



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

En : Génie Mécanique Spécialité

: Energétique

Par :

ALLAM KHEIR EDDINE

Evaluation théorique et optimisation de la performance d'un Système de réfrigération à compression de vapeur multi étages à L'aide du logiciel EES.

Soutenu publiquement, le 28 / 09 / 2023 , devant le jury composé de :

M. GHERNAOUT MEA	Pr	Univ. Tlemcen	Président
M. BEGAG Abdelaziz	MCB	Univ. Tlemcen	Examineur
M. BENRAMDANE Mohammed	MCA	Univ. Tlemcen	Encadrant
M. GHRICI Adenane	Docteur	Univ. Tlemcen	Co- Encadrant

Année universitaire : 2022 - 2023

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné la santé, la volonté et le courage d'accomplir ce travail.

Nos vifs remerciements vont à notre encadreur, M.R BENRAMDENE MOHEMMED , et Co encadreur MR GHRICI ADNANE pour sa confiance en nous, ses conseils inestimables, ainsi que pour le partage de ses compétences scientifiques. Nous sommes également reconnaissants de la grande liberté qu'il nous a accordée dans la gestion de ce mémoire, ainsi que pour ses encouragements et sa disponibilité qui nous ont soutenus au moment où nous en avons grand besoin.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, MR GHERNAOUT MEA et BEGAG ABDELAZIZ qui nous font l'honneur d'accepter d'examiner et de juger notre travail. Nous sommes également reconnaissants de leurs critiques constructives qui ont contribué à améliorer notre travail.

Enfin, un merci tout particulier à tous ceux qui nous ont apporté leur soutien

Dédicace

À l'aide d'Allah le tout Puissant qui m'a guidée et qui m'a tracée le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce modeste travail.

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

A la lumière de ma vie, la source de tendresse, ma première supportrice et mon amour éternelle, ma mère que j'adore.

A mon très cher père abdelhafid, pour ses encouragements, son soutien, et surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

A mes sœur Fadela et fadia , qui n'a pas cessé de m'encourager tout au cours de réalisation de ce travail.

A mes chers frères qui sont là mes cotes pour me soutenir, Habib et Abdessamad

A mes amis Barka anes et Mahboob Azzedine.

A tous ma famille

A tous mes autres proches.

Tous simplement, a tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

KHEIR EDDINE ALLAM

ملخص

تركز هذه الأطروحة على دراسة متعمقة لمجال مهم من الهندسة الحرارية: أنظمة التبريد بضغط البخار متعدد المراحل .
EES (Equation Equation Solver) الهدف الرئيسي هو تقييم أداء هذه الأنظمة نظرياً وتحسينها باستخدام برنامجاً

الدراسة باستكشاف متعمق للأساس النظري لأنظمة التبريد بضغط البخار متعدد المراحل، وفحص المكونات الرئيسية

ومبادئ التشغيل. يتم إيلاء اهتمام خاص لفهم العلاقات الديناميكية الحرارية التي تحكم هذه الأنظمة

لتحديد EES يصبح التحسين النقطة المركزية في هذه الدراسة. يتم استخدام النتائج التي تم الحصول عليها من خلال

التعديلات المثلى لمكونات النظام ومعلماته، مما يؤدي إلى تحسين كبير في الأداء. يتم تسليط الضوء بشكل خاص على

باعتباره مقياساً أساسياً لقياس هذا الأداء (COP) معامل الأداء

تقدم هذه الأطروحة نظرة شاملة لتقييم وتحسين أنظمة التبريد بضغط البخار متعدد المراحل، مما يوضح أهمية هذا العمل من

أجل كفاءة الطاقة والاستدامة البيئية. كما أنه يمهد الطريق للبحث المستقبلي والتطبيق العملي لهذه المعرفة لإنشاء أنظمة تبريد

أكثر كفاءة وصديقة للبيئة

الكلمات المفتاحية: معامل الأداء، معامل الأداء، EES

Abstract

This dissertation focuses on the in-depth study of a crucial area of thermal engineering: multistage vapor compression refrigeration systems. The main objective is to theoretically evaluate the performance of these systems and to optimize them using the EES (Engineering Equation Solver) software.

The study begins with an in-depth exploration of the theoretical basis of multi-stage vapor compression refrigeration systems, examining key components and operating principles. Particular attention is paid to understanding the thermodynamic relationships that govern these systems.

Optimization becomes the central point of this study. The results obtained through EES are used to identify optimal adjustments of system components and parameters, leading to significant performance improvement. The coefficient of performance (COP) is particularly highlighted as an essential metric for measuring this performance.

This dissertation provides a comprehensive overview of the evaluation and optimization of multistage vapor compression refrigeration systems, demonstrating the importance of this work for energy efficiency and environmental sustainability. It also paves the way for future research and practical application of this knowledge to create more efficient and environmentally friendly refrigeration systems

Keywords: performance coefficient, COP, ESS

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie d'un domaine crucial de l'ingénierie thermique : les systèmes de réfrigération à compression de vapeur multi-étages. L'objectif principal est d'évaluer théoriquement la performance de ces systèmes et de les optimiser en utilisant le logiciel EES (Engineering Equation Solver).

L'étude débute par une exploration approfondie des bases théoriques des systèmes de réfrigération à compression de vapeur multi-étages, en examinant les composants clés et les principes de fonctionnement. Une attention particulière est accordée à la compréhension des relations thermodynamiques qui régissent ces systèmes.

L'optimisation devient le point central de cette étude. Les résultats obtenus grâce à EES sont utilisés pour identifier les ajustements optimaux des composants et des paramètres du système, conduisant à une amélioration significative de la performance. Le coefficient de performance (COP) est particulièrement mis en avant comme une métrique essentielle pour mesurer cette performance.

Ce mémoire offre un aperçu complet de l'évaluation et de l'optimisation des systèmes de réfrigération à compression de vapeur multi-étages, démontrant l'importance de ces travaux pour l'efficacité énergétique et la durabilité environnementale. Il ouvre également la voie à des recherches futures et à l'application pratique de ces connaissances pour créer des systèmes de réfrigération plus efficaces et respectueux de l'environnement

Mots-clés : coefficient de performance, ESS

Table des matières

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

Chapitre 1 : Etude bibliographique

Partie A : Etude bibliographique sur la production du froid

1.A.1. Introduction :	2
1.A.2. Historiques du froid	2
1.A.3. Technologies de production du froid	3
1.A.3.1. Système de Compression mécanique de vapeur (CMV)	3
1.A.3.2. Système Absorption	3
1.A.3.3. Système Electro calorique	4
1.A.3.4. Système Effet Peltier	5
1.A.3.5. Système Adsorption	6
1.A.4. Application de froid	6
1.A.4.1. Climatisation	6
1.A.4.2. Réfrigération Alimentaire	7
1.A.4.3. Technologies de pointe	7
1.A.4.4. Cryogénie	7
1.A.4.5. Industries alimentaire et agroalimentaire	7
1.A.5. Principes de base de la production du froid	7

Parties B : Machines frigorifiques

1.B.1. Introduction	8
1.B.2. Définition de machine frigorifique	8
1.B.3. Machine frigorifique à compression de vapeur	9
1.B.4. Eléments composants une machine frigorifique	11
1.B.4.1. Compresseur	11
1.B.4.2. Condenseur	11

1.B.4.3. Détendeur	12
1.B.4.4. Évaporateur	13
Partie C : Fluides frigorigènes	
1.C.1. Définition	14
1.C.2. Rappel historique	14
1.C.3. Classification des fluides frigorigènes	14
1.C.3.1. Composés inorganiques	14
1.C.3.2. Composés organiques	15
1.C.4. Domaines d'application	16
1.C.5. Caractéristiques physiques du fluide frigorigène parfait	17
1.C.6. Critères de choix d'un fluide frigorigène	17
1.C.6.1. Critères thermodynamiques	17
1.C.6.2. Critères techniques	18
1.C.6.3. Critères de sécurité	18
1.C.6.4. Critères économiques	19
1.C.7. Détermination du coefficient de performance COP	19
1.C.8. Coefficient de performance de Carnot (COP_C)	19
1.C.9. Efficacité de système (η)	19
1.6. Conclusion	20

Chapitre 2 : Technologies de réfrigération à compression de vapeur

2.1. Introduction	21
2.2. Cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal	21
2.1.1: Composants de cycles	24
2.2.2. Principe de fonctionnement	24
2.3. Cycle de réfrigération à compression de vapeur réel	25
2.3.1 : Principe de fonctionnement	26
2.4. Systèmes de réfrigération à compression de vapeur innovants	27
2.4.1 Réfrigération à cascade	27
2.4.1.1 : Principe de fonctionnement	28

2.4.1.1.1. Avantages des systèmes de réfrigération à cascade	29
2.4.1.1. 2. Inconvénients des systèmes de réfrigération à cascade	30
2.4.1. 1.3. Applications des systèmes de réfrigération à cascade.....	30
2.4.2.Systèmes de Réfrigération à compression Multi-Étages	31
2.4.2.1 Principe fonctionnement	31
2.4.2.2. Avantages	32
2.4.2.3.Applications	33
2.4.3. Systèmes de réfrigération polyvalents avec un seul compresseur	33
2.4.3.1 : Principe de fonctionnement	33
2.5. Réfrigérant	34
2.5.1 : Principe de fonctionnement	35
2.5.2. Cycle de réfrigération	36
2.5.3. Application de réfrigérant	37
2.5.4. Réglementation des Réfrigérants	37
2.5.5. Avenir des réfrigérants	38
2.6. Conclusion.....	38

Chapitre 3 : Modélisation mathématique des machines frigorifiques à compression de vapeur

3.1. Introduction	40
3.2. Modélisation des machines à compression de vapeur (cycles idéal).....	41
3.2.1. Systèmes de réfrigération à compression de vapeur	41
3.2.2. Cycle frigorifique Carnot	41
3.3. Modélisation des machines à compression de vapeur à cascade	49
3.3.1 Systèmes en cascade	49
3.3.2. Avantages des systèmes en cascade.....	50
3.3.3. Température de cascade optimale	50
3.3.4. Systèmes en cascade automatique.....	52
3.4. Modélisation des machines à compression de vapeur multi-étages.....	53

3.4.1. Refroidissement intermédiaire en compression multi-étages.....	53
3.4.2: Système à plusieurs étages avec élimination des gaz instantanés et refroidissement intermédiaire	57
3.5. Conclusion	61
Chapitre 4 : Résultats et discussion	
4.1. Introduction	63
4.2. Calcul pour simulation des machines frigorifiques à compression de vapeur	63
4.2.1. Cycle frigorifique à compression de vapeur idéal	63
2.2. Cycle frigorifique à compression de vapeur actuel	65
4.3. Cycle frigorifique à compression de vapeur à cascade	67
4.4. Comparaison entre 3 cycles	69
4.5. Améliorer le cycle cascade	71
4.6. Conclusion.....	73
Conclusion général	75
Références	76

Liste des figures

Figure (1.1). Système de Compression mécanique de vapeur (CMV).....	3
Figure (1. 2). Système Absorption.....	4
Figure (1.3). Système Électro calorique	5
Figure (1. 4). Système EffetPeltier.....	5
Figure (1.5) : Système Adsorption.....	6
Figure (1. 6-a) : Schéma d'une machine frigorifique à compression de vapeur	10
Figure (1. 6-b) : Cycle de fonctionnement dans le diagramme (T,S)	10
Figure (1.7) : Le compresseur.....	11
Figure (1. 8) : Le Condenseur	12
Figure (1.9) : Le Détendeur.....	12
Figure (1. 10) : L'Évaporateur	13
Figure (2. 1) : Schéma du réfrigérateur de réfrigération à compression de vapeur idéal.....	23
Figure (2. 2) : Diagramme T-s du cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal.....	23
Figure (2. 3) : Diagramme T-s du cycle de réfrigération à compression de vapeur réel.....	25
Figure (2 .4) : cycle de cascade	28
Figure (2. 5) : Diagramme t-s de cycles cascade.....	28
Figure (2. 6) : Cycles et diagrammes t-s de systèmes de Réfrigération à compression multi-étage	31
Figure (2.7) : Schéma et diagramme T-s d'un réfrigérateur-congélateur avec un seul compresseur....	33
Figure (2. 8): Cycle de réfrigérant	35
Figure (3.1) .(a) : Schéma d'un système de réfrigération Carnot	40
Figure (3 .1).(b) : Cycle frigorifique de Carnot sur diagramme T-s	41
Figure (3.2): Carnot refrigeration cycle represented in T-s plane	42
Figure (3. 3) : Système de réfrigération Carnot à compression sèche	44
Figure (3 .4): Système de réfrigération à compression de vapeur standard	46
Figure (3. 5) : Un système de réfrigération en cascade à deux étages	49
Figure (3. 6): Schéma d'un système d'auto-cascade à deux étages	50

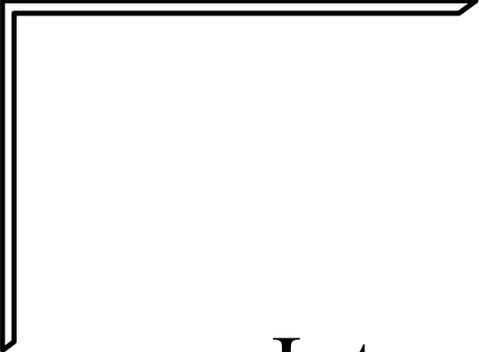
Figure (3. 7) (a) & (b): Refroidissement intermédiaire en compression à deux étages	51
Figure (3.8) (a): Refroidissement intermédiaire utilisant du réfrigérant liquide dans le réservoir de détente	53
Figure (3 .8) (b): Refroidissement intermédiaire utilisant un échangeur de chaleur externe refroidi par eau	53
Figure (3. 9) : Système de réfrigération à compression de vapeur à deux étages avec élimination des gaz instantanés à l'aide d'un réservoir flash et refroidissement intermédiaire	56
Figure (3.10) : Système de réfrigération à compression de vapeur à deux étages avec élimination des gaz instantanés à l'aide d'un réservoir de flash et refroidissement intermédiaire - diagramme Ph	57
Figure (4 .1) : Graphe représente le COP dans le cycle idéal	63
Figure (4 .2) : Graphe représente le W et Q dans le cycle idéal	64
Figure (4 .3) : Graphe représente le COP dans cycle Actuel	66
Figure (4 .4) : Graphe représente le W Et Q dans cycle Actuel	66
Figure (4 .5) : Graphe représente le COP dans cycle cascade	68
Figure (4 .6) : Graphe représente le W Et Q dans cycle cascade	69
Figure (4 .7) : Graphe représente COP pour 3 cycle	70
Figure (4 .8) : Graphe représente le W et Q pour 3 cycle	71
Figure (4 .9) : Graphe représente le COP dans cycle cascade	72
Figure (4 .10) : Graphe représente le W Et Q dans cycle cascade	73

Liste des tableaux

Tableau (1.1) : Domaines d’application privilégiés des fluides frigorigènes les plus utilisés	16
Tableau (4 .1) : Données de cycle idéal.....	63
Tableau (4.2) : Résultats de cycle idéal	63
Tableau (4.3) : Données de cycle Actuel	65
Tableau (4.4) : Résultat de cycle Actuel	65
Tableau (4 .5) : Données de cycle cascade	67
Tableau (4.6) : Résultat de cycle cascade	67
Tableau (4.7) : Résultat pour 3 cycle	70
Tableau (4 .8) : Données de cycle cascudent	71
Tableau (4.9) : Résultat de cycle cascade	72

Nomenclatures

Symboles	Signification	Unité
P	Pression	bar
W	Travail	KJ/Kg
Q	Chaleur fournie	KJ/Kg
H	Enthalpie	KJ/K
S	Entropie	KJ/K
m	Débit	KG/s
T	Température	K
V	Volume	m³



Introduction générale



Introduction générale

Les systèmes de réfrigération à compression de vapeur multi-étage sont des installations couramment utilisées pour la production de froid dans diverses applications, telles que la climatisation des bâtiments, la réfrigération industrielle et les systèmes de congélation. Ces systèmes sont conçus pour extraire la chaleur d'un espace ou d'un fluide et la rejeter à une température plus élevée, utilisant un cycle de compression de vapeur.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de l'évaluation théorique et de l'optimisation de la performance d'un système de réfrigération à compression de vapeur multi-étages. À travers cette recherche, nous nous attacherons à explorer les fondements théoriques, les avancées technologiques et les aspects modélisation qui sous-tendent ce domaine spécialisé. Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, chacun jouant un rôle crucial dans la compréhension approfondie et l'amélioration des systèmes de réfrigération.

Dans le chapitre 1, nous effectuerons une revue exhaustive de la littérature existante, examinant l'évolution historique des systèmes de réfrigération à compression de vapeur, mettant en lumière les avancées récentes dans les architectures multi-étages, et explorant les modèles théoriques qui forment la base de notre compréhension. En analysant les travaux antérieurs, nous identifierons les défis actuels et les opportunités de recherche dans le domaine

Le deuxième chapitre se concentrera sur la technologie sous-jacente des systèmes de réfrigération à compression de vapeur multi-étages. Nous explorerons les composants clés, les mécanismes de compression, les fluides réfrigérants, et les différentes architectures qui caractérisent ces systèmes. Cette section jettera les bases nécessaires pour comprendre le fonctionnement pratique des installations de réfrigération

Le troisième chapitre abordera la modélisation mathématique des systèmes de réfrigération étudiés. En détaillant les équations thermodynamiques et les paramètres influents, nous chercherons à formaliser le comportement théorique des systèmes multi-étages. Cette modélisation servira de référence pour notre évaluation théorique ultérieure et constituera un outil essentiel pour l'optimisation.

Le quatrième chapitre présentera les résultats de nos évaluations théoriques et des simulations basées sur la modélisation mathématique. Nous discuterons des performances observées .



Chapitre 1 :

Etude bibliographique



Chapitre 1 Etude bibliographique

Partie A : Etude bibliographique sur la production du froid

1.A.1. Introduction

La production du froid est un domaine crucial dans de nombreux secteurs, tels que l'industrie alimentaire, la climatisation, la réfrigération médicale et les technologies de pointe. Cette étude bibliographique vise à examiner les principaux aspects de la production du froid, il ya compris les principes de base, les différentes technologies utilisées, les avantages et les inconvénients de chaque méthode, ainsi que les avancées récentes dans le domaine [1].

1.A.2. Historique du froid

La production par temps froid est un processus relativement nouveau à l'échelle historique. en attendant.

Dans l'Antiquité, les Grecs et les Romains gardaient le froid hivernal sous forme de neige et de glace stockées dans des abris souterrains isolés avec de la paille ou du foin.

Boissons fraîches et nourriture même en été est au milieu

L'histoire du même temps où nous avons découvert que nous pouvions sauver Mélanger de la glace pilée et du sel de mer pour baisser la température.

Plus récemment, la production de froid s'est développée rapidement au XIXe siècle.

Parallèlement aux progrès des connaissances sur l'électricité. [2]

- 1805 : La première machine frigorifique à compression d'éther est imaginée
- Par l'Américain Evans ;
- 1835 : Un autre Américain, Perkins réalise à Londres le premier circuit Frigorifique avec de l'éther comme fluide frigorigène. Cette machine, qui Fabrique de la glace, n'a pas retenu l'attention des industriels. L'industrie du Froid ne prend son essor que plusieurs dizaines d'années plus tard, notamment Avec l'emploi des moteurs électriques ;
- 1844 : Création de la machine frigorifique à air
- 1859 : Apparition de la première machine frigorifique à absorption
- 1913 : Le premier réfrigérateur domestique fait son apparition

- 1919 : La marque Frigidaire fait son apparition
- 1928 : Découverte des molécules de CFC 12 par Medley Henné de la division Frigidaire de General Motors ;
- 1931 : La fabrication industrielle commence avec Electrolux ;
- 1950 – Démocratisation des réfrigérateurs ;
- 1964 : Les réfrigérateurs à 2 portes font leurs apparitions ;
- Années 70 : Les appareils s’accessoirisent : lumière, différents compartiments ;
- Années 80 : Apparitions des premiers réfrigérateurs combinés et des appareils Bimoteurs ;
- Années 90 : De nouveaux gaz plus propres sont utilisés ;
- Années 2000 : Le véritable défi devient l’environnement.

1.A.3. Technologies de production du froid

1.A.3.1. Système de Compression mécanique de vapeur (CMV)

Cette méthode utilise un compresseur pour comprimer un fluide réfrigérant, augmentant ainsi sa température et sa pression. Le fluide réfrigérant est ensuite refroidi et détendu pour créer un effet de refroidissement. [2][3]

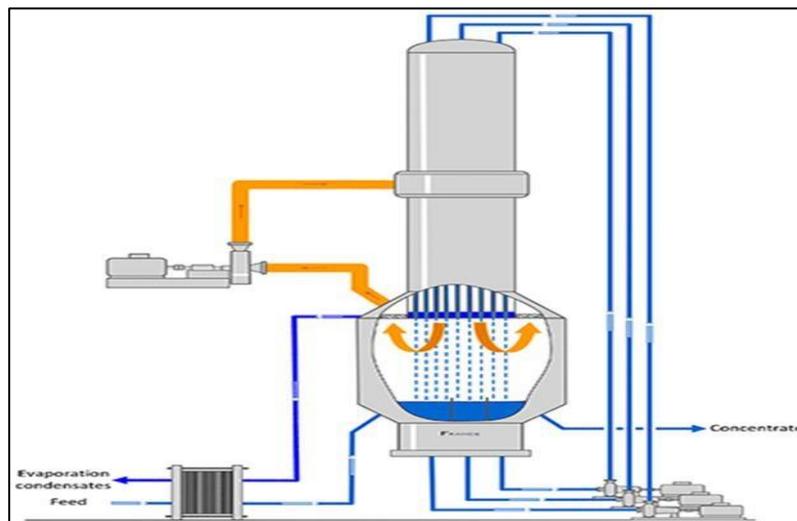


Figure (1.1). Système de Compression mécanique de vapeur (CMV) [2][3]

1.A.3.2. Système Absorption

Le système d'absorption utilise un absorbant pour absorber un fluide réfrigérant, ce qui permet de générer du froid lorsque l'absorbant est chauffé. Cette technologie est souvent utilisée dans les réfrigérateurs à gaz et dans les applications industrielles. [3]

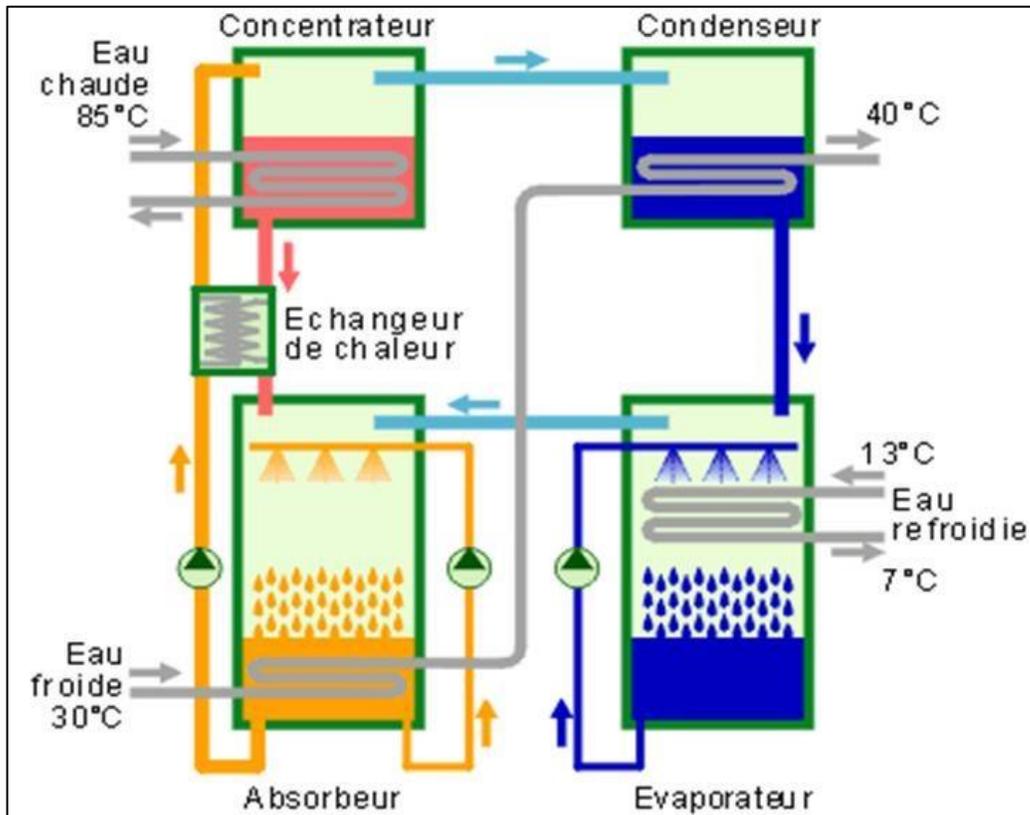


Figure (1. 2). Système Absorption [3]

1.A.3.3. Système Electro calorique

Les matériaux électro caloriques sont des matériaux qui subissent un changement de température lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique. Cette section présente les principes de base de la production du froid à l'aide de matériaux électro caloriques et examine les avancées récentes dans ce domaine.[3][4]

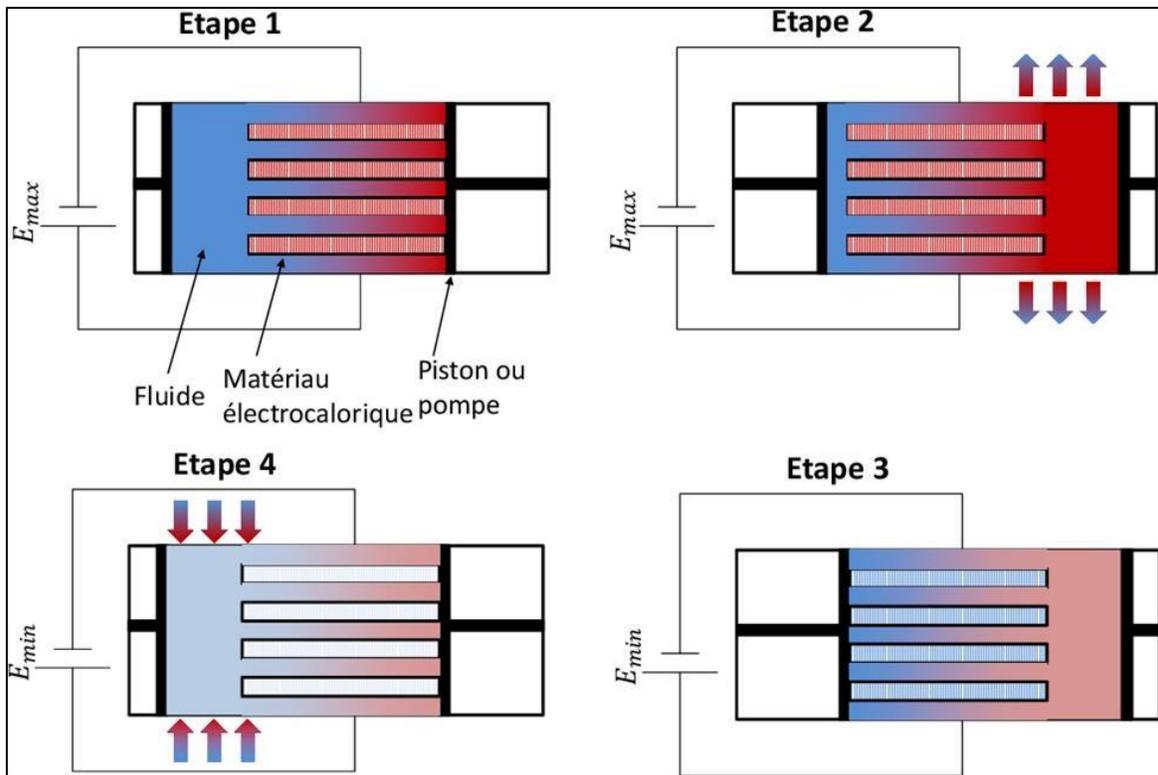


Figure (1.3). Système Électro calorique [3][4]

1.A.3.4. Système Effet Peltier

L'effet Peltier est basé sur la création d'un effet de refroidissement lorsqu'un courant électrique traverse un assemblage de matériaux semi-conducteurs. Cette technologie est couramment utilisée dans les refroidisseurs thermoélectriques.

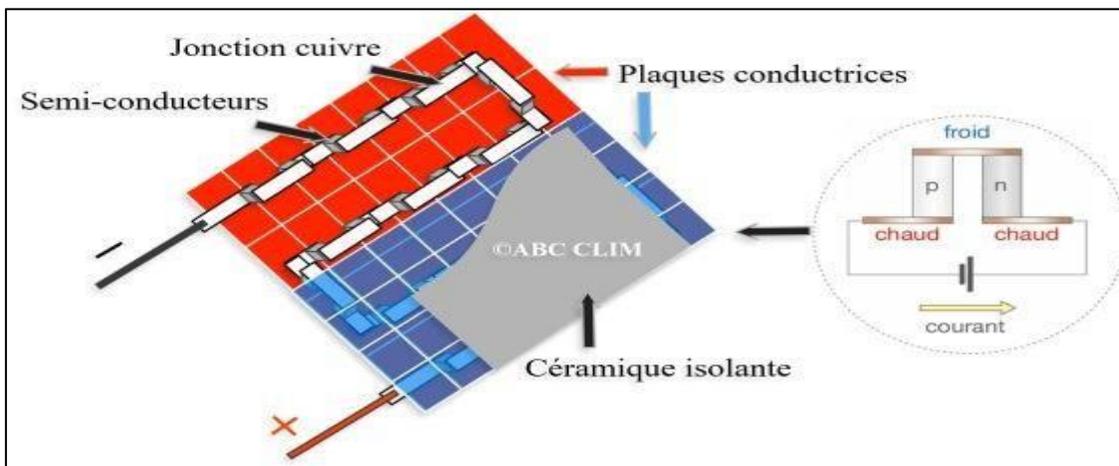


Figure (1. 4). Système Effet Peltier [4]

1.A.3.5. Système Adsorption

La technologie d'adsorption est l'une des méthodes de production de froid. Il repose sur la capacité du matériau adsorbant à piéger les molécules de gaz à sa surface lorsqu'il est exposé à une pression élevée et à les libérer lorsqu'il est exposé à une pression basse ou à une température élevée. [4]

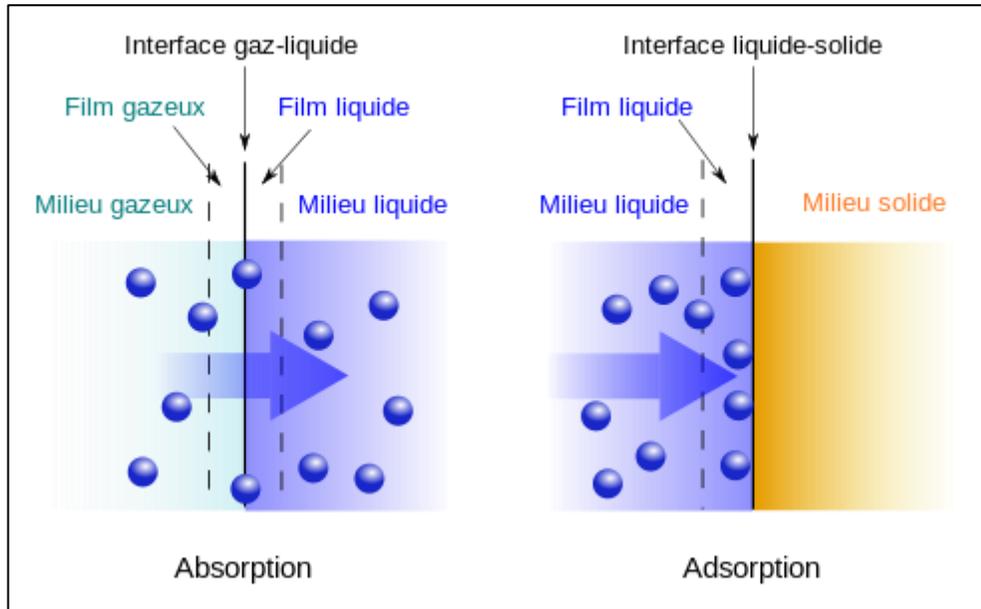


Figure (1.5) : Système Adsorption [4]

Autres technologies : Cette section couvre brièvement d'autres technologies de production du froid, telles que la cryogénie, l'adsorption, la thermo acoustique, etc.[4][5]

1.A.4. Application de froid

Le froid, généré par différentes technologies de production du froid, est utilisé dans de nombreuses applications. Voici quelques exemples courants d'applications de froid :

○ 1.A.4.1. Climatisation

L'une des principales utilisations du froid est la climatisation, que ce soit dans les bâtiments résidentiels, commerciaux ou industriels. Les systèmes de climatisation utilisent le froid pour réguler la température, l'humidité et la qualité de l'air intérieur, offrant ainsi des conditions de confort aux occupants.

○ 1.A.4. 2.Réfrigération alimentaire

Le froid est essentiel pour la conservation des aliments et des boissons. Les réfrigérateurs, congélateurs, chambres froides et vitrines réfrigérées sont utilisés dans les supermarchés, les restaurants, les entrepôts alimentaires et les installations de transformation des aliments pour maintenir la fraîcheur des produits, prolonger leur durée de conservation et garantir la sécurité alimentaire.

○ 1.A.4. 3.Technologies de pointe

Le froid est utilisé dans des domaines technologiques avancés, tels que l'informatique, l'électronique et l'industrie des semi-conducteurs, pour le refroidissement des composants électroniques, des processeurs, des lasers et des équipements de laboratoire.

○ 1.A.4. 4.Cryogénie :

La cryogénie est l'étude des températures extrêmement basses et de leurs applications. Elle est utilisée dans des domaines tels que la recherche scientifique, l'exploration spatiale, la cryoconservation des échantillons biologiques, la production d'azote liquide et d'oxygène liquide, ainsi que dans certaines procédures médicales.

○ 1.A.4. 5.Industrie alimentaire et agroalimentaire

Le froid est utilisé dans l'industrie alimentaire pour des applications telles que la congélation rapide, la surgélation, la pasteurisation, la réfrigération des matières premières et des produits finis, ainsi que pour le refroidissement des équipements de production.[5]

1.A.5. Principes de base de la production du froid

Circuit de refroidissement Cette section décrit le fonctionnement du cycle de réfrigération, qui est à la base de nombreuses méthodes de réfrigération. Cela inclut les composants clés du système de réfrigération tels que les compresseurs, les condenseurs, les détendeurs et les évaporateurs. [6]

Partie B : machines frigorifiques

1.B.1. Introduction

Un refroidisseur est un appareil utilisé pour produire de l'air froid en transférant de la chaleur d'un endroit à un autre. Ils jouent un rôle important dans de nombreux domaines tels que la climatisation, le stockage des aliments et la cryogénie. Ces machines sont basées sur des principes thermodynamiques et utilisent différents cycles et technologies pour atteindre leurs objectifs de refroidissement.

Les refroidisseurs fonctionnent sur le principe de base de la thermodynamique selon lequel la chaleur se déplace naturellement des zones chaudes vers les zones froides. Le processus de refroidissement est réalisé en transférant la chaleur de l'emplacement à refroidir (comme l'intérieur d'un bâtiment) vers l'environnement extérieur (généralement l'atmosphère) à l'aide de réfrigérants.

Il existe de nombreux types de refroidisseurs, chacun ayant des caractéristiques et des utilisations uniques. Les refroidisseurs les plus couramment utilisés sont basés sur le cycle de compression de vapeur, qui consiste à comprimer, condenser, dilater et évaporer un réfrigérant. Ce circuit transfère efficacement la chaleur de l'intérieur du système vers l'extérieur, créant de l'air frais.

D'autres technologies de refroidisseurs comprennent l'absorption, qui utilise l'absorption d'un liquide réfrigérant par un absorbant pour produire de la réfrigération, et les moteurs thermiques à gaz, qui utilisent le cycle thermodynamique pour produire de la réfrigération.

Les réfrigérateurs ont révolutionné nos vies, nous permettant de créer des environnements climatisés confortables, de conserver les aliments pendant de longues périodes et de faire progresser la recherche scientifique et médicale. Son utilisation évolue avec l'émergence de technologies plus performantes et plus respectueuses de l'environnement. [7]

1.B.2. Définition de machine frigorifique

Un refroidisseur est un appareil thermodynamique qui crée du froid en transférant la chaleur d'un endroit à un autre. On utilise un fluide caloporteur qui circule dans un circuit thermodynamique, absorbant la chaleur du milieu à refroidir et la restituant au milieu extérieur.

Une bonne référence pour en savoir plus sur les refroidisseurs est le livre Principes of Réfrigération de Roy J. Dossât. Ce livre couvre en détail les bases des refroidisseurs, y compris le cycle de compression de vapeur, les composants du système de réfrigération, les propriétés du réfrigérant et les méthodes de contrôle. Il fournit une base solide pour comprendre le fonctionnement et la conception des refroidisseurs [8]

1.B.3. Machine frigorifique à compression de vapeur

Ils sont complexes car ils s'inscrivent dans un système dissociatif de production de froid. A partir d'éléments séparables :

Système de refroidissement et moteur d'entraînement thermique.

Les principaux avantages des compresseurs à vapeur sont

Chaleur latente de vaporisation des liquides. En pratique, c'est généralement plus Elle est plus importante que la chaleur sensible générée par les moteurs à gaz permanents.

Voici une explication rapide du fonctionnement du compresseur.

Vapeur à un étage.

Un circuit de base décrit par un fluide frigorigène est représenté sur la figure 6-b. Lors de son passage dans le détendeur, la chute de température fait baisser la température du liquide.

Impression ; le mélange liquide-vapeur résultant est transféré transféré dans un évaporateur où il est évaporé.

Une température constante T_f de la source froide produit un effet utile.

A la sortie de l'évaporateur, le gaz est aspiré par le compresseur et comprimé par pression.

A haute pression P_c , P_f devient plus faible et la température du fluide passe de T_f à T_1

La transformation suivante correspond à un refroidissement isobare suivi d'une condensation.

Liquide dans le condenseur (conversions 1 - 3). Le liquide produit est ensuite collecté.

Dans une bouteille de stockage qui continue le cycle [9]:

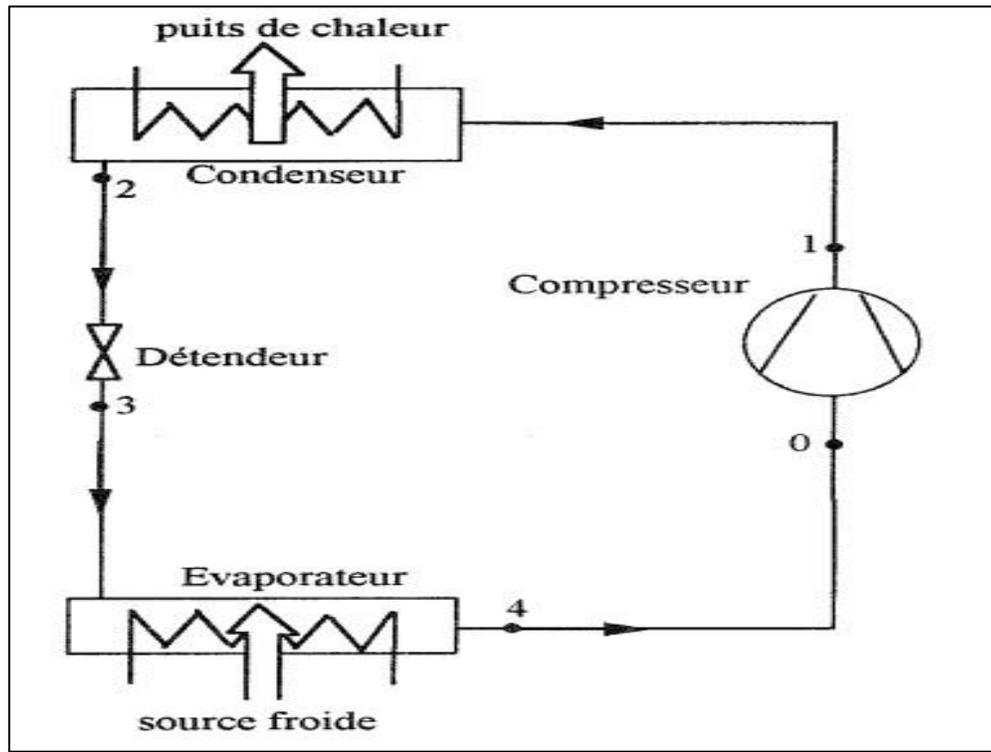


Figure (1. 6-a) : Schéma d'une machine frigorifique à compression de vapeur [9]

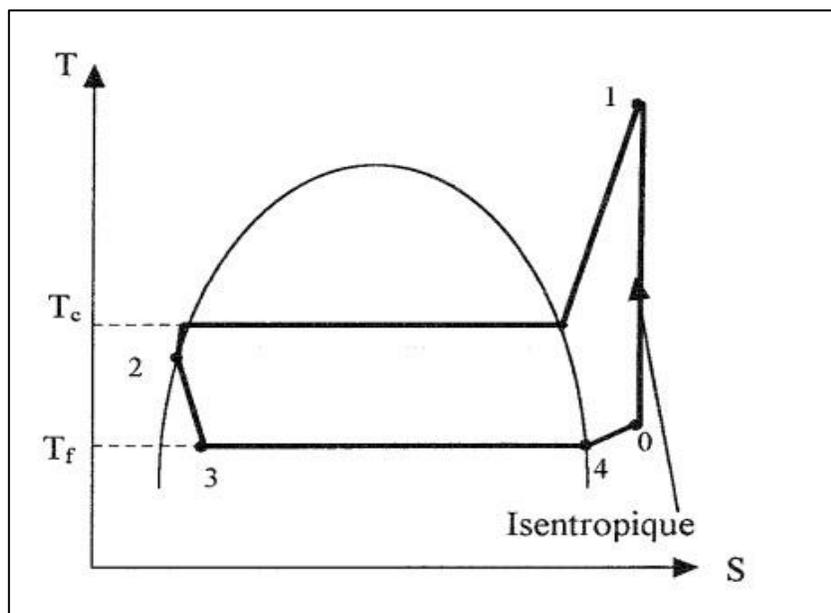


Figure (1. 6-b) : Cycle de fonctionnement dans le diagramme (T, S) [9]

1.B.4. Eléments composants une machine frigorifique

Les composants principaux d'une machine frigorifique comprennent le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. Ces composants travaillent en tandem pour extraire la chaleur d'un environnement et la rejeter dans un autre. Voici une description plus détaillée de ces composants [10]:

○ 1.B.4.1. Compresseur

Les compresseurs sont responsables de la compression du réfrigérant gazeux. Il aspire et comprime un gaz réfrigérant à basse pression, augmentant à la fois la pression et la température du liquide. Cela permet au fluide de circuler à travers le système.



Figure (1.7) : Le compresseur [10]

○ 1.B.4.2. Condenseur

Un condenseur est un échangeur de chaleur dans lequel un réfrigérant à haute pression et haute température libère la chaleur absorbée par l'environnement pour le refroidir. Le réfrigérant se condense sous haute pression en un liquide et libère de la chaleur dans le milieu extérieur, généralement par des tubes ou des ailettes. . [10]

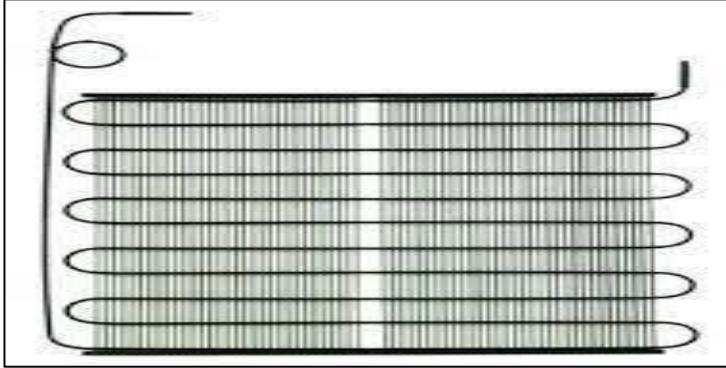


Figure (1. 8) : Le Condenseur [10]

○ 1.B.4.3. Détendeur

Un détendeur est un dispositif d'étranglement entre le condenseur et l'évaporateur. La pression la réfrigérante chute et la température chute. Les détendeurs régulent également le débit de réfrigérant dans le système. [10]



Figure (1.9) : Le Détendeur [10]

○ 1.B.4.4. Évaporateur

Un évaporateur est un autre type d'échangeur de chaleur dans lequel un réfrigérant basse pression et basse température absorbe la chaleur de l'environnement pour la refroidir. Le réfrigérant

s'évapore lors du passage de l'état liquide à l'état gazeux, absorbant la chaleur de l'environnement. [10]



Figure (1. 10) : l'Évaporateur [10]

Partie C : les fluides frigorigènes

1.C.1. Définition

Les fluides frigorigènes sont des substances ou des mélanges de substances utilisés dans les circuits des systèmes de réfrigération, tels que :

Chambre froide, réfrigérateur, pompe à chaleur. Les fluides frigorigènes ont la particularité d'avoir une très faible température d'évaporation sous pression atmosphérique. Cette propriété thermodynamique permet la génération d'air froid [11].

Les réfrigérants sont des carburants dans les systèmes de réfrigération qui circulent, s'évaporent, se compriment, se liquéfient et se dilatent. Le transfert de chaleur se produit en absorbant la chaleur en dessous de la température ambiante par évaporation et en relibérant la chaleur au-dessus de la température ambiante par condensation. Les fluides frigorigènes permettent l'échange de chaleur au sein d'un système de réfrigération en modifiant leur état. évaporation et condensation.

1.C.2. Rappel historique

L'eau est le premier fluide frigorigène utilisé depuis l'Antiquité. En 1876, Linde a introduit l'ammoniac. Au début du XXe siècle, les hydrocarbures, le dioxyde de carbone (naval) et le dioxyde de soufre étaient utilisés. Malheureusement, tous ces composés sont toxiques ou

inflammables. C'est pourquoi nous utilisons depuis les années 1930 des dérivés chloroformés du méthane et de l'éthane [11].

1.C.3. Classification des fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes sont classés afin que chaque liquide puisse être identifié avec précision. Cette classification repose sur des critères différents selon la famille ou la sous-famille de liquides considérée.

Les fluides frigorigènes sont généralement classés en deux groupes.

○ 1.C.3.1. Composés inorganiques

Les fluides de cette famille appartiennent à la série 700.

Le liquide le plus couramment utilisé dans cette famille est l'ammoniac (NH_3), appelé R717.

Répondre : signifie réfrigérant.

Le 7 La place des centaines indique la série 700.

17 : Les deux derniers chiffres indiquent la masse molaire du corps (14 pour l'azote (N) et 3 pour l'hydrogène (H)). [11].

○ 1.C.3.2. Composés organiques

Les composés organiques sont des dérivés du méthane (CH_4) et de l'éthane (C_2H_6). Ils sont classés en trois sous-familles. [11]

- 1- Corps pur.
- 2- Un mélange (de substances pures).
- 3 – hydro carbure.

Corps pur : Les substances pures sont classées en trois sous-groupes selon leur composition chimique.

- CFC (Chlorofluorocarbure).
- HCFC (chlorofluorocarbures).
- HFC (Fluorocarbure).

La principale caractéristique des substances pures est qu'elles se condensent et s'évaporent à température et pression constantes. [12].

Mélange : Les mélanges de substances pures sont divisés en deux sous-groupes. a)

Les azéotropes qui se comportent comme des corps purs :

Réfrigérant série 500.

b) Azéotropes qui ne sont pas des corps purs : Réfrigérant série 400. [12].

3) Hydrocarbures : Les fluides frigorigènes de type hydrocarbures sont principalement issus du raffinage du pétrole, mais aussi du dégazage (récupération des hydrocarbures liquides) du gaz naturel.

R600 (butane), R600a (isobutane) et R290 (propane) sont les plus couramment utilisés en soi.

Contrairement aux autres fluides frigorigènes, les hydrocarbures sont hautement inflammables.

Selon la classification, les fluides frigorigènes de type HC (hydrocarbures) entrent dans le groupe des liquides dits "naturels" avec les liquides de la série 700 tels que le R717 (ammoniac), le R718 (eau) ou le R744 (dioxyde de carbone). » [12]

1.C.4. Domaines d'application

Le tableau suivant résume les domaines d'application privilégiés des fluides frigorigènes les plus utilisés d'application privilégiés des fluides frigorigènes les plus utilisés

Tableau (1.1) : Domaines d'application privilégiés des fluides frigorigènes les plus utilisés.[12]

Fluid frigorigène	Designation Chimique	Formule chimique	Plage d'utilisati °C	Domaine d'application
R12	Dichlorodifluoromethane Ethane	CC12F2	-40 à +10	Réfrigérateurs, installation frigorifiques, industriels, équipement des engins de transport.
R13	Monochlorotrifluorométhane	CC1F3	-100 à -60	Installations frigorifiques en cascade pour application industriels.
R21	Dichlorofluométha	CHC12F	-20 à +20	Pompe à chaleurs, instillations frigorifiques à température de condensation élevée.
R22	Chlorodifuluorométhane	CHC1F2	-50 à +10	Pour navires, installation de congélation.
R23	Trifluorométhane	CHF3	-100 à -60	Installations frigorifiques mono et bi-étages pour application industrielles et laboratoires.
R717	Ammoniac	NH3	-70 à +10	Installations frigorifiques pour produits, applications industrielles.

1.C.5. Caractéristiques physiques du fluide frigorigène parfait

Les principales caractéristiques sont [13] :

1. Chaleur latente de vaporisation très élevée.
2. Le point d'ébullition est bien en dessous de la pression atmosphérique.
3. N'affecte pas les métaux qui composent le circuit (par exemple l'ammoniac attaque le cuivre).
4. Ininflammable et non explosif lorsqu'il est mélangé à l'air.
5. Il n'y a pas d'impact sur la santé du personnel. □ N'interfère pas avec les aliments stockés.
6. Inodore ou faible, pas d'inconfort.
7. N'affecte pas la couche d'ozone.
8. Aucune mesure contre le réchauffement climatique n'a été prise.

1.C.6. Critères de choix d'un fluide frigorigène

Les réfrigérants ont pour tâche de transférer de manière fiable la chaleur entre l'environnement réfrigéré et l'environnement extérieur en subissant une série de transformations thermodynamiques à l'intérieur du refroidisseur. Les fluides frigorigènes doivent répondre à tous les critères définis cidessous.[13]

1.C.6.1. Critères thermodynamiques

Ces critères peuvent être résumés comme suit :

- La pression d'évaporation du liquide doit être la plus élevée possible au-dessus de la pression atmosphérique afin de maintenir la surpression du circuit frigorifique par rapport à l'atmosphère.
- La température critique du liquide doit être supérieure à la température de condensation pour ne pas réduire l'efficacité du système de refroidissement. En général, vous devez toujours essayer de maintenir le mouvement de la machine aussi loin que possible de la zone dangereuse.
- La pression dans le circuit frigorifique est dans les valeurs recommandées par le fabricant du compresseur pour limiter et optimiser le taux de compression (rapport de la pression de refoulement à la pression d'aspiration) à une valeur appropriée (généralement 3-4) doit être maintenue. Rendement volumétrique du compresseur.

- Pour limiter la surchauffe de la vapeur lors de la compression, le rapport de chaleur spécifique (C_p/C_v) doit être le plus proche possible de 1. Une forte surchauffe peut modifier les propriétés de l'huile.
- La conductivité thermique, la densité, la viscosité cinématique, la capacité calorifique sont les paramètres qui dépendent de l'amélioration des échanges thermiques.

1.C.6.2. Critères techniques

Ces critères peuvent être résumés comme suit.

- La compatibilité du réfrigérant avec les matériaux utilisés dans le système doit être vérifiée.
- Le fluide frigorigène doit être choisi pour donner le meilleur compromis entre viscosité et miscibilité de l'ensemble fluide/lubrifiant.
- S'assurer qu'il n'y a pas d'eau dans le circuit de refroidissement.
- Le fluide frigorigène doit pouvoir conserver son intégrité et ses propriétés malgré des températures élevées en fin de compression et des cycles "chaud/froid" répétés.

1.C.6.3. Critères de sécurité

Ces critères peuvent être résumés comme suit.

- Les fluides frigorigènes doivent être non toxiques, ininflammables et non explosifs.
- Pour les applications dans l'industrie alimentaire, les liquides ne doivent pas affecter les aliments.
- Le liquide devrait avoir peu ou pas d'impact sur l'appauvrissement de la couche d'ozone terrestre et le réchauffement climatique.

1.C.6.4. Critères économiques

Ces critères peuvent être résumés comme suit.

- La sélection du réfrigérant détermine la sélection des composants dans le circuit de réfrigération et, plus important encore, le coût global du système.
- La disponibilité de liquide doit être suffisante pour permettre une maintenance rapide du système.
- Les prix des liquides soumis à de futures interdictions peuvent augmenter à l'approche de la date limite.

1.C.7. Détermination du coefficient de performance COP

Le coefficient de performance (COP) est défini comme le rapport de la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur à la quantité de chaleur fournie au générateur plus le travail de la pompe à solution. Le coefficient de performance est calculé par la formule suivante. .[13]

$$\text{COP} = \frac{Q_E}{Q_G + W_P} \quad (1.1)$$

1.C.8. Coefficient de performance de Carnot (COP_C)

Pour une machine de Carnot tritherme, l'expression du coefficient de performance est donnée par la formule suivant

$$\text{COP}_C = \frac{T_E}{T_C + T_E} \quad (1.2)$$

Le coefficient de performance de Carnot (**COP_C**) est le coefficient de performance maximal possible pour un système à absorption. .[13]

1.C.9. Efficacité de système (η)

L'efficacité du système (η) est définie comme étant le rapport du coefficient de performance (COP) sur le coefficient de performance de Carnot (COP_C). .[13]

1.6. Conclusion

Ce chapitre porte essentiellement sur la production du froid. En effet, on a essayé de donner un aperçu les machines frigorifiques, ainsi que les différents fluides frigorigènes rencontrés dans la pratique.



Chapitre 2 :
technologies de réfrigération à
compression de vapeur



2.1. Introduction

La réfrigération à compression de vapeur est une technologie couramment utilisée pour produire du froid dans de nombreuses applications, allant de la climatisation des bâtiments à la réfrigération industrielle. Cette technologie repose sur un cycle thermodynamique qui utilise un fluide frigorigène pour extraire la chaleur d'un espace ou d'un fluide et la rejeter à une température plus élevée.

Le principe de base de la réfrigération à compression de vapeur repose sur l'utilisation d'un compresseur qui comprime le fluide frigorigène, augmentant ainsi sa pression et sa température. Ensuite, le fluide frigorigène passe à travers un condenseur, où il cède sa chaleur à l'environnement extérieur, se condense et se transforme en liquide. Le liquide frigorigène passe ensuite par une vanne d'expansion, qui réduit sa pression et le fait passer dans l'évaporateur. Dans l'évaporateur, le liquide frigorigène s'évapore en absorbant la chaleur de l'espace ou du fluide à refroidir, créant ainsi l'effet de refroidissement souhaité. Enfin, le fluide frigorigène, sous forme de vapeur basse pression, retourne au compresseur pour recommencer le cycle.

Cette technologie offre de nombreux avantages, notamment une grande efficacité énergétique, une grande flexibilité dans les applications et la capacité de fournir des températures de refroidissement très basses. De plus, il existe une large gamme de fluides frigorigènes disponibles, ce qui permet de choisir celui qui convient le mieux à chaque application en termes de performances et d'impact environnemental.

2.2. Cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal

Dans un cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal, ces deux éléments sont :

Les principaux inconvénients du cycle de Carnot inversé sont :

Le réfrigérant est complètement évaporé avant d'entrer dans le système compresseur le frigorigène est complètement évaporé avant d'être admis dans le compresseur, la turbine a été remplacée par un détendeur. Ce faisant, le cycle devient moins efficace mais plus pratique que le cycle de Carnot inverse.

Le schéma du cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal est illustré à la figure 1 et figure 2. Ce cycle, qui est le cycle de réfrigération le plus utilisé parmi les machines frigorifiques, comprend quatre évolutions :

- (1-2) La compression isentropique dans le compresseur ;
- (2-3) L'évacuation de chaleur à pression constante dans le condenseur ;
- (3-4) La détente isenthalpique dans le détendeur ;
- (4-1) L'extraction de chaleur à pression constante dans l'évaporateur.

Dans un cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal, le réfrigérant entre dans le compresseur sous la forme suivante : C'est une vapeur saturée (état 1) et comprimée isentropiquement. Pression dans le condenseur. en attendant

Au fur et à mesure de son développement, la température du réfrigérant augmente, Dépasse la température des environnements chauds extérieurs.

Une fois dans le condenseur, le liquide a la forme suivante :

Vapeur surchauffée (état 2). Circulant dans le condenseur Dissiper la chaleur vers l'environnement extérieur. Il se présente sous la forme de Du liquide saturé est fourni au détendeur (état 3). Un liquide saturé subit une chute de pression à l'intérieur Tourner le détendeur de pression du condenseur sur pression Vaporisateur.

Il quitte le détendeur et entre dans l'évaporateur sous forme de gaz. Mélanges liquide-vapeur à faible puissance (condition 4). Quand il traverse L'évaporateur absorbe la chaleur de l'environnement réfrigéré évaporer. Il quitte finalement le vaporisateur sous forme de vapeur. Sature dans le compresseur (état 1). Le circuit est Atteint [14]

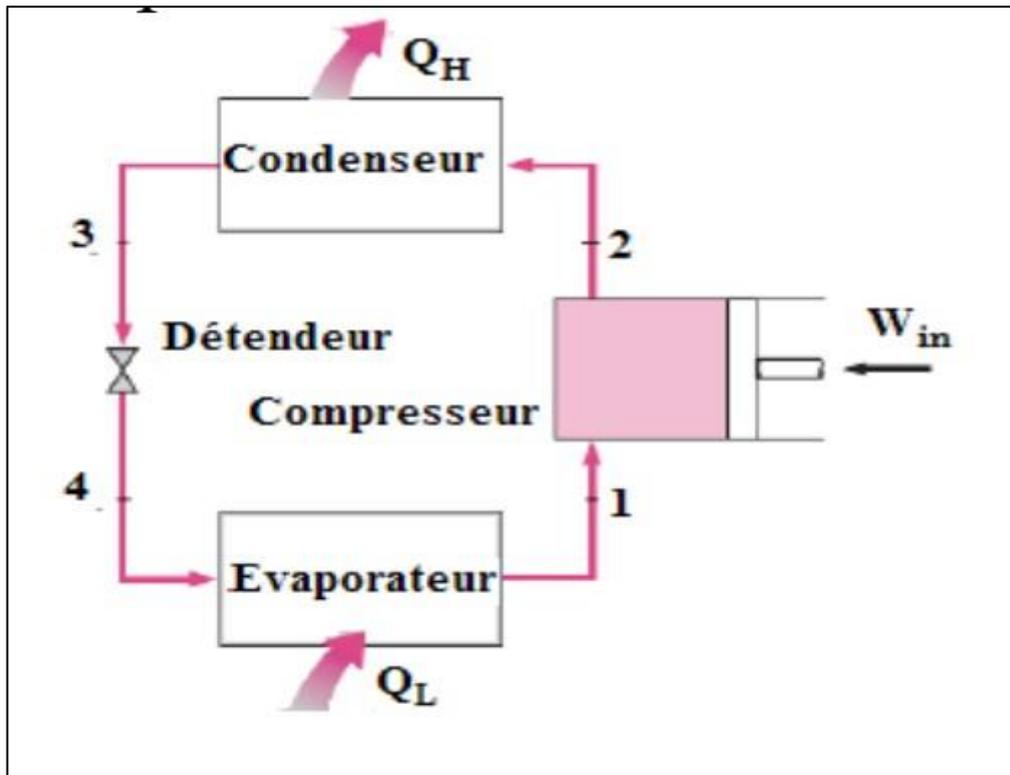


Figure (2. 1) : : Schéma du réfrigérateur de réfrigération à compression de vapeur idéal [14]

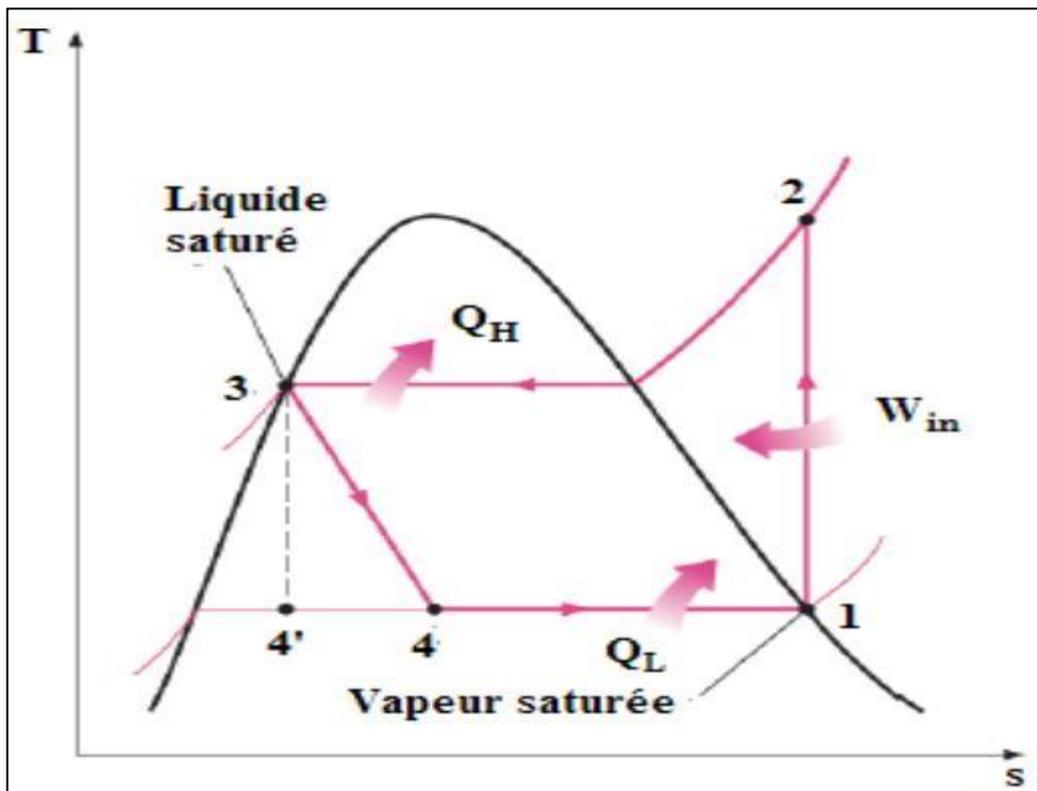


Figure (2. 2) : Diagramme T-s du cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal [14]

2.2.1 : Composants de cycles

Le cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal comprend les composants suivants :

Compresseur : Le compresseur est responsable de la compression du fluide frigorigène. Il aspire le fluide à basse pression et basse température provenant de l'évaporateur et le comprime, augmentant ainsi sa pression et sa température.

Condenseur : Le condenseur est l'endroit où le fluide frigorigène comprimé et chaud cède de la chaleur à une source externe, généralement l'air ambiant ou de l'eau. La chaleur transférée du fluide vers l'environnement extérieur permet au fluide de se condenser en un liquide à haute pression.

Vanne d'expansion ou détendeur : La vanne d'expansion ou le détendeur est un dispositif qui réduit la pression du fluide frigorigène en aval du condenseur. Cette réduction de pression provoque une chute de température du fluide.

Évaporateur : L'évaporateur est le composant où le fluide frigorigène à basse pression et basse température absorbe la chaleur de la source froide, telle que l'air à l'intérieur d'un réfrigérateur. Cette absorption de chaleur provoque l'évaporation du liquide, transformant le fluide en vapeur froide à basse pression.

2.2.2. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du cycle de réfrigération à compression de vapeur idéal repose sur les quatre étapes principales suivantes : [14]

Compression : Le cycle commence par la compression du fluide frigorigène à l'aide d'un compresseur. Cette compression augmente la pression et la température du fluide. En comprimant le fluide, on lui fournit de l'énergie sous forme de travail, ce qui élève son niveau d'enthalpie. [14]

Condensation : Le fluide frigorigène comprimé, maintenant à haute pression et haute température, est envoyé vers le condenseur. Dans le condenseur, le fluide cède de la chaleur à une source externe, généralement de l'air ou de l'eau, et se refroidit. La chaleur cédée provoque la condensation du fluide, le transformant en un liquide à haute pression. [14]

Détente : Le liquide haute pression sort du condenseur et passe par une vanne d'expansion ou un détendeur, qui réduit rapidement la pression du fluide. Cette détente rapide entraîne une diminution

de la température et de la pression du fluide, le transformant en un mélange de liquide-vapeur à basse température. [14]

Évaporation : Le mélange liquide-vapeur à basse température est acheminé vers l'évaporateur. À l'intérieur de l'évaporateur, le fluide absorbe la chaleur de la source froide, généralement l'air ou l'espace à refroidir. Cette absorption de chaleur provoque l'évaporation du liquide, le transformant en vapeur froide à basse pression.[14]

2.3. Cycle de réfrigération à compression de vapeur réel

Le cycle de réfrigération à compression de vapeur réel est basé sur les mêmes principes fondamentaux que le cycle idéal, mais il tient compte des pertes et des inefficacités qui se produisent dans les systèmes réels [15]

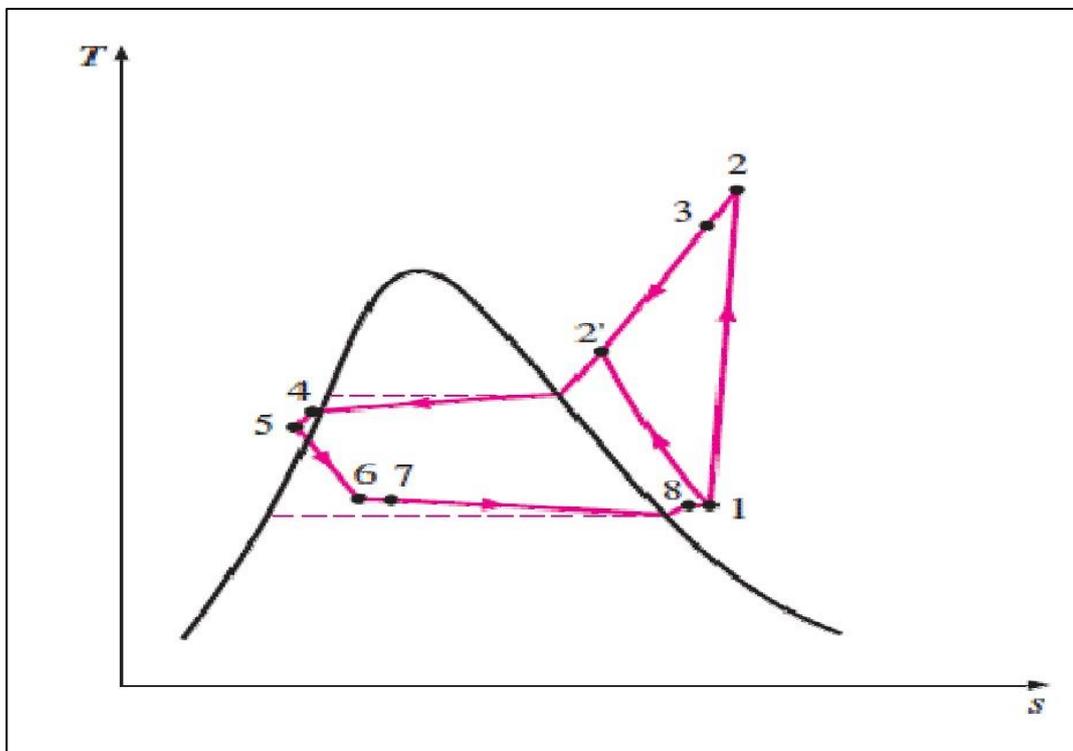


Figure (3. 3) : Diagramme T-s du cycle de réfrigération à compression de vapeur réel

Composant de cycle [15]

Les composants principaux d'un cycle de réfrigération à compression de vapeur réel sont les suivants [15] :

Compresseur : Il comprime le fluide frigorigène gazeux provenant de l'évaporateur, augmentant ainsi sa pression et sa température.

Condenseur : Il permet au fluide frigorigène comprimé et chaud de libérer de la chaleur à un milieu extérieur, généralement de l'air ou de l'eau. Le fluide frigorigène se condense et se transforme en liquide à haute pression.

Évaporateur : Il est en contact avec la source froide, telle que l'air ambiant ou les produits stockés dans un réfrigérateur. Le fluide frigorigène à basse pression et basse température s'évapore en absorbant la chaleur de la source froide, ce qui maintient une température basse à l'intérieur du compartiment réfrigéré.

Dispositif d'expansion : Il régule le débit du fluide frigorigène entre le condenseur et l'évaporateur. Il peut prendre la forme d'une vanne d'expansion thermique ou d'un détendeur, qui réduit la pression du fluide frigorigène et le prépare pour l'évaporation dans l'évaporateur.[2]

2.3.1 : Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du cycle de réfrigération à compression de vapeur réel repose sur les mêmes principes de base que le cycle idéal, mais il tient compte des pertes et des inefficacités du système réel. Voici le principe de fonctionnement du cycle de réfrigération à compression de vapeur réel [15]:

Compression : Le compresseur aspire le fluide frigorigène gazeux à basse pression provenant de l'évaporateur et le comprime, augmentant ainsi sa pression et sa température. Cependant, en raison des inefficacités du compresseur, une partie de l'énergie est perdue sous forme de chaleur et d'effets de frottement.

Condensation : Le fluide frigorigène comprimé et chaud est acheminé vers le condenseur où il cède de la chaleur à un milieu extérieur, généralement de l'air ou de l'eau, pour se condenser en un liquide à haute pression. Les pertes de chaleur supplémentaires peuvent se produire en raison de la différence de température entre le fluide et le milieu extérieur, ainsi que des pertes de chaleur dans les parois du condenseur.

Expansion : Le fluide frigorigène liquide à haute pression passe à travers la vanne d'expansion ou le détendeur, qui régule le débit et la pression du fluide. Cela permet une détente contrôlée du fluide, réduisant sa pression et sa température. Des pertes de charge et des inefficacités peuvent également se produire lors du passage du fluide à travers la vanne d'expansion ou le détendeur.

Évaporation : Le fluide frigorigène à basse pression et basse température résultant de l'expansion pénètre dans l'évaporateur, qui est en contact avec la source froide à refroidir, comme l'air ambiant ou les produits dans un réfrigérateur. Le fluide frigorigène s'évapore en absorbant la chaleur de la source froide, maintenant une température basse dans le compartiment réfrigéré. Cependant, des pertes de chaleur supplémentaires peuvent se produire en raison des différences de température entre le fluide et la source froide, ainsi que des pertes de chaleur dans les parois de l'évaporateur.

2.4. Systèmes de réfrigération à compression de vapeur innovants

Dès que le taux de compression est élevé, les rendements des machines frigorifiques à un étage de compression deviennent mauvais.

De plus, avec des fluides dont le coefficient adiabatique est élevé (ammoniac par exemple), les températures en fin de compression atteignent des valeurs élevées et incompatibles avec un bon fonctionnement du compresseur et cela dès que le taux de compression dépasse les valeurs 7 ou 8 (cas de l'ammoniac). Il est alors nécessaire de scinder la compression du fluide en plusieurs phases associées à un refroidissement intermédiaire des vapeurs entre les phases de compression [16]

2.4.1. Réfrigération à cascade

Les systèmes de réfrigération à cascade sont des systèmes de refroidissement qui utilisent deux circuits de réfrigération en cascade pour atteindre des températures très basses. Ces systèmes sont utilisés dans une variété d'applications, notamment dans les laboratoires de recherche, les usines de production de produits chimiques et pharmaceutiques, et les industries de la cryogénie.

Le principe de fonctionnement de ces systèmes est basé sur le transfert de chaleur entre les deux circuits de réfrigération en cascade. Le circuit supérieur utilise un réfrigérant à température ambiante pour évaporer et absorber la chaleur du circuit inférieur, qui utilise un réfrigérant à très basse température pour refroidir l'objet à refroidir.[16]

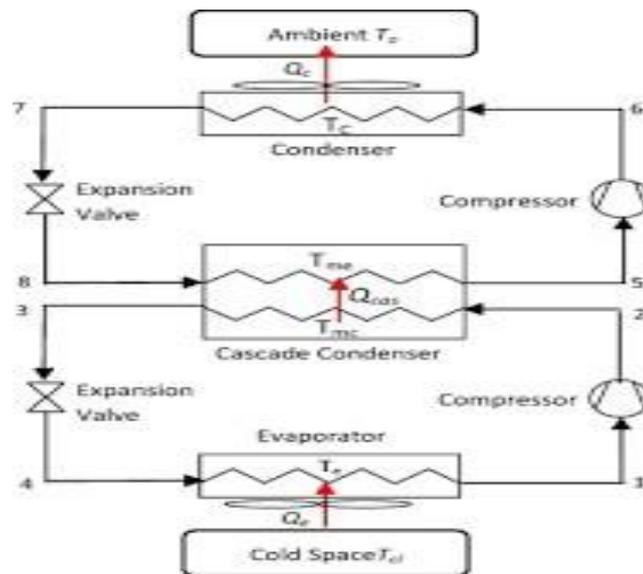


Figure (2.4): Cycle de cascade [16]

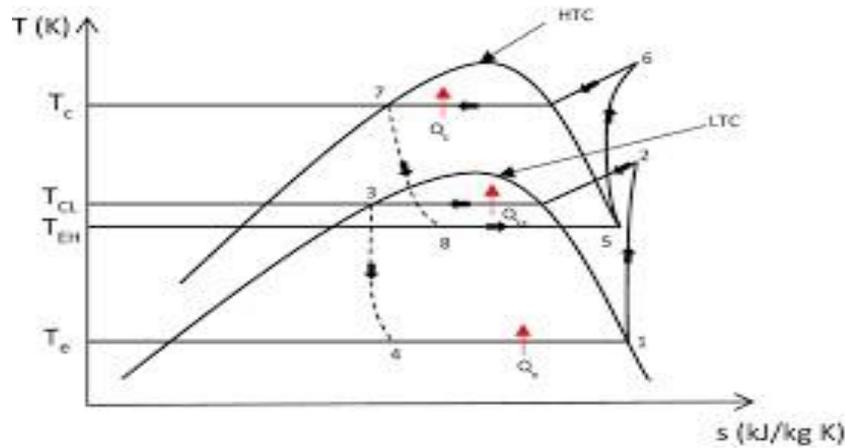


Figure (2.5): Diagramme t-s de cycles cascade [16]

2.4.1.1 : Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de la réfrigération à cascade repose sur l'utilisation de deux cycles de réfrigération indépendants, appelés étages, qui sont couplés pour permettre le refroidissement à des températures très basses. Chaque étage utilise un fluide frigorigène différent avec des températures d'ébullition adaptées à son étage respectif.

Voici le principe de fonctionnement de la réfrigération à cascade :

Deux étages : La réfrigération à cascade utilise deux étages de réfrigération, appelés étage supérieur et étage inférieur. Chaque étage fonctionne indépendamment et utilise un compresseur, un condenseur, un détendeur et un évaporateur.

Température de condensation : L'étage supérieur a une température de condensation plus élevée que l'étage inférieur. Cela signifie que le fluide frigorigène de l'étage supérieur peut condenser à une température plus élevée que celle de l'étage inférieur.

Couplage thermique : Les condenseurs de chaque étage sont couplés thermiquement, ce qui signifie que la chaleur rejetée lors de la condensation du fluide frigorigène dans l'étage supérieur est transférée à l'étage inférieur. Ce transfert de chaleur permet de refroidir le fluide frigorigène de l'étage inférieur.

Températures de fonctionnement : L'étage supérieur est utilisé pour refroidir la source froide à une température relativement élevée, tandis que l'étage inférieur est utilisé pour refroidir une source froide à une température plus basse.

Échange de chaleur : Lorsque le fluide frigorigène de l'étage supérieur condense, il transfère de la chaleur à l'étage inférieur via le couplage thermique. Cette chaleur est ensuite rejetée dans le condenseur de l'étage inférieur.

Sources froides distinctes : Chaque étage est en contact avec une source froide différente. La source froide de l'étage supérieur peut être une température ambiante plus élevée, tandis que la source froide de l'étage inférieur peut être une température plus basse, telle que celle d'un congélateur ou d'une chambre froide.

Efficacité améliorée : En utilisant deux étages distincts avec des températures d'ébullition adaptées, la réfrigération à cascade permet d'atteindre des températures de refroidissement plus basses et d'améliorer l'efficacité globale du système de réfrigération.

La réfrigération à cascade est couramment utilisée dans les applications nécessitant des températures de refroidissement extrêmement basses, telles que la recherche scientifique, la cryogénie, les laboratoires, l'industrie chimique, etc.[16]

2.4.1.1.a Avantages des systèmes de réfrigération à cascade

Les systèmes de réfrigération à cascade ont plusieurs avantages par rapport aux autres systèmes de réfrigération. Tout d'abord, ils peuvent atteindre des températures beaucoup plus basses que les autres systèmes de réfrigération. En outre, ces systèmes sont très efficaces pour maintenir des températures stables et constantes, ce qui est important pour les applications de recherche et de production.

Les systèmes de réfrigération à cascade sont également très fiables et ont une durée de vie plus longue que les autres systèmes de réfrigération. Ils nécessitent également moins d'entretien et sont plus faciles à réparer en cas de panne. Enfin, ces systèmes sont plus économes en énergie que les autres systèmes de réfrigération, ce qui peut aider à réduire les coûts d'exploitation à long terme.[17]

2.4.1.1.b. Inconvénients des systèmes de réfrigération à cascade

Bien que les systèmes de réfrigération à cascade présentent de nombreux avantages, ils ont également certains inconvénients. Tout d'abord, ces systèmes sont plus coûteux que les autres systèmes de réfrigération en raison de leur complexité et de leur technologie avancée. De plus, ces systèmes nécessitent des compétences spécialisées pour leur installation, leur entretien et leur réparation, ce qui peut augmenter les coûts d'exploitation à long terme.

En outre, ces systèmes peuvent être bruyants et nécessitent souvent des dispositifs de réduction du bruit pour minimiser les perturbations sonores. Enfin, ces systèmes peuvent être sujets à des fuites de réfrigérant, ce qui peut avoir un impact négatif sur l'environnement si les fuites ne sont pas détectées et réparées rapidement. [17]

2.4.1.1.c. Applications des systèmes de réfrigération à cascade

Les systèmes de réfrigération à cascade sont utilisés dans une variété d'applications industrielles et scientifiques. L'une des principales applications de ces systèmes est la cryogénie, où ils sont utilisés pour produire des températures extrêmement basses. Ces systèmes sont également utilisés dans les laboratoires de recherche pour refroidir des équipements sensibles tels que des spectromètres de masse et des microscopes électroniques.

En outre, les systèmes de réfrigération à cascade sont utilisés dans l'industrie pharmaceutique pour stocker des médicaments et des vaccins à des températures précises. Ils sont également utilisés dans les usines de production de produits chimiques pour maintenir des températures stables lors de la fabrication de produits chimiques sensibles à la température. [17]

2.4.2. Systèmes de Réfrigération à compression Multi-Étages

Le système de réfrigération à compression multi-étages est une technologie de pointe qui permet de refroidir efficacement les espaces de grande taille.

Ce système utilise plusieurs étages de compression pour atteindre des températures très basses, ce qui le rend idéal pour les applications industrielles telles que la cryogénie et la réfrigération des gaz naturels.[17]

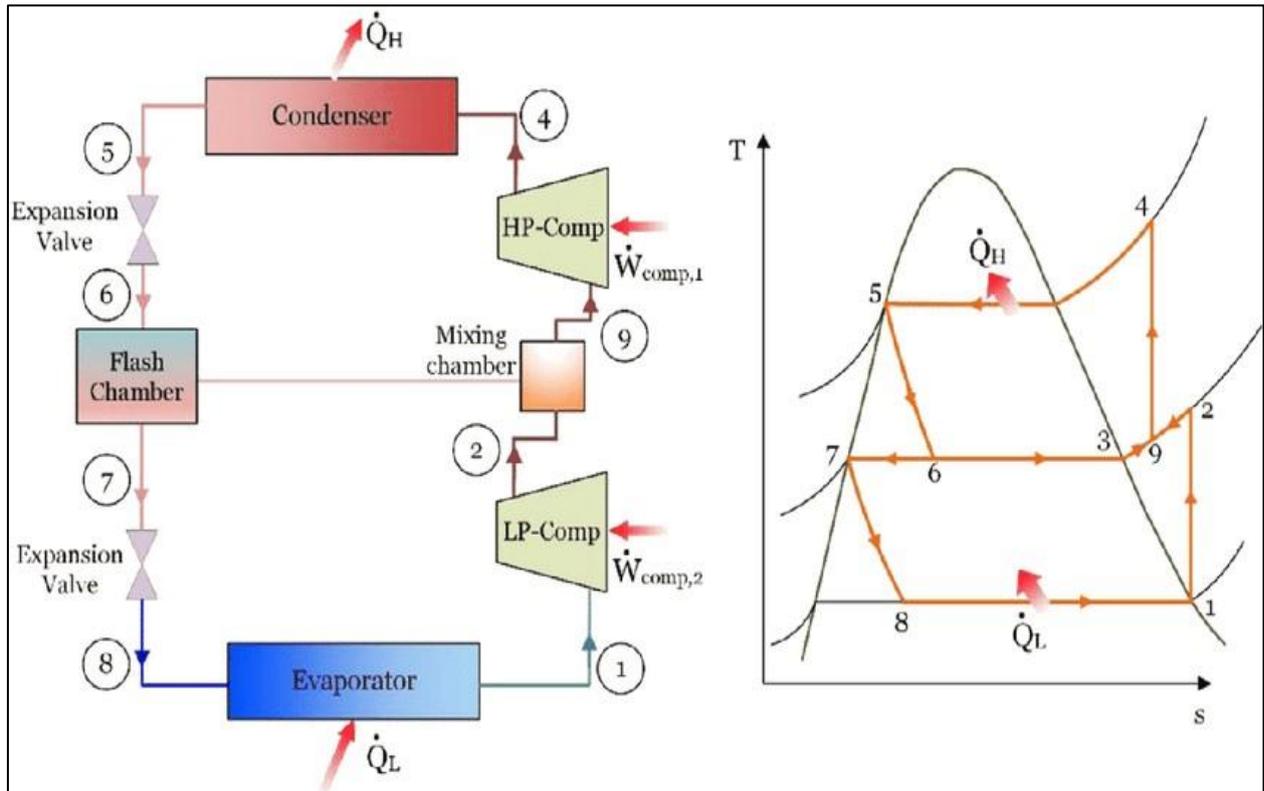


Figure (2. 6) : Cycles et diagrammes t-s de systèmes de Réfrigération à compression multi étage [17]

2.4.2.1 : Principe fonctionnement

Le principe fonctionnement de des systèmes de réfrigération à compression multi-étages est similaire à celui des systèmes à cascade, mais avec plusieurs étages de réfrigération plutôt que deux. Ces systèmes sont conçus pour atteindre des températures encore plus basses en utilisant plusieurs cycles de réfrigération en cascade. [17]

Voici le principe de fonctionnement des systèmes de réfrigération à compression multi-étages

Étages de réfrigération : Le système comprend plusieurs étages de réfrigération, généralement trois ou plus. Chaque étage est composé d'un compresseur, d'un condenseur, d'un détendeur et d'un évaporateur.

Étages en cascade : Les étages de réfrigération sont connectés en cascade, ce qui signifie que la chaleur rejetée par l'étage supérieur est utilisée pour refroidir l'étage inférieur. Le fluide frigorigène circule à travers les étages successifs, transférant la chaleur d'un étage à l'autre.

Températures croissantes : Les étages sont organisés de manière à avoir une température de condensation croissante d'un étage à l'autre. Cela signifie que chaque étage peut condenser à une température plus élevée que l'étage précédent.

Couplage thermique : Les condenseurs de chaque étage sont thermiquement couplés, permettant le transfert de chaleur de l'étage supérieur à l'étage inférieur. La chaleur rejetée lors de la condensation du fluide frigorigène dans les étages supérieurs est utilisée pour refroidir les étages inférieurs.

Sources froides distinctes : Chaque étage est en contact avec une source froide différente. Les sources froides peuvent être des températures ambiantes ou plus basses, en fonction des besoins de refroidissement spécifiques de chaque étage.

Contrôle de la température : Les systèmes de réfrigération à compression multi-étages peuvent être contrôlés individuellement pour maintenir différentes températures dans chaque étage, en fonction des exigences de refroidissement.

Efficacité améliorée : L'utilisation de plusieurs étages permet d'atteindre des températures encore plus basses que les systèmes à cascade traditionnels, tout en optimisant l'efficacité énergétique globale du système.

2.4.2.2. Avantages

Les systèmes de réfrigération à compression multi-étages offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes de réfrigération traditionnels.

Ils sont plus économes en énergie, plus silencieux, et peuvent atteindre des températures plus basses. De plus, ils sont plus fiables et nécessitent moins d'entretien que les systèmes de réfrigération à absorption.

2.4.2.3 Applications

Les systèmes de réfrigération à compression multi-étages sont utilisés dans une variété d'applications industrielles, notamment la cryogénie, la réfrigération des gaz naturels, et la production de glace sèche.

Ils sont également utilisés dans les laboratoires de recherche, les centres de calcul haute performance, et les installations médicales pour le stockage à long terme d'échantillons biologiques et de produits pharmaceutiques.

2.4.3. Systèmes de réfrigération polyvalents avec un seul compresseur

Les systèmes de réfrigération polyvalents avec un seul compresseur sont une avancée technologique majeure dans le domaine de la réfrigération. Ces

systèmes permettent de réguler la température dans des environnements variés, tout en économisant de l'énergie et en réduisant les coûts d'exploitation.[17]

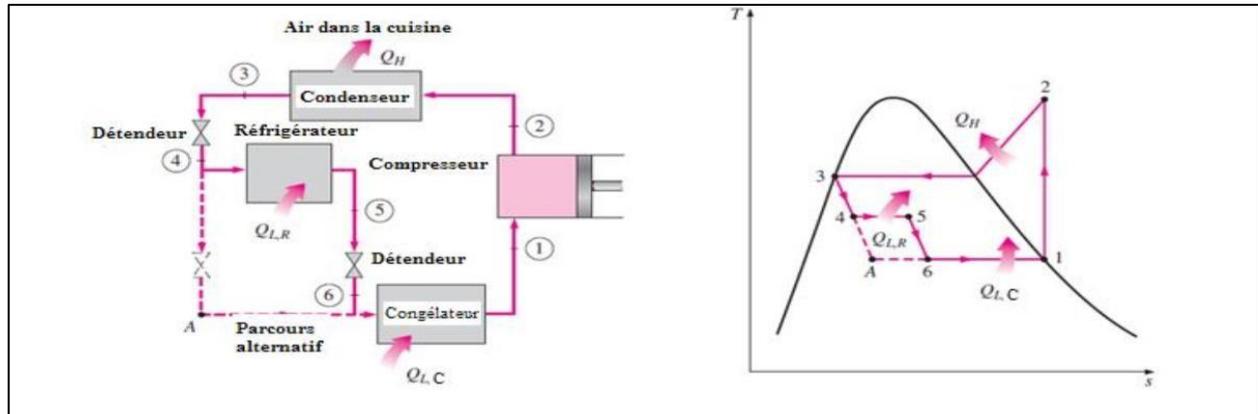


Figure (2.7) : Schéma et diagramme T-s d'un réfrigérateur-congélateur avec un seul compresseur. [17]

2.4.3.1 : Principe de fonctionnement

Les systèmes de réfrigération polyvalents avec un seul compresseur sont conçus pour fournir différentes températures de refroidissement dans des zones distinctes à partir d'un seul compresseur central. Ces systèmes permettent une utilisation efficace de l'énergie en partageant les capacités de refroidissement entre plusieurs zones.

2.5. Réfrigérant

Un réfrigérant est une substance qui refroidit l'air ou l'eau en absorbant la chaleur. Ils sont utilisés dans diverses applications telles que les systèmes de climatisation et de réfrigération. Il existe de nombreux types de fluides frigorigènes, chacun avec ses avantages et ses inconvénients. Les plus couramment utilisés sont les hydrofluorocarbures (HFC), les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochloro fluorocarbures (HCFC). [18]

2.5.1 : Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un réfrigérant repose sur ses propriétés thermodynamiques et son cycle de transformation à travers un système de réfrigération. Un réfrigérant est une substance chimique qui est utilisée dans les systèmes de réfrigération pour absorber la chaleur d'une source froide et la rejeter vers une source chaude.

Voici les principes de fonctionnement d'un réfrigérant [18] :

Cycle de réfrigération : Le réfrigérant circule à travers un cycle de réfrigération, qui comprend généralement les étapes suivantes : compression, condensation, détente et évaporation. Ces étapes permettent au réfrigérant de changer d'état entre liquide et gaz à des températures et pressions différentes.

Cycle répété : Après l'évaporation, le réfrigérant gazeux est aspiré par le compresseur, où le cycle recommence.

Les réfrigérants sont choisis en fonction de leurs propriétés thermodynamiques, de leur stabilité chimique, de leur compatibilité avec les matériaux du système de réfrigération et de leur impact sur l'environnement. Certains réfrigérants couramment utilisés sont les hydrofluorocarbures (HFC), les hydro chlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrocarbures (HC).

Il est important de noter que les réfrigérants doivent être manipulés et éliminés correctement pour minimiser les risques pour l'environnement et la santé humaine. De nombreux pays ont mis en place des réglementations strictes pour la gestion des réfrigérants, notamment dans le cadre de la transition vers des réfrigérants à faible potentiel de réchauffement climatique, tels que les hydro fluor oléfines (HFO) et les réfrigérants naturels comme l'ammoniac (NH_3) et le dioxyde de carbone (CO_2)

2.5.2. Cycle de réfrigération

Le cycle de réfrigération est le processus par lequel un réfrigérant refroidit l'air ou l'eau. Il se compose de quatre étapes principales :

Compression, condensation, détente, évaporation.

Lorsque le réfrigérant est comprimé, sa température et sa pression augmentent. Il passe ensuite à travers un condenseur et est refroidi pour devenir un liquide. Le liquide se dilate ensuite à travers un dispositif de détente, réduisant la pression et la température. Enfin, le réfrigérant est

vaporisé dans un évaporateur, absorbant la chaleur et refroidissant l'air ou l'eau environnante.

[18]

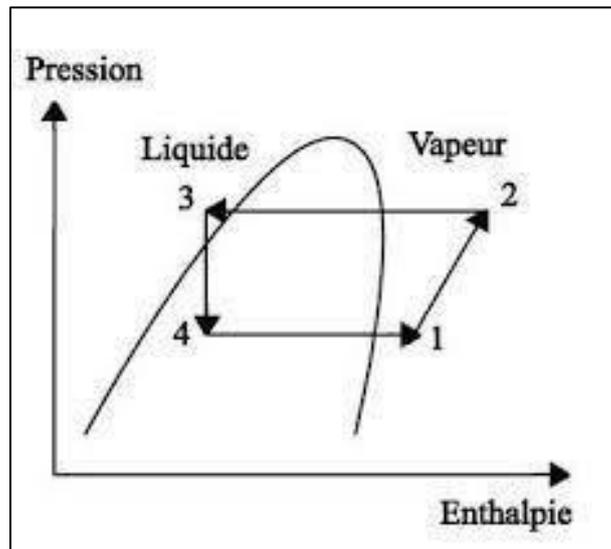


Figure (2. 8): cycle de réfrigérant [18]

2.5.3. Application de réfrigérant

Les réfrigérants sont utilisés dans une variété d'applications, y compris les systèmes de climatisation et de réfrigération commerciaux et résidentiels, les pompes à chaleur, les réfrigérateurs et les congélateurs et les véhicules récréatifs.

Il est également utilisé dans des domaines tels que la cryogénie, la fabrication chimique et pharmaceutique et la conservation des aliments et des boissons. [18]

2.5.4. Réglementation des Réfrigérants

Réglementation des fluides frigorigènes

En raison de leur impact sur l'environnement, les fluides frigorigènes sont réglementés par divers organismes nationaux et internationaux. Par exemple, l'Union européenne a adopté des réglementations sur les gaz fluorés qui fixent des limites strictes à l'utilisation des HFC et des HCFC.

Aux États-Unis, l'EPA réglemente l'utilisation et la manipulation des réfrigérants, y compris les exigences de récupération et de recyclage. D'autres pays ont introduit des réglementations similaires pour réduire l'impact environnemental des fluides frigorigènes.

2.5.5. Avenir des réfrigérants

L'avenir des réfrigérants est incertain car les réglementations changent constamment et la technologie évolue. Cependant, il est clair que des alternatives plus vertes joueront un rôle de plus en plus important dans les années à venir.

De nouvelles technologies, telles que le refroidissement magnétique et thermoacoustique, sont également en cours de développement et peuvent offrir des solutions plus durables et efficaces à long terme. [18]

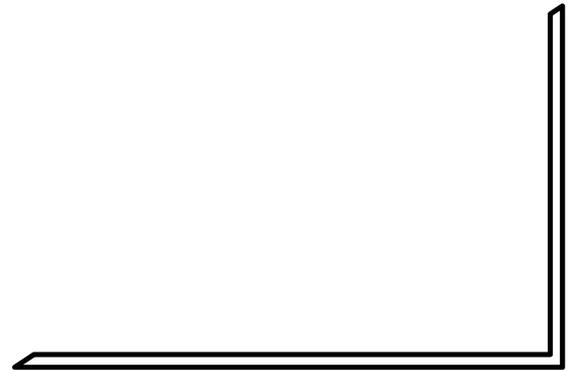
2.6. Conclusion

Les technologies de réfrigération à compression de vapeur ont été cruciales dans les domaines de la réfrigération et du conditionnement d'air, jouant un rôle essentiel dans divers secteurs tels que le commercial, le résidentiel, l'industriel et le transport. Ces systèmes reposent sur le cycle de réfrigération à compression de vapeur, comprenant des composants clés tels que le compresseur, le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. Ils extraient la chaleur d'une source froide pour la rejeter vers une source chaude, permettant le refroidissement de l'espace ou la préservation des produits. Au fil des ans, ces technologies ont évolué pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire l'impact environnemental en utilisant des réfrigérants respectueux de l'environnement, et répondre aux besoins spécifiques des applications. De plus, des alternatives émergentes telles que la réfrigération à adsorption, la réfrigération magnétique et la réfrigération thermomagnétique offrent des perspectives prometteuses en matière d'efficacité énergétique. Bien que les technologies de réfrigération à compression de vapeur continuent d'être cruciales pour assurer le confort, la préservation des aliments et des produits, et des applications industrielles essentielles, il est impératif de poursuivre la recherche et le développement pour améliorer encore l'efficacité énergétique, réduire l'impact environnemental et explorer de nouvelles alternatives technologiques face aux défis actuels et futurs.



Chapitre 3 :

Modélisation mathématique des machines frigorifique à compression de vapeur



3.1. Introduction

La modélisation mathématique des machines frigorifiques à compression de vapeur est un domaine essentiel de l'ingénierie thermique. Ces machines sont largement utilisées dans de nombreux domaines, tels que la climatisation, la réfrigération industrielle et les systèmes de congélation. La modélisation mathématique permet de comprendre le fonctionnement de ces machines, de prédire leurs performances et d'optimiser leur conception et leur exploitation.

Une machine frigorifique à compression de vapeur utilise un fluide frigorigène qui circule à travers plusieurs composants, tels qu'un compresseur, un condenseur, un détendeur et un évaporateur. Le fluide frigorigène subit des changements d'état (vapeur à liquide et vice versa) et des variations de pression et de température tout au long du cycle de réfrigération.

La modélisation mathématique de ces machines repose sur l'application des lois de la thermodynamique, des équations de conservation de la masse et de l'énergie, ainsi que des relations spécifiques au fluide frigorigène utilisé. Ces modèles permettent de décrire le comportement du fluide et des composants de la machine, et de déterminer les performances thermodynamiques telles que la puissance de refroidissement, le coefficient de performance (COP) et les températures de fonctionnement.

La modélisation mathématique des machines frigorifiques à compression de vapeur peut être réalisée à différents niveaux de complexité, en fonction des objectifs spécifiques de l'analyse. Des modèles simples basés sur des hypothèses simplificatrices peuvent être utilisés pour des études préliminaires ou des calculs rapides, tandis que des modèles plus détaillés prenant en compte des phénomènes plus complexes peuvent être nécessaires pour des analyses approfondies.

Ces modèles mathématiques sont généralement mis en œuvre à l'aide de logiciels de simulation thermique et sont utilisés par les ingénieurs en thermodynamique pour concevoir, analyser et optimiser les performances des machines frigorifiques à compression de vapeur. Ils permettent de prendre en compte des paramètres tels que les conditions de fonctionnement, les propriétés thermodynamiques du fluide frigorigène, les caractéristiques des composants et les pertes thermiques, afin d'obtenir une vision complète et précise du système

3.2. Modélisation des machines à compression de vapeur (cycles idéal)

3.2.1. Systèmes de réfrigération à compression de vapeur

Comme mentionné, les systèmes de réfrigération à compression de vapeur sont les plus couramment utilisés. Parmi tous les systèmes de réfrigération. Comme leur nom l'indique, ces systèmes appartiennent au groupe général classe de cycles de vapeur, dans laquelle le fluide de travail (réfrigérant) subit un changement de phase à au moins au cours d'un processus. Dans un système de réfrigération à compression de vapeur, la réfrigération est obtenue lorsque le réfrigérant s'évapore à basse température. L'entrée du système est en la forme d'énergie mécanique nécessaire au fonctionnement du compresseur. Ces systèmes sont donc également appelés systèmes de réfrigération mécanique. Réfrigération à compression de vapeur les systèmes sont disponibles pour s'adapter à presque toutes les applications avec les capacités de réfrigération allant de quelques watts à quelques mégawatts. Une grande variété de réfrigérants peut être utilisée dans ces systèmes pour s'adapter à différentes applications, capacités, etc. La compression de vapeur réelle

Le cycle est basé sur le cycle d'Evans-Perkins, également appelé cycle de Rankine inversé.

Avant de discuter et d'analyser le cycle réel, il est essentiel de trouver la limite supérieure de performances des cycles de compression de vapeur. Cette limite est fixée par un système totalement réversible [19].

3.2.2. Cycle frigorifique Carnot

Le cycle de réfrigération de Carnot est un cycle complètement réversible, il est donc utilisé comme modèle de perfection pour un cycle frigorifique fonctionnant entre une source de chaleur à température constante et couler. Il sert de référence à laquelle les cycles réels sont comparés. Graphiques 1. (a) et (b) montrent le schéma d'un système de réfrigération à compression de vapeur Carnot et le cycle de fonctionnement sur le diagramme T-s.

Le système de réfrigération de base Carnot pour la vapeur pure se compose de quatre composants : compresseur, condenseur, turbine et évaporateur. L'effet de réfrigération ($q_4 - 1 = q_e$) est obtenu à l'évaporateur lorsque le réfrigérant subit le processus de vaporisation (processus 4-1) et extrait la chaleur latente de la source de chaleur à basse température. La basse température, basse la vapeur

sous pression est ensuite comprimée de manière isentropique dans le compresseur vers le dissipateur thermique température T_c . La pression du réfrigérant augmente de P_e à P_c pendant la compression processus (processus 1-2) et la vapeur de sortie est saturée. Ensuite la haute pression, haute le réfrigérant saturé en température subit le processus de condensation dans le condenseur

(Processus 2-3) car il rejette la chaleur de condensation ($q_{2-3} = q_c$) vers un radiateur externe à T_c . Le liquide saturé à haute pression s'écoule alors à travers la turbine et subit un processus isentropique expansion (processus 3-4). Au cours de ce processus, la pression et la température chutent de P_c, T_c à P_e, T_e . Etant donné qu'un liquide saturé est détendu dans la turbine, une certaine quantité de liquide jaillit dans vapeur et la condition de sortie se situe dans la région à deux phases. Cette basse température et cette basse le mélange liquide-vapeur sous pression entre ensuite dans l'évaporateur pour terminer le cycle. Ainsi comme illustré à la Fig.10.1(b), le cycle implique deux processus de transfert de chaleur isothermes (processus 4-1 et 2-3) et deux processus de transfert de travail isentropique (processus 1-2 et 3-4). La chaleur est extrait isotherme à la température de l'évaporateur T_e lors du processus 4-1, la chaleur est rejetée isotherme à la température du condenseur T_c pendant le processus 2-3. Les travaux sont fournis au compresseur pendant la compression isentropique (1-2) de la vapeur de réfrigérant de l'évaporateur pression P_e à la pression de condenseur P_c , et le travail est produit par le système sous forme de liquide réfrigérant. Se détend de manière isentropique dans la turbine de la pression du condenseur P_c à la pression de l'évaporateur P_e . Tous les processus sont à la fois intérieurement et extérieurement réversibles, c'est-à-dire l'entropie nette génération pour le système et l'environnement est nulle.[19]

Application des premières et deuxièmes lois de la thermodynamique au cycle frigorifique de Carnot

$$\int \delta Q = \int \delta W \quad (3.1)$$

$$\int \delta W = Q_e - Q_c \quad (3.2)$$

$$\int \delta W = W_t - W_c = -w_{net} \quad (3.3)$$

$$\Rightarrow (Q_c - Q_e) = W_{net} \quad (3.4)$$

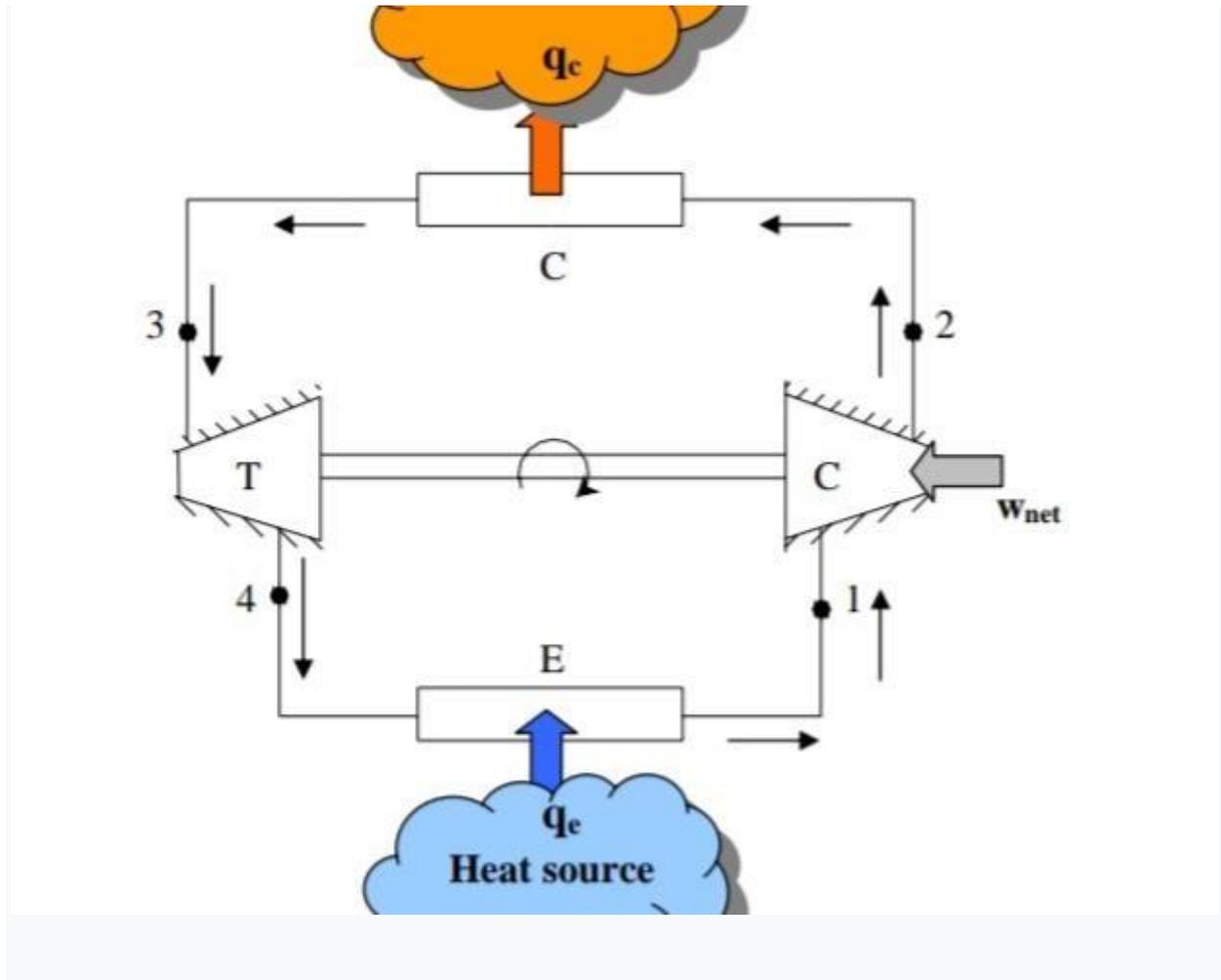


Figure (3.1). (a) : Schéma d'un système de réfrigération Carnot [19]

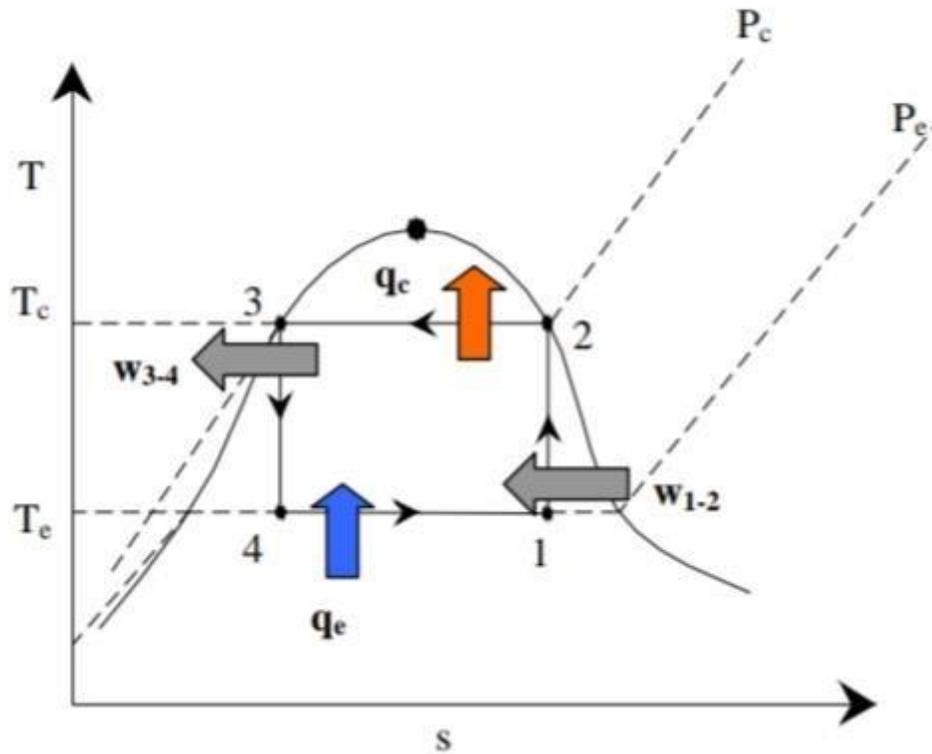


Figure (3.1). (b) : Cycle frigorifique de Carnot sur diagramme T-s [19]

Maintenant pour les processus de transfert de chaleur réversibles et isothermes 2-3 et 4-1, nous pouvons écrire :

$$Q_c = Q_{2-3} = -T \cdot ds_{Tc} (s_2 - s_3) \tag{3.5}$$

$$Q_e = Q_{4-1} = -T \cdot ds_{Te} (s_1 - s_4) \tag{3.6}$$

Où T_e et T_c sont respectivement les températures de l'évaporateur et du condenseur, et,

$$s_1 = s_2 \text{ et } s_3 = s_4 \tag{3.7}$$

Le Coefficient de Performance (COP) est donné par :

$$\text{COP}_{\text{carnot}} = \text{Effet Réfrigérant} / \text{Débit net} = Q_e / W_{\text{net}} \tag{3.8}$$

$$\text{COP} = \frac{T_e(s_1 - s_4)}{T_c(s_2 - s_3) - T_e(s_1 - s_4)} = \frac{T_e}{T_c - T_e} \tag{3.9}$$

Ainsi le COP du cycle frigorifique de Carnot est fonction de l'évaporateur et du condenseur Températures uniquement et est indépendante de la nature de la substance de travail. C'est la raison pour laquelle exactement la même expression a été obtenue pour les systèmes de réfrigération à cycle d'air fonctionnant sur cycle Carnot. Le COP Carnot fixe une limite supérieure pour les systèmes de réfrigération fonctionnant entre deux réservoirs thermiques à température constante (source de chaleur et dissipateur). Depuis Théorèmes de Carnot, pour les mêmes températures de source de chaleur et de puits, aucun cycle irréversible ne peut avoir un COP supérieur à celui de Carnot COP.[19]

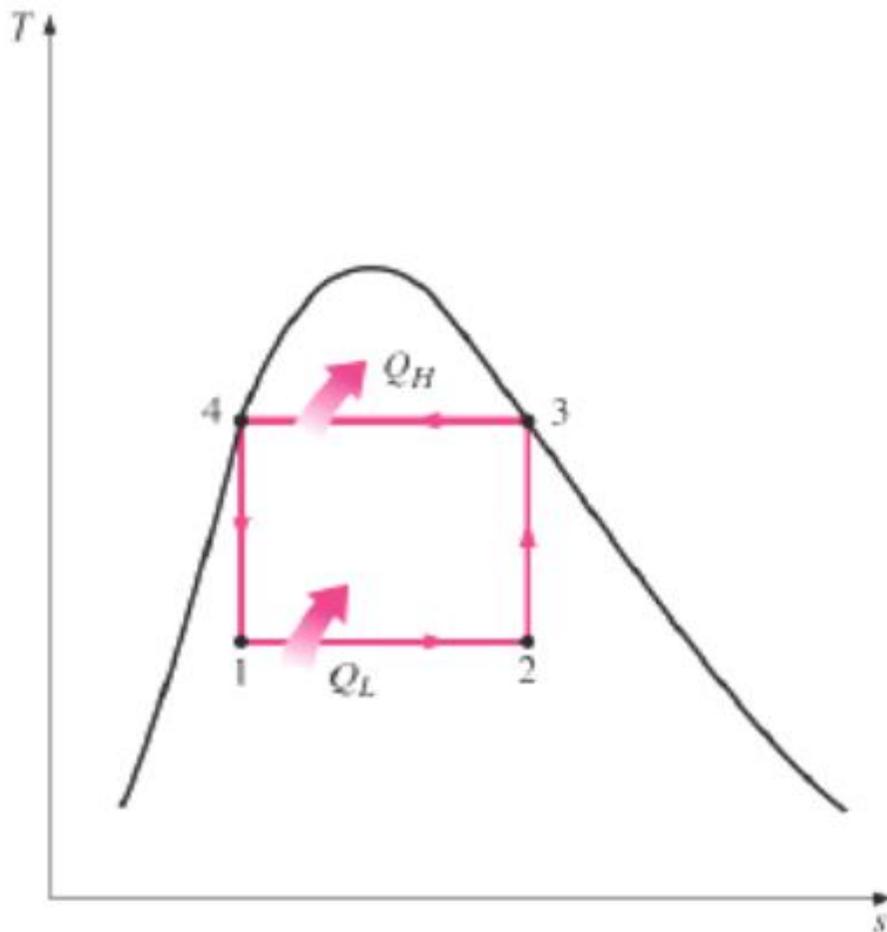


Figure (3.2): Carnot refrigeration cycle represented in T-s plane [19]

Il ressort de l'expression ci-dessus que le COP d'un système de réfrigération Carnot augmente à mesure que la température de l'évaporateur augmente et que la température du condenseur diminue. Ce peut être expliqué très facilement à l'aide du diagramme T-s (Fig.2). Comme la montre la figure, COP est le rapport de la zone a-1-4-b à la zone 1-2-3-4. Pour une température de condenseur fixe T_c , lorsque la température de l'évaporateur T_e augmente, la zone a-1-4-b (qe) augmente et la zone 1-2-3-4 (wnet) diminue en conséquence, le COP augmente rapidement. De même pour un évaporateur fixe température T_e , lorsque la température de condensation T_c augmente, l'apport de travail net (zone 1-2-3-4) augmente, même si la puissance frigorifique reste constante, le COP diminue. La variation du COP de Carnot avec la température de l'évaporateur pour différents condenseurs températures. On constate que le COP augmente fortement avec les températures de l'évaporateur, en particulier à des températures de condensation élevées. Le COP diminue à mesure que la température du condenseur augmente, mais l'effet devient marginal aux basses températures de l'évaporateur. Il sera montré plus tard que les systèmes de réfrigération à compression de vapeur réels se comportent également d'une manière similaire à celui des systèmes de réfrigération Carnot en ce qui concerne les tendances de performance Difficultés pratiques avec le système de réfrigération Carnot : Il est difficile de construire et d'exploiter un système de réfrigération Carnot en raison des éléments suivants difficultés pratiques :

- Au cours du processus 1-2, un mélange composé de liquide et de vapeur doit être comprimé isentropiquement dans le compresseur. Une telle compression est connue sous le nom de compression humide en raison de la présence de liquide. En pratique, la compression humide est très difficile surtout avec un mouvement alternatif compresseurs. Ce problème est particulièrement grave en cas de mouvement alternatif à grande vitesse. Compresseurs, qui sont endommagés par la présence de gouttelettes de liquide dans la vapeur. Même bien que certains types de compresseurs puissent tolérer la présence de liquide dans la vapeur, car les compresseurs à pistons sont le plus largement utilisés dans la réfrigération, traditionnellement la compression sèche (compression de vapeur uniquement) est préférable à la compression humide [19]

- La deuxième difficulté pratique du cycle Carnot est qu'en utilisant une turbine et en extrayant, le travail du système pendant l'expansion isentropique du réfrigérant liquide n'est pas Économiquement faisable, en particulier dans le cas de systèmes de petite capacité. Cela est dû au

fait que la puissance de travail spécifique (par kilogramme de fluide frigorigène) de la turbine est donnée par

$$W_{3-4} = \int_{P_e}^{P_c} v \cdot dp \quad (3.10)$$

Étant donné que le volume spécifique de liquide est beaucoup plus petit par rapport au volume spécifique d'un vapeur/gaz, le travail de sortie de la turbine dans le cas du liquide sera faible. De plus, si on considère les inefficacités de la turbine, alors la production nette sera encore réduite.

Comme un résultat utilisant une turbine pour extraire le travail du liquide à haute pression n'est pas économiquement justifiée dans la plupart des cas. Une voie pour réaliser la compression sèche à Carnot cycle de réfrigération doit avoir deux compresseurs - un isentropique et un isotherme.[19]

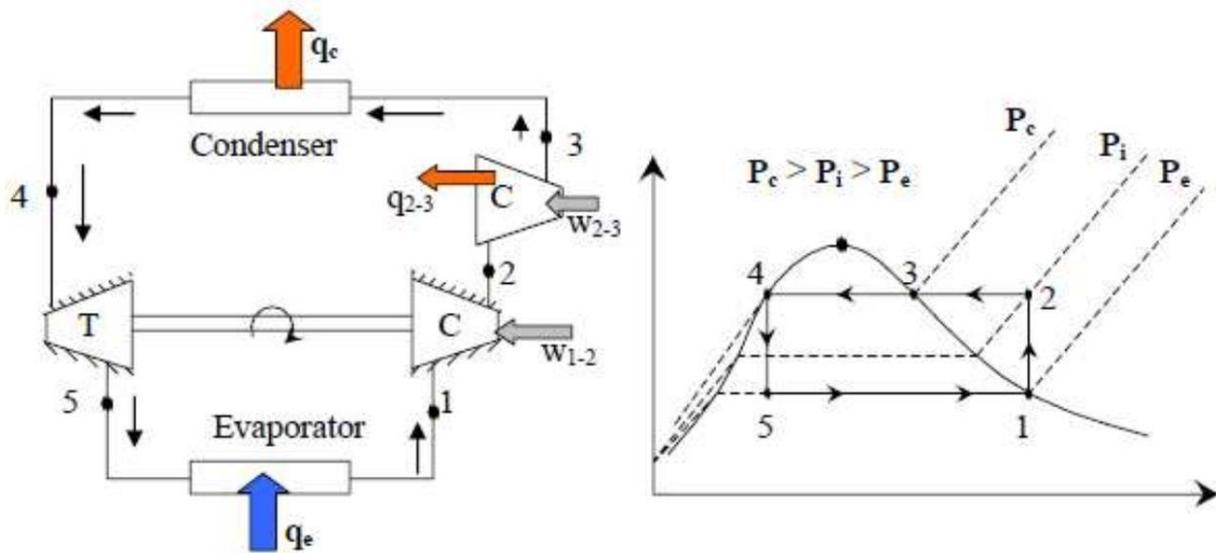


Figure (3. 3) : Système de réfrigération Carnot à compression sèche [19]

Le système de réfrigération Carnot à compression sèche se compose d'un processus de compression isentropique (1-2) de la pression d'évaporateur P_e à une pression intermédiaire

Pi et température Tc, suivi d'un processus de compression isotherme (2-3) à partir de la pression intermédiaire Pi à la pression de condenseur Pc. Bien qu'avec cette modification, le problème de la compression humide peut être évité, mais ce système modifié n'est pas pratique en raison de la difficulté d'obtenir une véritable compression isotherme à l'aide de compresseurs à grande vitesse. De plus, l'utilisation de deux compresseurs au lieu d'un n'est pas économiquement justifiée. De la discussion ci-dessus, il ressort clairement que, d'après des considérations pratiques, le système de réfrigération doit être modifié. La compression sèche avec un seul compresseur est possible si le processus de rejet de chaleur isotherme est remplacé par un processus de rejet de chaleur isobare. De même, le processus d'expansion isentropique peut être remplacé par un étranglement isenthalpique. Un système de réfrigération qui intègre ces deux changements est connu sous le nom d'Evans Perkins ou de cycle inversé de Rankine. C'est le cycle théorique sur lequel la vapeur réelle.

Les systèmes de réfrigération à compression sont basés dans des régions où a été récolté en hiver et stocké dans des glaciers à utiliser en été. Le commerce de la glace a atteint son apogée en 1872 lorsque l'Amérique seule a exporté 225 000 tonnes de glace vers divers pays jusqu'en Chine et en Australie. Cependant, avec l'avènement de la réfrigération artificielle, le commerce de la glace a progressivement diminué [19]

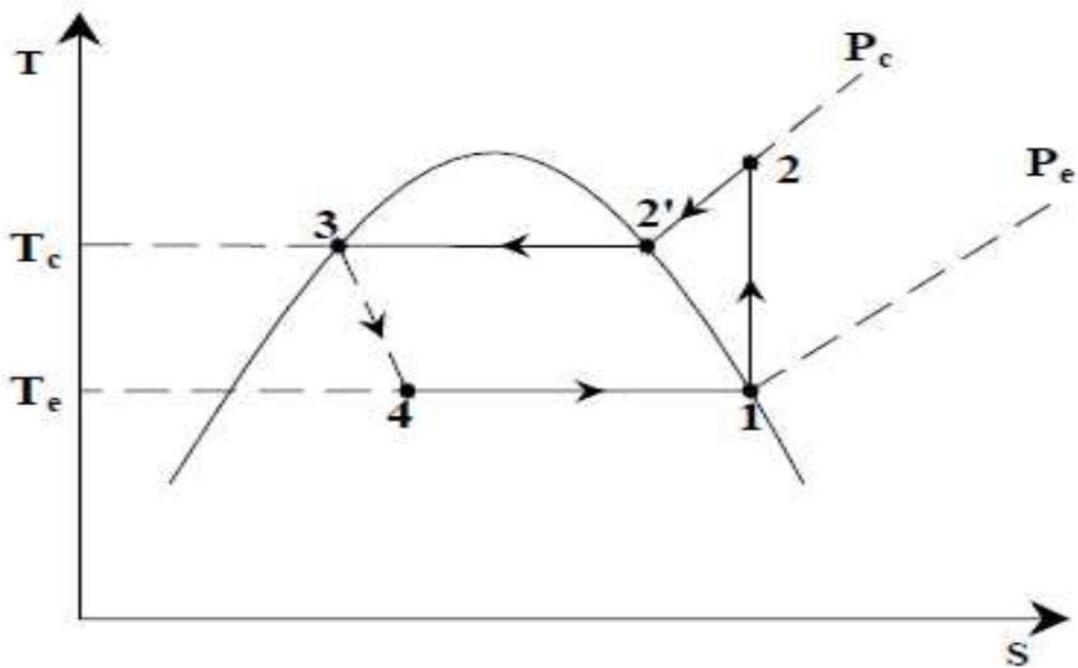


Figure (3.4): Système de réfrigération à compression de vapeur standard [19]

Une analyse simple d'un système de réfrigération à compression de vapeur standard peut être effectuée en supposant a) un débit constant ; b) des changements négligeables d'énergie cinétique et potentielle à travers chaque composant, et c) aucun transfert de chaleur dans les conduites de raccordement. L'énergie à flux constant l'équation est appliquée à chacune des quatre composantes [19]

Évaporateur : Taux de transfert de chaleur à l'évaporateur ou à la capacité de réfrigération Q_e est donné par :

$$Q_e = m r (h_1 - h_4) \quad (3.11)$$

Compresseur : Alimentation électrique du compresseur, W_c est donné par :

$$W_c = m r (h_2 - h_1) \quad (3.12)$$

Condenseur : Taux de transfert de chaleur au condenseur Q_c est donné par :

$$Q_c = m r (h_2 - h_3) \quad (3.13)$$

Périphérique d'extension : Pour l'expansion isenthalpique traverser le dispositif d'expansion pourrait être considérable, cependant, si nous prenons le contrôle en processus, le changement d'énergie cinétique un volume, bien en aval du dispositif de détente, alors l'énergie cinétique se dissipe en raison des effets visqueux

$$h_3 = h_4 \quad (3.14)$$

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{W_c} = \frac{m_r(h_1 - h_4)}{m_r(h_2 - h_1)} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (3.15)$$

3.3. Modélisation des machines à compression de vapeur à cascade

3.3.1 Systèmes en cascade

Dans un système en cascade, une série de réfrigérants avec des points d'ébullition progressivement plus bas sont utilisés dans une série d'unités à un étage. Le condenseur du système d'étage inférieur est couplé à l'évaporateur du système d'étage supérieur suivant et ainsi de suite. Le composant où la chaleur de condensation du réfrigérant de l'étage inférieur est fournie pour la vaporisation du réfrigérant de niveau suivant est appelé condenseur en cascade. Les figures 9 montrent le schéma et les diagrammes Ph d'un système de réfrigération en cascade à deux étages. Comme illustré, ce système utilise deux réfrigérants différents fonctionnant en deux cycles individuels. Ils sont couplés thermiquement dans le condenseur en cascade. Les fluides frigorigènes sélectionnés doivent avoir des caractéristiques pression-température appropriées. Un exemple de combinaison de réfrigérants est l'utilisation de dioxyde de carbone (NBP = -78,4°C, Tcr= 31,06°C) en cascade basse température et ammoniac (NBP = -33,33°C, Tcr= 132,25°C) en cascade à haute température. Il est possible d'utiliser plus de deux étages en cascade, et il est également possible de combiner des systèmes à plusieurs étages avec des systèmes en cascade [20].

3.3.2. Avantages des systèmes en cascade

. Étant donné que chaque cascade utilise un réfrigérant différent, il est possible de sélectionner un réfrigérant le mieux adapté à cette plage de température particulière. Les pressions très élevées ou très basses peuvent être évitées.

La migration de l'huile de lubrification d'un compresseur à l'autre est empêchée

En pratique, l'adaptation des charges dans le condenseur en cascade est difficile, en particulier lors de l'abaissement du système. Par conséquent, les condenseurs en cascade sont normalement surdimensionnés. De plus, dans les systèmes réels, une différence de température entre les réfrigérants de condensation et d'évaporation doit être prévue dans le condenseur en cascade, ce qui entraîne une perte d'efficacité. De plus, on constate qu'à basse température, la surchauffe (utile ou inutile) est préjudiciable du point de vue de l'effet de réfrigération volumétrique, donc dans les systèmes en cascade, la surchauffe doit être juste suffisante pour empêcher l'entrée de liquide dans le compresseur, et pas plus pour tous les réfrigérants.[20]

3.3.3. Température de cascade optimale

Pour un système en cascade à deux étages fonctionnant sur le cycle de Carnot, la température de cascade optimale à laquelle le COP sera maximum, T_{cc} , opterest donné par :

$$T_{cc, \text{opt}} = \sqrt{T_e \cdot T_c} \quad (3.16)$$

Où T_e et T_c sont la température de l'évaporateur de la cascade à basse température et la température du condenseur de la cascade à haute température, respectivement. [20]

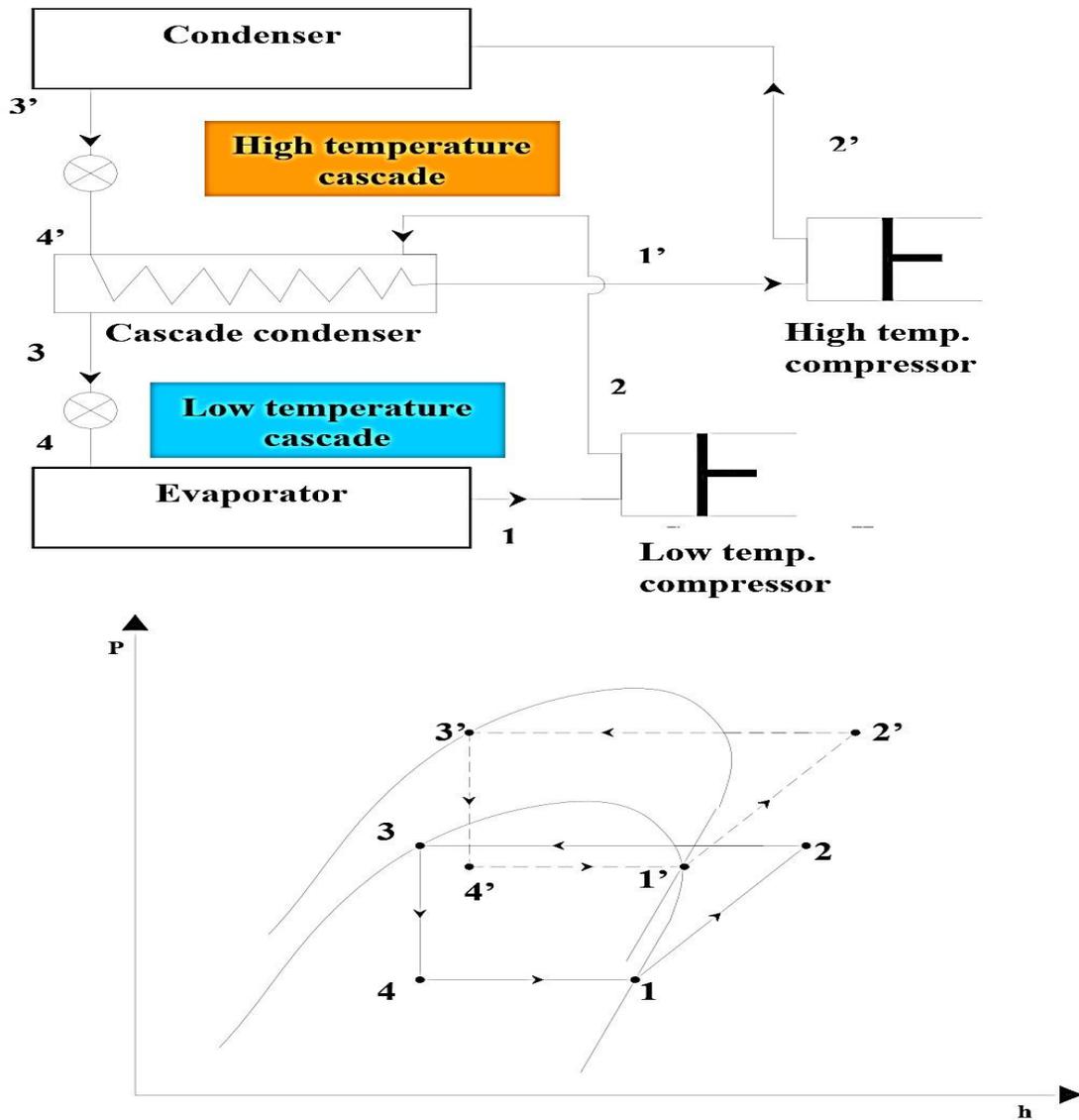


Figure (3. 5) : Un système de réfrigération en cascade à deux étages [20]

Evaporateur :

$$Q_e = m r (h_1 - h_4) \quad (3.17)$$

Compresseur 1 :

$$W_{c1} = m r (h_2 - h_1) \quad (3.18)$$

Compresseur 2 :

$$W_{c2} = m r' (h_{2'} - h_{1'}) \quad (3.19)$$

Le Coefficient de Performance (COP) est donné par :

$$COP = \frac{m r (h_1 - h_4)}{m r (h_2 - h_1) + m r' (h_{2'} - h_{1'})} \quad (3.20)$$

3.3.4. Systèmes en cascade automatique

Un système en cascade automatique peut être considéré comme une variante du système en cascade, dans lequel un seul compresseur est utilisé. Le concept de système d'auto-cascade a été proposé pour la première fois par Ruhemann en 1946. La figure 6 montre le schéma d'un cycle d'auto-cascade à deux étages.

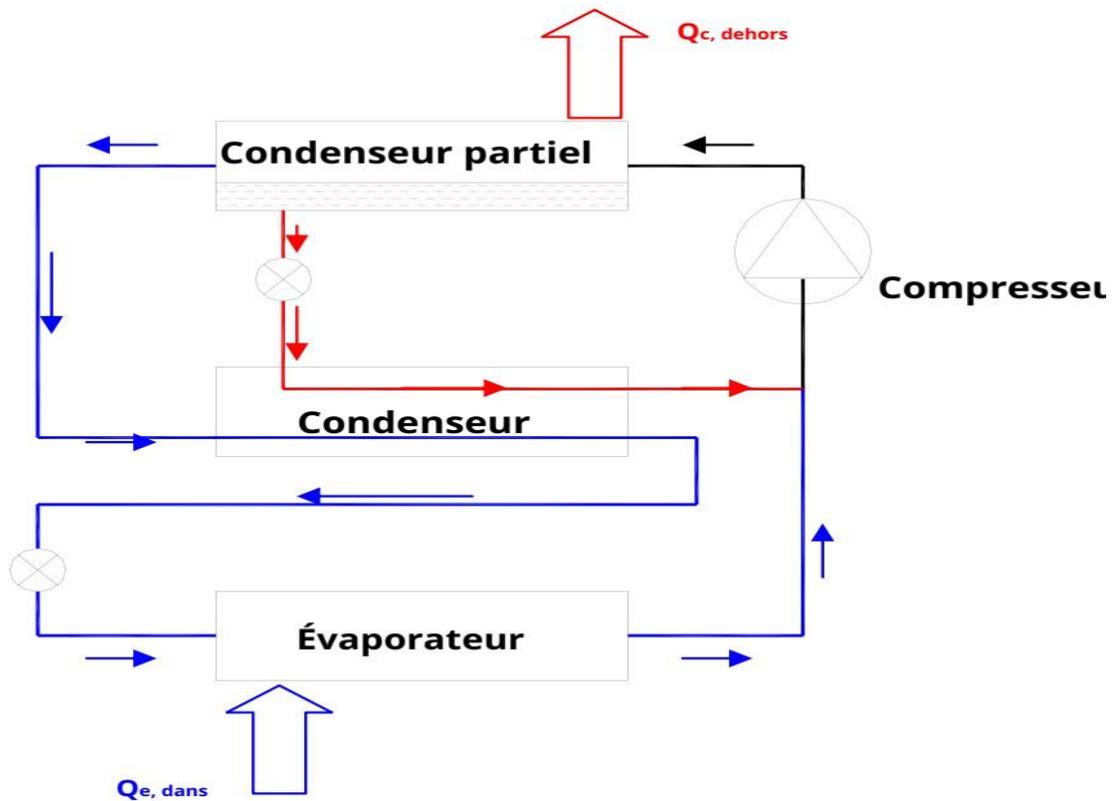


Figure (3. 6): Schéma d'un système d'auto-cascade à deux étages [20]

3.4. Modélisation des machines à compression de vapeur multi-étages

3.4.1. Refroidissement intermédiaire en compression multi-étages

L'apport de travail spécifique, W en compression polytropique réversible de vapeur de fluide frigorigène est donné par [20]:

$$w = - \int_1^2 v \cdot dp = \left(\frac{n}{n-1}\right) P_1 \cdot V_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{n-1/n}\right] \quad (3.21)$$

Où P_1 et P_2 sont les pressions d'entrée et de sortie du compresseur, V est le volume spécifique de vapeur de fluide frigorigène à l'entrée du compresseur et n est l'exposant polytropique. À partir de l'expression ci-dessus, on peut voir qu'un apport de travail spécifique diminue en tant que volume spécifique, v est réduite. A une pression donnée, le volume spécifique peut être réduit en diminuant la température. C'est le principe du refroidissement intermédiaire dans la compression à plusieurs étages. Les figures 7 (a) et (b) montrent le processus de refroidissement intermédiaire en compression à deux étages sur des diagrammes de volume spécifique à la pression (Pv) et de Ph

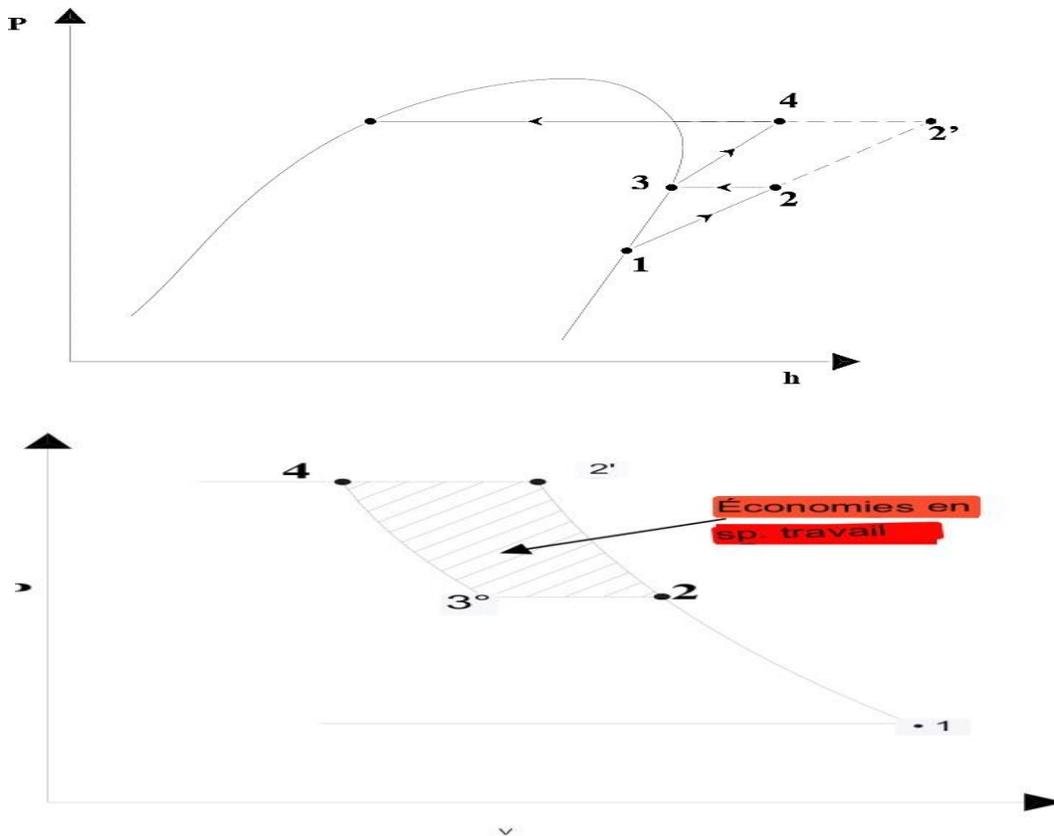


Figure (3. 7) (a) & (b): Refroidissement intermédiaire en compression à deux étages [20]

Comme le montrent les figures, au lieu de comprimer la vapeur en une seule étape de l'état 1 à l'état 2', si le fluide frigorigène est comprimé de l'état 1 à une pression intermédiaire, l'état 2, refroidi de 2 à 3 puis comprimé à la pression requise (état 4), réduction des résultats d'entrée de travail. Si les processus sont réversibles, alors les économies en travail spécifique sont données par la zone

ombrée 2-3-4-2' sur le diagramme Pv. Les économies de travail peuvent également être vérifiées à partir du diagramme Ph. Sur le diagramme Ph, les lignes 1-2-2' et 3-4 représentent les isentropes. Étant donné que la pente des isentropes sur le diagramme Ph diminue (les lignes deviennent plus plates) à mesure qu'elles s'éloignent de la ligne de vapeur saturée [20]

$$(h_4 - h_3) < (h_{2'} - h_2) \Rightarrow (h_2 - h_1) + (h_4 - h_3) < (h_{2'} - h_1) \quad (3.22)$$

Le refroidissement intermédiaire de la vapeur peut être réalisé en utilisant soit un échangeur de chaleur refroidi à l'eau, soit par le réfrigérant dans le réservoir de détente. La figure 8 (a) et la figure 8 (b) montrent ces deux systèmes. Le refroidissement intermédiaire n'est pas toujours possible à l'aide d'échangeurs de chaleur refroidis à l'eau car il dépend de la disponibilité d'eau suffisamment froide vers laquelle le réfrigérant du compresseur à étage bas peut rejeter de la chaleur. De plus, avec le refroidissement par eau, le réfrigérant à l'entrée du compresseur à étage élevé peut ne pas être saturé. Le refroidissement par eau est couramment utilisé dans les compresseurs d'air. Le refroidissement intermédiaire réduit non seulement l'apport de travail, mais réduit également la température de refoulement du compresseur, ce qui améliore la lubrification et prolonge la durée de vie du compresseur.

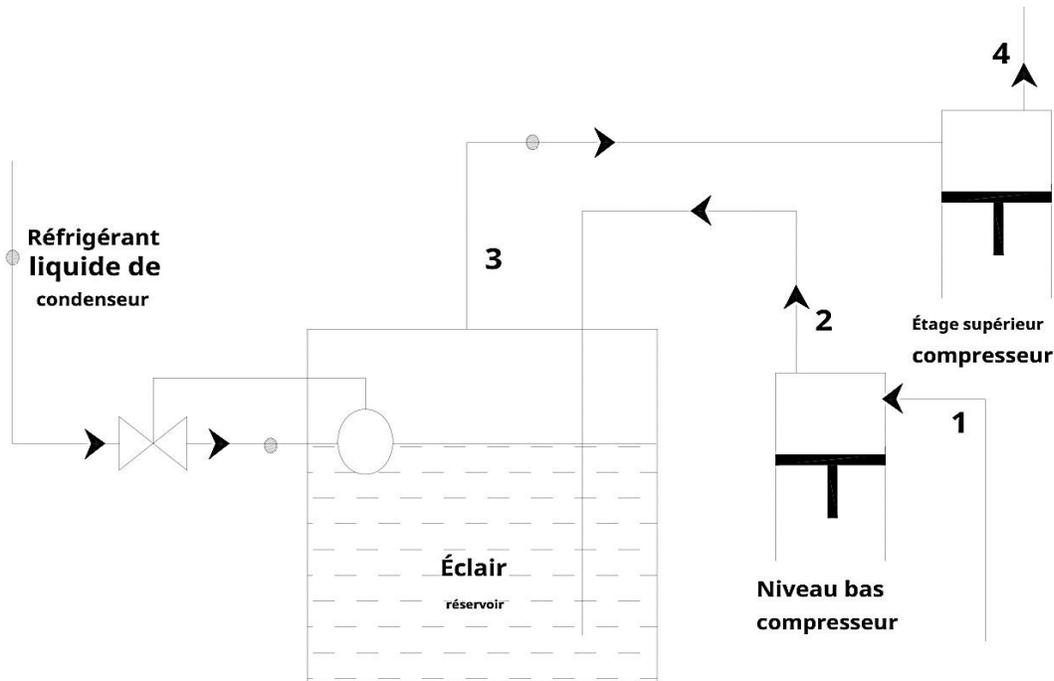


Figure (3.8) (a): Refroidissement intermédiaire utilisant du réfrigérant liquide dans le réservoir de détente [21]

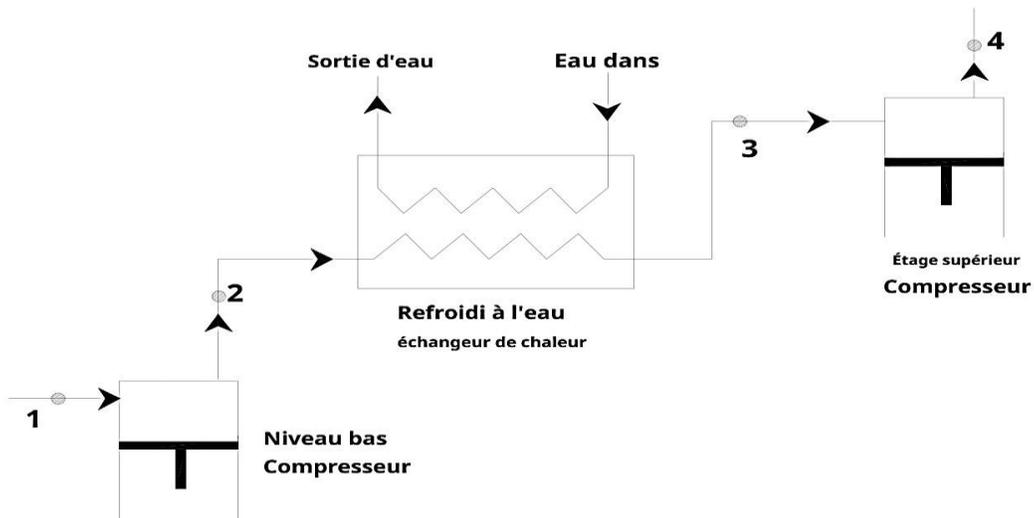


Figure (3.8) (b): Refroidissement intermédiaire utilisant un échangeur de chaleur externe refroidi par eau [21]

Le refroidissement intermédiaire utilisant le réfrigérant liquide du condenseur dans le réservoir de détente peut ou non réduire la puissance absorbée par le système, car cela dépend de la nature du réfrigérant. Cela est dû au fait que la chaleur rejetée par le réfrigérant lors du refroidissement

intermédiaire génère de la vapeur supplémentaire dans le réservoir de détente, qui doit être comprimée par le compresseur à étage supérieur. Ainsi, le débit massique de réfrigérant à travers le compresseur à étage supérieur sera supérieur à celui du compresseur à étage inférieur. Que la puissance totale absorbée par le système diminue ou non dépend de la question de savoir si l'augmentation de la consommation d'énergie due à un débit massique plus élevé est compensée par une diminution du travail spécifique de compression ou non. Pour l'ammoniac, la puissance absorbée diminue généralement avec le refroidissement intermédiaire par réfrigérant liquide, cependant, pour les réfrigérants tels que R12, R22, la puissance absorbée augmente légèrement. Ainsi, le refroidissement intermédiaire utilisant un réfrigérant liquide n'est pas efficace pour R12 et R22. Cependant, comme mentionné, l'un des avantages du refroidissement intermédiaire est la réduction de la température de refoulement du compresseur, ce qui conduit à une meilleure lubrification du compresseur et à sa durée de vie plus longue.

Il est également possible de refroidir la vapeur de réfrigérant en combinant un échangeur de chaleur refroidi à l'eau et le liquide réfrigérant dans le réservoir de détente. En raison de l'utilisation à la fois du refroidissement par eau et du réservoir de détente, la quantité de vapeur de réfrigérant gérée par le compresseur à étage élevé diminue, ce qui réduit la consommation d'énergie. Cependant, la possibilité de cela dépend à nouveau de la disponibilité de l'eau de refroidissement à la température requise. L'un des problèmes de conception dans la compression à plusieurs étages est la sélection d'une pression intermédiaire appropriée. Pour les compresseurs d'air avec refroidissement intermédiaire à la température initiale, l'apport de travail théorique au système sera minimum lorsque les rapports de pression sont égaux pour tous les étages. Cela se traduit également par des températures de refoulement de compresseur égales pour tous les compresseurs. Ainsi, pour un compresseur d'air à deux étages avec refroidissement intermédiaire, la pression intermédiaire optimale, P_{opt} est [21]:

$$P_{opt} = \sqrt{P_{faible} \cdot P_{haut}} \quad (3.23)$$

Où P_{faible} et P_{haut} sont respectivement la pression d'entrée du compresseur à bas étage et la pression de sortie du compresseur à haut étage. La relation ci-dessus s'avère valable pour les gaz parfaits. Pour les réfrigérants, des facteurs de correction à l'équation ci-dessus sont suggérés, par exemple une telle relation pour les réfrigérants est donnée par :

$$P_{\text{opte}} = \sqrt{P_e \cdot P_c \frac{T_c}{T_e}} \quad (3.24)$$

Où P_e et P_c sont les pressions de l'évaporateur et du condenseur, et T_c et T_e sont les températures du condenseur et de l'évaporateur (en K). Plusieurs combinaisons de systèmes multi-étages sont utilisées dans la pratique. Certains d'entre eux sont discutés ci-dessous

3.4.2: Système à plusieurs étages avec élimination des gaz instantanés et refroidissement intermédiaire

Les figures 9 et figure 10 montrent un système de réfrigération à compression de vapeur à deux étages avec élimination des gaz de détente à l'aide d'un réservoir de détente et refroidissement intermédiaire de la vapeur de réfrigérant par un échangeur de chaleur refroidi à l'eau et un réservoir de détente. La vapeur surchauffée de l'échangeur de chaleur refroidi à l'eau bouillonne à travers le liquide réfrigérant dans le réservoir de détente. On suppose que dans ce processus, la vapeur de réfrigérant surchauffée est complètement désurchauffée et ressort sous forme de vapeur saturée à l'état 4. Cependant, dans la pratique, une désurchauffe complète peut ne pas être possible. Comme mentionné, l'utilisation d'une combinaison de refroidissement par eau avec un réservoir de détente pour le refroidissement intermédiaire réduit la vapeur générée dans le réservoir de détente. Les performances de ce système peuvent être obtenues facilement en appliquant des équations de bilan de masse et d'énergie aux composants individuels [22]

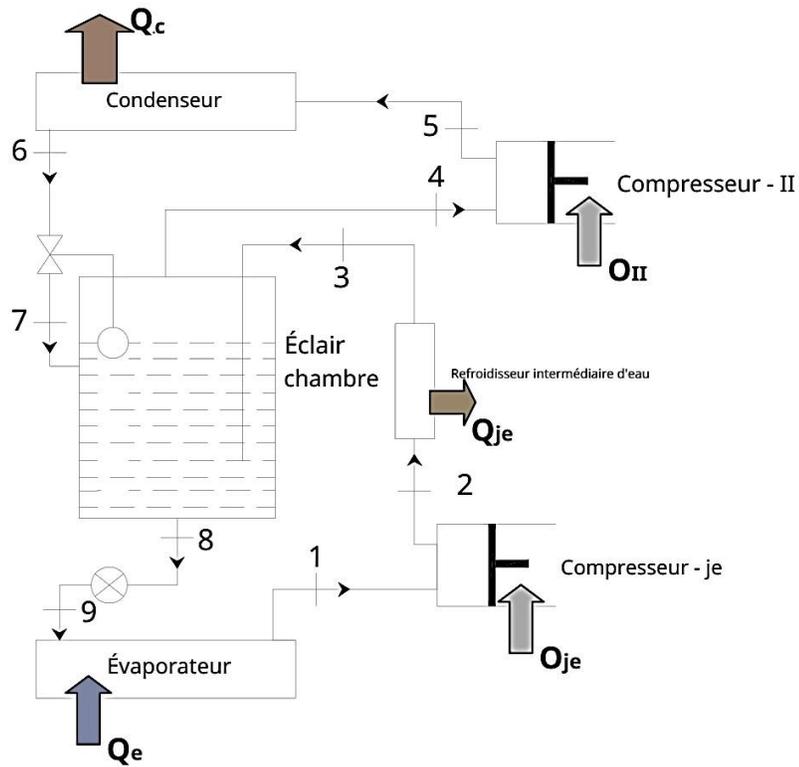


Figure (3. 9) : Système de réfrigération à compression de vapeur à deux étages avec élimination des gaz instantanés à l'aide d'un réservoir flash et refroidissement intermédiaire [22]

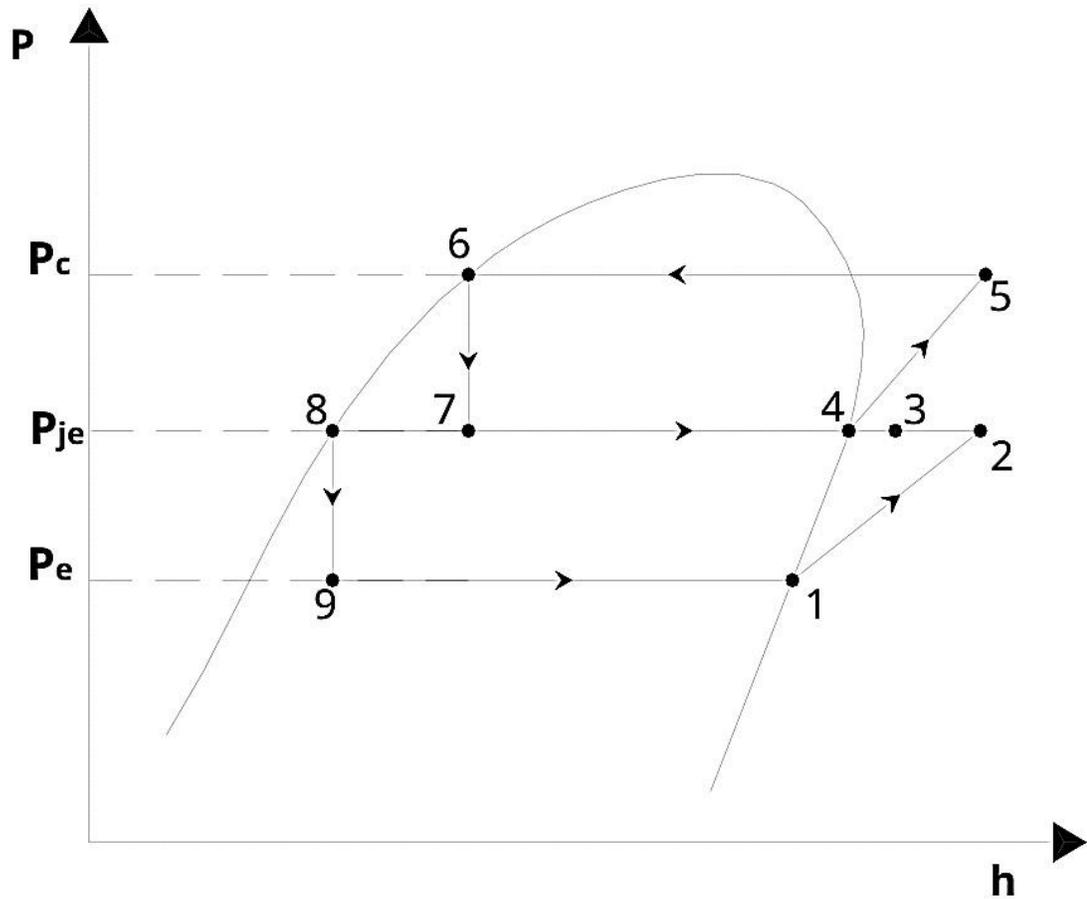


Figure (3.10) : Système de réfrigération à compression de vapeur à deux étages avec élimination des gaz instantanés à l'aide d'un réservoir de flash et refroidissement intermédiaire - diagramme Ph [22] A partir du bilan massique et énergétique

$$m_7 + m_3 = m_8 + m_4 \quad (3.25)$$

$$m_7 h_7 + m_3 h_3 = m_8 h_8 + m_4 h_4 \quad (3.26)$$

Du bilan massique et énergétique à travers le détendeur,

$$m_8 = m_9 \quad (3.27)$$

$$h_8 = h_9 \quad (3.28)$$

Du bilan de masse et d'énergie à travers l'évaporateur :

$$m_9 = m_8 \quad (3.29)$$

$$Q_e = m_1 (h_1 - h_9) \quad (3.30)$$

Du bilan de masse et d'énergie à travers le compresseur à bas étage, Compresseur-I :

$$m_9 = m_1 = m_I \quad (3.31)$$

$$W_I = m_I (h_2 - h_1) \quad (3.32)$$

Où m_I est le débit massique de réfrigérant à travers le compresseur-I

$$m_2 = m_3 = m_I \quad (3.33)$$

$$Q_I = m_I (h_2 - h_3) \quad (3.34)$$

Où Q_I est la chaleur transférée par le réfrigérant à l'eau de refroidissement dans le refroidisseur intermédiaire.

À partir de l'équilibre massique et énergétique du compresseur à étage élevé, Compresseur-II :

$$m_4 = m_5 = m_{II} \quad (3.35)$$

$$W_{II} = m_{II} (h_5 - h_4) \quad (3.36)$$

Où m_{II} est le débit massique de réfrigérant à travers le Compresseur-II

Enfin, à partir du bilan de masse et d'énergie à travers le condenseur :

$$m_5 = m_6 = m_{II} \quad (3.37)$$

$$Q_c = m_{II} (h_5 - h_6) \quad (3.38)$$

Enfin, à partir du bilan de masse et d'énergie à travers la vanne à flotteur :

$$m_6 = m_7 = m_{II} \quad (3.39)$$

$$h_6 = h_7 \quad (3.40)$$

À partir de l'ensemble d'équations ci-dessus, on peut facilement montrer que pour le flash tank

$$m_7 = m_4 = m_{II} \quad (3.41)$$

$$m_3 = m_8 = m_I \quad (3.42)$$

$$m_{II} = m_I \left[\frac{h_3 - h_8}{h_4 - h_7} \right] \quad (3.43)$$

On peut voir à partir de l'expression ci-dessus que le fluide frigorigène s'écoule à travers le haut-compression d'étage m_{II} peut être réduite en réduisant l'enthalpie de la vapeur de réfrigérant entrant dans le réservoir de détente, h_3 du refroidisseur intermédiaire refroidi par eau. La quantité de vapeur supplémentaire générée en raison de la désurchauffe de la vapeur de réfrigérant du refroidisseur intermédiaire refroidi par eau est donnée par [22]:

$$m_{II} = m_I \left[\frac{h_3 - h_4}{h_4 - h_8} \right] \quad (3.44)$$

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{W_I + W_{II}} = \frac{m_I(h_1 - h_9)}{m_I(h_2 - h_1) + m_{II}(h_5 - h_4)} \quad (3.45)$$

Le système ci-dessus offre plusieurs avantages,

- a) La qualité du réfrigérant entrant dans l'évaporateur diminue, ce qui donne lieu à un effet réfrigérant plus élevé, à une chute de pression plus faible et à un meilleur transfert de chaleur dans l'évaporateur
- b) Les pertes d'étranglement sont réduites car la vapeur générée lors de l'étranglement à partir de P_c
- c) L'efficacité volumétrique des compresseurs sera élevée en raison des rapports de pression réduits
- d) La température de refoulement du compresseur est considérablement réduite. Cependant, un inconvénient du système ci-dessus est que puisque le liquide réfrigérant dans le réservoir de détente est saturé, il y a une possibilité de flashage de liquide devant le détendeur en raison de la chute de pression ou du transfert de chaleur dans les conduites reliant le réservoir de détente au dispositif de détente.

Parfois, ce problème est résolu en utilisant un système avec un sous-refroidisseur liquide.

3.5. Conclusion

La modélisation mathématique des machines frigorifiques à compression de vapeur est un outil puissant et essentiel pour l'ingénierie thermique. Elle permet de comprendre le comportement des machines frigorifiques, de prédire leurs performances et d'optimiser leur conception et leur fonctionnement.

Grâce à la modélisation mathématique, les ingénieurs peuvent simuler le cycle de réfrigération et étudier l'impact des différents paramètres sur les performances globales de la machine. Cela inclut

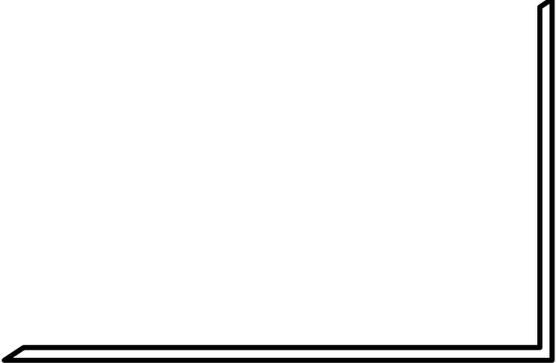
des variables telles que les températures d'entrée et de sortie, les pressions, les débits de fluide, les propriétés thermodynamiques du fluide frigorigène, ainsi que les caractéristiques des composants de la machine.

En utilisant ces modèles, il est possible d'évaluer le coefficient de performance (COP) de la machine, qui représente l'efficacité énergétique du système de réfrigération. Cela permet d'identifier les sources de perte d'efficacité et de proposer des améliorations pour optimiser le rendement global de la machine.



Chapitre 4 :

Résultats et discussion



4.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats de notre étude approfondie sur machines frigorifique a compression de vapeur. Les données et les informations présentées ici sont le fruit de recherches minutieuses et d'une méthodologie rigoureuse que nous avons suivie pour répondre à nos questions de recherche. Nous allons commencer par exposer les données brutes sous forme de tableaux et de graphiques, puis les analyser en détail pour extraire des tendances, des corrélations et des insights significatifs. Ces résultats sont essentiels pour répondre à notre objectif principal, qui est machines frigorifiques à compression de vapeur, ainsi que pour contribuer à la compréhension globale de technologie de compression de vapeur. Nous allons également discuter des implications de ces résultats et de leur pertinence par rapport à la littérature existante. En fin de compte, ce chapitre offre une vue d'ensemble approfondie des découvertes de cette étude et constitue une étape importante vers la réponse à nos questions de recherche.

Dans ce chapitre one appliquer le logiciel **EES** . Cette logiciel l'abréviation de Engineering Equation Solver ou Solveur d'équations pour l'ingénierie. EES permet de résoudre des systèmes d'équations algébriques, des équations différentielles, des équations à variables complexes. **EES** permet également d'optimiser les paramètres de modélisation d'un système, de calculer des régressions linéaires et non linéaires, de générer des courbes de grande qualité. **EES** fonctionne à la fois sur des plates-formes PC Compatible

4.2. Calcul pour simulation des machines frigorifiques à compression de vapeur

4.2.1. Cycle frigorifique à compression de vapeur idéal

Nous avons comme données les pressions et le débit :

Commentaire

Tableau (4 .1) : les données de cycle idéal

P max (bars)	P min (bars)	\dot{m} (débit du réfrigérant) (Kg/s)
8	1,4	0, les donn05

Les résultats obtenus par logiciel ESS (COP , W et Q) :

Tableau (4.2) : Résultats de cycle idéal

Cycles	COP	W(KJ/Kg)	Q(KJ/Kg)
Idéal	3.96	1.81	7,185

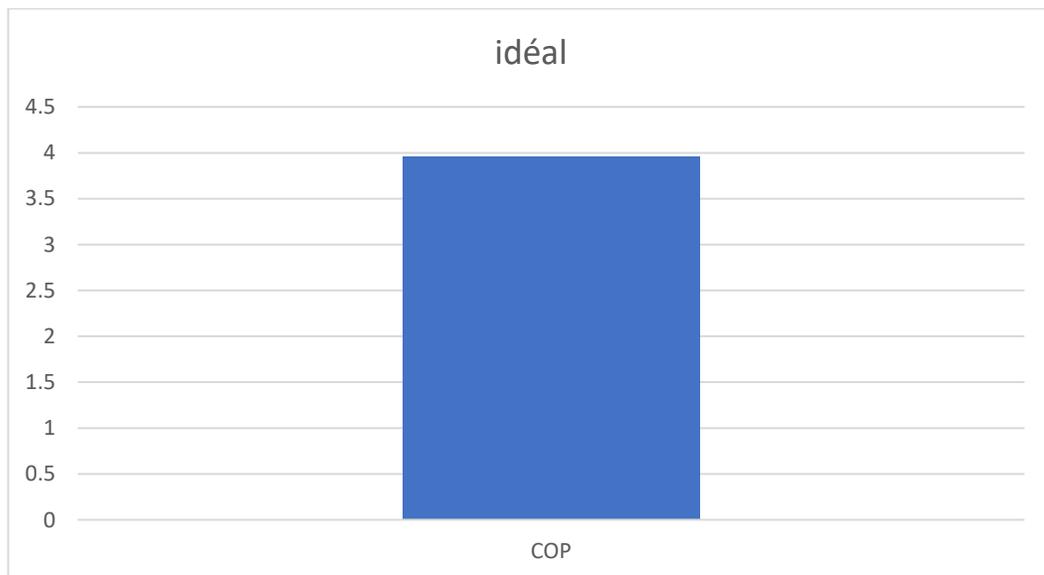
Les graphes :

Figure (4 .1) : Graphe représente le COP dans le cycle idéal

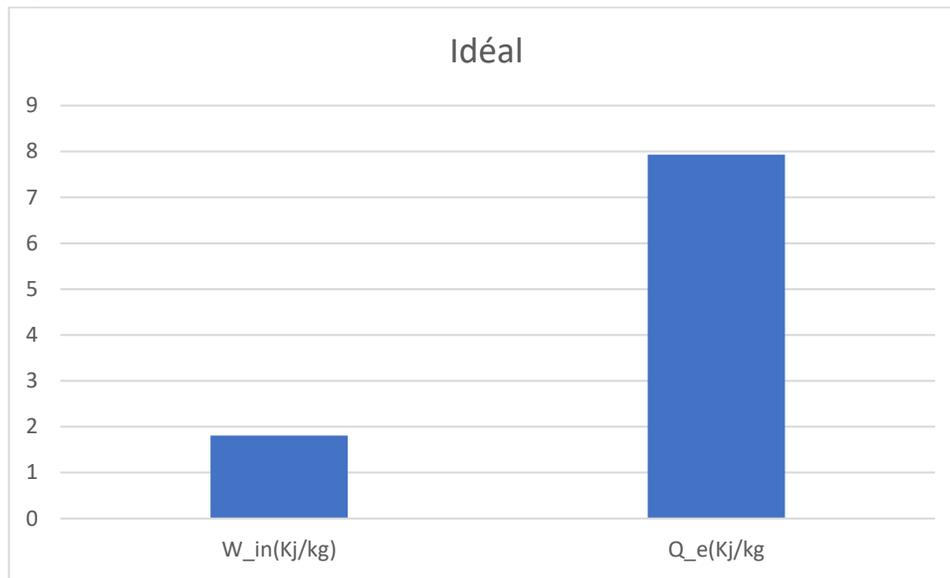
Commentaire

Figure (4 .2) : graphe représente le W et Q dans le cycle idéal

Commentaires**A - Cycle Idéal**

- Coefficient de Performance (COP) : 3.96
- Travail d'Entrée (W_{in}) : 1.81 kJ/kg
- Chaleur Fournie (Q_e) : 7.18 kJ/kg

Le cycle idéal montre un COP élevé, ce qui indique une bonne efficacité énergétique. Cependant, le travail d'entrée et la chaleur fournie sont relativement élevés, ce qui peut être attribué aux hypothèses idéalisées utilisées pour ce modèle.

2.2. Cycle frigorifique à compression de vapeur actuel

Nous avons comme donnée les pressions et les températures et le débit

Commentaire

Tableau (4.3) : Les données de cycle Actuel

Pc1 (bars)	Pc2 (bars)	Pcd (bars)	Pev (bars)	Tc1 (K)	Tc2 (K)	Tcd (K)	\dot{m} (débit du réfrigérant) (Kg/s)
1.4	8	7.2	1.5	263	323	299	0.05

Les résultats obtenus par logiciel ESS (COP , W et Q)

Tableau (4.4) : Résultat de cycle Actuel

Cycle	COP	W(KJ/Kg)	Q(KJ/kg)
Actuel	3,935	2,015	7,931

Commentaire
Les graphes :

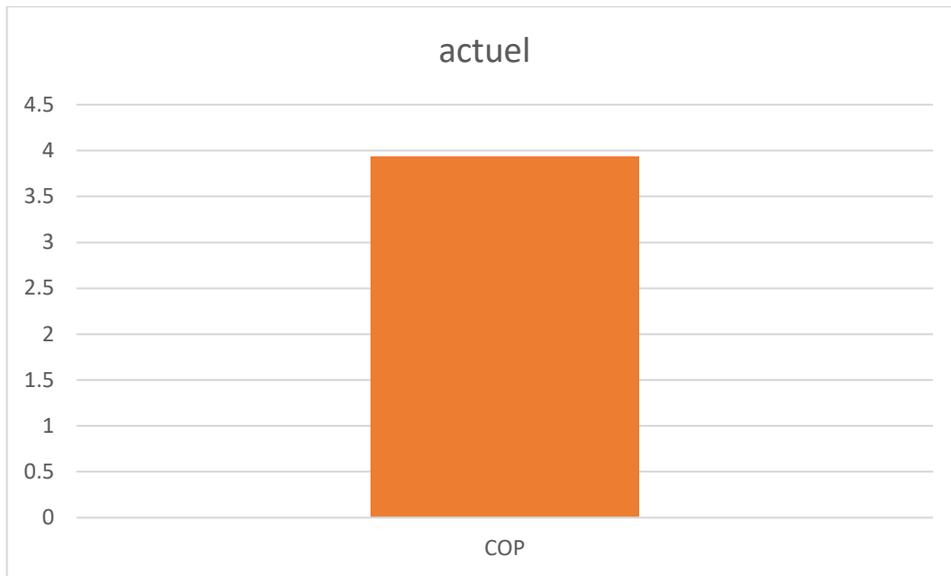


Figure (4 .3) : Graphe représente le COP dans cycle Actuel

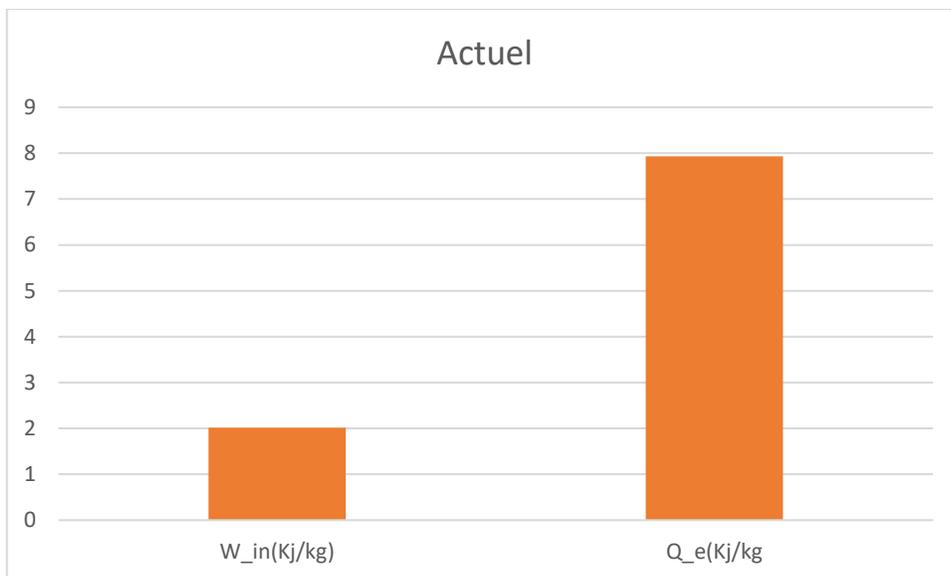


Figure (4 .4) : Graphe représente le W Et Q dans cycle Actuel

Commentaire**Commentaire :****B-Cycle Actuel :**

- Coefficient de Performance (COP) : 3.93
- Travail d'Entrée (W_{in}) : 2.015 kJ/kg
- Chaleur Fournie (Q_e) : 7.931 kJ/kg

Le cycle actuel montre un COP similaire à celui du cycle idéal, ce qui suggère une efficacité remarquable malgré les inefficiences réelles. Le travail d'entrée est légèrement plus élevé, ce qui pourrait être dû à des composants réels qui ne sont pas aussi performants que les composants idéalisés.

4.3. Cycle frigorifique à compression de vapeur à cascade

Nous avons comme donnée la pression est le débit du réfrigérant A

Tableau (4 .5) : les données de cycle cascade

P max (bars)	P min (bars)	P int (bars)	\dot{m} (débit du réfrigérant A) (Kg/s)
8	1.4	3.2	0.05

Les résultats obtenus par logiciel ESS (COP , W et Q)

Tableau (4.6) : Résultat de cycle cascade

Cycle	COP	W(KJ/Kg)	Q (KJ/Kg)	\dot{m}_b (KG/s)
Cascade	4,474	2,056	9,2	0,06417

Commentaire

Les graphes :

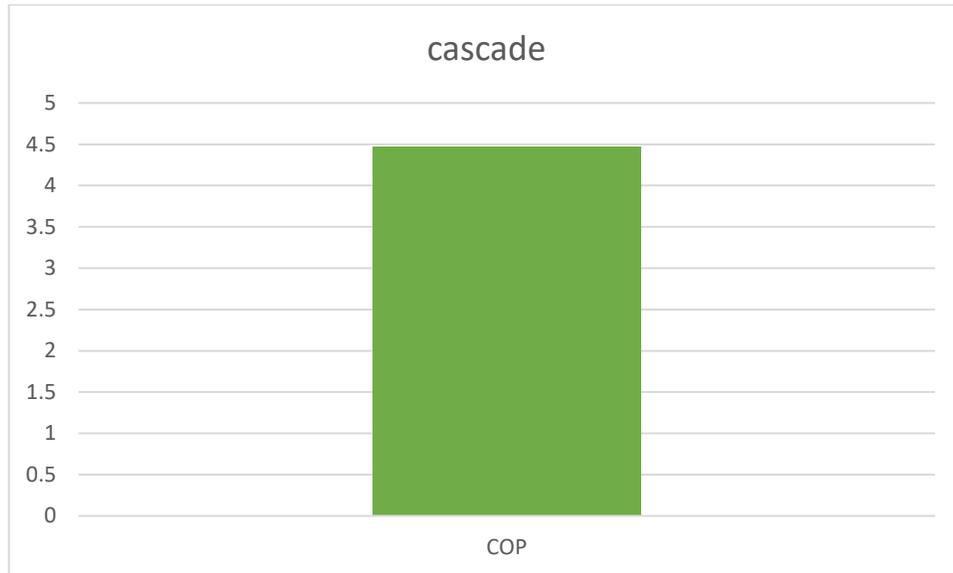


Figure (4 .5) : graphe représente le COP dans cycle cascade

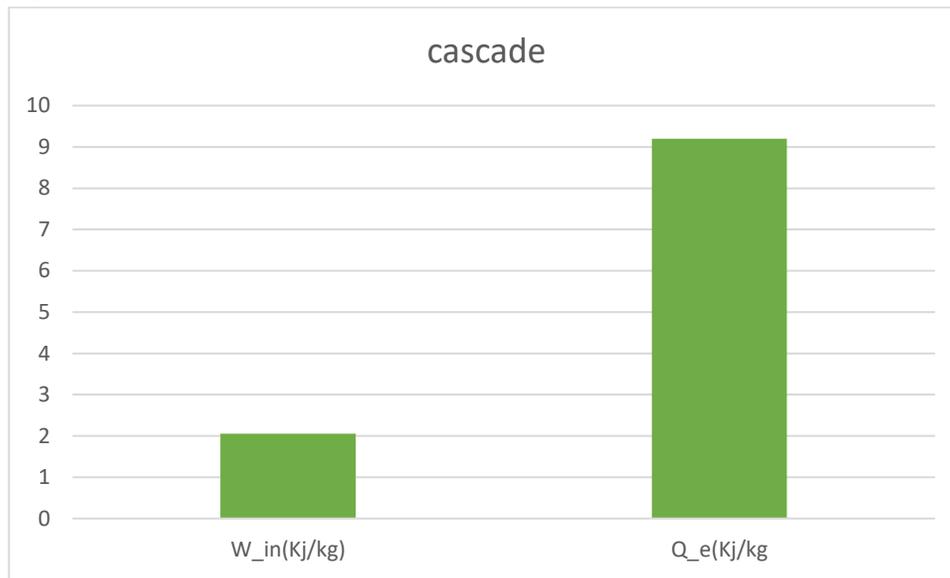
Commentaire

Figure (4 .6) : graphe représente le W Et Q dans cycle cascade

Commentaire :**C-Cycle à Cascade :**

- Coefficient de Performance (COP) : 4.47
- Travail d'Entrée (W_{in}) : 2.056 kJ/kg
- Chaleur Fournie (Q_e) : 9.2 kJ/kg

Le cycle à cascade se démarque avec un COP considérablement plus élevé, indiquant une meilleure efficacité énergétique par rapport aux deux autres cycles. Bien que le travail d'entrée soit légèrement plus élevé que celui du cycle actuel, la chaleur fournie est significativement supérieure, démontrant l'efficacité du cycle à exploiter la chaleur disponible.

Commentaire**4.4. Comparaison entre 3 cycles**

Tableau (4.7) : Résultat pour 3 cycle

Cycle	COP	W (KJ/Kg)	Q (KJ/Kg)
Idéal	3,96	1,81	7,185
Actuel	3,93	2,015	7,931
cascade	4 ,47	2,56	9 ,2

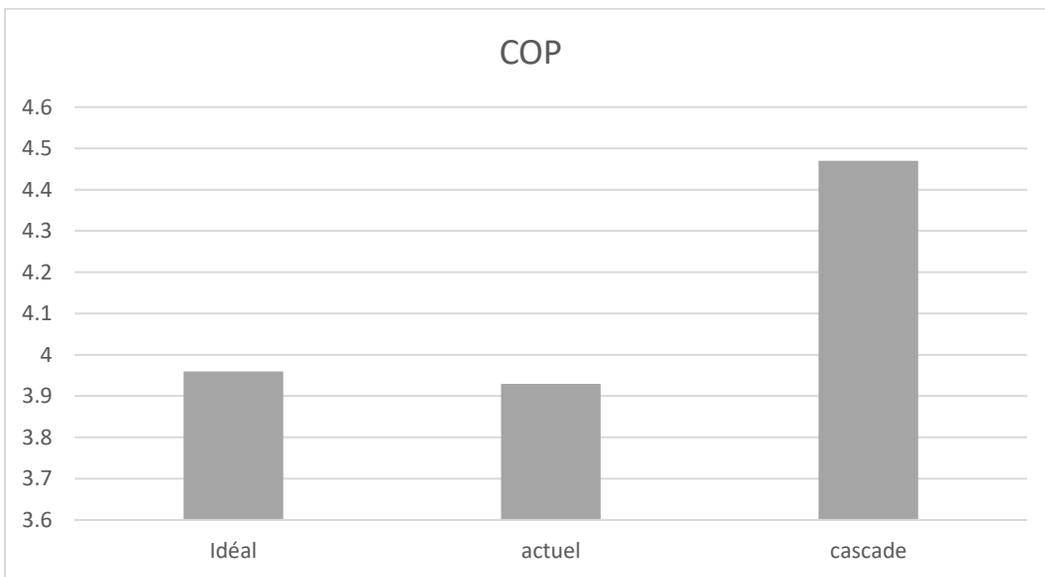
Les graphes :

Figure (4 .7) : graphe représente COP pour 3 cycle

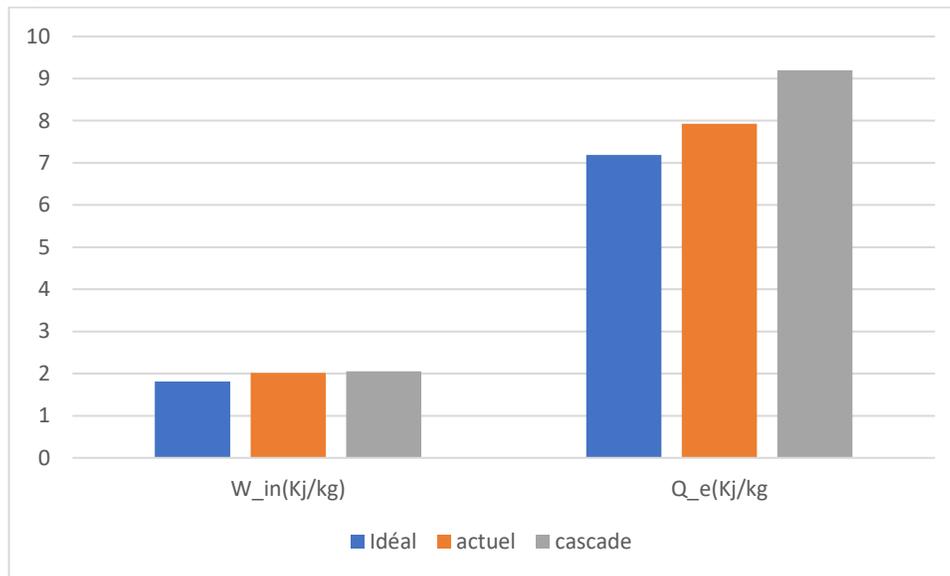
Commentaire

Figure (4 .8) : graphe représente le W et Q pour 3 cycle

Commentaire :

Le cycle à cascade se distingue avec un COP nettement supérieur et une chaleur fournie plus importante. Cela suggère qu'il est le choix optimal pour les conditions de pression spécifiées (8 bars max et 0.14 bars min) et qu'il peut être particulièrement adapté à votre application avec le gaz R134a

4.5. Améliorer le cycle cascade

Nous changer la pression, augmenter la pression P max et P min

Nous avons comme donnée la pression est le débit du réfrigérant A

Tableau (4 .8) : les données de cycle cascade

P max (bars)	P min (bars)	P int (bars)	m (débit du réfrigérant A) (Kg/s)
9	1.8	3.2	0.05

Commentaire

Les résultats obtenus par logiciel ESS (COP , W et Q)

Tableau (4.9) : Résultat de cycle cascade

Cycle	COP	W(KJ/Kg)	Q (KJ/Kg)	m _b (KG/s)
Cascade	4,67	2,008	9,385	0,06417

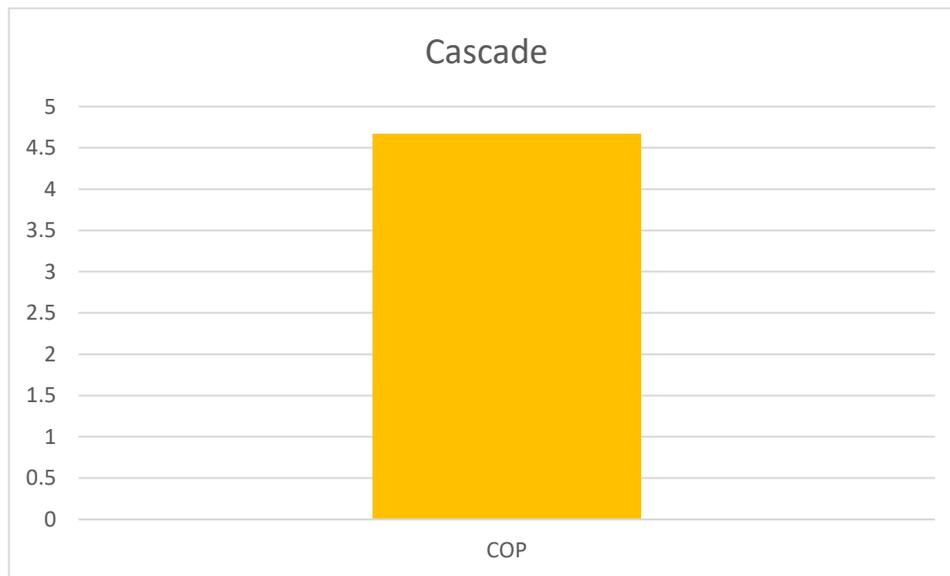
Les graphes

Figure (4 .9) : graphe représente le COP dans cycle cascade

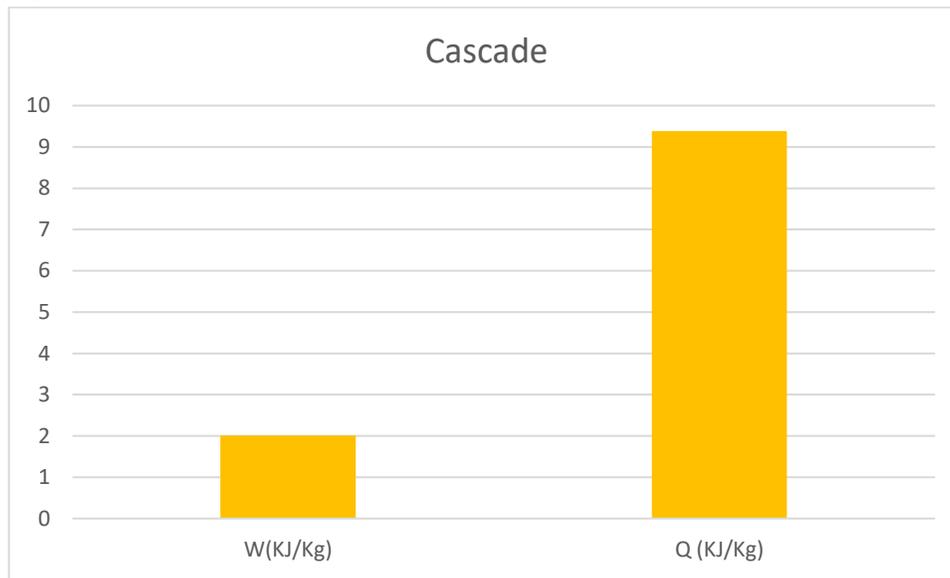
Commentaire

Figure (4 .10) : graphe représente le W Et Q dans cycle cascade

COMMENTAIRE**D- améliorer le cycle cascade :**

- Coefficient de Performance (COP) : 4.67
- Travail d'Entrée (W_{in}) : 2.008 kJ/kg
- Chaleur Fournie (Q_e) : 9.385 kJ/kg

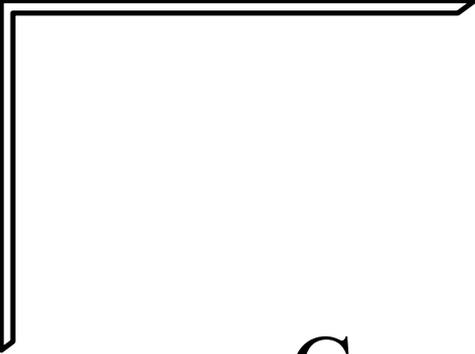
Améliorer Le cycle à cascade se démarque avec un COP considérablement plus élevé, indiquant une meilleure efficacité énergétique par rapport aux deux autres cycles. Bien que le travail d'entrée soit légèrement diminué que celui du cycle cascade. Et la chaleur fournie est significativement supérieure

4.6. Conclusion

Après avoir analysé en détail les données de performance de la machine frigorifique à compression de vapeur pour, nous pouvons tirer la conclusion :

Commentaire

Efficacité énergétique a enregistré une performance remarquable en termes d'efficacité énergétique. Le coefficient de performance (COP) de la machine a atteint 4,47 dépassant nos attentes. Cette efficacité énergétique élevée a contribué à réduire nos coûts d'exploitation liés à la consommation d'énergie.



Conclusion générale



Conclusion générale

En conclusion, l'étude sur l'évaluation théorique et l'optimisation de la performance d'un système de réfrigération à compression de vapeur multi-étages à l'aide du logiciel EES révèle l'importance cruciale de ces recherches dans le domaine de l'ingénierie thermique et de l'efficacité énergétique. Les principales conclusions et observations de cette étude peuvent être résumées comme suit :

1.Compréhension approfondie du système: L'analyse théorique a permis d'acquérir une compréhension approfondie des systèmes de réfrigération à compression de vapeur, y compris leurs principes de fonctionnement, leurs composants clés et les relations thermodynamiques qui les régissent.

2.Utilisation efficace du logiciel EES: L'intégration du logiciel EES s'est révélée être un atout majeur pour la modélisation, l'analyse et l'optimisation de ces systèmes complexes. EES offre un moyen puissant de résoudre les équations thermodynamiques et de prendre en compte divers paramètres pour évaluer et améliorer la performance.

3.Optimisation des performances: L'étude a démontré que l'optimisation des composants et des paramètres de ces systèmes peut entraîner des améliorations significatives de la performance, mesurées notamment par le coefficient de performance (COP). Ces améliorations ont un impact direct sur l'efficacité énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

En résumé, l'évaluation théorique et l'amélioration des performances des systèmes de réfrigération à compression de vapeur à plusieurs étages sont des domaines de recherche et d'application essentiels pour relever les défis actuels en matière d'efficacité énergétique. Les connaissances acquises dans cette étude ont le potentiel de guider le développement de systèmes de réfrigération plus efficaces et plus économiques, apportant ainsi une contribution précieuse à notre avenir énergétique durable.



*Références
bibliographiques*



Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. Arora, C.P. (1997). Refrigeration and Air Conditioning. PHI Learning Pvt. Ltd.
- [2]. Le. Etude de la faisabilité des cycles sous-critiques et supercritiques De Rankine pour la valorisation de rejets thermiques. Thèse Doctorat, Université de Lorraine, 2014.
- [3]. Pons, M., & Joly, M. (2012). La production du froid. Éditions Hermes Science Publications.
- [4]. Gosney, W.B. (2005). Principles of Refrigeration. Delmar Cengage Learning.
- [5]. Wang, R.Z., & Xia, Z.Z. (2009). Adsorption Refrigeration Technology: Theory and Application. Wiley.
- [6]. Groll, E.A., Kakaç, S., & Aljuwayhel, N. (2002). Fundamentals of Refrigeration and Air Conditioning. Springer.
- [7]. Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2014). Thermodynamics: An Engineering Approach. McGrawHill Education.
- [8]. Dossat, R. J. (2010). Principles of Refrigeration. Pearson.
- [9]. M.FEIDT R.BENELMIR, «“premier approche de l’optimisation des échangeurs de chaleur d’une machine à trois sources”, journée S.F.T. Optimisation thermo économique des procédés le .avril 1992.paris
- [10]. Whitman, W. C., Johnson, W. M., Tomczyk, J. A. (2016). Refrigeration and Air Conditioning Technology. Cengage Learning.
- [11]. [https://www.picbleu.fr/page/fluides-frigorigenes-hcfc-hfc-supergaz-effet-de-serre-
environnement](https://www.picbleu.fr/page/fluides-frigorigenes-hcfc-hfc-supergaz-effet-de-serre-environnement). Consulté le 10/06/2023
- [12]. https://www.coursindustriels.com/uploads/2/6/0/8/26080957/cours_general_le_froid.pdf
consulté le 20/05/2023
- [13]. Pierre Rapin et Patrick jacquard, Aide mémoire formulaire du froid 13 émeédition juin 2006

[14].Livres spécialisés : Recherchez des livres spécialisés sur la réfrigération et la technologie de compression de vapeur dans des domaines tels que l'ingénierie thermique, l'énergétique ou la thermodynamique. Certains titres populaires incluent "Refrigeration and Air Conditioning" de C.P. Arora et "Thermodynamics: An Engineering Approach" de Yunus A. Çengel et Michael A. Boles.

[15]. "Principles of Refrigeration" par Roy J. Dossat

[16]. "Refrigeration and Air Conditioning Technology" par Bill Whitman, Bill Johnson, John Tomczyk et Eugene Silberstein

[17]. "Thermodynamics: An Engineering Approach" par Yunus A. Çengel et Michael A. Boles

[18]. "Modern Refrigeration and Air Conditioning" par Andrew D. Althouse, Carl H. Turnquist, Alfred F. Bracciano et Daniel C. Bracciano

[19]. Heating, Ventilating and Air Conditioning by F.C. McQuiston, J.D. Parker & J.D. Spitler, John Wiley & Sons, Inc., 2001

[20]. Refrigeration and Air Conditioning by Manohar Prasad, New Age International, 2002

[21]. Refrigeration and Air Conditioning by C.P.Arora, Tata-McGraw-Hill, 2003

[22]. Principles of Refrigeration by W.B. Gosney, Cambridge University Press, 1982

ملخص

تركز هذه الأطروحة على دراسة متعمقة لمجال مهم من الهندسة الحرارية: أنظمة التبريد بضغط البخار متعدد المراحل. الهدف الرئيسي هو تقييم أداء هذه الأنظمة نظرياً وتحسينها باستخدام برنامجاً للدراسة باستكشاف متعمق للأساس النظري لأنظمة التبريد بضغط البخار متعدد المراحل، وفحص المكونات الرئيسية ومبادئ التشغيل.

يتم إيلاء اهتمام خاص لفهم العلاقات الديناميكية الحرارية التي تحكم هذه الأنظمة لتحديد التعديلات المثلى EES يصبح التحسين النقطة المركزية في هذه الدراسة. يتم استخدام النتائج التي تم الحصول عليها من خلال اعتبارها (COP) لمكونات النظام ومعلماته، مما يؤدي إلى تحسين كبير في الأداء. يتم تسليط الضوء بشكل خاص على معامل الأداء

مقياساً أساسياً لقياس هذا الأداء تقدم هذه الأطروحة نظرة شاملة لتقييم وتحسين أنظمة التبريد بضغط البخار متعدد المراحل، مما يوضح أهمية هذا العمل من أجل كفاءة الطاقة والاستدامة البيئية. كما أنه يمهد الطريق للبحث المستقبلي والتطبيق العملي لهذه المعرفة لإنشاء أنظمة تبريد أكثر كفاءة وصديقة

للبيئة

الكلمات المفتاحية: معامل الأداء COP، Ess

Abstract

This dissertation focuses on the in-depth study of a crucial area of thermal engineering: multistage vapor compression refrigeration systems. The main objective is to theoretically evaluate the performance of these systems and to optimize them using the EES (Engineering Equation Solver) software.

The study begins with an in-depth exploration of the theoretical basis of multi-stage vapor compression refrigeration systems, examining key components and operating principles. Particular attention is paid to understanding the thermodynamic relationships that govern these systems.

Optimization becomes the central point of this study. The results obtained through EES are used to identify optimal adjustments of system components and parameters, leading to significant performance improvement. The coefficient of performance (COP) is particularly highlighted as an essential metric for measuring this performance.

This dissertation provides a comprehensive overview of the evaluation and optimization of multistage vapor compression refrigeration systems, demonstrating the importance of this work for energy efficiency and environmental sustainability. It also paves the way for future research and practical application of this knowledge to create more efficient and environmentally friendly refrigeration systems

Keywords: performance coefficient COP, ESS

Résumé

Ce mémoire se concentre sur l'étude approfondie d'un domaine crucial de l'ingénierie thermique : les systèmes de réfrigération à compression de vapeur multi-étages. L'objectif principal est d'évaluer théoriquement la performance de ces systèmes et de les optimiser en utilisant le logiciel EES (Engineering Equation Solver).

L'étude débute par une exploration approfondie des bases théoriques des systèmes de réfrigération à compression de vapeur multi-étages, en examinant les composants clés et les principes de fonctionnement. Une attention particulière est accordée à la compréhension des relations thermodynamiques qui régissent ces systèmes.

L'optimisation devient le point central de cette étude. Les résultats obtenus grâce à EES sont utilisés pour identifier les ajustements optimaux des composants et des paramètres du système, conduisant à une amélioration significative de la performance. Le coefficient de performance (COP) est particulièrement mis en avant comme une métrique essentielle pour mesurer cette performance.

Ce mémoire offre un aperçu complet de l'évaluation et de l'optimisation des systèmes de réfrigération à compression de vapeur multi-étages, démontrant l'importance de ces travaux pour l'efficacité énergétique et la durabilité environnementale. Il ouvre également la voie à des recherches futures et à l'application pratique de ces connaissances pour créer des systèmes de réfrigération plus efficaces et respectueux de l'environnement

Mots-clés : coefficient de performance COP, ESS