **Yn** provoquent l'effet inverse : la pression d'huile qui agit sur le piston diminue. Le tiroir est, cette fois-ci, poussé vers le refoulement : la puissance frigorifique **diminue**. [25]

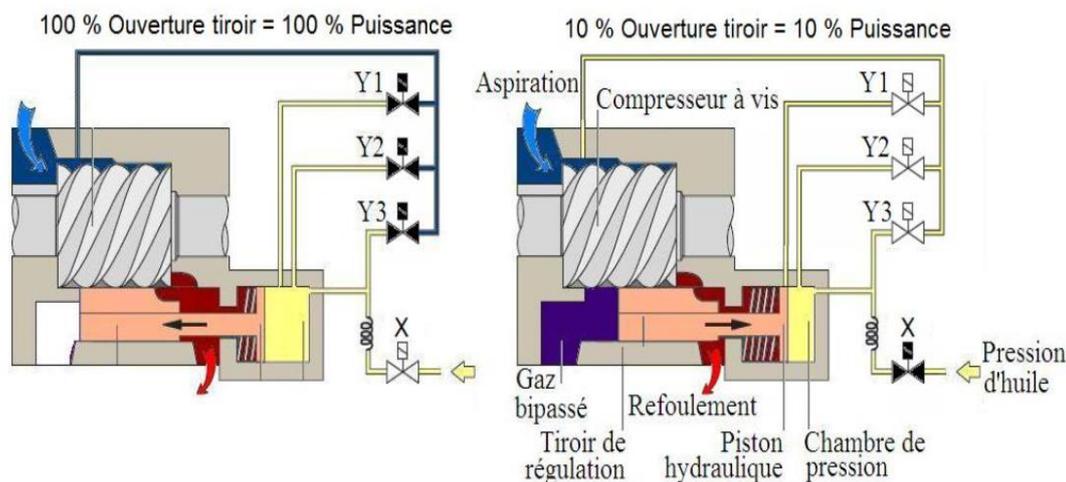


Figure 2.7 : Visualisation du mouvement du tiroir de capacité par commande hydraulique.

II.2.5. Variation de Volume :

Le rapport de volume, noté V_i , est une caractéristique inhérente au compresseur : cette caractéristique affecte directement sur les performances du compresseur. On connaît également V_i sous l'appellation de ('volume ratio' en anglais). On définit ce coefficient comme étant le rapport entre le volume aspiré V_1 et le volume refoulé V_2 .

$$V_i = \frac{V_1}{V_2} = \text{Volume au début de la compression} / \text{Volume à la fin de la compression} \quad (2.1)$$

Ce taux de volume détermine le taux de pression τ_i . Le taux de pression est le rapport entre la pression P_2 du volume refoulé V_2 et la pression P_1 du volume aspiré. Ce rapport est positif étant donné que P_2 représente la pression de refoulement, la pression maximum et P_1 la pression d'aspiration, la pression minimum.

$$\tau_i = \frac{P_2}{P_1} = \text{Pression du volume refoulé} / \text{Pression du volume aspiré.} \quad (2.2)$$

Le V_i est donc une caractéristique fondamentale du compresseur à vis qu'il faut adapter au régime de fonctionnement du système frigorifique. Concrètement, ce

coefficient V_i est déterminé par la taille et la forme de l'orifice de compression. Un compresseur peut être à V_i fixe ou à V_i variable :

- Pour un compresseur à V_i fixe équipé d'un tiroir de régulation de capacité, le V_i est donné pour la longueur du tiroir de capacité.
- Pour un compresseur à V_i variable, un second tiroir, appelé tiroir de V_i , est situé derrière le tiroir de capacité. Ce tiroir de V_i permet de créer un volume qui limite la course du tiroir de capacité réglant ainsi la section de l'orifice de refoulement.

Le principal inconvénient des machines à V_i constant est qu'elles ne peuvent s'adapter à des régimes de pressions variables et ainsi voient leur rendement se détériorer en dehors du point d'adaptation. Comme on le voit sur la figure 2.8, le rendement d'un compresseur à V_i fixe n'est optimisé que pour une unique valeur de V_i et diminue lorsque le rapport de compression évolue, alors que le fonctionnement en V_i variable permet à la machine de s'adapter aux variations de régimes de pressions et ainsi d'avoir un rendement toujours optimisé et ce pour n'importe quelle valeur de rapport de compression. [25]

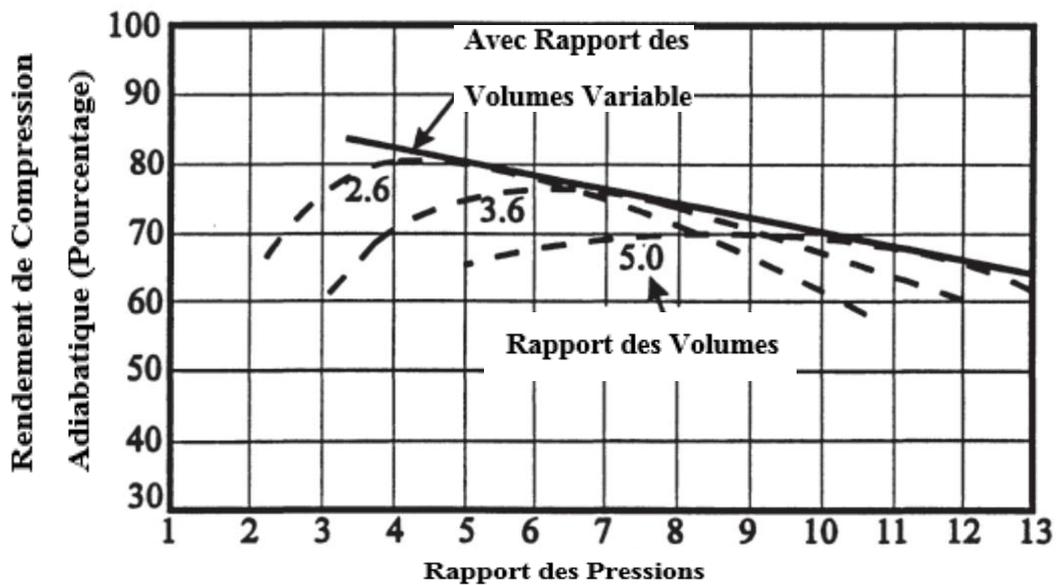


Figure 2.8 : Variation du rendement du compresseur en fonction du rapport de compression. [26]

Le tiroir de variation de V_i et le tiroir de régulation de capacité sont mécaniquement indépendants. Ils sont chacun contrôlés par un piston. Ces pistons sont déplacés, au moyen d'électrovannes qui agissent sur la pression d'huile en les maintenant dans la position désirée.



Figure 2.9 : Une vue réelle d'un compresseur à vis avec son moteur électrique et son séparateur d'huile.

II.2.6. Circuit D'huile :

Comme nous l'avons vu déjà, le rotor libre est entraîné par le rotor couplé au moteur, il y a donc un contact permanent entre les rotors pendant leur fonctionnement. Ceci met en évidence la nécessité de lubrifier les parties en contact afin de préserver les rotors d'une usure rapide. La lubrification des rotors est assurée par une injection d'huile permanente qui va ainsi former un film entre les deux rotors. Cette injection d'huile permet non seulement de lubrifier les rotors et d'assurer leur étanchéité, mais elle assure également la lubrification et le refroidissement des paliers et de la transmission.

La quantité d'huile injectée nécessaire est importante à cause des contraintes appliquées aux rotors. En effet, pour un compresseur à vis, le débit massique d'huile peut être jusqu'à trois fois plus important que celui du fluide frigorigène. Cette quantité d'huile traverse le compresseur et se mélange aux vapeurs de fluide frigorigène. Cette huile a pour effet de stagner au bas des tubes et de diminuer la puissance frigorifique et calorifique des échangeurs. C'est pourquoi il faut empêcher l'huile de se propager vers les échangeurs en la séparant du réfrigérant.

Le séparateur d'huile, monté sur le refoulement du compresseur, assure cette fonction de séparation en plus de celle de réservoir d'huile et celle d'injection permanente.

Le séparateur d'huile utilise les deux effets suivants pour séparer l'huile du réfrigérant :

- **Effet de choc** : le mélange gaz-huile est projeté sur une paroi perpendiculaire (chicane) au jet, ainsi les particules les plus lourdes d'huile sont séparées.

- **Effet cyclonique** : il permet de propulser les particules d'huile sur la paroi grâce à son effet de centrifugation.

En sortie du séparateur, l'huile est réinjectée dans le compresseur soit par une pompe à engrenage entraînée par le compresseur ou indépendante, soit par différence de pression entre la pression d'aspiration et la pression de refoulement. Cette huile sera refroidie par une injection de l'ammoniac liquide vient de la bouteille accumulatrice HP de 12-13 bar et à travers un filtre et un détendeur thermostatique sa pression diminuera et devient de 3-4 bar et de basse température. [25]

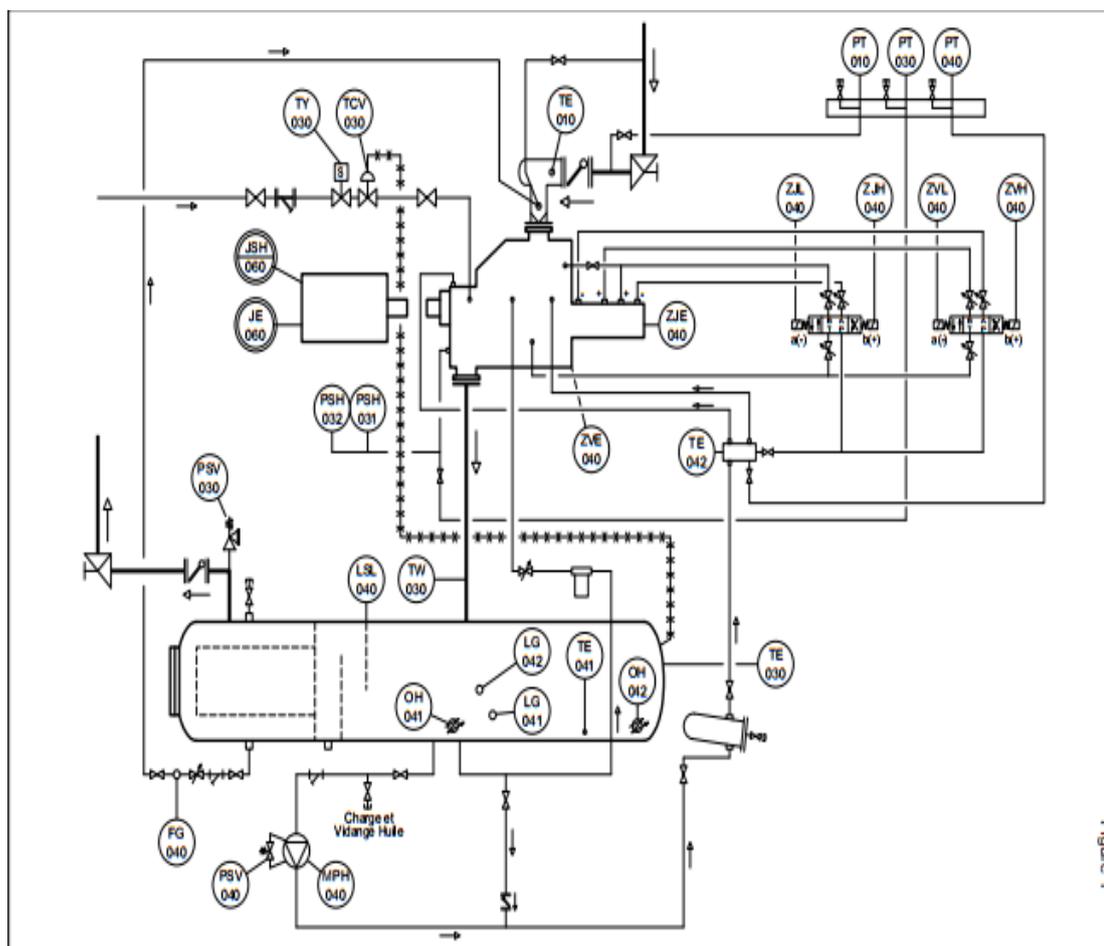


Figure 2.10 : Un schéma de circuit d'huile de compresseur à vis. [23]

II.3. Condenseur Évaporatif :

II.3.1. Définition :

Un condenseur évaporatif ou condenseur à évaporation forcée est un dispositif qui convertit le réfrigérant contenu dans un circuit fermé d'une vapeur chauffée à une forme liquide refroidie par l'évaporation de l'eau pulvérisée sur la surface extérieure du tube de réfrigérant. Il s'agit essentiellement d'un hybride entre un condenseur refroidi par air et un condenseur refroidi par eau qui utilise les principes de rejet de chaleur pour suivre un processus d'évaporation. [27]



Figure 2.11 : Une vue de face réelle d'un condenseur évaporatif.



Figure 2.12 : Une vue de côté réelle d'un condenseur évaporatif.

II.3.2. Fiche Technique de Condenseur Evaporatif:

Tableau 2.2 : Les spécifications de condenseur évaporatif. [28] [29]

Marque	Baltimore Aircoil (BAC).
Série	V.
Référence	VXC-S403.
Puissance Absorbé par le Moteur	18,5 KW.
Puissance Absorbé par la Pompe	4 KW.
Capacité Thermique Max	1737KW
Nombre des Ventilateurs	Trois Ventilateur de type centrifuge.
Réfrigérant Compatible	R717 (NH ₃).
Débit d'air	131760 m ³ /h ou 36,6 m ³ /s.
Débit d'eau	25.2 l/s ou 0,03 m ³ /s
Charge de R717	196 Kg.
Pression Max	32 Bar.
Température	-30°C/+120°C.

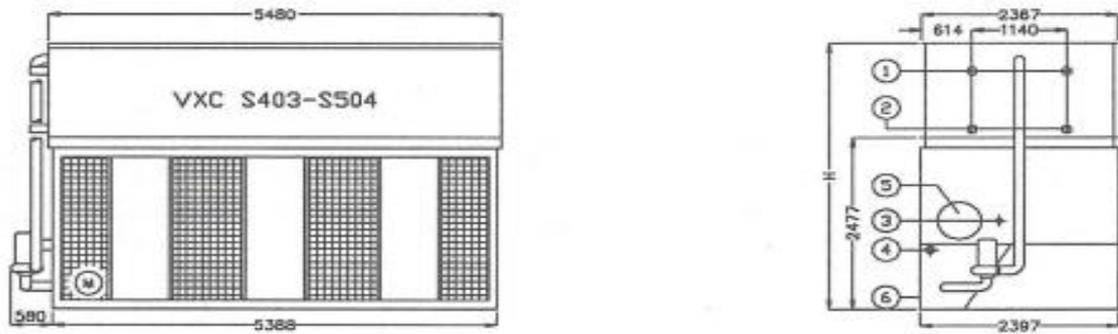


Figure 2.13 : Un dessin technique d'un condenseur évaporatif.

• **Composition :**

Le condenseur évaporatif est composé de plusieurs éléments qui sont cités ci-dessous :

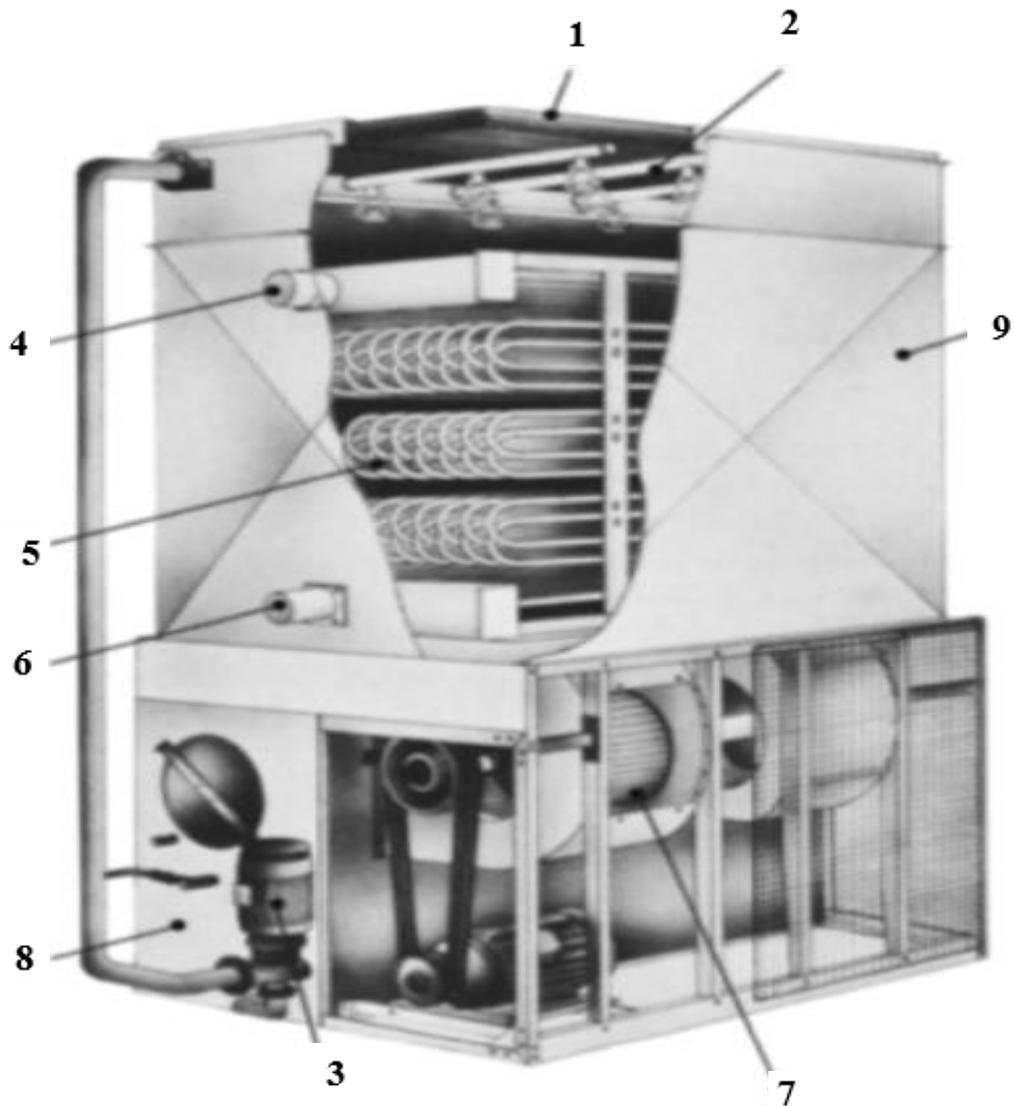


Figure 2.14 : Composition d'un condenseur évaporatif. [1]

1 : Séparateur de gouttes (chicane ou éliminateurs).

2 : Dispositif de pulvérisation.

3 : Pompe de circulation d'eau.

4 : Entrée des gaz.

5 : Faisceau de condensation.

6 : Sortie liquide condensé.

7 : Ventilateur.

8 : Bassin de réception de l'eau d'arrosage.

9 : Enveloppe extérieure.

II.3.3. Principe de Fonctionnement :

Les condenseurs évaporatifs utilisent à la fois l'air et l'eau comme fluides de condensation pour condenser le réfrigérant à vapeur chaude et le convertir en réfrigérant liquide. En bref, il s'agit d'un type de refroidissement indirect, où la chaleur du réfrigérant à vapeur est prise par l'eau et ce dernier est refroidie à l'air.

Ces condenseurs remplissent les fonctions combinées d'un condenseur refroidi à l'eau et d'une tour de refroidissement. L'eau est pompée d'un réservoir vers un collecteur de pulvérisation (avec des buses) et elle est pulvérisée à travers des buses sur les serpentins du condenseur, à travers lesquels le réfrigérant à vapeur chaude reçu du compresseur circule. La chaleur est transférée du réfrigérant à vapeur à travers le tube de condensation murs à l'extérieur de l'eau, qui passe sur la surface latérale des tubes. En raison de la chaleur rejetée par le réfrigérant à vapeur chaude vers l'eau froide, il devient un réfrigérant liquide. En même temps, l'air est aspiré du côté inférieur du condenseur par un ventilateur. L'air est évacué par le haut du condenseur. L'air provoque l'évaporation des gouttelettes d'eau collées à la surface des serpentins du condenseur en absorbant la chaleur de l'eau restante, nécessaire à leur évaporation.

La chaleur absorbée par ces gouttelettes d'eau est appelée chaleur latente d'évaporation ou de vaporisation. En raison du rejet de chaleur, l'eau restante est refroidie. Cette eau condensée recueillie dans le réservoir d'eau du bas est à nouveau remise en circulation dans le circuit. En même temps, l'air absorbe également une partie de la

chaleur des gouttelettes d'eau pour les évaporer. Ainsi, l'air devient chaud et est rejeté par le haut dans l'atmosphère. Afin de pallier le manque d'eau causé par l'eau évaporée, de l'eau d'appoint est fournie au réservoir d'eau. Une vanne à flotteur dans le réservoir d'eau contrôle l'alimentation d'appoint. Des plaques d'éliminateurs d'eau sont fournies au-dessus du collecteur de pulvérisation pour empêcher les particules d'eau de s'échapper avec l'air évacué.

- La température de condensation du fluide frigorigène dépend de la température de bulbe humide de l'air à l'entrée du condenseur. [27]

$$T_c = TBH + 10 \text{ à } 15^\circ\text{C avec } TBH = \text{Température de bulbe humide.} \quad (2.3)[30]$$

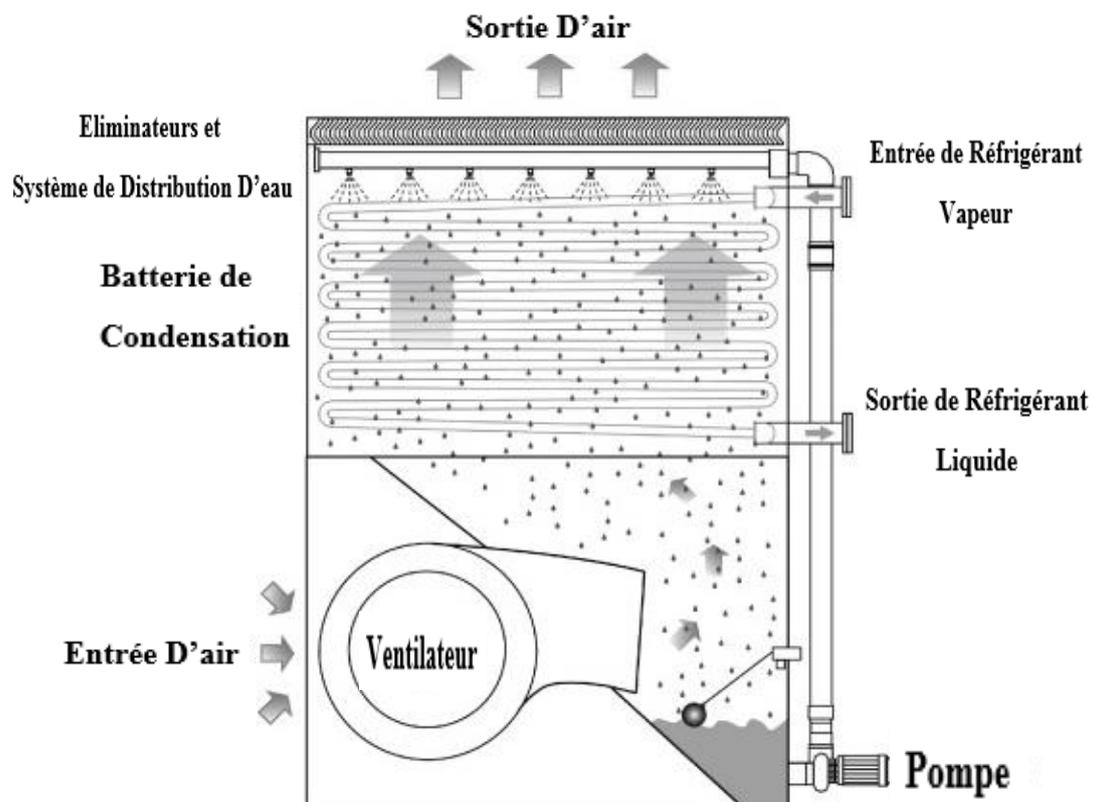


Figure 2.15 : Schéma de principe d'un condenseur évaporatif. [31]

II.4. Vanne de Lamination :

II.4.1. Définition :

Une vanne de lamination est un dispositif mécanique (remplaçant le détendeur thermostatique) qui sert à assurer la détente du réfrigérant de la haute vers la basse pression. Il s'agit essentiellement d'un mode de réalisation de la loi de conservation de débit.



Figure 2.16 : Une vanne de lamination. [32]

II.4.2. Principe de Fonctionnement :

Une électrovanne située avant la vanne de lamination s'ouvre et laisse le réfrigérant circuler vers la bouteille séparatrice à cause d'un bas niveau actionné par le flotteur de liquide de cette dernière (l'électrovanne et le flotteur marchent ensemble).

Le fluide frigorigène maintenant est à l'entrée de la vanne avec une haute pression (de 11 bar jusqu'à 13 bar) d'une phase liquide dans une surface grande et avec une petite vitesse et selon le théorème de conservation de débit, le fluide rentre dans une section plus petite que sa dernière, cette petite section représentée par une petite ouverture d'un clapet pour étrangler le réfrigérant et dans cela la vitesse va augmenter et automatiquement la pression diminue (environ 3-4 bar).



Figure 2.17 : Une vue réelle d'une vanne de lamination.

II.5. Bouteille Accumulatrice et Bouteille Séparatrice :

II.5.1. Bouteille Accumulatrice :

Elle est située à la sortie du condenseur/entrée de la vanne de lamination, ces réservoirs horizontaux à haute pression constituent la principale source de réfrigérant liquide pour un système de réfrigération. Il fournit également un endroit pour stocker le réfrigérant selon les besoins afin de minimiser les effets transitoires du système. Dans certaines conceptions de système, le récepteur haute pression est également conçu pour stocker la totalité de la charge du système, Cela permet de stocker l'entière quantité du réfrigérant en cas d'entretien.

Ses avantages sont :

- Pressions de conception maximales plus adapter pour les autres réfrigérants.

- Colonne de niveau.
- Raccords de thermosiphon supplémentaires, branche tombante ou buses d'injection de liquide.
- Parois renforcées contre la corrosion. [33]

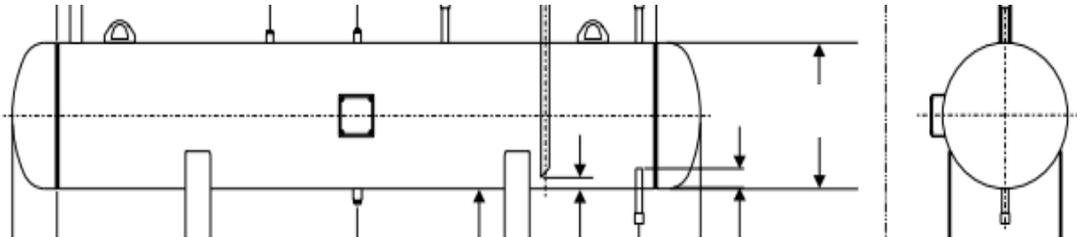


Figure 2.18 : Un dessin technique d'une bouteille à haute pression.



Figure 2.19 : Une vue réelle d'une bouteille accumulatrice HP.

II.5.2. Bouteille Séparatrice :

Cette bouteille, thermiquement isolée, est conçue pour supporter les basses températures, elle est située à la sortie de la vanne de lamination et qui sert à stocker l'ammoniac en deux phases (liquide et gazeux) afin d'alimenter l'ensemble d'évaporateurs

et des compresseurs. Les échangeurs sont alimentés en ammoniac liquide pour assurer l'effet frigorifique et les vapeurs sortantes de ces derniers sont reconduite vers la même bouteille.

La partie supérieure de cette bouteille (100% de vapeur) est aspirée par les compresseurs, cela garantie la qualité nette de la vapeur aspirée.

A l'intérieur de cette bouteille, il existe des chicane et leur rôle est d'éviter l'élévation des gouttelettes d'ammoniac liquide vers le haut pour que les compresseurs n'aspirent que de l'ammoniac gazeux. Aussi il existe un système de sécurité qui détecte la montée du niveau du liquide à l'intérieur de cette bouteille (pour éviter l'aspiration de liquide).

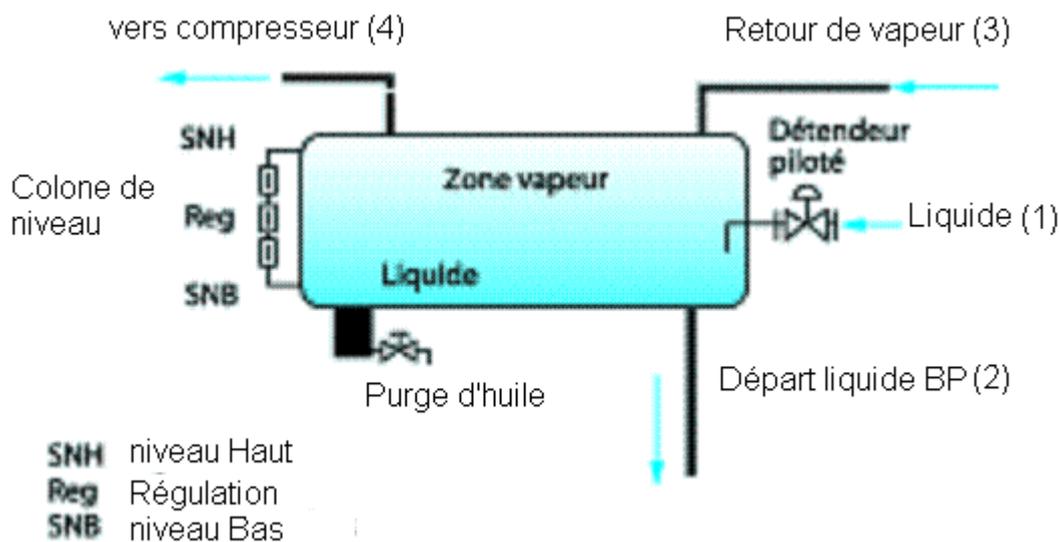


Figure 2.20 : Un schéma d'une bouteille séparatrice BP.



Figure 2.21 : Une vue réelle d'une bouteille séparatrice BP.

II.6. Echangeur à Plaques :

II.6.1. Définition :

Un échangeur de chaleur à plaques est un dispositif permettant le transfert de chaleur entre deux fluides. Il est composé de chambres séparées en acier inoxydable par lesquels le liquide froid et le liquide chaud passent sans se toucher et où le transfert de chaleur a lieu. [34]

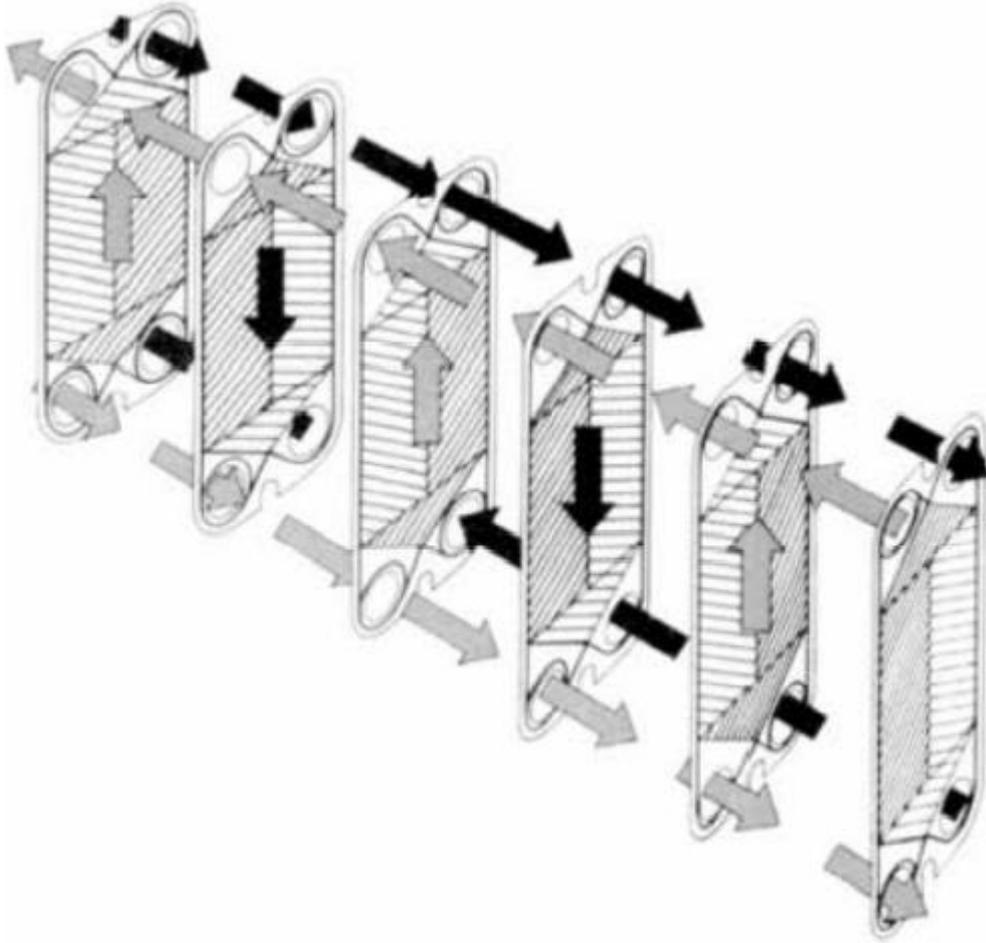


Figure 2.22 : Ecoulement a contre-courant des fluides dans un échangeur de chaleur à plaques. [1]

II.6.2. Principe de Fonctionnement et Composition :

Échangeur à plaques se compose d'un ensemble de paire des plaques installées en parallèle altérant canaux soudés et canaux a joints traditionnels. Le liquide éventuellement agressif circule dans le canal fermé par soudure alors que l'autre fluide circule dans le canal ouvert étanche par un point élastomère traditionnel. Seuls subsistent pour chaque double plaque deux joints annulaires ou circulaires d'étanchéité au niveau des tubulures entrée/sortie du fluide éventuellement agressif. Ces joints peuvent être confectionnés dans un élastomère haute résistance. Le fluide réfrigérant circule dans les canaux soudés, l'autre fluide dans les canaux normaux qui peuvent être facilement ouverts pour un nettoyage ou une inspection. [1]

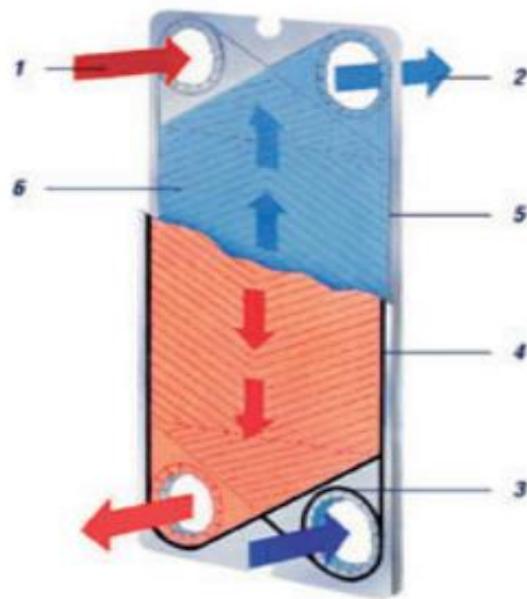


Figure 2.23 : Schéma d'un échangeur à plaques et sa composition. [35]

• **Composition :**

- 1 – Fluide service (l'eau glycolée).
- 2 – Fluide de refroidissement.
- 3 – Joint circulaire.
- 4 – Joint de plaque.
- 5 – Soudure laser.
- 6 – Canal entre plaques soudées.

II.6.3. Caractéristiques Techniques :

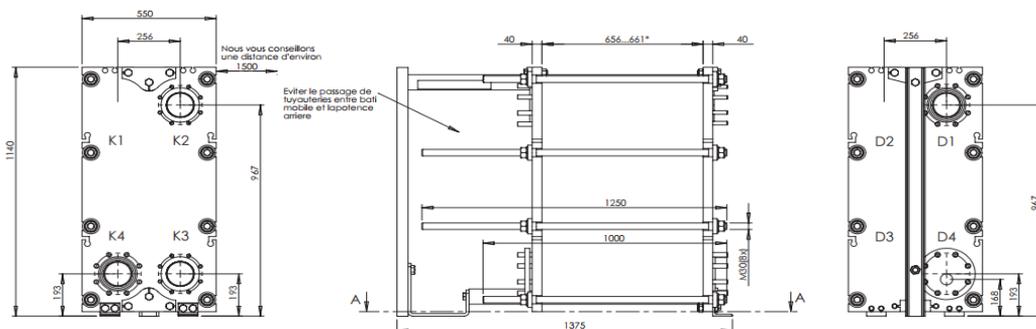


Figure 2.24 : Un dessin technique d'un échangeur à plaques.

Tableau 2.3 : Un tableau des propriétés de fluide de service et fluide refroidissement.[36]

Fluide	Ammoniac	L'eau Glycolée
Température d'évaporation [°C]	0	/
Pression d'entrée [Bar]	4,29	/
Température Entrée->Sortie [°C]	0-->0	7,00 --> 3,00
Débit Massique [Kg/h]	2082,1/2394,4	170207,3
Débit Volumique [m ³ /h]	602,768	164,134
Masse Volumique [Kg/m ³]	3,06	1037,00
Chaleur Spécifique [J/Kg.°K]	2200	3860,0
Conductivité Thermique [W/m.°K]	/	0,454
Viscosité Dynamique [mPa.s]	/	6,515
Vitesse dans le Raccordement [m/s]	0,133 / 21,319	5,810 / 5,801
Perte de Charge Calculée [bar]	0,023	0,957
Température de Design Max/Min [°C]	-10,00 / 50,00	-10,00 / 50,00
Pression de Design Max/Min [bar]	-1,00 / 16,00	0,00 / 10,00
Pression de Test [bar]	22,88	12,50
Volume de Rétention [L]	75,165	75,165
Fixation des Joints	Clipsé	Clipsé

Tableau 2.4 : Un tableau des caractéristiques d'échangeur à plaques. [36]

Type D'appareil	ThermoLine TL0250 TCGL - 1250
Puissance Thermique [KW]	730
Sens de Circulation du Fluide	Co-Courant
DTLM [°C]	4,72
Surface D'échange [m ²]	50,065
Nombre de Plaques Installée/Max	188/215
Coefficient U Réel/Théorique [W/m ² .°K]	3088,6/3297,2
Surface de réserve [%]	6,80
Résistance à L'encrassement [m ² .°K/W]	0,00002
Poids de L'appareil Vide/Plein [Kg]	915 / 1041
Compatibilité des Réfrigérants	Tous les Réfrigérants Compatibles
Compatibilité des Fluides de Service	Eau, Eau Glycolée, Huiles, Réfrigérants, Produits Corrosifs

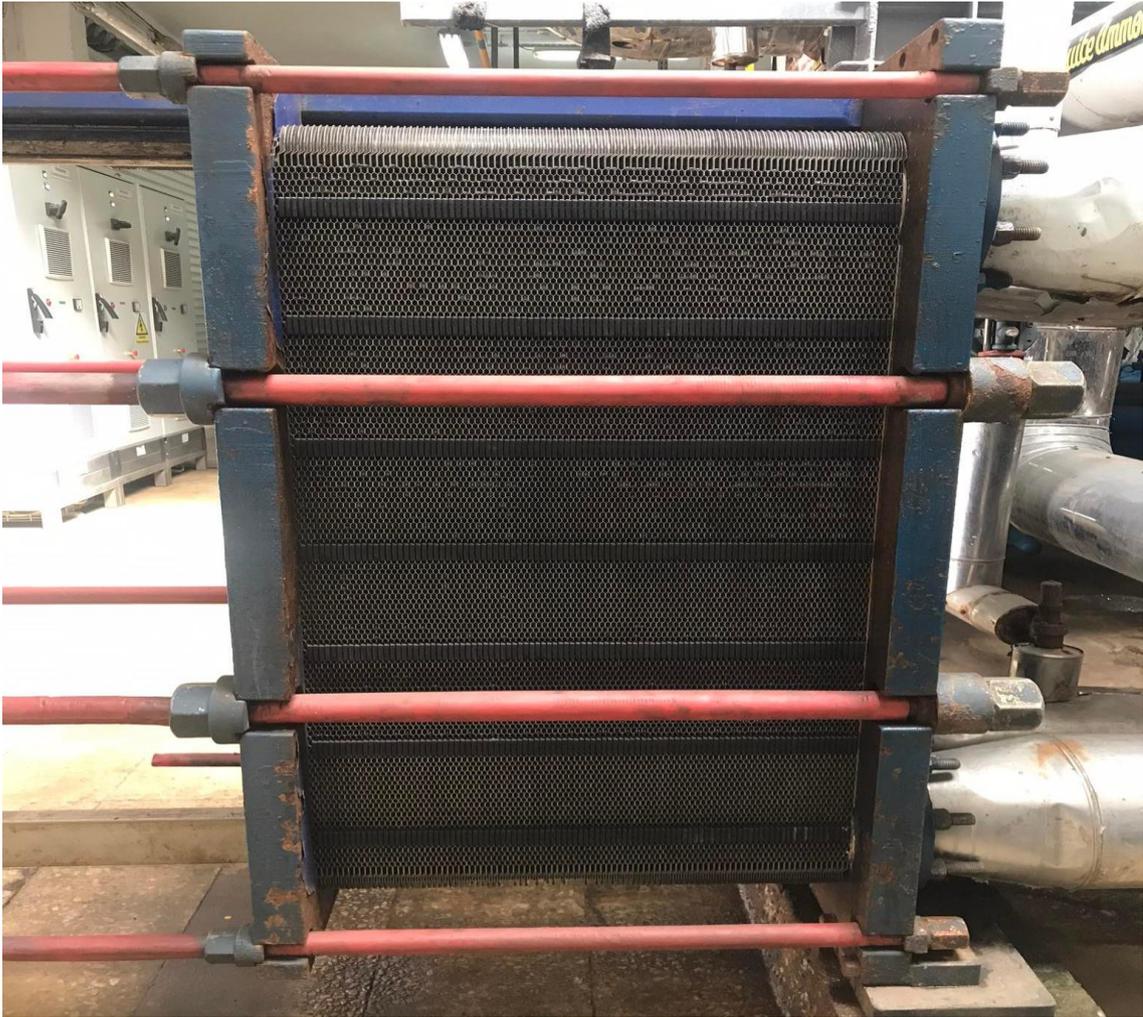


Figure 2.25 : Une vue réelle d'un échangeur à plaques.

II.6.4. Lois Relier avec L'échangeur :

L'énergie transmise du fluide chaud vers le fluide froid est exprimée par la relation suivante :

$$Q = \dot{m}_f C_f (T_{f2} - T_{f1}) \quad (2.4)$$

$$Q = \dot{m}_c C_c (T_{c2} - T_{c1}) \quad (2.5)$$

Avec :

$$Q = U S DTLM \quad (2.6)$$

$$DTLM = \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad (2.7)$$

$$\Delta T_1 = T_{c1} - T_{f1} \quad (2.8)$$

$$\Delta T_2 = T_{c2} - T_{f2} \quad (2.9)$$

Le coefficient d'échange global est donné par :

$$U = \frac{1}{R_{th}} \quad (2.10)$$

Avec R_{th} est la résistance thermique, exprimée par :

$$R_{th} = \left(\frac{1}{H_c}\right) + \left(\frac{e}{\lambda}\right) + \left(\frac{1}{H_f}\right) \quad (2.11)$$

$$\text{Alors } U = \frac{1}{\left(\frac{1}{H_c}\right) + \left(\frac{e}{\lambda}\right) + \left(\frac{1}{H_f}\right)} \quad (2.12)$$

$$\text{Efficacité} = \frac{\dot{m}_c C_c (T_{c2} - T_{c1})}{\dot{m}_c C_c (T_{c1} - T_{f1})} \quad (2.13)$$

II.7. L'eau Glycolée :

II.7.1. Définition :

Le glycol est un composé organique appartenant à la famille des alcools. Il est plus communément appelé antigel et il est connu pour avoir un goût sucré. Cependant, il peut être toxique et est généralement teint fluorescent ou clair et légèrement huileux en termes de consistance.

Dans les systèmes de refroidissement, l'objectif principal du glycol est d'aider le système à rester aussi froid que possible sans geler. Lorsque le glycol est mélangé avec de l'eau, le point de congélation de l'eau descend jusqu'à -39 degrés Celsius. Cela signifie qu'un système qui doit garder de grandes surfaces au frais, comme une patinoire, peut rester glacial et même en dessous du point de congélation de l'eau sans se geler. [37] [38] [39]

II.7.2. Types d'eaux Glycolées :

Le glycol est un terme général qui englobe un certain nombre de formules chimiques distinctes. C'est pourquoi il est important de comprendre le type dont vous pourriez avoir besoin et comment il sera utilisé. Certaines options sont toxiques et d'autres sont beaucoup plus sûres :

- **Éthylène glycol**

L'éthylène glycol et ses dérivés sont plus toxiques et doivent être utilisés avec précaution. Il est le plus couramment utilisé comme antigel dans les automobiles, le liquide de frein, les systèmes HVAC et certaines fibres artificielles. Il est dérivé de l'oxyde d'éthylène, qui provient de l'éthylène.

- **Propylène glycol**

Le propylène glycol est la variante non toxique. Il est similaire à l'éthylène dans ses propriétés physiques, mais il est fréquemment utilisé dans les aliments, les produits d'hygiène buccale, les cosmétiques et les systèmes HVAC. Il aide à préserver les matériaux et à retenir l'humidité. [37]

II.7.3. Propriétés Physique-Chimiques :

Glycolée est un liquide toxique, incolore, pratiquement inodore, à faible volatilité, à faible viscosité et hygroscopique. Il est totalement miscible à l'eau et à de nombreux liquides organiques. Les groupes hydroxyle sur les glycols subissent la chimie habituelle des alcools, donnant une grande variété de dérivés possibles. Cette chimie permet à l'éthylène glycol d'agir comme intermédiaire dans une large gamme de réactions. La formation de résine est particulièrement importante, y compris la condensation avec du téréphtalate de diméthyle ou de l'acide téréphtalique résultant en une résine de polyester pour les boissons non alcoolisées et les emballages alimentaires.

L'utilisation répandue de l'éthylène glycol comme antigel est basée sur sa capacité à abaisser le point de congélation lorsqu'il est mélangé avec de l'eau. Les propriétés physiques des mélanges éthylène glycol-eau sont donc extrêmement importantes. L'éthylène glycol a de nombreuses utilisations finales, notamment la production de fibres et de résines de polyester, comme additif dans les systèmes de climatisation à eau glacée, les systèmes de chauffage/refroidissement géothermiques et comme précurseur important des fibres et des résines de polyester dans l'industrie des plastiques. [37] [38] [39]

II.8. PID :

II.8.1. Définition :

Le terme PID signifie dérivé intégral proportionnel et il s'agit d'un type d'appareil utilisé pour contrôler différentes variables de processus telles que la pression, le débit, la

température et la vitesse dans les applications industrielles. Dans ce contrôleur, un dispositif de retour de boucle de contrôle est utilisé pour réguler toutes les variables de processus.

Ce type de commande est utilisé pour piloter un système en direction d'un emplacement objectif autrement de niveau. Il est presque partout pour le contrôle de la température et utilisé dans les processus scientifiques, l'automatisation et dans l'industrie. Dans ce contrôleur, la rétroaction en boucle fermée est utilisée pour maintenir la sortie réelle d'une méthode proche de l'objectif, sinon sortie au point fixe si possible.

Le signal final est :

$$u(t) = Kp \cdot e(t) + \left(\frac{Ki}{Ti}\right) \cdot \int_0^t e(t)dt + Td \cdot Kd \cdot \left(\frac{de(t)}{dt}\right) \quad (2.14)$$

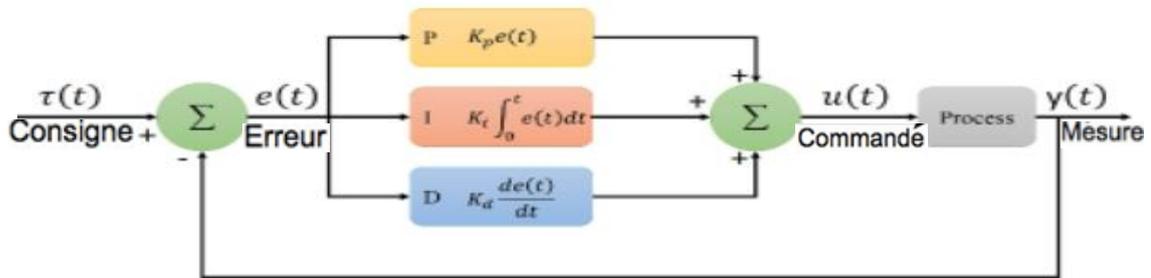


Figure 2.26 : Schéma de fonctionnement d'un PID.



Figure 2.27 : Une vue réelle d'un appareil de régulation de l'installation.

II.8.2. Principe de Fonctionnement :

- **Action Proportionnelle :**

Cette fonction est mathématiquement très simple. C'est une multiplication

$$u(t) = Kp \cdot e(t) \quad (2.15)$$

La sortie $u(t)$ est égale à l'entrée $e(t)$ multiplier par un nombre connu Kp . « $u(t)$ est proportionnelle à $e(t)$ »

Dans un régulateur $e(t)$ est l'écart entre la mesure et la consigne, Kp est appelé GAIN. Ce coefficient peut aussi désigner par l'expression « bande proportionnelle » Bp ou Xp .

La conversion entre le gain et la Bp est simple, la bande proportionnelle est l'inverse du gain en pourcentage.

$$Kp = 100 \cdot \left(\frac{1}{Bp}\right) = \left(\frac{100}{Bp}\right) \quad (2.16)$$

Un régulateur qui travaille en proportionnelle pure n'arrive jamais à la consigne, il y a toujours un écart résiduel qui subsiste.

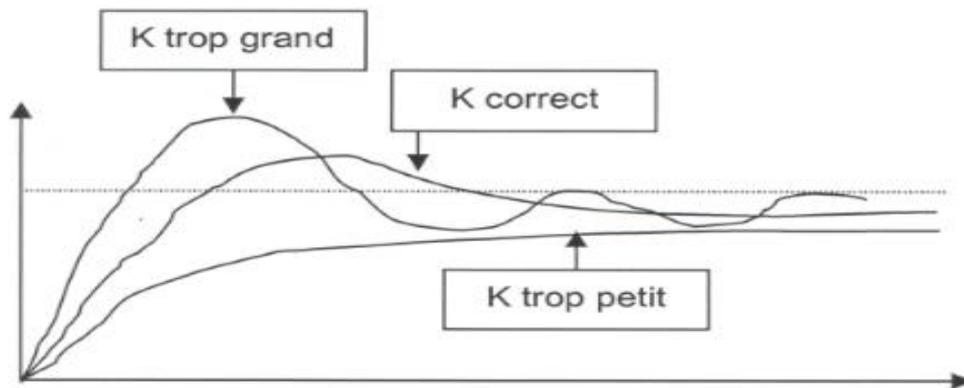


Figure 2.28: L'influence de l'action proportionnelle sur la réponse du processus à un échelon.

L'action proportionnelle permet de jouer sur la vitesse de réponse du procédé. Plus le gain est élevé plus la réponse s'accélère, plus l'erreur statique diminue, mais plus la stabilité se dégrade (pompage du régulateur).

• **Action Intégrale :**

La régulation proportionnelle s'avère insuffisante chaque fois que l'on souhaite régler la mesure avec une assez bonne précision. D'autre part, dans le cas de procédés industriels ou l'on veut une marge de stabilité assez grande, il faut des gains faibles, ce qui a pour conséquence d'engendrer des écarts importants. L'action intégrale permet d'éliminer cet écart. Cette action va jouer sur l'écart entre la mesure et la consigne dans le temps.

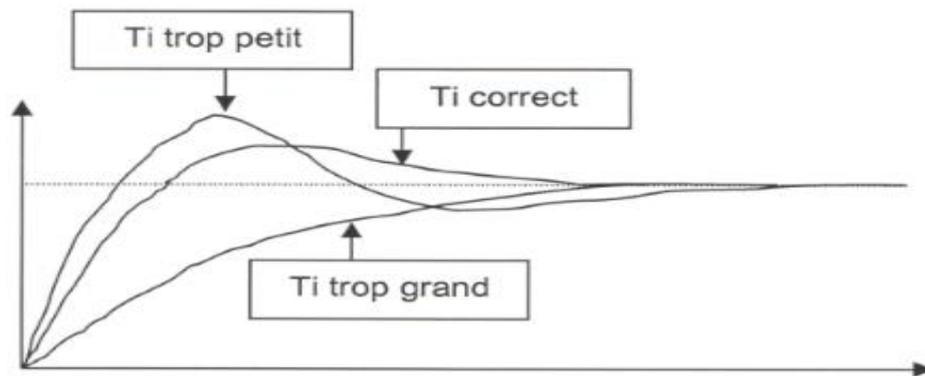


Figure 2.29 : L'influence de l'action intégrale sur la réponse du processus à un échelon.

L'action intégrale agit proportionnelle à la surface de l'écart, et elle poursuit son action tant que l'écart n'est pas nul.

$$u(t) = \left(\frac{K_i}{T_i}\right) \cdot \int_0^t e(t) dt \quad (2.17)$$

Comme dans le cas de l'action proportionnelle, un dosage trop important de l'action intégrale (T_i petit) engendre une instabilité de la boucle de régulation. Pour son réglage il faut la aussi là aussi trouver un compromis entre la stabilité et la rapidité.

Les unités utilisées sont des minutes ou des secondes.

Dans la pratique l'action intégrale est associée à l'action proportionnelle car ces 2 actions sont complémentaires.

L'action intégrale améliore le comportement et permet d'obtenir des résultats satisfaisants dans des application courantes et classique.

La régulation P+I permet d'obtenir dans la majorité des cas un comportement satisfaisant de la régulation.

• **Action Dérivée :**

Pour certaines applications, notamment lorsque les variations de la grandeur contrôlée sont rapides et le temps de réponses de la régulation important il est possible d'améliorer la régulation en ajoutant à l'algorithme PI la fonction dérivée. Le rôle de l'action dérivée est de compenser en partie le temps mort existant sur le procédé.

L'action dérivée a pour l'effet de délivrer une sortie variante proportionnellement à la vitesse de l'écart. Lorsque l'écart reste constant la sortie du module dérivée est nulle.

Avec les actions proportionnelles et intégrales on doit attendre que la mesure varie suffisamment pour pouvoir réagir.

Si l'on veut une régulation très fine, il ne va plus falloir attendre les variations mais anticiper sur la mesure, c'est-à-dire que sur une première variation de l'écart les actions P et I sont annihilées pour permettre à la sortie de passer à une valeur qu'elle aurait atteint au bout d'un temps t à l'action dérivée.

L'action dérivée effectuée est sensible anticipation de la sortie dans le temps.

Elle est exprimée en minutes ou en secondes. Comme pour les autres actions (P&I), un dosage trop important de la dérivée peut compromettre la stabilité. De plus l'action dérivée est rendue quasiment impossible puisqu'elle a pour effet d'augmenter l'amplitude du signal sur sa sortie. [40] [41] [42]

$$u(t) = Td \cdot Kd \cdot \left(\frac{de(t)}{dt}\right) \quad (2.18)$$

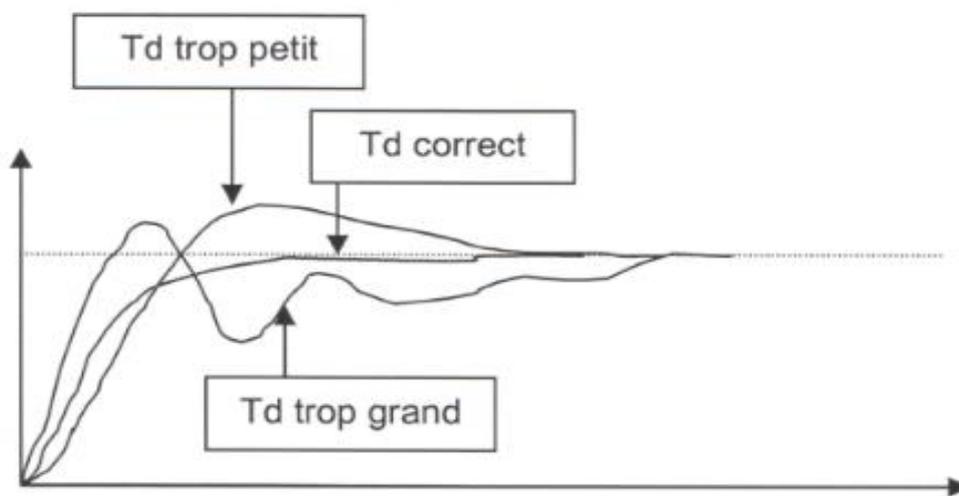


Figure 2.30 : L'influence de l'action dérivée sur la réponse du processus à un échelon.

Conclusion :

Ce chapitre a traité les organes constitutifs de la station de production de froid disponible à l'unité Coca-Cola de Rouïba. Le principe de fonctionnement ainsi que les spécifications techniques des composants ont été abordés.

On a traité ainsi, dans ce chapitre, les fluides frigorigènes utilisés généralement et l'ammoniac spécialement. Les propriétés physico-chimiques de ce fluide ont été présentés.

Une partie sur la régulation des systèmes est ainsi présenté en fin de chapitre.

CHAPITRE 03 :
Résultats, Interprétations
et Améliorations

Introduction :

Ce chapitre traitera une étude théorique d'une installation simple d'un cycle de compression à vapeur fonctionnant avec le réfrigérant R717.

Dans ce chapitre on va également faire une simulation de la station qu'on a déjà présentée en chapitre précédent, cette partie représente une étude expérimentale de la station existant déjà.

Finalement on va proposer des améliorations de performances liée à des causes ou des problèmes qu'on a remarqués lors de notre stage au sein de l'unité.

III.1 Etude Théorique :

Pour la simulation de notre système, on est obligé de commencer par une étude paramétrique des cycles de compression de vapeur utilisant l'ammoniac comme fluide frigorigène, pour cela, dans notre mémoire, l'outil EES (Engineering Equation Solver) a été utilisé.

Le programme de simulation réalisé suit l'algorithme de calcul suivant :

```

TBH=24,6 [°C]
T_H=TBH+10 [°C]
T_C=-2,3 [°C]
R$='Ammonia'

T[1]=T_C
x[1]=1 [-]
s[1]=entropy(R$,T=T[1];x=x[1])
P[1]=pressure(R$,T=T[1];x=x[1])
h[1]=enthalpy(R$,T=T[1];x=x[1])

s[2]=s[1]
P[2]=P[3]
x[2]=1 [-]
h[2]=enthalpy(R$,s=s[2];P=P[2])
T[2]=temperature(R$,s=s[2];P=P[2])

T[3]=T_H
x[3]=0 [-]
s[3]=entropy(R$,T=T[3];x=x[3])
P[3]=pressure(R$,T=T[3];x=x[3])
h[3]=enthalpy(R$,T=T[3];x=x[3])

h[4]=h[3]
P[4]=P[1]
s[4]=entropy(R$,h=h[4];P=P[4])
T[4]=temperature(R$,h=h[4];P=P[4])
x[4]=quality(R$,h=h[4];T=T[4])

T[5]=T[1]
x[5]=x[1]
s[5]=s[1]
P[5]=P[1]
h[5]=h[1]

m_dot=1[Kg/s]

Q_dot_cond\m_dot=h[2]-h[3]
Q_dot_evap\m_dot=h[1]-h[4]
W_dot_c\m_dot=h[2]-h[1]
COP=(Q_dot_evap\m_dot)/(W_dot_c\m_dot)
    
```

Figure 3.1 : Programme de simulation de l'étude paramétrique.

Le schéma de l'installation, réalisé sous EES est démontré en figure suivante (Figure 3.2).

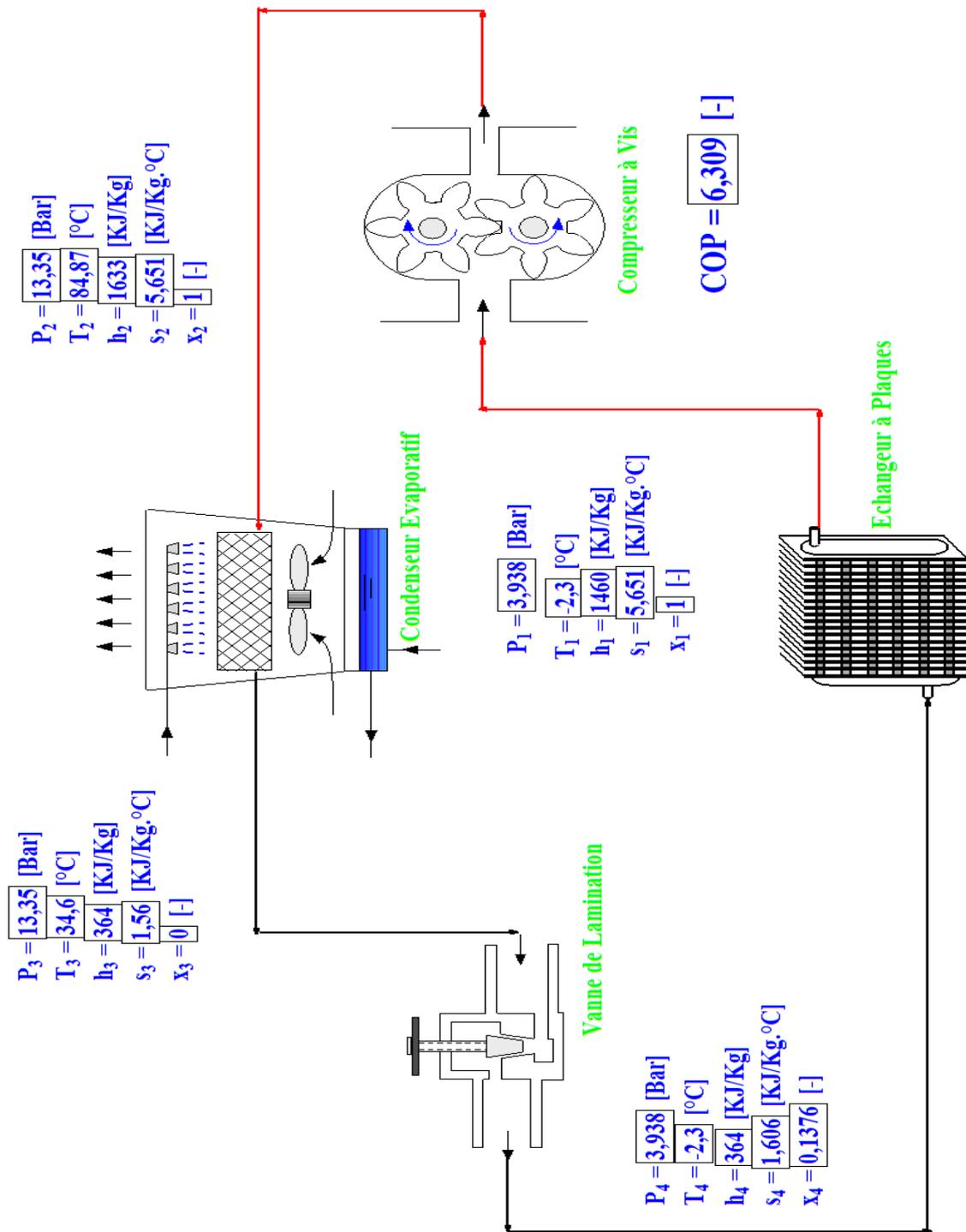


Figure 3.2 : Schéma global du cycle à compression de vapeur.

Les résultats de simulations sont présentés ci-dessous :

- **Diagramme PH :**

Le diagramme PH du cycle à compression de vapeur est présenté en figure 3.3

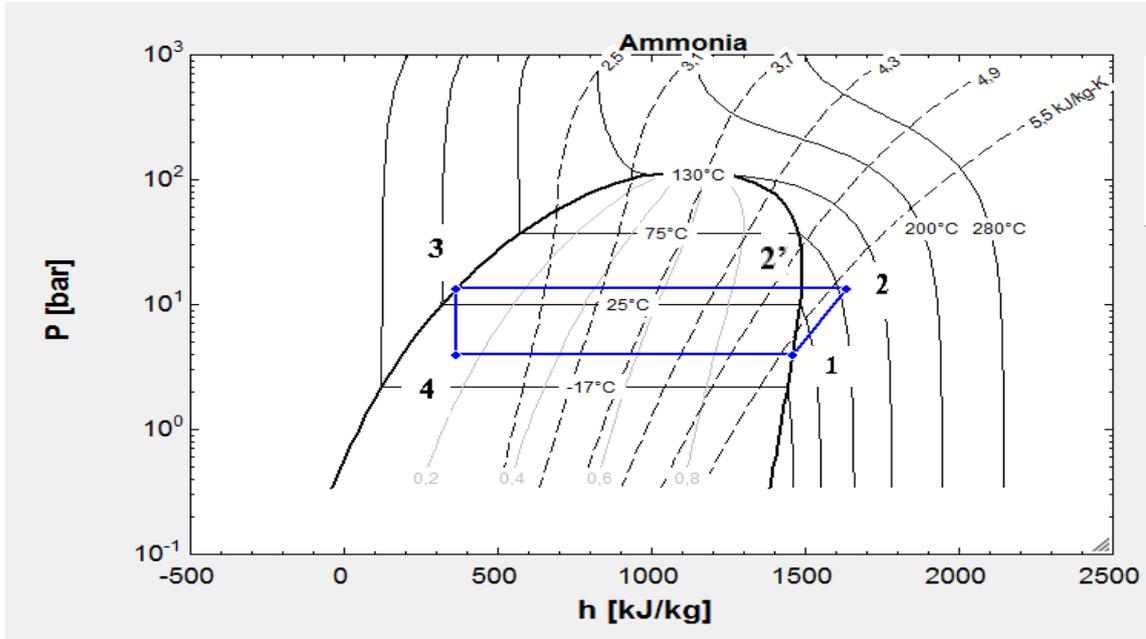


Figure 3.3 : Diagramme PH du cycle à NH3.

Par l'application de la relation (1.7), on obtient :

$$\Delta T \text{ désurchauffe} = T_2 - T \text{ condensation} (T_2') = 84,87 - 34,6 = 50,27^\circ\text{C}$$

III.1.1 L'influence de la Température du Bulbe Humide sur les Performances du Système :

➤ Variation des Puissances du Cycle en Fonction de la Température du Bulbe Humide (TBH) :

Dans ce qui suit, le débit massique du réfrigérant a été pris égal à 1kg/s et la température de l'évaporateur (froid) est de $-2,3^{\circ}\text{C}$:

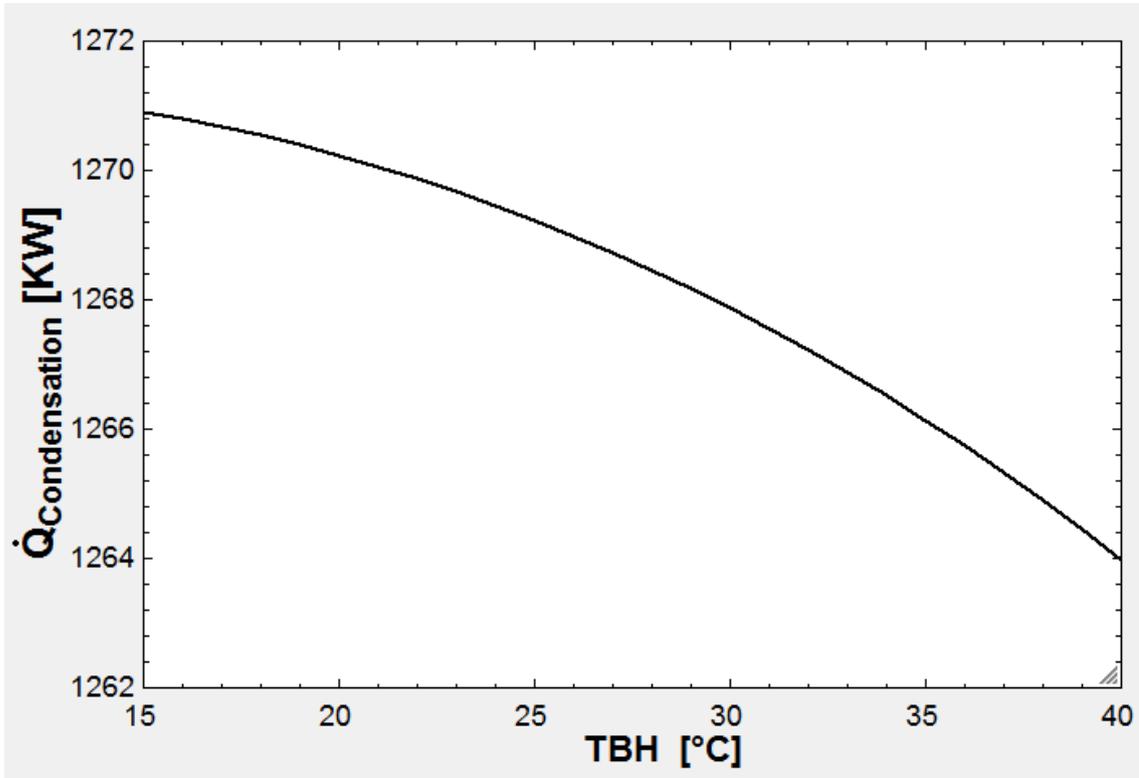


Figure 3.4 : Variation de la puissance du condenseur en fonction de température du bulbe humide.

Discussion :

D'après la figure 3.4, on remarque clairement que la puissance du condenseur (\dot{Q}_c) diminue en augmentant la température de la source extérieure (T_{BH}) d'une valeur maximale de 1271 KW pour une température de 15°C jusqu'à atteindre une valeur minimale de 1264 KW pour une température de condensation de 40°C .

Ce comportement se traduit par l'augmentation de la température extérieure (également température du condenseur) ainsi la diminution de l'échange thermique entre le condenseur et l'ambiance.

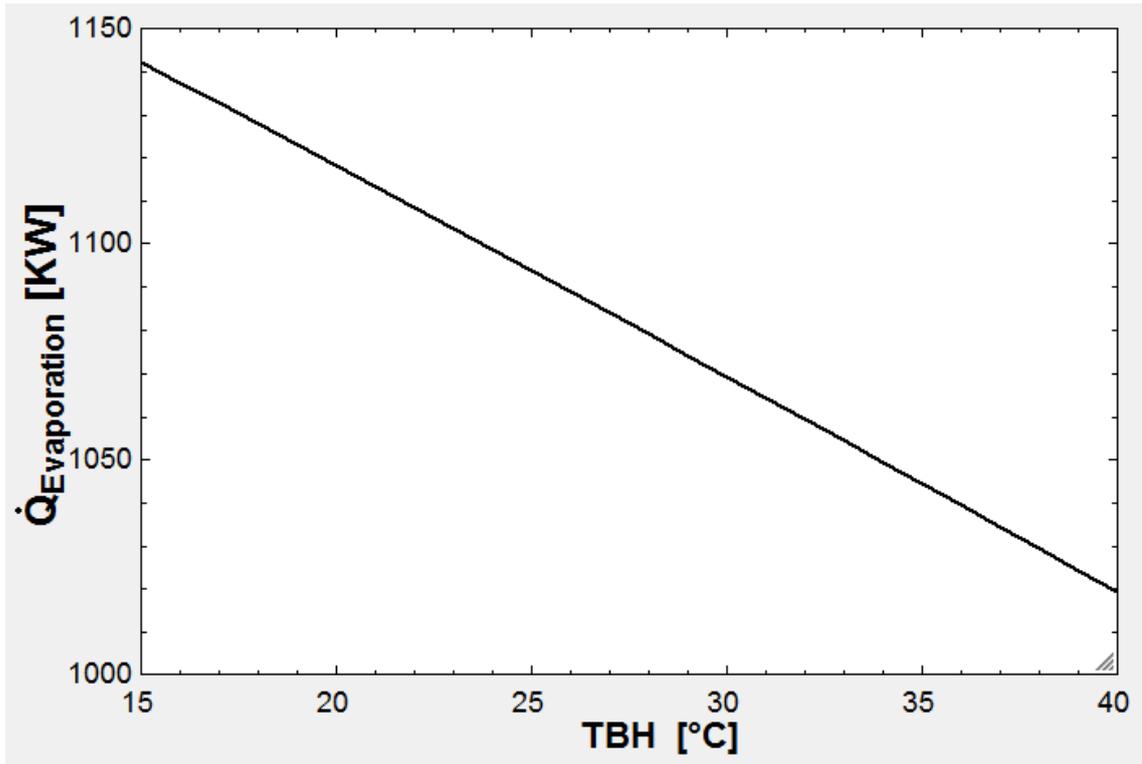


Figure 3.5 : Variation de la puissance de l'évaporation en fonction de la température du bulbe humide.

Discussion :

La figure 3.5 représente la variation de la puissance frigorifique (puissance au niveau de l'évaporateur) en fonction de la température extérieure. On note que cette puissance suit l'allure de celle de la condensation, elle est à son maximum de 1142 KW pour une température de condensation de 15°C et chute vers une valeur de 1019 KW pour une température de 40°C cela est interprété par la qualité du condensat au niveau du condenseur, sachant que le fluide à la sortie du condenseur doit être à l'état liquide (saturé).

En analysant les données démontrées en figure 3.5 nous permet d'identifier un taux de dégradation de puissance de 10% en allant de 15 à 40 °C de température ambiante.

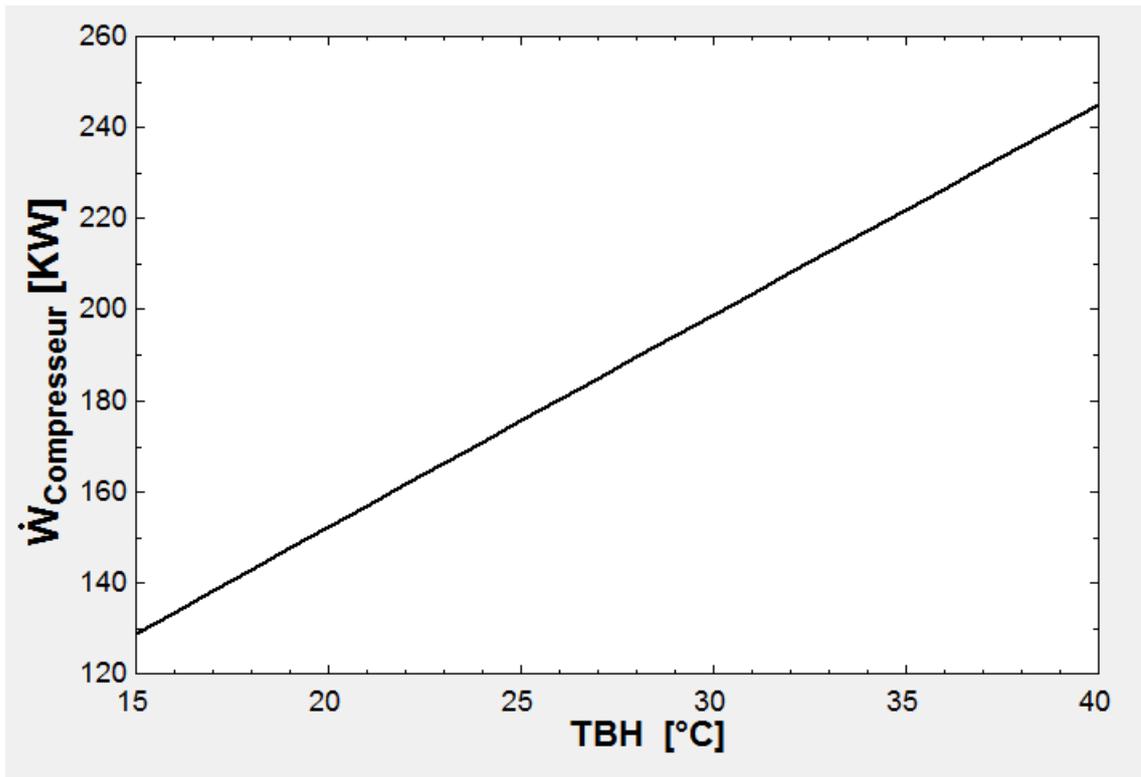


Figure 3.6 : Variation de la puissance du compresseur en fonction de la température du bulbe humide.

Discussion :

La figure 3.6 représente l'évolution de la puissance électrique du compresseur du cycle en fonction de la température du condenseur, on remarque clairement que cette puissance augmente en fonction de la température du milieu extérieur, ce comportement est expliqué par l'effort fournie par le compresseur pour compenser le manque causé par la forte température ambiante.

En analysant les données démontrées en figure 3.6 nous permet d'identifier un taux d'augmentation de puissance de 47% en allant de 15 à 40 °C de température extérieure.

➤ **Variation du COP du Cycle en Fonction de la Température du Bulbe Humide (TBH) :**

L'évolution du coefficient de performance du cycle en fonction de la température du condenseur est représentée en figure 3.7 :

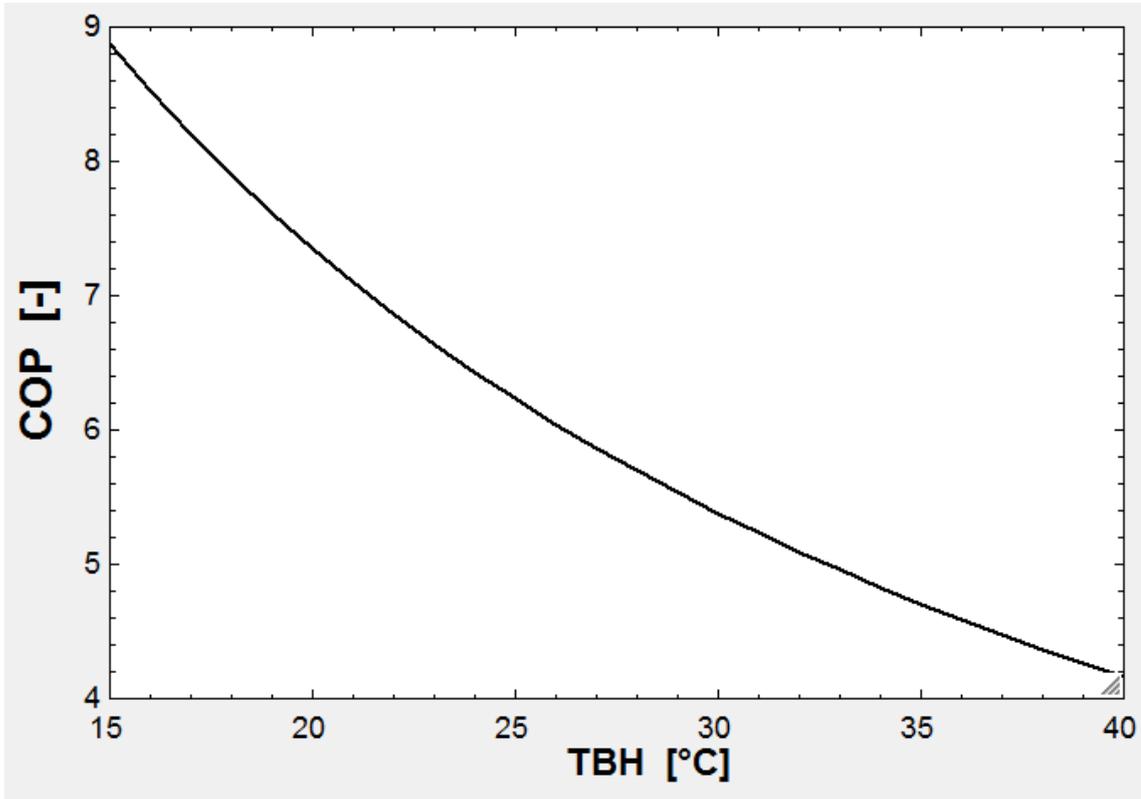


Figure 3.7 : Variation du COP de la machine en fonction de la température du bulbe humide.

Discussion :

D'après cette figure, le COP du cycle diminue d'une valeur de 8,873 en fonction de la température du bulbe humide de 15°C vers une valeur de 4,16 pour une température de 40°C, ceci est expliqué par l'augmentation du travail du compresseur (voir figure 3.6) et la diminution de la puissance frigorifique (voir figure 3.5) selon l'équation du COP (équation 1.4).

En analysant les données démontrées en figure 3.7 nous permet d'identifier un taux dégradation de COP de 53% en allant de 15 à 40 °C de température ambiante.

III.1.2 L'influence de la Température de la Source Froide sur les Performances du Système :

➤ Variation des Puissances du Cycle en Fonction de la Température Froide (T_e) :

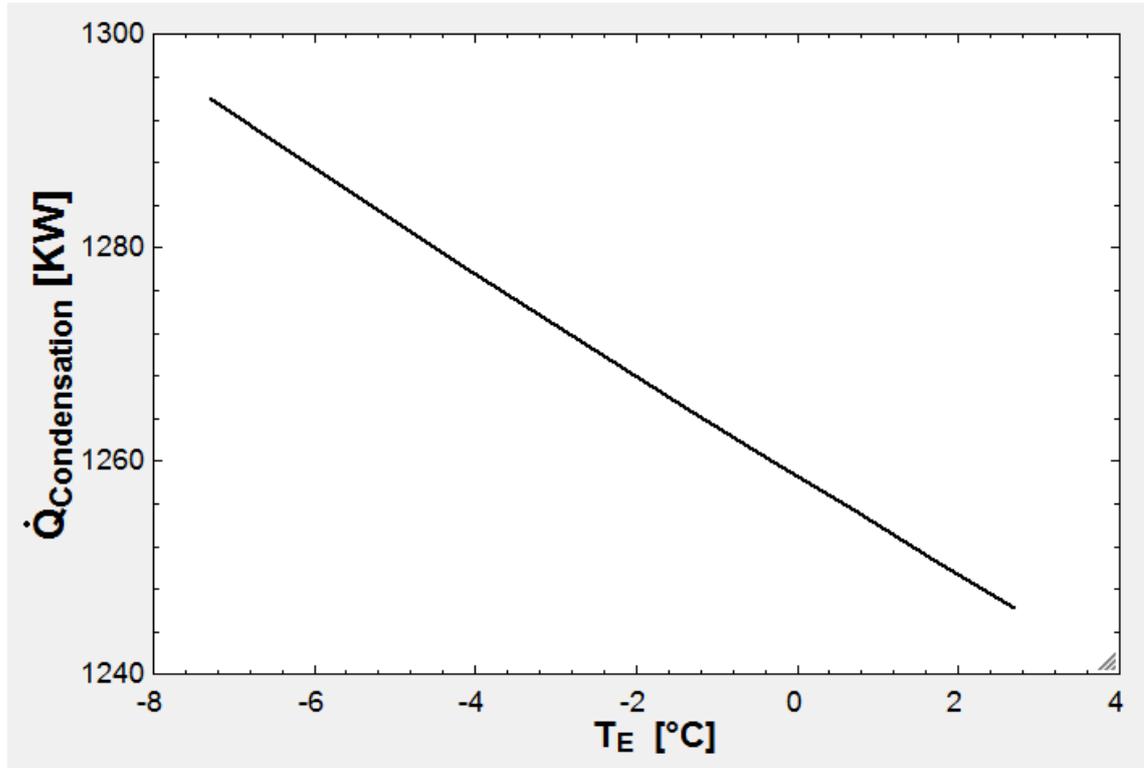


Figure 3.8 : Variation de la puissance du condenseur en fonction de la température froide.

Discussion :

Cette figure représente la variation de la puissance de condensation en fonction de la température froide, on remarque clairement que la puissance du condenseur (\dot{Q}_c) diminue quand la température de la source froide (T_e) diminue d'une valeur maximale de 1294 KW pour une température $-7,3^\circ\text{C}$ jusqu'à atteindre une valeur minimale de 1246 KW pour une température froide de $2,7^\circ\text{C}$, cette diminution est muni à l'application de relation (1.2) pour une température froide élevé (vers le plus), la puissance de condensation sera élevé, l'opposé est même juste pour une température froide bas, la puissance de condensation va diminuer.

En analysant les données démontrées en figure 3.8, nous permet d'identifier un taux dégradation de \dot{Q}_c de 3,7% en allant de $-7,3$ à $2,7^\circ\text{C}$ de température froide.

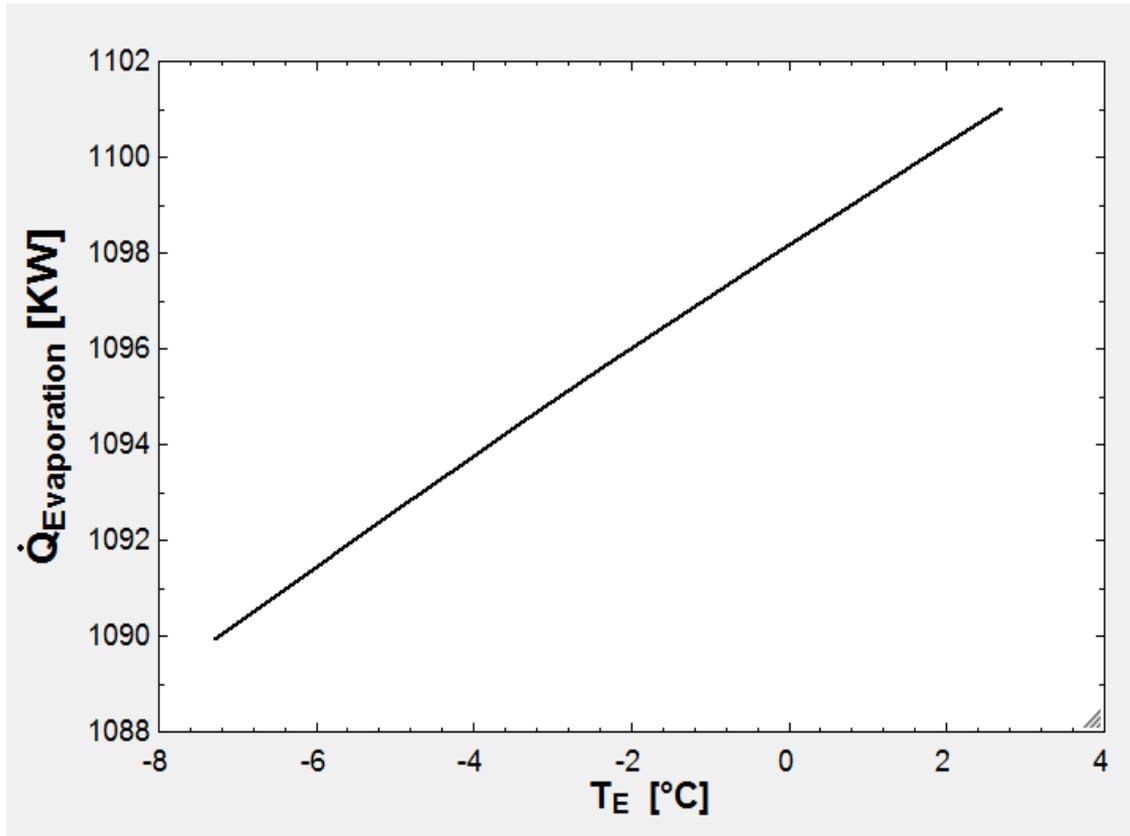


Figure 3.9 : Variation de la puissance de l'évaporation en fonction de la température de froide.

Discussion :

Cette courbe représente la variation de la puissance frigorifique \dot{Q}_f en fonction de la température froide T_e . On note clairement que la puissance d'évaporation (\dot{Q}_f) diminue lorsque la diminution de la température froide, elle est à son minimum 1090KW pour une température d'évaporation $-7,3^\circ\text{C}$ et augmente vers une valeur maximum 1101KW pour une température froide $2,7^\circ\text{C}$, cette augmentation est muni à l'application de relation (1.3), pour une température froide élevé (vers le plus) l'ammoniac absorbe une chaleur plus grande pour deviendra un vapeur saturé que les températures très bas.

En analysant les données démontrées en figure 3.9, nous permet d'identifier un taux augmentation de \dot{Q}_f de presque 1% en allant de $-7,3$ à $2,7$ °C de température froide.

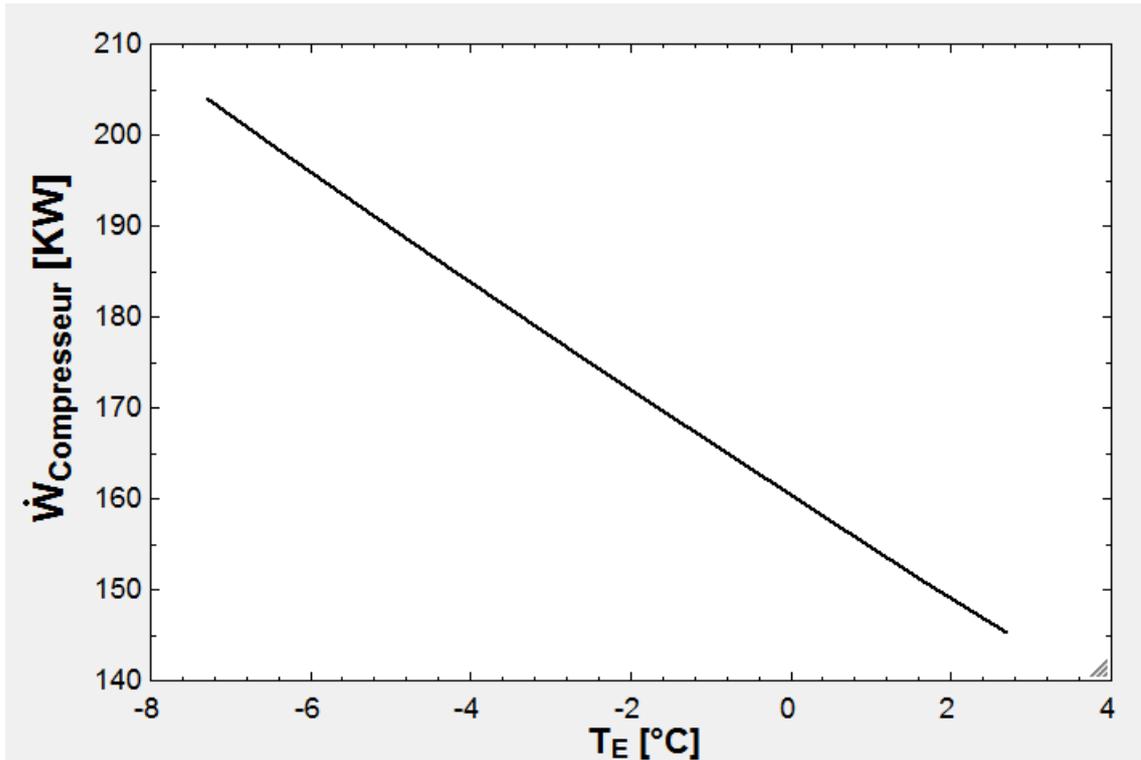


Figure 3.10 : Variation de la puissance du compresseur en fonction de la température de l'évaporation.

Discussion :

Cette figure représente la variation de puissance du compresseur (\dot{W}_c) en fonction de la température d'évaporation (T_e), on remarque que cette machine est fonctionnée à l'influence de température d'évaporation. On note que la puissance est de 204KW pour une température $-7,3^\circ\text{C}$ on aura plus de consommation électrique, tandis qu'en diminuée la température d'évaporation vers $2,7^\circ\text{C}$ la puissance du cette machine est diminuée à 145,2KW. On dit que la relation entre la puissance de condensation et la puissance de compresseur sont proportionnelles au température d'évaporation.

En analysant les données démontrées en figure 3.10, nous permet d'identifier un taux dégradation de \dot{W}_c de 28% en allant de $-7,3$ à $2,7$ °C de température froide.

➤ Variation du COP du cycle en fonction de la température froide (T_e) :

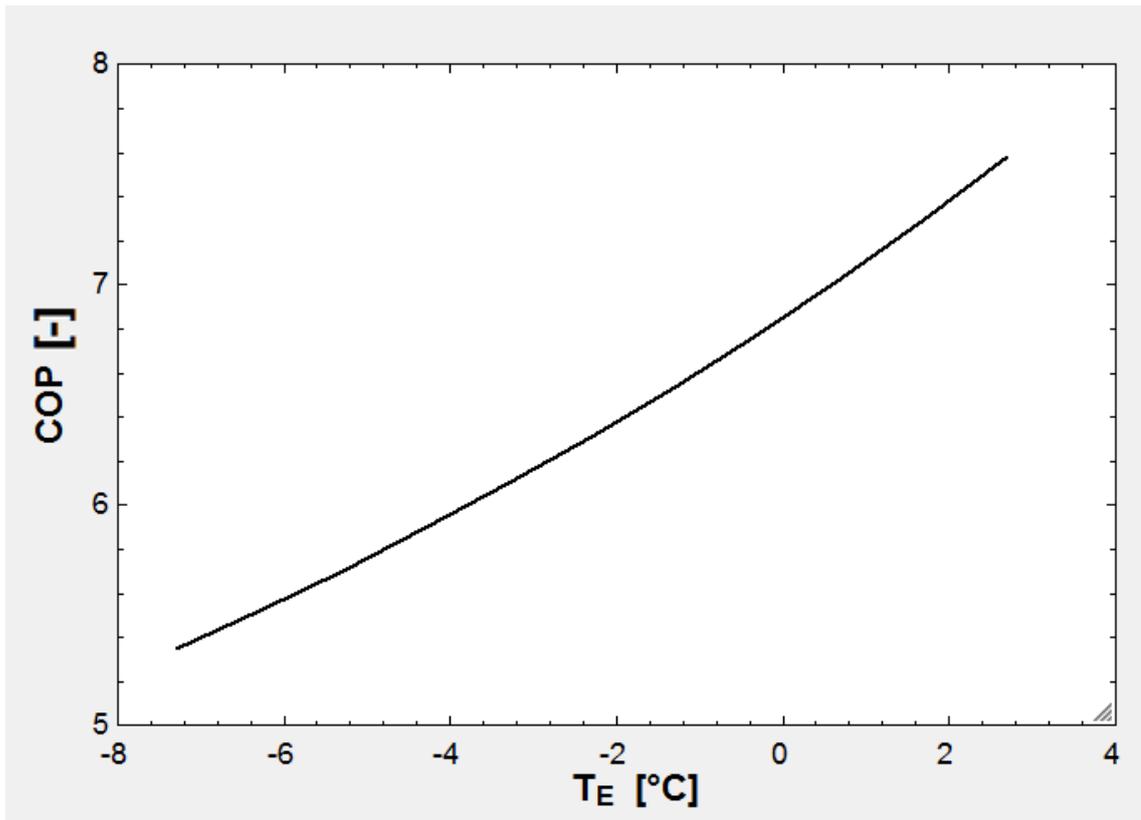


Figure 3.11 : Variation du COP en fonction de la température de l'évaporation.

Discussion :

Cette courbe représente l'évolution du coefficient de performance du cycle en fonction de la température d'évaporation. D'après cette figure, le COP du cycle augmente à une valeur minimale de 5,343 en fonction de la température d'évaporation $-7,3^{\circ}\text{C}$ vers une valeur maximale de 7,583 pour une température de $2,7^{\circ}\text{C}$, ceci est expliqué par l'augmentation de puissance d'évaporateur (voire la figure 3.10) et diminution le travail du compresseur (voire la figure 3.11) selon l'équation (1.4) de COP.

En analysant les données démontrées en figure 3.11, nous permet d'identifier un taux d'augmentation de COP de 29% en allant de $-7,3$ à $2,7^{\circ}\text{C}$ de température froide.

III.2 Calcul des Performances étant par les Données Expérimentales :

Le programme de simulation réalisé suit l'algorithme de calcul suivant :

```

P[1]= 3,92 [Bar]
T[1]= 0 [C°]
R$='Ammonia'
x[1]=1
h[1]=enthalpy(R$, T=T[1]; P=P[1])
s[1]=entropy(R$, T=T[1]; P=P[1])

P[2]= 12,73[Bar]
T[2]= 64,7 [C°]
x[2]=1
h[2]=enthalpy(R$, P=P[2]; T=T[2])
s[2]=entropy(R$, P=P[2]; T=T[2])

P[3]= 13,28[Bar]
T[3]= 34,6 [C°]
x[3]=0
h[3]=enthalpy(R$, T=T[3]; x=x[3])
s[3]=entropy(R$, T=T[3]; x=x[3])

P[4]= 3,92[Bar]
T[4]= -2,3 [C°]
h[4]=enthalpy(R$, x=x[4]; T=T[4])
s[4]=entropy(R$, x=x[4]; T=T[4])
x[4]=0,1364

P[5]=P[1]
T[5]=T[1]
h[5]=h[1]
s[5]=s[1]

m_dot=1,25 [kg/s]
Q_dot_cond/m_dot=h[2]-h[3]
Q_dot_evapt/m_dot=h[1]-h[4]
W_dot_c/m_dot=h[2]-h[1]
W_dot_c_tot/m_dot=(W_dot_c/m_dot)*2
COP = (Q_dot_evapt/m_dot)/(W_dot_c_tot/m_dot) "(Puissance_com/m_dot)"
    
```

Figure 3.12 : Programme de calcul pour l'étude expérimentale.

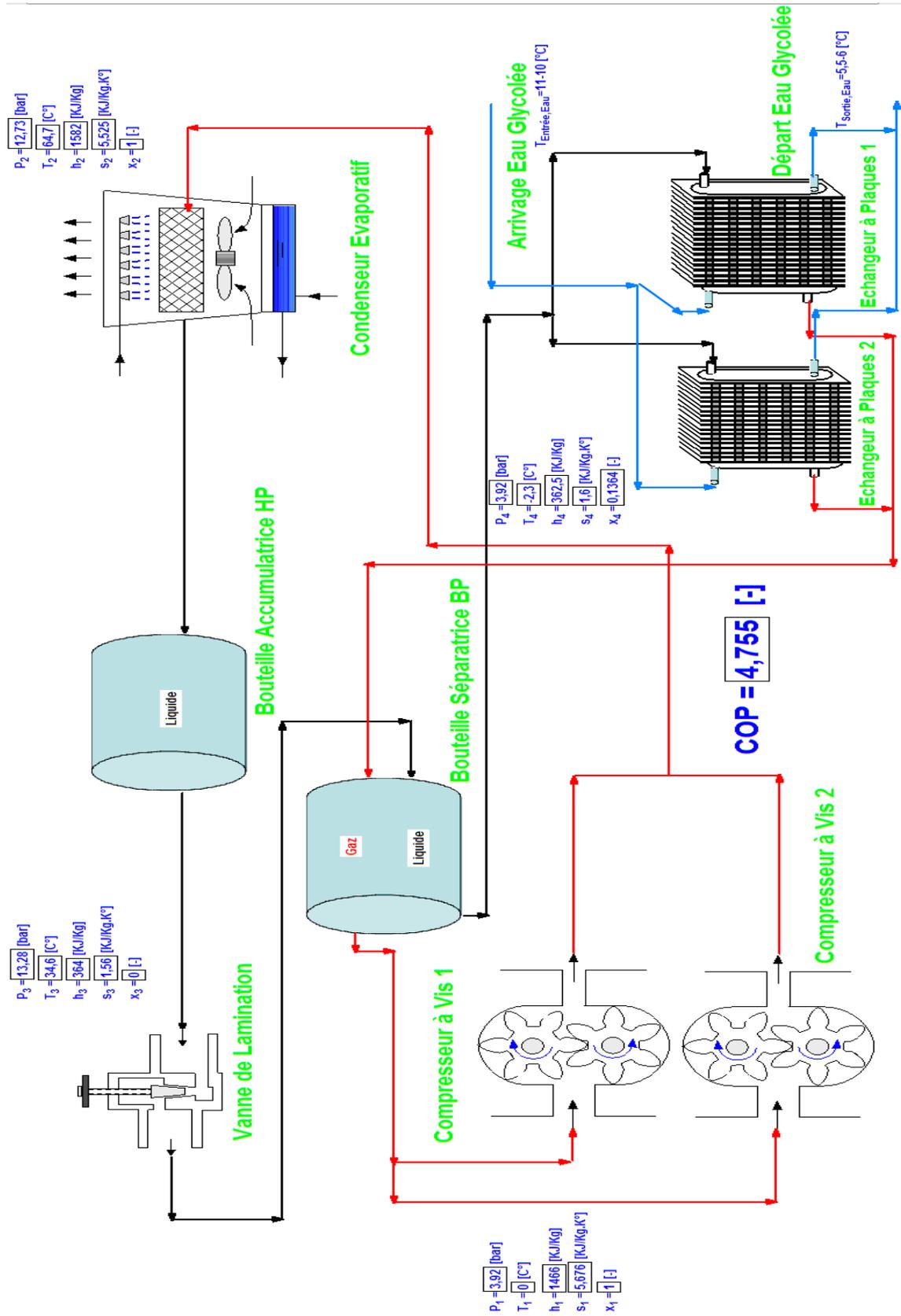


Figure 3.13 : Schéma globale du cycle réel de l'installation frigorifique de FRUITAL-COCACOLA (unité de Rouiba).

Tableau 3.1 : Résultats des calculs de cycle réel.

	hi [KJ/Kg]	Pi [Bar]	Ti [°C]	si [KJ/Kg.°C]	Xi (-)
1	1466	3,92	0	5,676	1
2	1582	12,73	64,7	5,525	1
3	364	13,28	34,6	1,56	0
4	362,5	3,92	-2,3	1,6	0,1364
5	1466	3,92	0	5,676	1

Tableau 3.2 : Températures de l'eau glycolée.

Température d'entrée [°C]	10-11
Température de sortie [°C]	5,5-6

Les résultats de Tableau (3.1) sont présentés ci-dessous :

- **Diagramme PH :**

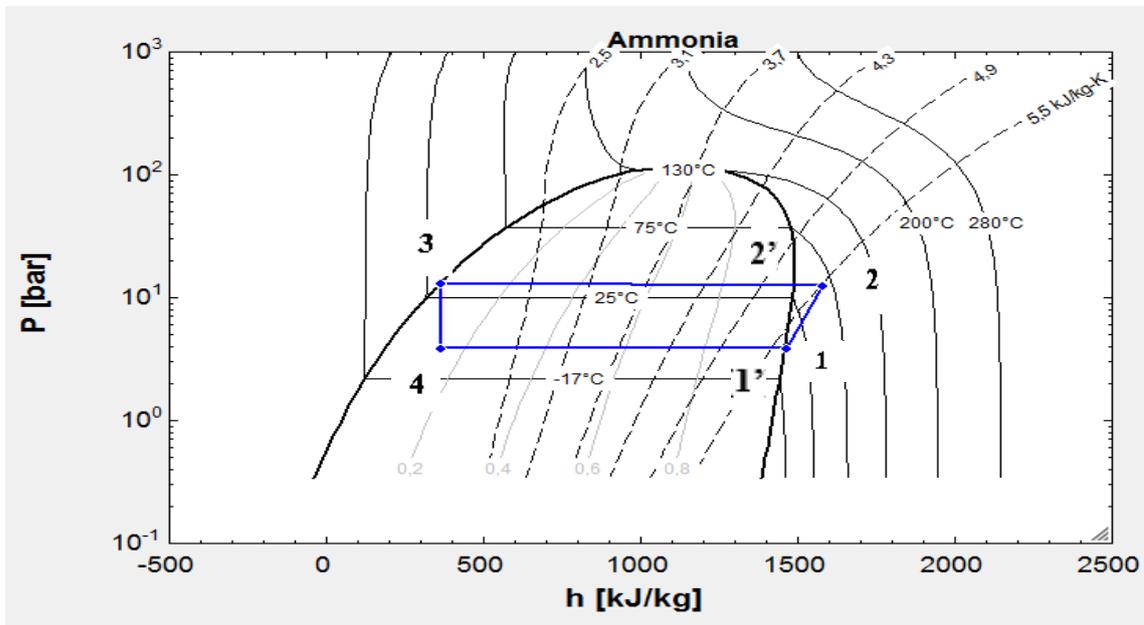


Figure 3.14 : Diagramme PH de cycle réel.

Par l'application de la relation (1.6) et (1.7), on obtient :

$$\Delta T \text{ surchauffe} = T_1 - T \text{ évaporation } (T_{1'}) = 0 + 2,3 = 2,3^\circ\text{C}$$

$$\Delta T \text{ désurchauffe} = T_2 - T \text{ condensation } (T_{2'}) = 64,7 - 34,6 = 30,1^\circ\text{C}$$

III.2.1 L'influence de Débit de Réfrigérant sur les Performances du Système :

➤ Variation des Puissances du Cycle en Fonction de Débit Massique de Réfrigérant :

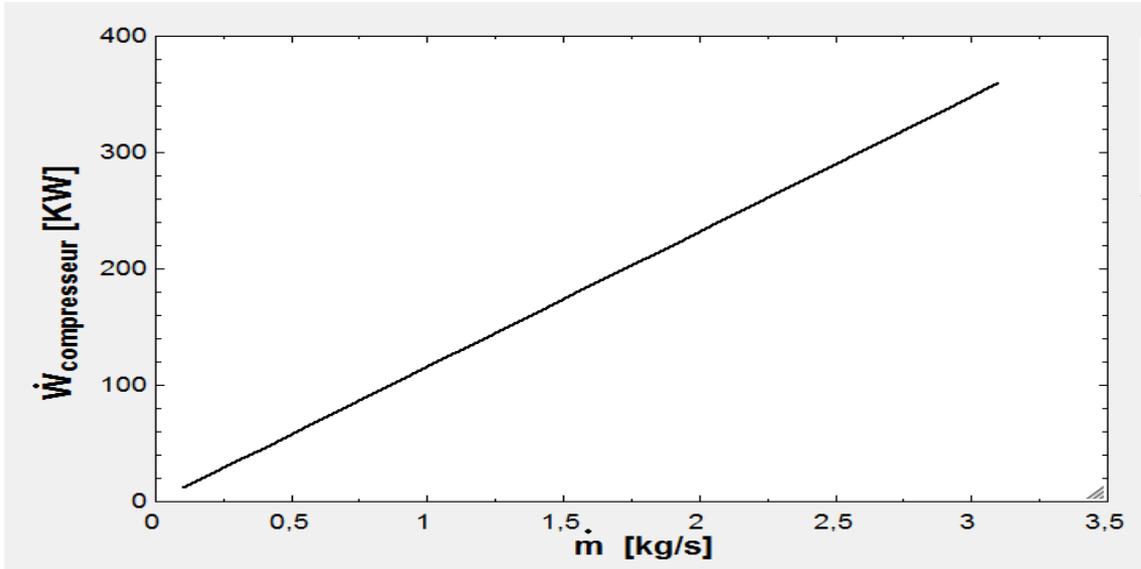


Figure 3.15 : Variation de puissance de compresseur en fonction de débit massique.

Discussion :

Cette courbe représente la variation de puissance du compresseur (\dot{W}_c) en fonction du débit massique du réfrigérant, on remarque que plus de débit est important, plus on aura une forte consommation électrique au niveau du compresseur d'après la relation (1.1).

On note dans cette courbe quand le débit massique du réfrigérant démarre à 0,1 kg/s le compresseur consomme un travail de 11,6KW, tandis qu'en augmentant le débit vers 3kg/s la puissance du compresseur passe à 348,1 kW.

D'après la figure 3.15, on remarque une augmentation de puissance de 96% en allant de 0,1 kg/s à 3kg/s.

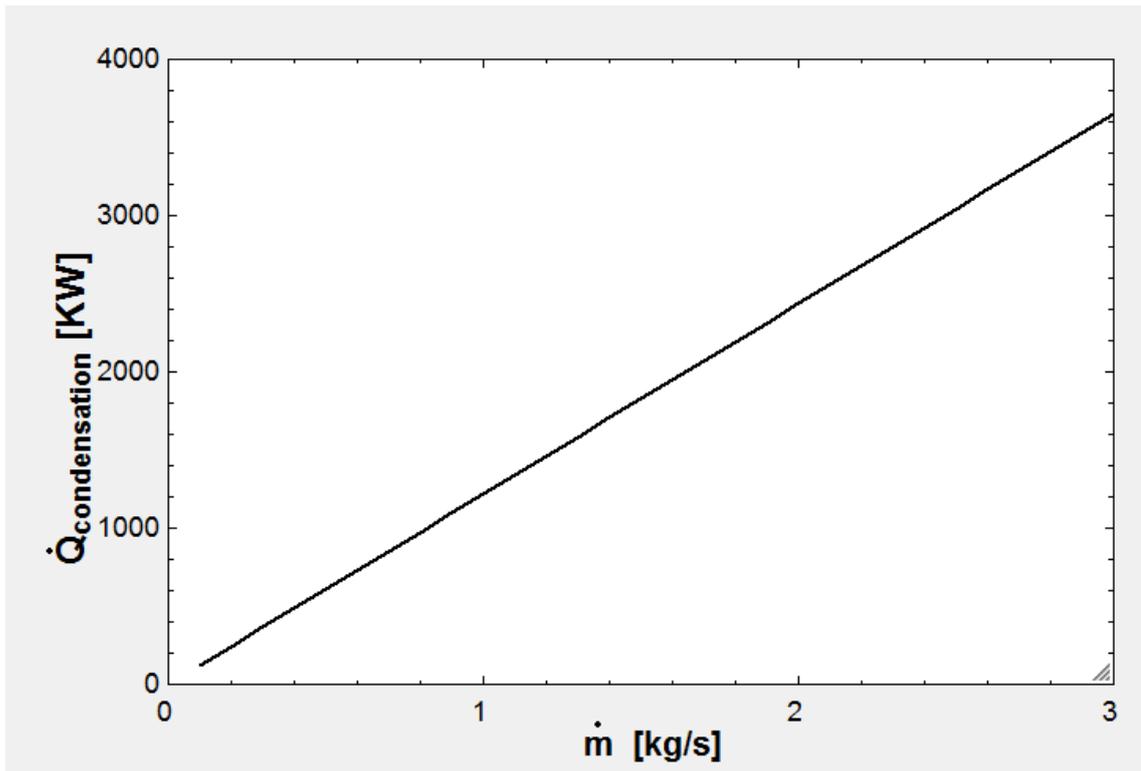


Figure 3.16 : La variation de puissance de condensation en fonction de débit massique.

Discussion :

Cette figure représente la variation de la puissance de condensation (\dot{Q}_c) en fonction de débit massique de réfrigérant, plus de débit plus de condensation c'est-à-dire il existe une relation directe entre le débit et la puissance du condenseur (relation 1.2). On note dans cette courbe le débit 0,1 kg /s la puissance est 121,8 KW, le débit 3kg /s la puissance est 3654KW. On dit que le débit est important.

D'après la figure (3.16), il y a une augmentation de 96% entre 0.1 kg/s et 3kg/s.

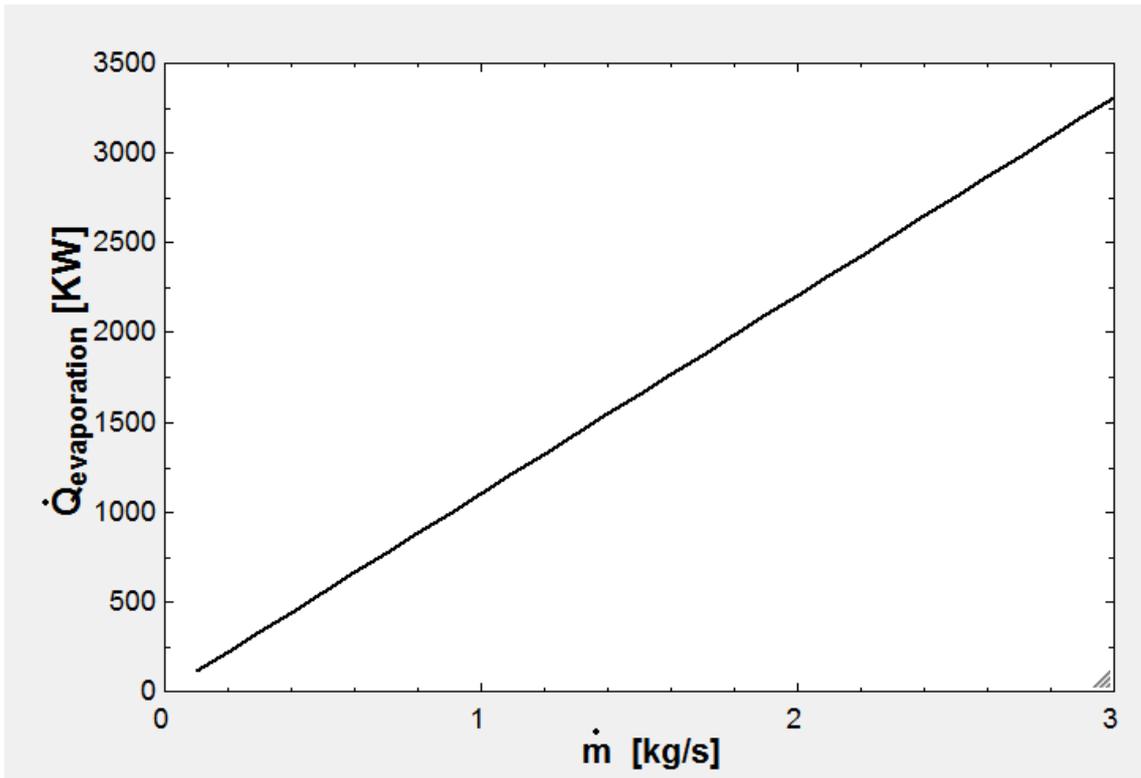


Figure 3.17 : La variation de puissance frigorifique en fonction de débit massique.

Discussion :

Cette figure représente la puissance frigorifique en fonction de débit du réfrigérant, on remarque que la puissance augmente quand le débit augmente, alors quand le débit augmente, la puissance augmente aussi d'après la relation (1.3), donc on peut dire que le débit est très important.

On note dans cette courbe que quand le débit est à 0,1 kg/s la puissance frigorifique était de 110,3 kW tandis qu'en augmentant le débit jusqu'à 3 kg/s la puissance atteint la valeur 3310 kW. Une augmentation de 96% entre 0,1 kg/s et 3 kg/s est remarquée.

III.3 Amélioration :

III.3.1 Problématique Générale :

Durant la période de notre stage pratique de 6 mois, nous avons constaté lors de nos déplacements et contacts avec l'équipe de maintenance de l'entreprise une diminution fréquente du niveau d'huile dans le séparateur et réservoir d'huile de chaque compresseur, et lors de notre examen et étude de la station, nous avons remarqué une augmentation du niveau d'huile dans le pot d'huile, ce phénomène s'appelle l'immigration d'huile et ses causes principales sont l'injection d'ammoniac liquide pour refroidir l'huile de lubrification et la mauvaise filtration (filtre coalesceurs) au cours de temps (dernière changement c'était en 2015), les conséquences de cette immigration sont la diminution de l'échange thermique entre l'ammoniac et l'eau glycolée par la création d'une couche d'isolation .

A chaque vidange du pot d'huile et au cours des différentes interventions afin de régler les pannes et les fuites , nous constatant une diminution de la charge d' NH_3 dans l'installation, ce qui cause une diminution de la quantité d' NH_3 envoyé vers les échangeurs à plaques donc un mauvais refroidissement de l'eau et au même temps une augmentation de consommation électrique absorbée par les compresseurs à vis, d'une façon générale une diminution de rendement énergétique, donc un appoint d' NH_3 est nécessaire . Après cet appoint, l'équipe maintenance constater une augmentation de la HP qui peut perturber le bon fonctionnement de station, cette augmentation peut atteindre plus de 14 bar jusqu'à la limitation au bien arrêt de la station. La cause majeure de cette augmentation est la présence de l'humidité et les incondensables importés des bouteilles d'ammoniac lors le chargement.

Pour régler ces problèmes et pour le bon fonctionnement de la station frigorifique, nous avons proposés des séries d'améliorations qui sont les suivis :

III.3.1.1 Partie 01 :

III.3.1.1.A Filtre Déshydrateur de type WDO :

➤ Définition :

Le WDO est un séparateur destiné à débarrasser le réfrigérant de toute présence d'eau, d'impuretés et de dépôts d'huile.

La séparation des éléments s'effectue à l'aide de 2 résistances de réchauffage électrique d'une puissance de 400 W unitaire ceinturant le séparateur.



Figure 3.18 : Une vue réelle de gauche d'un filtre déshydrateur de type WDO.



Figure 3.19 : Une vue réelle de droite d'un filtre déshydrateur de type WDO.

➤ **Principe de Fonctionnement :**

On relie cette filtre avec la bouteille séparatrice BP, l'alimentation en ammoniac liquide basse pression sera au-dessous de bouteille et l'envoi d'ammoniac gazeux est

vers le côté haut de la bouteille (au niveau d'aspiration des compresseurs). On relie cette filtre également avec source d'électricité d'une tension de 220V et de fréquence de 50 HZ (similaire à la fréquence de réseau électrique Algérien) après on mit le filtre en marche.

Lors la mise en marche de cette filtre, on remarque qu'on un voyant électrique de 'Remplissage' est allumé, ça veut dire le filtre est en train de remplir en ammoniac liquide BP par l'ouverture d'une électrovanne jusqu'à un volume de 100L.

Après le remplissage, on remarque qu'un autre voyant électrique de 'Chauffage' allume lui aussi signifie que les résistances électriques sont allumées est en train de chauffé l'ammoniac jusqu'à éteint la température de 40°C, cette température est suffisante pour évaporer l'ammoniac.

Maintenant, l'ammoniac commence à évaporer et le niveau de ce dernier va descendre (on remarque ça dans l'indicateur de niveau), l'ammoniac de phase gazeuse va monter en haut jusqu'à éteindre une autre électrovanne, cet appareil s'appelle l'électrovanne à pression constante, son travail de détecter une pression similaire à la pression de la bouteille séparatrice BP donc quand elle reçoit cette pression elle ouvre et laisse le gaz partir.

Pas Finalement, on remarque que le niveau de l'ammoniac est au bas et en suite le voyant électrique de 'Fin de Cycle' allume, ça veut dire l'opération est fini (un seul cycle) alors l'opération ça va répétera jusqu'à la cinquième cycle.

Finalement, on mit le filtre en arrêt et on ouvre la vanne à poids pour purger l'eau dans bac, on arrête au minute l'ammoniac commence d'échapper avec l'eau. On répète l'opération jusqu'à remarquer que la quantité d'eau commence diminuer en fonction de l'ammoniac évaporer jusqu'à son éteindre le point de pureté (ammoniac déshydraté).

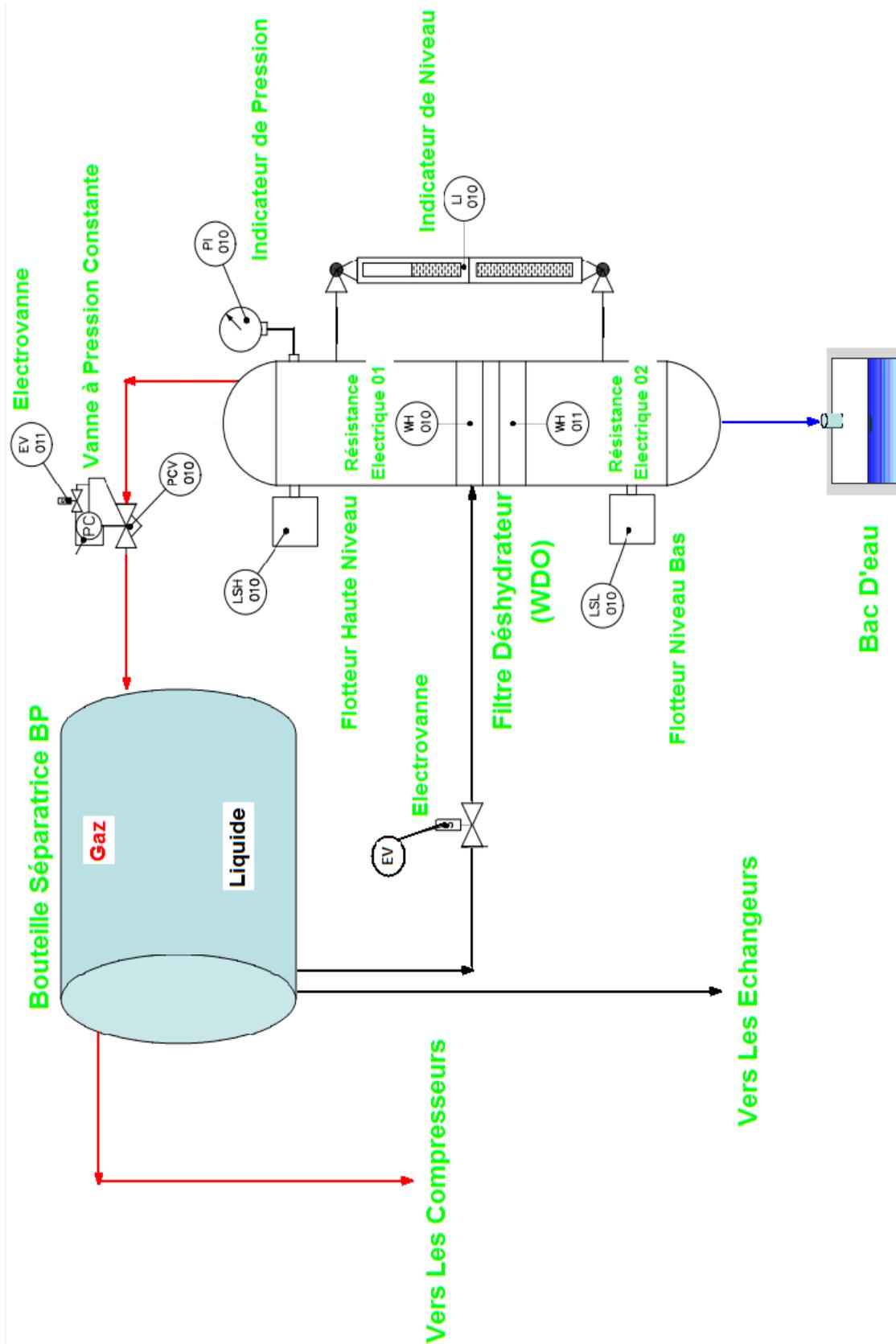


Figure 3.20 : Schéma d'une amélioration en ajoutant filtre déshydrateur de type WDO.

[45]

III.3.1.2 Partie 02 :

Pour le problème de l'immigration d'huile, nous proposons :

III.3.1.2.A Les Filtres Coalesceurs :

Remplacement des filtres coalesceurs ancien modèle au niveau de séparateur d'huile avec des filtres très efficaces de nouvelle génération.

➤ **Définition :**

Un coalesceur est un équipement industriel utilisé dans les industries pétrochimiques et de traitement du pétrole et du gaz pour effectuer la coalescence. La coalescence est le processus qui provoque une agglomération (rassemblement) d'aérosols liquides pour former des gouttelettes plus grosses qui sont suffisamment grosses pour être drainées par gravité. Un coalesceur fonctionne à l'inverse d'un émulsifiant qui crée des émulsions.

Un coalesceur peut être utilisé seul ou en tant que composant d'une unité de séparation plus grande. Le choix du bon type d'équipement dépendra de la nature de la substance à séparer. Par exemple, un coalesceur d'huile ou un coalesceur de carburant peut être utilisé pour récupérer respectivement du pétrole ou du carburant à partir d'un mélange eau-huile, tandis qu'un coalesceur de gaz est utilisé pour séparer les gaz des émulsions gaz-carburant ou gaz-eau.



Figure 3.21 : L'emplacement des filtres coalesceurs ancien modèle au niveau de séparateur d'huile (une vue réelle).

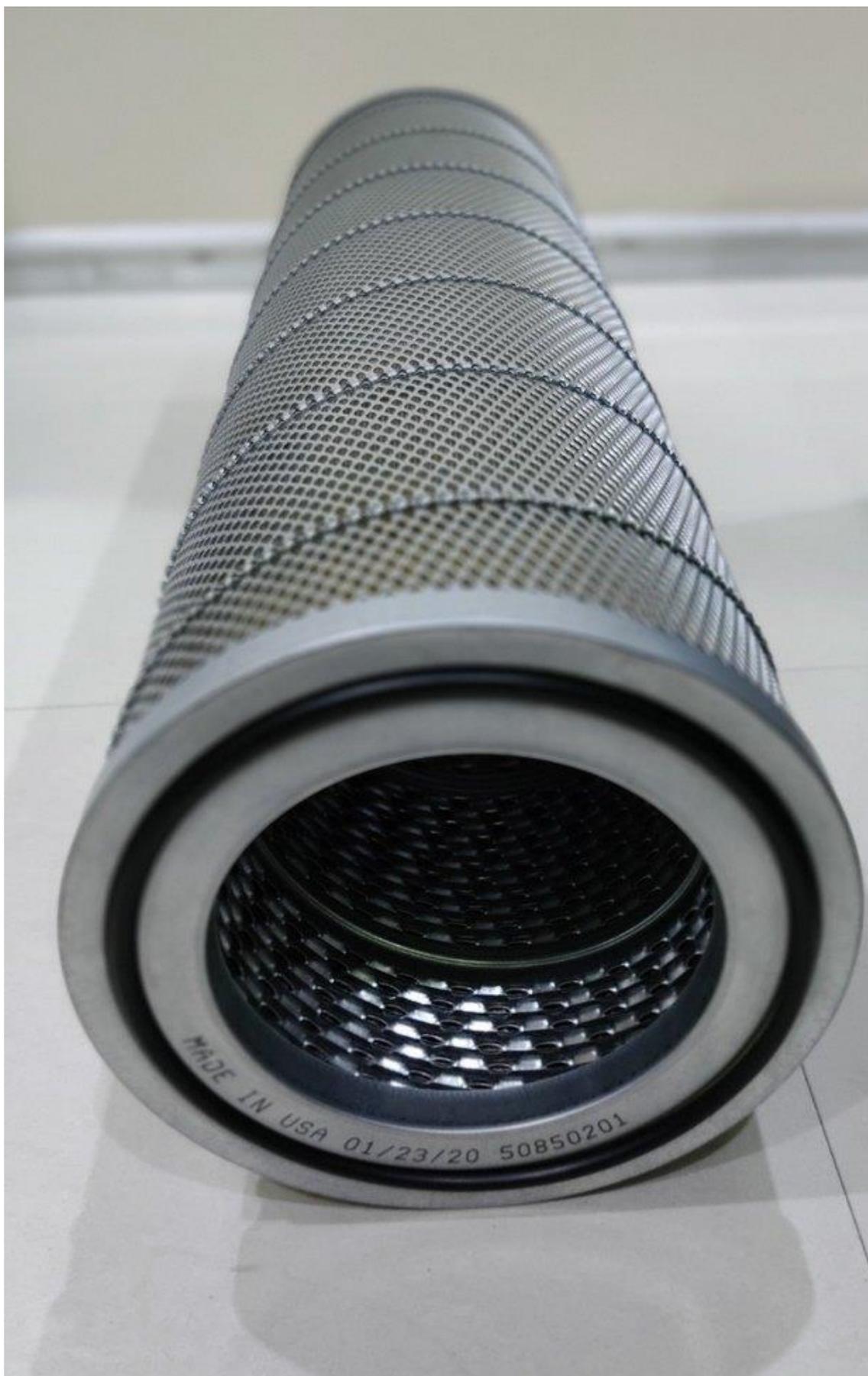


Figure 3.22 : Filtres coalesceurs nouvelles génération. [44]

➤ Principe de Fonctionnement de ces Filtres :

Typiquement, le mécanisme de séparation se compose d'une série de murs défecteurs ou de filtres situés à divers points du système. Le système est conçu de telle sorte que les dispositifs de séparation piègent les différents composants du mélange à intervalles.

Dans le cas de la séparation ammoniac-huile, les fibres de chicane séparent les molécules d'huile les plus denses et permettent aux molécules d'ammoniac de diffuser et pour que l'huile fusionne à un point de collecte sous les murs défecteurs où elle peut être drainée mécaniquement ou réinjecter vers le compresseur. [43]

III.3.1.2.B Refroidissement D'huile :

Pour le refroidissement d'huile, nous proposons trois améliorations et à l'entreprise (FRUITAL-COCACOLA) le choix de choisir entre ces derniers :

- **Refroidissement D'huile par L'échange Thermique avec L'ammoniac :**

➤ Matériels à Ajouter :

Nous proposons d'ajouter quelques éléments afin de refroidir l'huile par l'échange thermique avec l'ammoniac :

- ✓ Un échangeur à plaques.
- ✓ Un détendeur thermostatique.
- ✓ Une vanne à trois voies thermostatique.
- ✓ Une électrovanne.
- ✓ Une Sonde électrique.

➤ Principe de Fonctionnement :

Lors la marche de l'installation, le compresseur à vis va comprimer le mélange ammoniac-huile vers le condenseur évaporatif, mais avant d'arriver au condenseur on doit séparer le mélange pour obtenir ammoniac brut, donc le mélange va entrer premièrement dans un séparateur d'huile afin de filtrer l'huile de l'ammoniac.

Le travail d'huile essentiellement est de refroidir les organes intérieurs de compresseur alors elle va gagner une quantité de chaleur (sa température éteint 65°C ou plus), cette quantité on veut la dégager pour que l'huile peut refaire son travail proprement par la refroidir aussi.

Chapitre 03 : Résultats, Interprétations et Améliorations

Pour le côté de l'ammoniac (ammoniac venu de la bouteille Accumulatrice HP), on doit choisir un détendeur thermostatique peut diminuer la température d'huile moins de 65°C et la température et pression de sortie de l'ammoniac doit être [-2,3 ;0] °C et [3 ;4] Bar. Après la détente l'ammoniac liquide (avec petit pourcentage d'un teneur en vapeur), l'ammoniac va entrer dans un échangeur à plaques et absorbe la chaleur de d'huile, cette chaleur a la capacité de changer la phase de R717 en phase gazeux et continuera son parcours vers la bouteille séparatrice BP. Il y a une sonde électrique situé à la sortie de séparateur d'huile (coté huile), si elle détecte une $T < 65^{\circ}\text{C}$ donc elle va actionner une électrovanne situé avant le détendeur thermostatique à fermer la vanne pour arrêter l'écoulement (il n'y a pas d'échange thermique).

Pour l'autre côté d'huile, il va entrer dans l'échangeur à plaques et cède une quantité de chaleur vers l'ammoniac (l'autre côté d'échangeur) alors effectivement la température d'huile va diminuer et elle va réinjecter dans le compresseur au niveau d'aspiration par une différence de pression (entre le refoulement et aspiration de compresseur). On a également une vanne thermostatique à trois voies, si elle détecte une température $T \geq 65^{\circ}\text{C}$, elle ouvre la voie vers l'échangeur et ferme la voie directe vers le compresseur mais si elle détecte $T < 65^{\circ}\text{C}$, elle ferme la voie vers l'échangeur et réinjecte directement l'huile dans le compresseur (Voir figure 3.23).

On a effectivement une sonde électrique à la sortie de séparateur d'huile (coté huile) pour mesurer la température de sortie d'huile, si $T \geq 65^{\circ}\text{C}$ donc la sonde va indiquer la température à la régulation alors le PID va ouvrir l'électrovanne pour l'application d'échange, sinon si la $T < 65^{\circ}\text{C}$ alors l'électrovanne reste fermée et l'ammoniac reste dans les bouteilles.

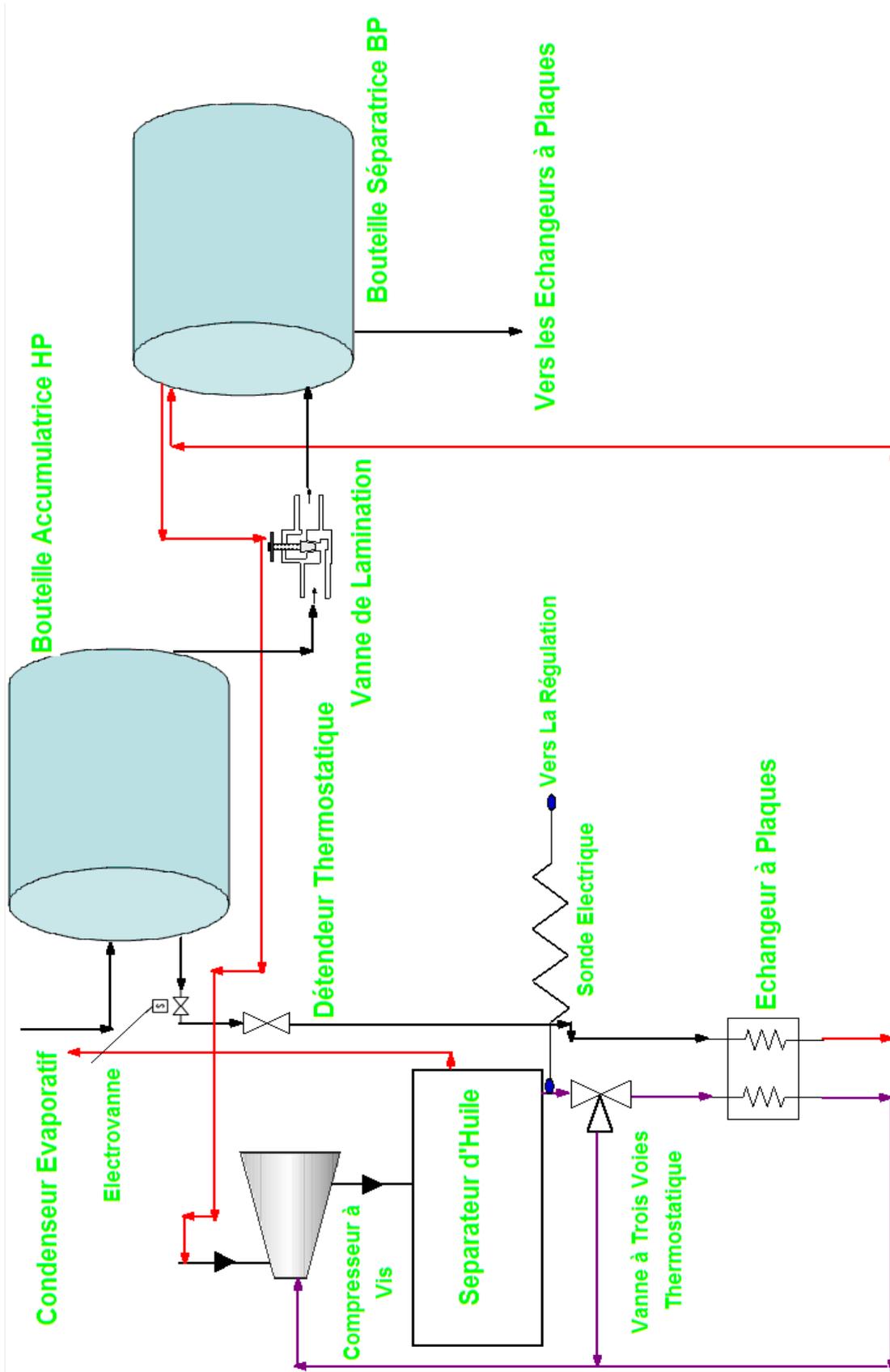


Figure 3.23 : Un schéma d'une amélioration pour refroidir l'huile par l'échange thermique avec l'ammoniac contenant dans l'installation.

- **Refroidissement D'huile par le Phénomène de Thermosiphon :**

- **Définition de Phénomène de Thermosiphon :**

Un thermosiphon est le phénomène de circulation naturelle d'un liquide dans une installation du fait de la variation de sa masse volumique en fonction de la température.

Dans un circuit de chauffage en thermosiphon, le liquide caloporteur réchauffé dans le générateur thermique, plus léger, monte vers un échangeur situé en partie haute de l'installation pour céder ses calories à l'air ambiant. Le fluide caloporteur refroidi redescend naturellement vers le bas de l'installation pour être réchauffé par le générateur et recommencer le cycle en continu. [46]

- **Matériels à Ajouter :**

- ✓ Un échangeur à plaques.
- ✓ Une vanne à trois voies thermostatique.
- ✓ Une bouteille séparatrice HP.
- ✓ Une sonde électrique.
- ✓ Une électrovanne.

- **Principe de Fonctionnement :**

Lors la marche de l'installation, le compresseur à vis va comprimer le mélange ammoniac-huile vers le condenseur évaporatif, mais avant d'arriver au condenseur on doit séparer le mélange pour obtenir ammoniac brut, donc le mélange va entrer premièrement dans un séparateur d'huile afin de filtrer l'huile de l'ammoniac.

Le travail d'huile essentiellement est de refroidir les organes intérieurs de compresseur alors elle va gagner une quantité de chaleur (sa température éteint 65°C ou plus), cette quantité on veut la dégager pour que l'huile peut refaire son travail proprement par la refroidir aussi.

Pour le côté ammoniac, le réfrigérant gazeux dans le condenseur évaporatif cède une quantité de chaleur vers l'extérieure et transforme en liquide et deviendra refroidi (par rapport à l'huile), après le liquide va circuler vers la bouteille séparatrice HP puis vers la bouteille accumulatrice HP. La bouteille HP laisse une quantité de liquide d'ammoniac circule vers l'échangeur de chaleur en absorbant la quantité de chaleur, cette quantité va changer l'état de l'ammoniac en ré-vaporiser en autre fois, donc le gaz

de R717 va en haut vers la bouteille séparatrice HP puis vers le condenseur évaporatif, et l'opération se refaire.

Pour l'autre côté d'huile, il va entrer dans l'échangeur à plaques et cède une quantité de chaleur vers l'ammoniac (l'autre côté d'échangeur) alors effectivement la température d'huile va diminuer et elle va réinjecter dans le compresseur au niveau d'aspiration par une différence de pression (entre le refoulement et aspiration de compresseur). On a également une vanne thermostatique à trois voies, si elle détecte une température $T \geq 65^{\circ}\text{C}$, elle ouvre la voie vers l'échangeur et ferme la voie directe vers le compresseur mais si elle détecte $T < 65^{\circ}\text{C}$, elle ferme la voie vers l'échangeur et réinjecte directement l'huile dans le compresseur (Voir figure 3.24).

On a effectivement une sonde électrique à la sortie de séparateur d'huile (coté huile) pour mesurer la température de sortie d'huile, si $T \geq 65^{\circ}\text{C}$ donc la sonde va indiquer la température à la régulation alors le PID va ouvrir l'électrovanne pour l'application d'échange, sinon si la $T < 65^{\circ}\text{C}$ alors l'électrovanne reste fermée et l'ammoniac reste dans les bouteilles.

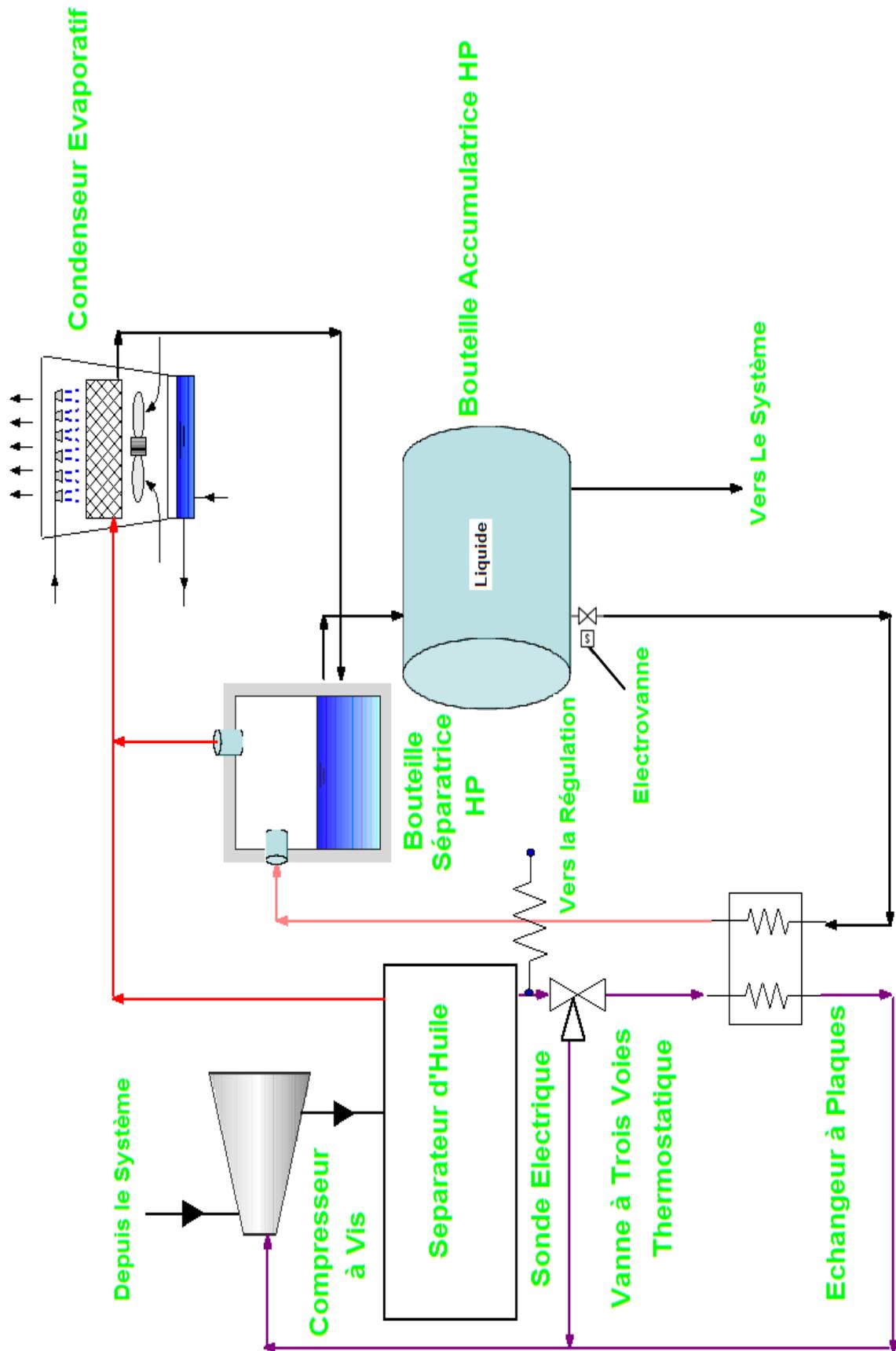


Figure 3.24 : Un schéma d'une amélioration pour refroidir l'huile par le phénomène de Thermosiphon.

- **Refroidissement D'huile par L'eau :**

- **Matériels à Ajouter :**

- ✓ Un échangeur à plaque Contre-Courant. [52]
- ✓ Une pompe à eau. [51]
- ✓ Une vanne à trois voies thermostatique.

- **Application Numérique :**

On a comme données :

-Température d'entrée d'huile (source chaude) : $T_{Ce} = 65^{\circ}C$.

-Température de sortie d'huile (source chaude) : $T_{Cs} = 35^{\circ}C$.

-Température d'entrée d'eau glycolée (source froide) : $T_{Fe} = 6^{\circ}C$.

-On propose la température de sortie d'eau glycolée est : $T_{Fs} = 13^{\circ}C$ afin de conclure le débit massique d'eau glycolée.

-Débit massique d'huile : $\dot{m}_{huile} = 0,30 \frac{kg}{s}$. [49]

-Nous prendrons les caractéristiques d'une autre l'huile de lubrification similaire, Chaleur spécifique à pression constante d'huile : $C_{p_{huile}} = 2800 \frac{J}{kg \cdot C}$. [48]

-Chaleur spécifique à pression constante d'eau glycolée : $C_{p_{eau}} = 3860 \frac{J}{kg \cdot C}$. [36]

-Masse volumique d'huile : $\rho_{huile} = 860 \frac{kg}{m^3}$. [47]

-On fixe la valeur de coefficient d'échange globale dans un intervalle de $U \in [100 ; 400] W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ donc on prend : $U = 250 \frac{W}{m^2 \cdot C}$.

-Masse volumique d'eau glycolée : $\rho_{eau} = 1037 \frac{kg}{m^3}$. [36]

On calcule le débit volumique de la pompe d'huile :

$$Qv_{huile} = \frac{(\dot{m}_{huile} * 3600)}{\rho_{huile}} \longrightarrow Qv_{huile} = 1,256 \frac{m^3}{h}.$$

On applique la relation (2.5), on obtient :

$$Q = \dot{m}_{huile} * C_{p_{huile}} * (T_{Ce} - T_{Cs}) \longrightarrow Q = 25200 W.$$

On applique l'inverse de la relation (2.4) afin de calculer le débit massique d'eau glycolée :

$$\dot{m}_{eau} = \frac{Q}{Cp_{eau}*(TFs-TFe)} \longrightarrow \boxed{\dot{m}_{eau} = 0,9326 \frac{kg}{s}}$$

On conclure d'après cette résultat le débit volumique de la pompe à eau :

$$Qv_{eau} = \frac{(\dot{m}_{eau}*3600)}{\rho_{eau}} \longrightarrow \boxed{Qv_{eau} = 3,238 \frac{m^3}{h}}$$

On veut une pompe à eau qu'elle peut servir les deux échangeurs à plaques (compresseur à vis 1 et 2) alors :

$$Qv_{eau;totale} = Qv_{eau} * 2 \longrightarrow \boxed{Qv_{eau;totale} = 6,475 \frac{m^3}{h}}$$

D'après la relation (2.7), on obtient :

$$DTLM = \frac{(Tce-TFs)-(Tcs-TFe)}{\ln \frac{(Tce-TFs)}{(Tcs-TFe)}} \longrightarrow \boxed{DTLM = 39,39^{\circ}C}$$

D'après la relation (2.13), on obtient :

$$Efficacité = \frac{\dot{m}_{huile}*Cp_{huile}*(Tce-Tcs)}{\dot{m}_{huile}*Cp_{huile}*(Tce-TFe)} \longrightarrow \boxed{Efficacité = 0,5085}$$

D'après l'inverse de la relation (2.6) pour calculer la surface d'échange de l'échangeur à plaques, on obtient :

$$S = \frac{Q}{DTLM*U} \longrightarrow \boxed{S = 2,559 m^2}$$

➤ Principe de Fonctionnement :

Lors la marche de l'installation, le compresseur à vis va comprimer le mélange ammoniac-huile vers le condenseur évaporatif, mais avant d'arriver au condenseur on doit séparer le mélange pour obtenir ammoniac brut, donc le mélange va entrer premièrement dans un séparateur d'huile afin de filtrer l'huile de l'ammoniac.

Le travail d'huile essentiellement est de lubrifier ainsi de refroidir les organes intérieurs du compresseur alors elle va gagner une certaine quantité de chaleur d'une valeur de 25,2 kW (sa température atteint 65°C ou plus), cette quantité doit être évacuée pour assurer les bonnes performances de cette dernière.

Pour le côté d'huile (source chaude), il va entrer dans l'échangeur à plaques contre-courant et cède une quantité de chaleur vers l'eau glycolée (l'autre côté de

l'échangeur) alors effectivement la température d'huile va diminuer de la valeur de 65°C jusqu'à 35°C et cette huile est ensuite dirigée vers le compresseur au niveau d'aspiration par une différence de pression (entre le refoulement et l'aspiration). On a également une vanne thermostatique à trois voies, si elle détecte une température supérieure à 65°C, elle ouvre la voie vers l'échangeur et ferme la voie vers le compresseur, contrairement (si $T < 65^\circ\text{C}$), l'huile est dirigée directement vers le compresseur.

Pour l'autre côté, l'eau glycolée est obtenue directement de la cuve avec une température d'entrée de 6°C (source froide) à l'aide d'une pompe centrifuge d'un débit volumique de 6,475 m³/h (une pompe de diamètre 2,54 cm soit pour l'aspiration ou le refoulement) dans un grand tube de 5,08 cm qui est ensuite divisé en deux tubes de diamètre 2,54 cm, chaque tube vers un échangeur à plaques pour absorber la quantité de chaleur cédée par l'huile afin de la refroidir (25,200 KW). A la sortie, l'eau retournera avec une température de 13°C et les deux tubes sont collectés vers la cuve d'eau glycolée (Voir figure 3.25).

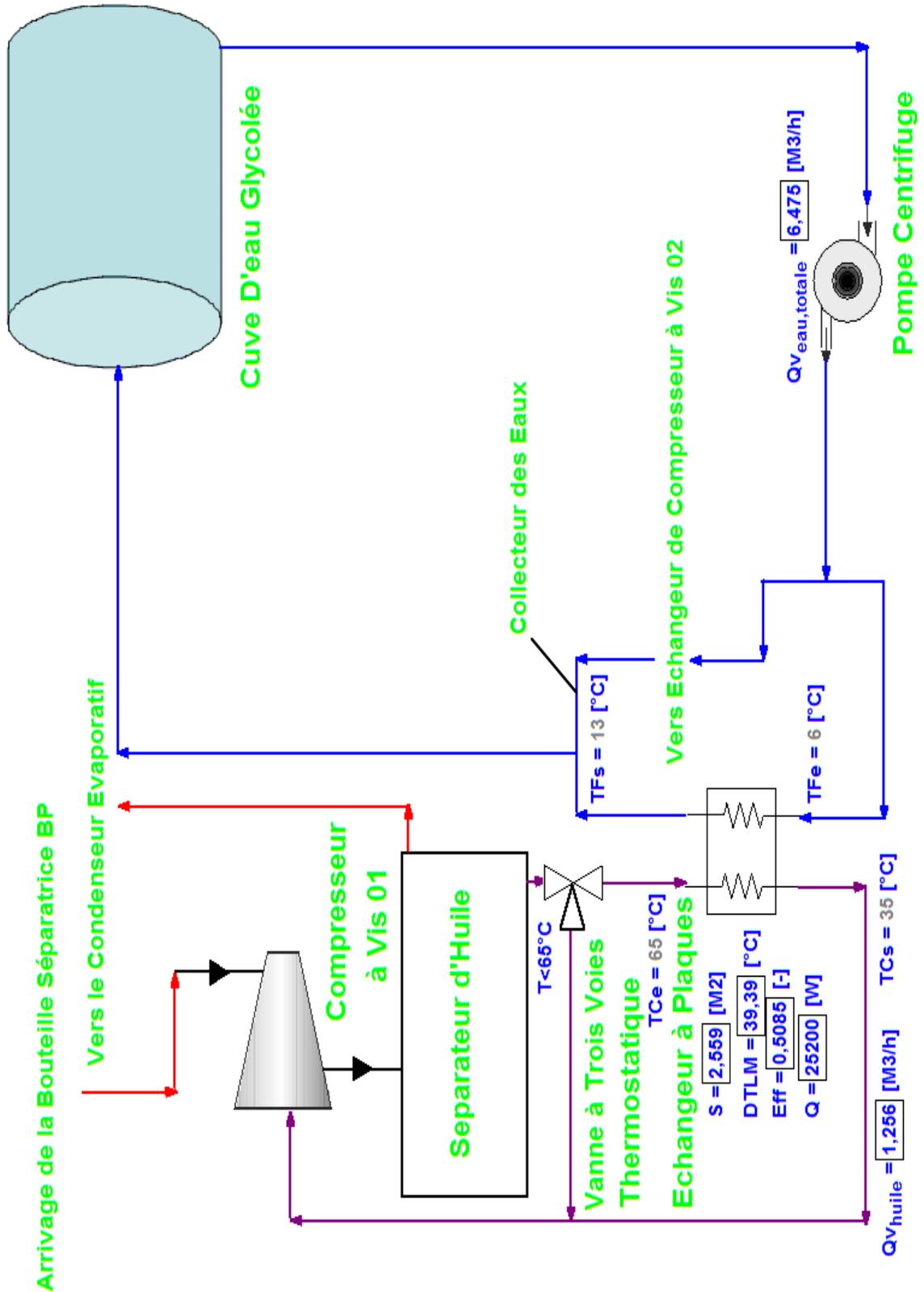


Figure 3.25 : Un schéma d'une amélioration pour refroidir l'huile par l'eau glycolée.

➤ **L'influence de la Température de Sortie Chaude sur les Performances de L'échangeur à Plaques :**

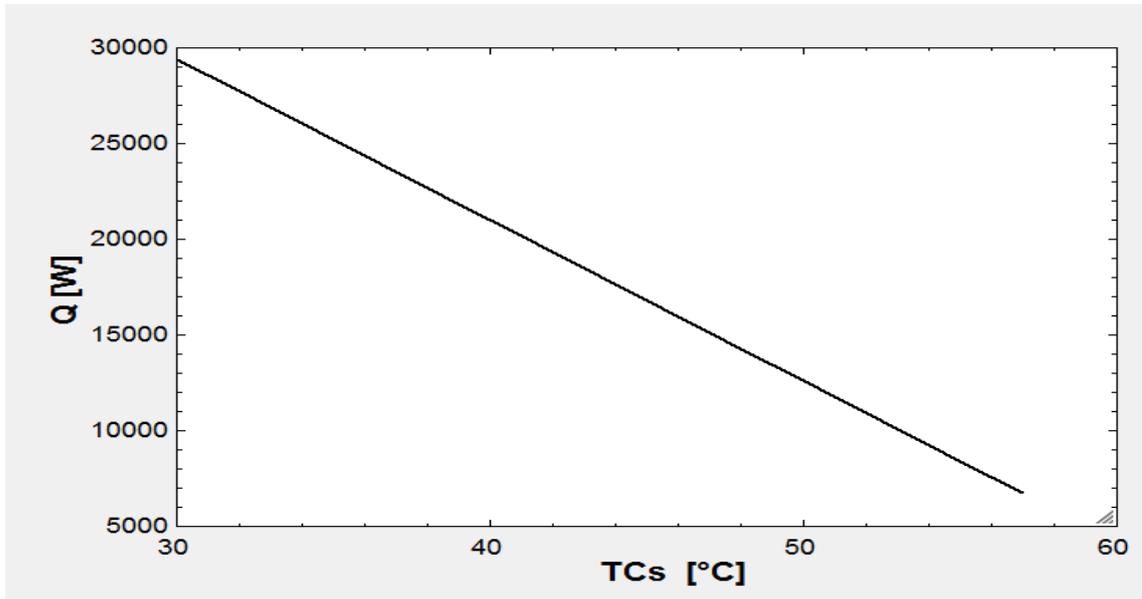


Figure 3.26 : La variation de la puissance de chaleur cédée par l'huile en fonction de la température chaude de sortie.

Discussion :

Cette figure représente la variation de la puissance d'huile en fonction de la température chaude à la sortie de l'échangeur. On remarque la puissance d'huile est 29,400 KW pour une température de sortie 30°C puis elle diminue et atteind 6720W quand la température augmente jusqu'à 57. Cela est interprété par la différence de température entre la source chaude et la source froide qui deviens mois important en augmentant la température de source chaude (voir l'équation (2.5)).

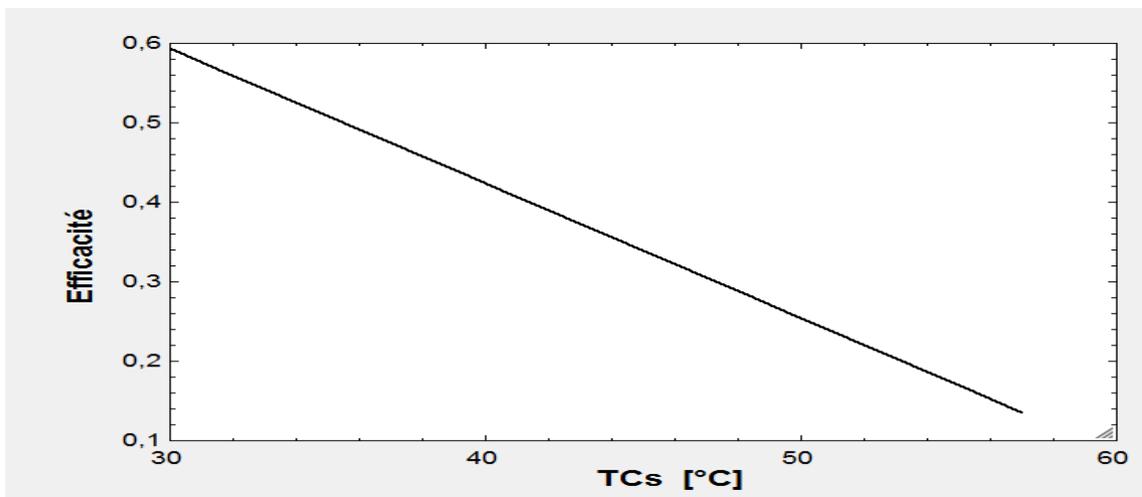


Figure 3.27 : La variation d'efficacité en fonction de la température chaude de la sortie de l'échangeur.

Discussion :

Cette figure représente la variation d'efficacité en fonction de la température chaude de la sortie de l'échangeur TCs, on note que l'efficacité est à son maximum à 59,32 % pour une température de 30°C puis elle est diminuée jusqu'à atteindre 13,56% pour une température de 57°C. Cela est une baisse de puissance échangée en augmentant la température de sortie de l'huile (figure 3.26), voir l'équation de DTLM (l'équation 2.7) et l'efficacité (l'équation 2.13).

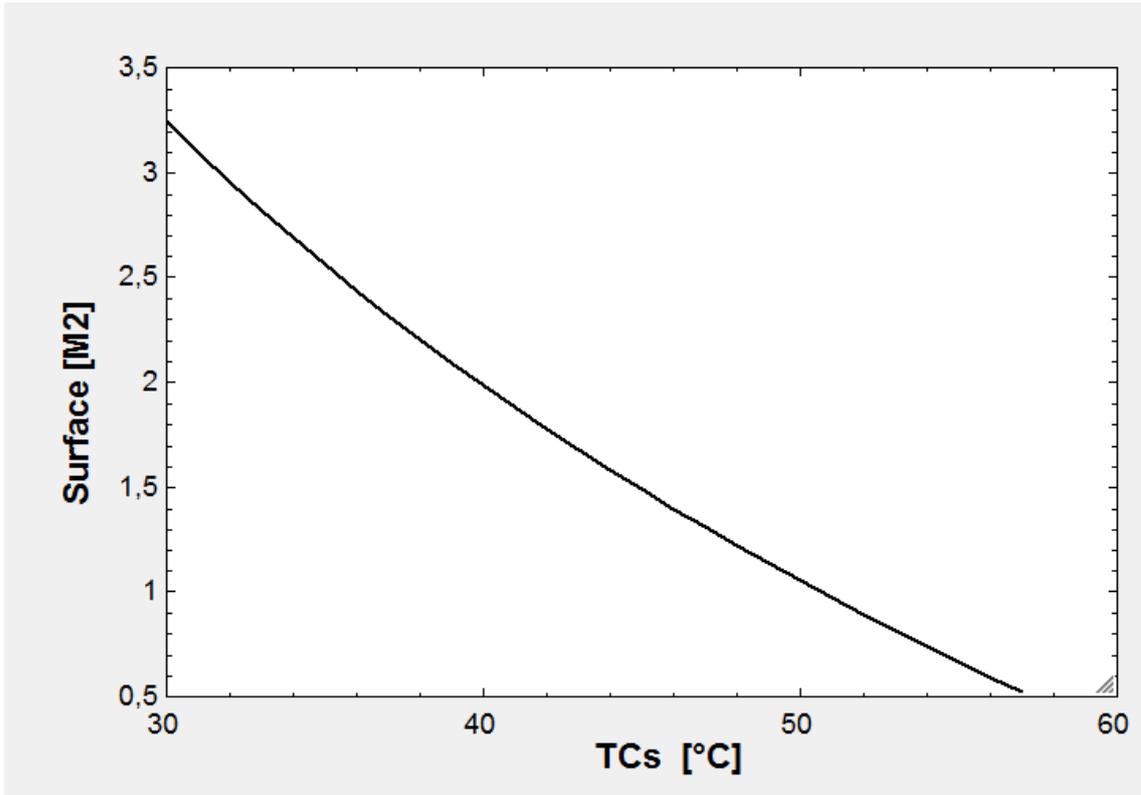


Figure 3.28 : La variation de la surface d'échange en fonction de la température chaude à la sortie de l'échangeur.

Discussion :

Cette figure représente la variation de la surface de contact en fonction de la température chaude à la sortie de l'échangeur TCs, on remarque que la surface de l'échange thermique est à son maximum d'une valeur 3,257 m² pour une température de sortie d'huile de 30°C puis elle diminue avec l'augmentation de cette dernière jusqu'à atteindre la valeur de 0,552m² pour une température TCs de 57°C. Cela est interprété par la différence des températures d'échange thermique en appliquant la relation (2.5) et la relation (2.7).

Conclusion :

Ce chapitre a traité les résultats expérimentaux et de simulation de l'installation de production du froid disponible à l'unité Coca-Cola de Rouïba.

Une première partie qui est une étude paramétrique sur le comportement de l'installation sous différentes conditions de températures (ambiante et d'évaporation). Une seconde partie a été présentée en utilisant les données expérimentales de l'installation.

Ce chapitre a aussi présenté les améliorations proposées pour l'optimisation des performances de l'installation frigorifique, les défauts traités ont été signalé par les ingénieurs de l'unité Coca Cola. Une de ces améliorations a été étudiée en détail et une simulation a été réalisée afin de connaître l'influence des performances des échangeurs de chaleurs proposés sur les performances des compresseurs.

Conclusion Générale

Dans notre mémoire et durant les six mois de notre stage nous avons pu après avoir étudié et analyser l'installation de production d'eau glacée de FRUITAL Coca-Cola utilisant l'ammoniac (NH_3) comme fluide frigorigène.

Après avoir présenté la station frigorifique, on a remarqué des anomalies qui impact négativement le rendement et la fiabilité de l'installation, ces anomalies ont été conclues après l'utilisation des plusieurs méthodes d'analyses (les études paramétriques théorique et expérimentale et la méthode de Cinq-Pourquoi, la méthode d'Ishikawa...Etc). Ces anomalies sont :

- Présence de l'humidité dans le circuit frigorifique.
- L'immigration d'huile.

On a pu proposer des améliorations pour réduire ces anomalies à l'aide de logiciel EES (Engineering Equation Solver) pour avoir meilleur rendements énergétique et frigorifique, augmenter la durée de vie et la rentabilité de de l'installation et l'économie de consommation électrique pour qu'elle sera moins couteuse et réduire les couts de maintenance et les risques et la pollution liés à l'environnement après la vidange d'huile

Ces améliorations sont :

- Le placement d'un filtre déshydrateur de type WDO pour éliminer le problème d'humidité dans le circuit.
- Augmenter la fréquence de changement des filtres coalesceurs pour avoir (meilleure séparation entre l'ammoniac et l'huile et pour le phénomène d'immigration d'huile signalé) et pour un bon rendement frigorifique.
- Une installation pour refroidissement d'huile, ce refroidissement qu'il va minimiser le phénomène détecter au niveau d'installation.

Et à la fin, nous espérons que ces améliorations seront prises en compte et retenu dans le cadre d'investissement et apporter des bénéfices à la société.

Références Bibliographie

- [1] Rapin, P., Jacquard, P., & Desmons, J, Technologie des installations frigorifiques, Dunod, 2011.
- [2] Energie +, Machine frigorifique à ab/adsorption, Production de Froid, Site-Web, 2014, <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-de-froid/machine-frigorifique-a-ab-adsorption/>
- [3] Récupération de Chaleur Fatale Industrielle Des Economies D'énergie à la Clé, Machine à absorption, Agence de la transition écologique, Site-Web, <http://www.recuperation-chaleur.fr/machine-absorption>
- [4] ABC Clim, Machine frigorifique à absorption : le principe, Site-Web, <https://www.abcclim.net/absorption.html>.
- [5] Kapilan N, TECHNICAL ASPECTS OF ADSORPTION COOLING SYSTEM, Université de l'ingénieur et Technologies de Nagarjuna,2016.
- [6] The Editors of Encyclopaedia Britannica, Adsoption, Britannica, Site-Web, 2022, <https://www.britannica.com/science/adsorption>
- [7] David Hosansky, Adsorption Chiller, Britannica, Site-Web, 2014, <https://www.britannica.com/topic/adsorption-chiller>.
- [8] Oualid SOTEHI, Riad BENELMIR, Damien DESCIEUX, Abla CHAKER, Etude numérique et expérimentale d'une climatisation solaire à adsorption sur boucle géothermique, Laboratoire de Physique Energétique et Université de Constantine et Université de Lorraine, 2015.
- [9] Energie +, Roue Dessicante, Production de Froid, Site-Web,2014, <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/production-de-froid/roue-dessicante/>.
- [10] Chadi Maalouf, Étude du potentiel de rafraîchissement d'un système évaporatif à désorption avec régénération solaire, Université de La Rochelle, 2006.
- [11] Saad S.Alrwashdeh, HandriAmmari, Life cycle cost analysis of two different refrigeration systems powered by solar energy, Université Mutah, 2019.
- [12] Max Appl, Ammonia : principes and industriel practice, Weinheim, 1999.

- [13] QH, Niloy Kumar Das, A very important molecule for biological organisms to make proteins or nucleic acids, Université de Sciences et Technologies Shahjalal, Site-Web, 2013, <http://www.chm.bris.ac.uk/motm/ammonia/Ammonia%20MOTM.htm>
- [14] Justin Louchheim, The Fertilizer Institute, Fertilizer History: The Haber-Bosch Process, Site-Web, 2014, <https://www.tfi.org/the-feed/fertilizer-history-haber-bosch-process>.
- [15] Techniques de L'ingénieur, Fabrication des grands produits industriels en chimie et pétrochimie, 2012.
- [16] Francis Meunier, Daniel Colbourne, Les fluides frigorigènes : Composés halogénés et fluides naturels, Dunod, 2014.
- [17] Centre de Formation aux Techniques de la Réfrigération et de la Neige, Ammoniac, Cours Froid, 2006.
- [18] Luc Lefebvre, Les risques à la santé associés à l'utilisation des réfrigérants dans les systèmes de réfrigération des arénas et centres de curling, Direction de santé publique de Montréal, 2013.
- [19] Beijer Ref Support, Pourquoi NH₃, Site-Web, 2020, <https://www.beijerref.nl/fr/pourquoi-nh3/>.
- [20] Good Way Technologies, Ammonia As a Refrigerant: Pros and Cons, Green Buildings & Green Technology, Site-Web, 2022, <https://www.goodway.com/hvac-blog/2009/08/ammonia-as-a-refrigerant-pros-and-cons/>
- [21] Francis Meunier, Paul Rivet, Marie-France Terrier, Froid industriel, Dunod, 2010.
- [22] Frick, Rotary screw compressors models TDSH / PDSH 163 through 408, Johnson Controls, 2010.
- [23] York, RWB II motocompresseur a vis : prescriptions d'installation de conduite et d'entretien, 2009.
- [24] Bruxelles Environnement, Extrait du syllabus « rappels techniques » : Chapitre 2 le circuit frigorifique, institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, 2013.
- [25] SERRELI Carine, Variation de Vitesse sur un groupe à Vis, L'institut national des sciences appliquées de Strasbourg, 2011.

- [26] Stoecker, W. F.; Jones, J. W, Refrigeration and Air Conditioning, département de génie mécanique de Mc-Graw Hill, 2004.
- [27] Electrical Workbook, What is Evaporative Condenser ? Working, Applications & Types, Refrigeration and Air Conditioning, Site-Web, 2021, <https://electricalworkbook.com/evaporative-condenser/>
- [28] Baltimore Aircoil, VX Evaporative Condensers, Selection Guide and Technical Data, Site-Web, 2020.
- [29] Baltimore Aircoil, VXC, Site-Web, 2022, <https://www.baltimoreaircoil.eu/fr/produits/VXC-S288-S1010>.
- [30] Centre de Formation aux Techniques de la Réfrigération et de la Neige, Condenseurs, Cours Froid, 2002.
- [31] G.F. Hundy, A.R. Trott, T.C. Welch, Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps, 2016.
- [32] Ceac, Refrigeration Valves, Gas Powered Valves, Site-Web, 2016 <https://www.caen.es/en/refrigeration-valves/powered-valves/>
- [33] Frick, Horizontal High Pressure Receivers, Johnson Controls, 2011.
- [34] Vaillant, Qu'est-ce qu'un échangeur de chaleur à plaques ? Concept et définition, Echangeur de Chaleur à Plaques, Site-Web, 2022, <https://www.vaillant.ch/particuliers/guide-du-chauffage/dictionnaire-de-la-technologie-de-chauffage/echangeur-de-chaleur-a-plaques/>
- [35] THERMOWAVE, thermoline échangeurs de chaleur à plaques, 2012.
- [36] THERMOWAVE, Echangeur de chaleur à plaques TL00Z50TCGL-FN40759, ThermoLine TL0250 TCGL - 1250, 2012.
- [37] Tower Water, What Is Glycol ?, Glycol Systems, Site-Web, 2020, <https://www.towerwater.com/what-is-glycol/>
- [38] LENTUS, How does glycol keep a closed loop water system from freezing?, Site-Web, 2019, <https://www.lentusllc.com/post/2019/08/29/how-does-glycol-keep-a-closed-loop-water-system-from-freezing>

- [39] The Chemical Company, Ethylene Glycol (MEG), Chemical, Site-Web, <https://thechemco.com/chemical/ethylene-glycol/>
- [40] ELPROCUS, What is a PID Controller : Working & Its Applications, Site-Web, 2022, <https://www.elprocus.com/the-working-of-a-pid-controller/>
- [41] PLCynergy, WHAT IS A PID CONTROLLER AND HOW IT WORKS?, PID Controlers, Site-Web, 2022, <https://plcynergy.com/pid-controller/>.
- [42] Lucas Alpi, Régulation PID : une solution toujours actuelle, NOVUS, Site-Web, 2019, <https://www.novusautomation.com>
- [43] IFSolutions, What Does a Coalescing Filter Do & How Does a Coalescer Work?, Fuel Gas Conditioning, Site-Web, 2019, <https://ifsolutions.com/what-does-a-coalescing-filter-do-how-does-a-coalescer-work/>
- [44] INDIAMART, Coalescer Filter Frick/Mycom, For Industrial, Frick, Site-Web, <https://www.indiamart.com/proddetail/coalescer-filter-frick-mycom-22791063491.html>
- [45] Johnson Controls, Schéma Frigorifique Water Dirt and Oil, Johnson Controls Industries, 2012.
- [46] ClimaMaison, Thermosiphon, Lexique, Site-Web, 2022, <https://www.climamaison.com/lexique/thermosiphon.htm#:~:text=Un%20thermosiphon%20est%20le%20phénomène,en%20fonction%20de%20la%20température.>
- [47] TOTAL, TOTAL LUNARIA NH 46-68, Industrie & Spécialités, TOTAL Lubrifiants, 2004.
- [48] Gianluca Valenti, Luigi Colombo, Stefano Murgia, Andrea Lucchini, Andrea Sampietro, Andrea Capoferri, Lucio Araneo, Thermal Effect of lubrication Oil in Positive-displacement Air Compressors, Ecole polytechnique de Milan et Ing. Enea Mattei SpA, 2012.
- [49] Tuthill, Lubrication Pumps L Series, Lubrification Pumps, Site-Web, 2022, <https://www.tuthillpump.com/en-us/products/lubrication-pumps/lubrication-pumps-l-series>
- [50] The Engineering ToolBox, Ammonia - Specific Heat vs. Temperature and Pressure, Site-Web, 2016, https://www.engineeringtoolbox.com/ammonia-heat_capacity-specific-

[temperature-pressure-Cp-Cv-d_2016.html#:~:text=At%20ambient%20pressure%20and%20temperature,V%20%20will%20vary%20with%20temperature.](#)

[51] PEDROLLO, PLURIJET 80-100, Electropompes multicellulaires auto-amorçantes.

[52] ALFA LAVAL, Alfa Laval AC43/ACH43/ACP43, Echangeur de chaleur à plaques brasées pour climatisation et réfrigération.

[53] Pourquoi utiliser l'ammoniac dans la réfrigération industrielle ?, Site-Web, Danfoss, 2016, <https://www.danfoss.com/fr-fr/markets/refrigeration-and-air-conditioning/dcs/industrial-refrigeration/ammonia-in-industrial-refrigeration/why-ammonia/#:~:text=L%27ammoniac%20possède%20de%20meilleures,de%20construction%20de%201%27installation.>

Annexes

Annexe A : Les Relevés des Pressions et Température :

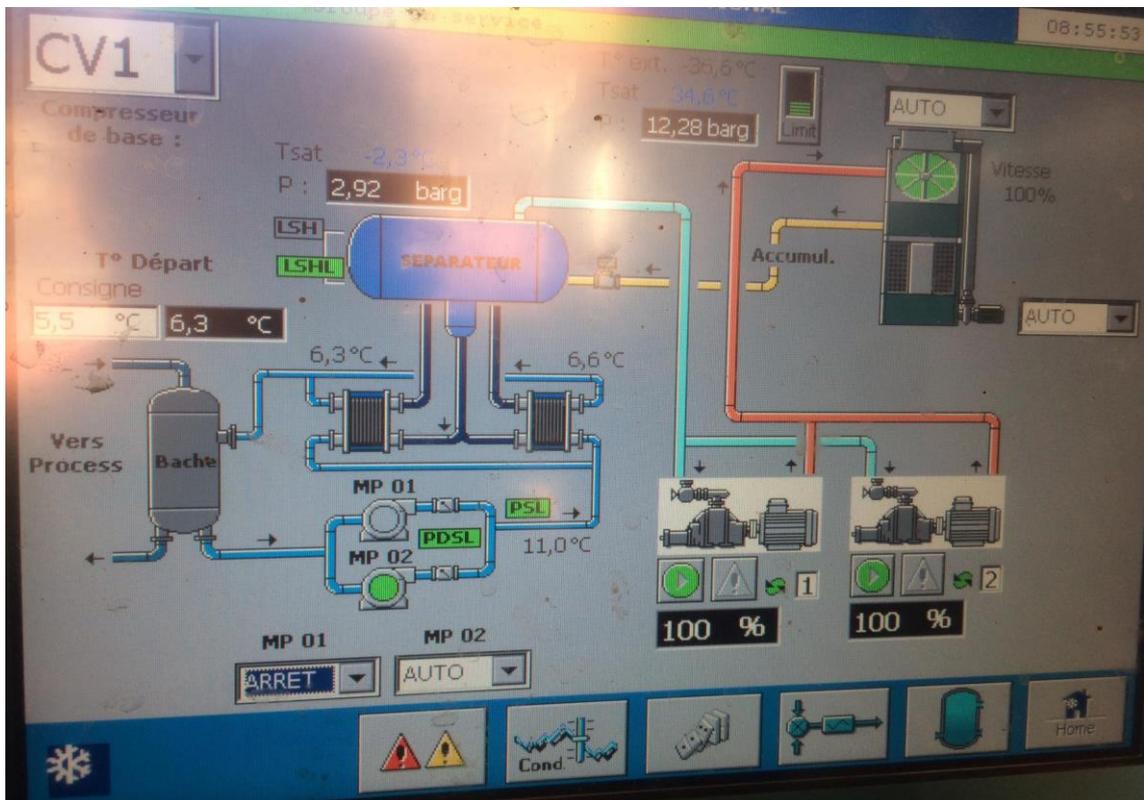


Figure A.1 : Les pressions et température au cours de cycle frigorifique.

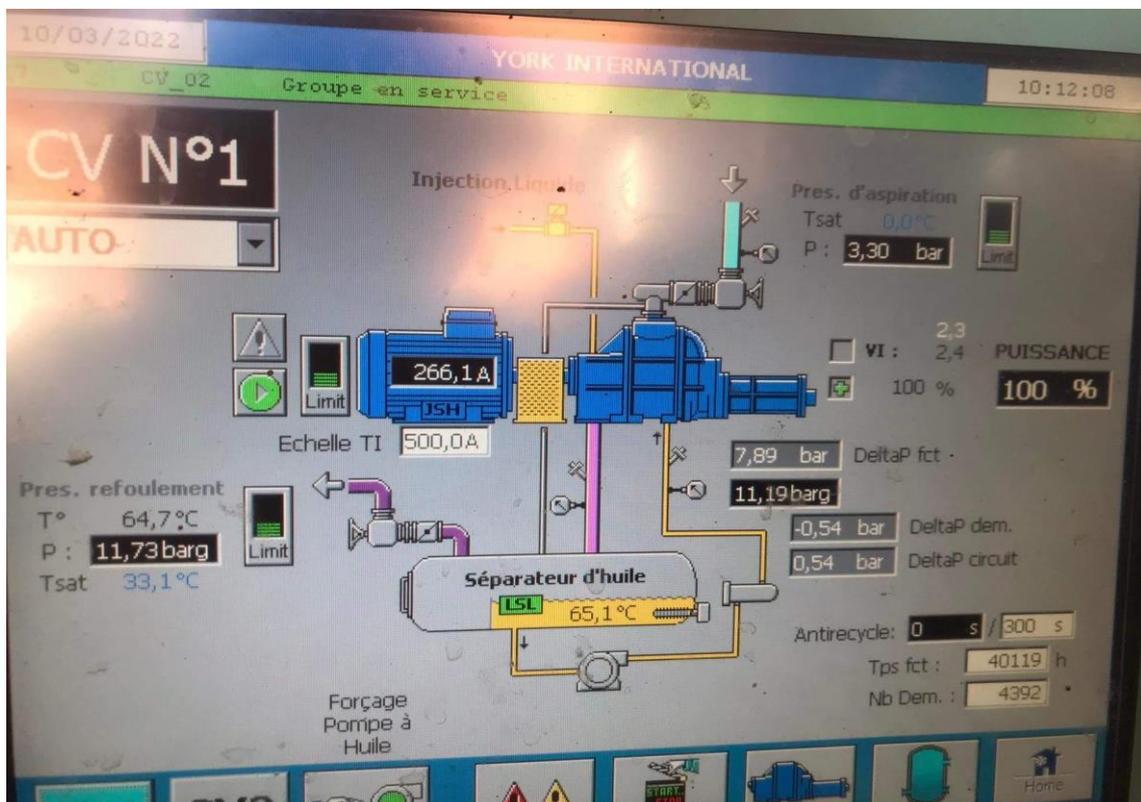


Figure A.2 : Les pressions et température au niveau de compresseur à vis.

Annexe B : Le Programme de Calculs pour Déterminer la Surface D'échange :

$$TCe=65[^\circ C]$$

$$TCs=35[^\circ C]$$

$$TFe=6[^\circ C]$$

$$TFs=13[^\circ C]$$

$$m_dot_huile=0,30[kg/s]$$

$$Cp_eau=3860 [J/Kg.^\circ C]$$

$$Cp_huile=2800 [J/Kg.^\circ C]$$

$$Qv_huile=(m_dot_huile*3600)/860 [M3/h]$$

$$U=250 [W/M2.^\circ C]$$

$$Q=m_dot_huile*Cp_huile*(TCe-TCs)$$

$$m_dot_eau=Q/(Cp_eau*(TFs-TFe))$$

$$Qv_eau=(m_dot_eau*3600)/1037 [M3/h]$$

$$DTLM= ((TCe-TFs)-(TCs-TFe))/(\ln((TCe-TFs)/(TCs-TFe)))$$

$$S=Q/(DTLM*U)$$

$$Eff=(m_dot_huile*Cp_huile*(TCe-TCs))/(m_dot_huile*Cp_huile*(TCe-TFe))$$

$$Qv_eau_totale=Qv_eau*2$$

Figure A.3 : L'organigramme des calculs sous EES.