

MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie

Mécanique Spécialité :

Energétique

Thème

ETUDE D'UN CIRCUIT FRIGORIFIQUE

Présenté par :

❖ FORLOUL ABDELILLAH

❖ LAHRECHE BRAHIM

Soutenu le .. / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Président	M ^r FLITTI ABDELMADJID	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	M ^r KHALDI ABDELAZIZ	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	M ^{me} BELHACHEMI AMINA	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022

REMERCIEMENT

Nous tenons tout d'abord à remercier le tout puissant ALLAH pour
tout.

Nos remerciements honorables à notre encadrante, Mme Belhachemi
Amina, d'avoir accepté de nous encadrer, pour sa disposition malgré
ses occupations et sa considération envers nous ainsi que tous les
efforts qu'elle a fournis dans l'élaboration de ce travail.

Nous remercions le président, Dr Flitti Abdalmadjid ainsi que
l'examineur Dr Khaldi Abdelaziz d'avoir disposé de leurs temps pour
apporter une attention particulière à notre travail.

Nous remercions également tous le corps enseignant du département
de Génie Mécanique pour la bonne formation qu'ils nous ont permis
d'acquérir.

Je dédie ce modeste travail

A mon très cher père, tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma très chère mère, quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit, ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mes chers frères Ibrahim Abdellatif et Abdelsamed source de vie, d'espoir et de motivation.

A mes très chers amis, tout particulièrement Chaouki, Tariq.

A ma famille et tous ceux qui m'ont aidé de loin où de près à réaliser ce travail et à toutes les personnes qui occupent une place dans mon cœur.

A la mémoire de ma mère

LAHRECHE BRAHIM

Résumé

L'utilisation des équipements frigorifiques est devenue indispensable dans le secteur industriel, commercial et privé. Ceci nous a poussé à faire une étude sur le circuit frigorifique.

Dans ce mémoire nous avons essayé de chercher une combinaison qui assure un COP acceptable, donc des performances d'un tel système en prenant en compte les facteurs qui vont influencer sur le fonctionnement du circuit frigorifique en se basant sur les propriétés thermodynamiques des fluides frigorifiques, dans le cas d'un simple cycle, d'un cycle bi-étagé et dans le cas d'un cycle à cascade.

A l'aide des programmes de calcul nous sommes arrivés à déterminer l'allure du COP en fonction des pressions, la haute pression dans le cas d'un simple circuit, et en fonction de la pression intermédiaire pour les installations fonctionnant à trois niveaux de pression, comme nous avons pu savoir l'effet des facteurs déjà cités sur l'écart entre la basse température et la haute température dans le circuit frigorifique.

Abstract

The use of refrigeration equipment has become essential in the industrial, commercial and private sector. This prompted us to carry out a study on the refrigeration circuit.

In this thesis we have tried to find a combination that ensures an acceptable COP, therefore the performance of such a system by taking into account the factors that will influence the operation of the refrigeration circuit based on the thermodynamic properties of the refrigerants, in the case of a single cycle, a two-stage cycle and in the case of a cascade cycle.

Using calculation programs, we managed to determine the shape of the COP as a function of the pressures, the high pressure in the case of a simple circuit, and as a function of the intermediate pressure for installations operating at three levels of pressure, as we were able to know the effect of the factors already mentioned on the difference between the low temperature and the high temperature in the refrigeration circuit.

الملخص

أصبح استخدام معدات التبريد ضرورياً في القطاع الصناعي والتجاري والخاص. دفعنا هذا إلى إجراء دراسة على دائرة التبريد. في هذه الأطروحة، حاولنا إيجاد مجموعة تضمن COP مقبولاً، وبالتالي أداء مثل هذا النظام من خلال مراعاة العوامل التي ستؤثر على تشغيل دائرة التبريد بناءً على الخصائص الديناميكية الحرارية لمواد التبريد، في الحالة لدورة واحدة ودورة من مرحلتين وفي حالة الدورة المتتالية.

باستخدام برامج الحساب، تمكنا من تحديد شكل COP كدالة للضغط، والضغط العالي في حالة الدائرة البسيطة، وكدالة للضغط الوسيط للمنشآت التي تعمل على ثلاثة مستويات من الضغط، كما نحن تمكنا من معرفة تأثير العوامل التي سبق ذكرها على الفرق بين درجة الحرارة المنخفضة وارتفاع درجة الحرارة في دائرة التبريد.

SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX	I
LISTE DES FIGURES	II
NOMENCLATURE	IV
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE.....	2
I.1. INTRODUCTION.....	2
I.2. MACHINE THERMIQUE.....	2
I.3. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE CYCLE FRIGORIFIQUE.....	2
I.3.1 Définition du cycle frigorifique.....	2
I.3.2. Classification des systèmes frigorifiques.....	3
I.3.3. Principe de fonctionnement du circuit frigorifique à compression de vapeur.....	4
I.3.4. Les composants du circuit frigorifique.....	5
I.4. LES FLUIDES FRIGORIGENES.....	7
I.5. LES DOMAINES D'APPLICATIONS DES CIRCUITS FRIGORIFIQUES	9
I.6. PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT.....	10
I.6.1. Ozone et récupération des fluides frigorigènes	10
I.6.2. Effet de serre	11
I.7. LA FUITE DU FLUIDE FRIGORIGENE	11
I.7.1. Détection des fuites de fluides frigorigène.....	11
CHAPITRE II : ETUDE DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE EN CASCADE	13
II.1. INTRODUCTION	13
II.2 DEFINITION DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE EN CASCADE	13
II.3. LES COMPOSANTS D'UN CIRCUIT FRIGORIFIQUE EN CASCADE A DEUX ETAGES.....	14
II.4. LA DESCRIPTION ET LE PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE EN CASCADE A DEUX ETAGES.....	14
II.5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE CASCADE	15
II.5.1. Avantages.....	15
II.5.2. Inconvénients	16
II.6. L'ANALYSE THERMODYNAMIQUE DU CYCLE FRIGORIFIQUE EN CASCADE A DEUX ETAGES :	16
CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	20
III.1. INTRODUCTION.....	20

SOMMAIRE

III.2. PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS.....	20
III.2.1. Circuit frigorifique simple de R134a.....	20
III.2.2. Circuit frigorifique simple de R161.....	22
III.2.3. Circuit frigorifique simple de NH3.....	24
III.2.4. Circuit frigorifique en cascade R134a- R134a	26
III.2.5. Circuit frigorifique en cascade (R161-R161)	28
III.2.6. Circuit frigorifique en cascade (NH3-NH3).....	30
III.2.7. Circuit frigorifique en cascade (R134a-R161)	32
III.2.8. Circuit frigorifique en cascade (R134a -NH3)	34
III.2.9. Circuit frigorifique en cascade (R161 -NH3).....	35
III.3.1. L'influence sur le COP... ..	37
III.3.2. L'influence sur l'écart de la température.....	38
CONCLUSION... ..	39
REFERENCES	

LISTE DES TABLEAUX

Tab.I.1. Températures d'évaporation de certains fluides frigorigènes	8
Tab.II.2. Les différentes caractéristiques du fluide dans le cycle en cascade.....	15
Tab.III.1. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R134a.....	20
Tab.III.2. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R161	22
Tab.III.3. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple NH3	25
Tab.III.4. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique bi-étagé de R134a.....	27
Tab.III.5. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique bi-étagé de R161	29
Tab.III.6. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique bi-étagé de NH3... ..	31
Tab.III.7. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique en cascade (R134a / R161)	33
Tab.III.8. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique en cascade (R134a/NH3)	35
Tab.III.9. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique en cascade (R161/ NH3)... ..	36

LISTE DES FIGURES

Fig.I.1. Fonctionnement du circuit frigorifique	4
Fig. I.2.Types de compresseurs.....	5
Fig.I.3. Principe de fonctionnement du compresseur.....	5
Fig.I.4. Condenseur.....	6
Fig.I.5. Fonctionnement du condenseur.....	6
Fig.I.6. Détendeur.....	6
Fig.I.7. Fonctionnement du détendeur.....	6
Fig.I.8. Evaporateur.....	7
Fig.I.9. Fonctionnement d'évaporateur.....	7
Fig.I.10. Désignation des composés organiques.....	9
Fig.I.11. Détecteur de fluides frigorigènes Tru Pointe IR.....	12
Fig.II.1 : Circuit frigorifique en cascade.....	13
Fig.II.1. Passage du fluide par le compresseur.....	17
Fig.II.2. Passage du fluide par le condenseur.....	17
Fig.II.3. Passage du fluide par L'évaporateur.....	18
Fig.II.4. Passage du fluide par le Détendeur.....	18
Fig.II.5. Passage du fluide par L'échangeur.....	19
Fig.III.1. Diagramme T-S du cycle simple R134a.....	21
Fig.III.2. Effet de la haute pression sur le COP du cycle simple R134a.....	21
Fig.III.3. Effet de la haute pression sur le Q eva ; W com du cycle simple R134a.....	22
Fig.III.4. Diagramme T-S du cycle simple R161.....	24
Fig.III.5. Effet de la haute pression sur le COP du cycle simple R161.....	24
Fig.III.6. Effet de la haute pression sur le Q eva, Wcom du cycle simple R161.....	25
Fig.III.7. Diagramme T-S du cycle simple NH3.....	26
Fig.III.8. Effet de la haute pression sur le COP du cycle simple NH3.....	26
Fig.III.9. Effet de la haute pression sur le Q eva, Wcom du cycle simple NH3.....	27
Fig.III.10. Diagramme T-S du cycle frigorifique bi-étagé de R134a.....	28
Fig.III.11. Effet de la moyenne pression sur le COP du bi-étagé de R134a.....	28
Fig.III.12. Effet de la moyenne pression sur le Q_v , \dot{W}_{compA} , \dot{W}_{compB} du cycle bi-étagé R134a.....	29
Fig.III.13. Diagramme T-S du cycle frigorifique bi-étagé de R161.....	30
Fig.III.14. Effet de la moyenne pression sur le COP du bi-étagé de R161.....	30

LISTE DES FIGURES

Fig.III.15. Effet de la moyenne pression sur le \dot{Q}_{ev} , \dot{W}_{compA} , $\dot{W}_{comp B}$ du cycle bi-étagé R161.....	31
Fig.III.16. Diagramme T-S du cycle frigorifique bi-étagé de NH3.....	32
Fig.III.17. Effet de la moyenne pression sur le COP du bi-étagé de NH3.....	32
Fig.III.18. Effet de la moyenne pression sur le \dot{Q} , $\dot{W}_{comp A}$, $\dot{W}_{comp B}$ du cycle bi-étagé NH3.....	33
Fig.III.19. Effet de la moyenne pression sur le COP du cycle en cascade (R134a/R161).....	34
Fig.III.20. Effet de la moyenne pression sur le \dot{Q} , $\dot{W}_{comp A}$, $\dot{W}_{comp B}$ du cycle en cascade (R134a / R161).....	34
Fig.III.21. Effet de la moyenne pression sur le COP du cycle en cascade (R134a/NH3).....	35
Fig.III.22. Effet de la moyenne pression sur le \dot{Q} , $\dot{W}_{comp A}$, $\dot{W}_{comp B}$ du cycle en cascade (R134a/NH3).....	36
Fig.III.23. Effet de la moyenne pression sur le COP du cycle en cascade (R161/NH3).....	37
Fig.III.24. Effet de la moyenne pression sur le \dot{Q} , $\dot{W}_{comp A}$, $\dot{W}_{comp B}$ du cycle en cascade (R161/ NH3).....	37
Fig.III.25. Le COP des différents cycles.....	38
Fig.III.26. Le ΔT des différents cycles.....	39

NOMENCLATURE

Symbole	Désignation	Unité
COP	Coefficient de performance	-
\dot{m}_i	Le débit massique du fluide dans le circuit frigorifique simple	Kg/S
\dot{m}_A	Le débit massique de la cellule inférieure de basse pression	Kg/S
\dot{m}_B	Le débit massique de la cellule supérieure de haute pression	Kg/S
Q_{cond}	La chaleur évacuée par le condenseur	KJ/S
Q_{eva}	La chaleur absorbée par l'évaporateur.	KJ/S
Bp	Basse pression.	KPa
Mp	Moyenne pression.	KPa
Hp	Haute pression.	KPa
ΔT	L'écart de température entre la source froide et la source chaude	°c
\dot{W}_{com}	Le travail des compresseurs du circuit	KJ/S
\dot{W}_{comA}	Le travail du compresseur de premier étage.	KJ/S
\dot{W}_{comB}	Le travail du compresseur du deuxième étage.	KJ/S
hi	L'enthalpie massique.	KJ/Kg
Pi	Pression	KPa
Si	Entropie massique	KJ/Kg
Ti	Température	°c

i varie de 1 jusqu'à 8, il désigne l'entrée ou la sortie de chaque composant du circuit

INTRODUCTION GENERALE

L'amélioration d'une machine frigorifique revient à augmenter son coefficient de performance. Dans ce travail nous avons essayé de chercher une combinaison qui assure un COP acceptable, donc des performances d'un tel système en prenant en compte les facteurs qui vont influencer sur le fonctionnement du circuit frigorifique en se basant sur les propriétés thermodynamiques des fluides frigorifiques, dans le cas d'un simple cycle, d'un cycle bi-étagé et dans le cas d'un cycle à cascade.

A l'aide des programmes de calcul nous sommes arrivés à déterminer l'allure du COP en fonction de la haute pression dans le cas d'un simple circuit, et en fonction de la pression intermédiaire pour les installations fonctionnant à trois niveaux de pression.

Il existe plusieurs modèles des machines frigorifiques, notre étude s'est consacré aux machines à compression de vapeur, nous pouvons trouver des machines composées par un simple étage c'est-à-dire un seul compresseur, un évaporateur, un condenseur et un détendeur, ce type de machine, travaillant entre deux niveaux de pression, la haute pression et la basse pression, comme nous pouvons trouver d'autres types constitués par un ensemble d'étages avec différentes associations entre les composants du système, dans notre études nous nous sommes consacré à celle qui travaillent à trois niveaux de pression.

Après avoir dressé dans le chapitre I une recherche bibliographique sur les systèmes frigorifiques. Nous consacrons le chapitre II à des rappels fondamentaux sur le principe de fonctionnement d'un cycle bi étagé en cascade. Ce mode de fonctionnement a été modélisé on se basons sur les équations de conservation d'énergie et de conservation de masse régissant chaque composant du système à fin d'être implémenter dans EES. Dans le chapitre III, l'étude par le logiciel EES nous a permis d'obtenir des résultats qui ont été exposés sous forme de courbes pour voir l'effet des paramètres déjà citer sur le COP suivis par une discussion de ces résultats.

I.1. Introduction :

Pour mieux détailler les caractéristiques des machines frigorifiques à compression de vapeur, objet du présent travail, l'étude bibliographique suivante donne une synthèse des processus de production de froid et des systèmes frigorifiques couramment utilisés.

I.2. Machine thermique :

Un moteur thermique est un mécanisme par lequel un fluide subit des transformations cycliques, au cours desquelles le fluide échange de l'énergie avec le monde extérieur sous forme de travail et de chaleur.

La théorie des moteurs thermiques se concentre sur la description et l'étude physique de certains systèmes thermodynamiques capables de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique et inversement. Il a été établi au milieu du XIXe siècle et est basé sur la thermodynamique, en particulier les deux premiers principes.

De nombreux moteurs thermiques sont couramment utilisés : moteurs thermiques ou moteurs à combustion interne (sous la forme de moteurs à combustion externe tels que les moteurs à vapeur et les turbines à vapeur, ou sous la forme de moteurs à combustion interne tels que l'essence, le diesel, les moteurs à réaction et les turbines à gaz), réfrigérateurs et pompes à chaleur. [1]

I.3. Etude bibliographique sur le cycle frigorifique :

I.3.1 Définition du cycle frigorifique :

Le cycle de réfrigération est le chemin parcouru par le réfrigérant (liquide de refroidissement), qui subit plusieurs changements d'état (liquide / gaz) dans divers composants. Le circuit de refroidissement a pour objectif d'inverser le sens du transfert de chaleur afin de refroidir une pièce, que ce soit pour le confort des personnes avec climatisation ou pour refroidir des aliments avec refroidissement.[2]

1.3.2. Classification des systèmes frigorifiques :

La classification des systèmes frigorifiques est habituellement faite par type de source d'énergie absorbée, de processus physico-chimique intervenant dans le système ou par type d'utilisation.

1.3.2.a. Classification par processus physico-chimique :

- Systèmes à changement d'état du frigorigène :

Sont celles qui font intervenir deux chaleurs latentes du changement de phase du frigorigène. La chaleur latente de vaporisation, et la chaleur latente de condensation.

- Systèmes à gaz permanent :

Les chaleurs d'échauffement et de refroidissement résultant respectivement de la compression et la détente d'un gaz sont utilisées dans un processus de production de froid.

- Systèmes à propriétés thermoélectriques :

Les puissances frigorifiques développées par ces systèmes sont modestes et leur utilisation est restreinte.

- Systèmes à sorption de gaz ou de vapeur :

Ces systèmes sont à absorption (humide ou sèche) et à adsorption.

1.3.2.b. Classification par source d'énergie absorbée :

- **Systèmes frigorifiques consommant de l'énergie mécanique (ou électrique) :**

ces systèmes transfèrent de l'énergie calorifique d'un niveau de température inférieur T_f vers un niveau de température supérieur T_i , ces des systèmes est dithermes. Parmi ces systèmes, on trouve essentiellement les systèmes frigorifiques à compression de vapeur.

- **Systèmes frigorifiques consommant de l'énergie calorifique :**

Le principe de fonctionnement de ces systèmes consiste à extraire ou fournir une quantité de chaleur en consommant de l'énergie calorifique. Ils sont constitués d'au moins trois sources de chaleur : source froide, à la température T_f , une source intermédiaire ou puits de rejet thermique à la température T_i et une source fournissant de la chaleur " motrice " à la température T_c ce sont systèmes trithermes.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons à l'analyse de fonctionnement des machines à compression de vapeur. [3]

I.3.3. Principe de fonctionnement du circuit frigorifique à compression de vapeur :

Les systèmes de réfrigération à compression sont les systèmes de réfrigération les plus courants dans la pratique. Dans un système de réfrigération à compression, le réfrigérant traverse le circuit de réfrigérant et y subit diverses transitions d'état. Les systèmes de réfrigération à compression sont basés sur les effets physiques suivant : La transition de l'état liquide à l'état gazeux nécessite de l'énergie thermique. L'évaporateur (2) puise de l'énergie thermique dans l'espace (1) à refroidir. En modifiant la pression pendant l'évaporation et la condensation.

Le niveau de température peut être ajusté pour provoquer le transfert de chaleur du côté froid vers le côté chaud. Le condensat de réfrigérant (4) libère de nouveau de l'énergie thermique. Pour augmenter la pression, un compresseur à vis, à spirale, à turbine ou à jet de vapeur peut être utilisé à la place du compresseur à piston (3) illustrés. [2]

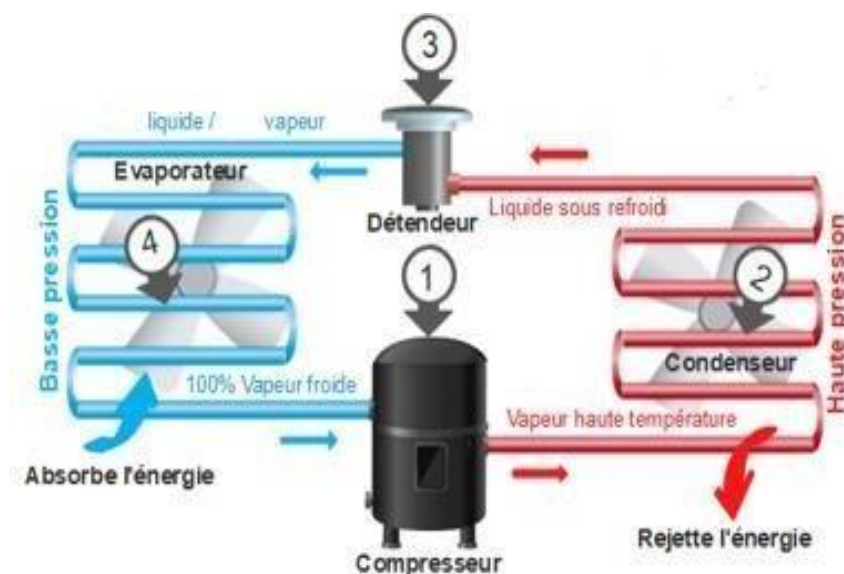


Fig.I.1. Fonctionnement du circuit frigorifique [4]

I.3.4. Les composants du circuit frigorifique :

Les composants de base du circuit frigorifique sont le compresseur, l'évaporateur, le condenseur et le détendeur. Pour ceux-ci, la connexion de refroidissement ainsi que le réfrigérant doivent être intégrés.

I.3.4.a. Le Compresseur :

Le compresseur est l'un des composants clés du circuit. Il permet au fluide frigorigène de circuler par compression. Le compresseur aspire de la vapeur à basse pression (BP) (à bas niveau de température) issu de l'évaporateur, le comprime et le refoule de la vapeur à haute pression (HP) vers le condenseur.

Il existe plusieurs types de compresseurs, allant des petits compresseurs domestiques (comme les réfrigérateurs fermés) aux modèles plus grands pour les applications industrielles. [5]

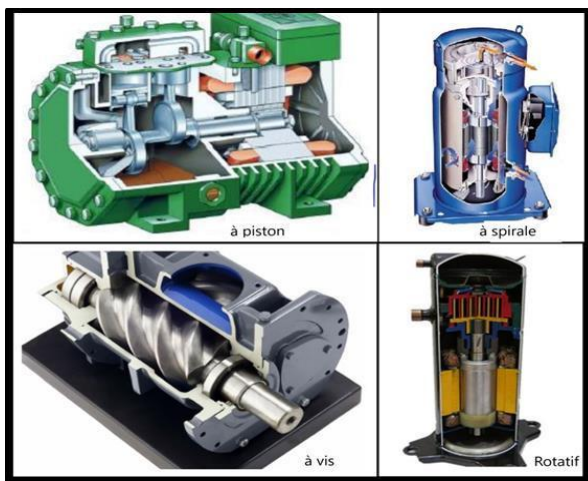


Fig. I.2. Types de compresseurs [6-9]

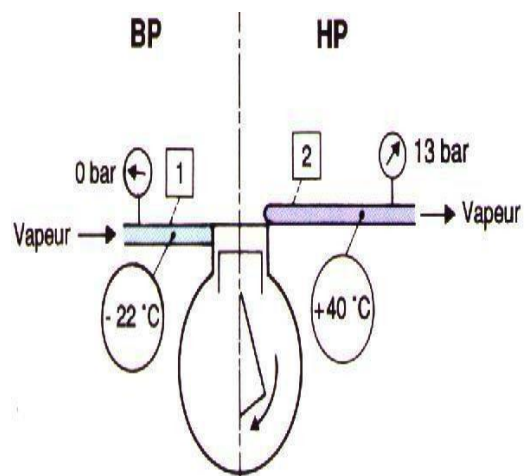


Fig.I.3. Principe de fonctionnement du compresseur[10]

I.3.4.b. Le Condenseur :

Le réfrigérant liquide traverse le compresseur et atteint le condenseur. Le condenseur est un échangeur de chaleur qui va permettre l'évacuation de la chaleur contenue dans le fluide frigorigène gazeux qui était auparavant aspirée par l'évaporateur et comprimée dans le compresseur. Par conséquent, il reçoit du gaz à haute pression et à haute température. C'est là que la chaleur du réfrigérant est échangée avec l'air ou l'eau et cela aidera au chauffage.

Il va se refroidir et se condenser. Il change à nouveau d'état et repasse du gaz au liquide. A la sortie condenseur, le fluide frigorigène est encore sous haute pression, mais sa température a chuté.[11]

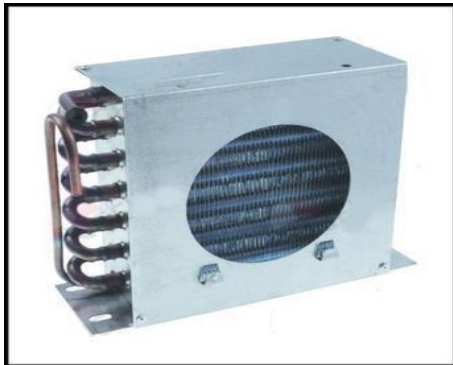


Fig.I.4. Condenseur [10]

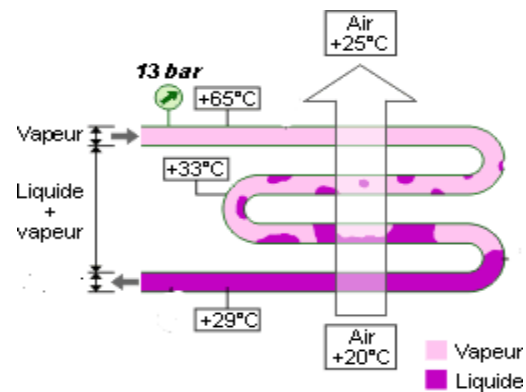


Fig.I.5. Fonctionnement du condenseur [10]

I.3.4.c. Le Détendeur :

A l'entrée du régulateur (détendeur), le réfrigérant est à l'état liquide et sous haute pression. Lorsque le réfrigérant passe le détendeur, sa pression et sa température chutent. Avec le détendeur, vous pouvez également régler le débit de réfrigérant à travers le circuit fermé. A la sortie du détendeur, le fluide frigorigène est à l'état liquide et sous basse pression. Lors du passage de l'ouverture calibrée du détendeur, le liquide subit une chute de pression qui, d'une part, provoque son évaporation partielle et d'autre part se refroidit. L'expansion du fluide est une expansion isenthalpique [12].



Fig.I.6. Détendeur [10]

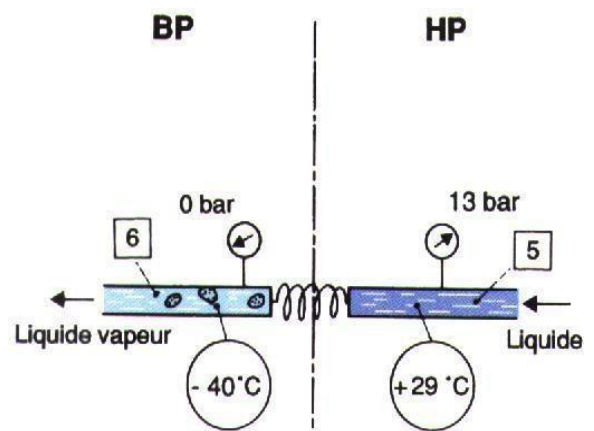


Fig.I.7. Fonctionnement du détendeur [10]

I. 3.4.d. L'Évaporateur :

Un évaporateur est également indispensable car son rôle est de capter la chaleur de la pièce à refroidir. Il capte la chaleur en évaporant le réfrigérant qu'il contient. Le fluide arrive à l'évaporateur sous la forme d'un mélange liquide-vapeur, à basse pression et basse température.

De cette façon, la chaleur est transférée du milieu à refroidir au fluide frigorigène, qui capte la chaleur en s'évaporant.

A la sortie de l'évaporateur, le fluide est entièrement sous forme vapeur avant d'être aspiré par le compresseur [13].

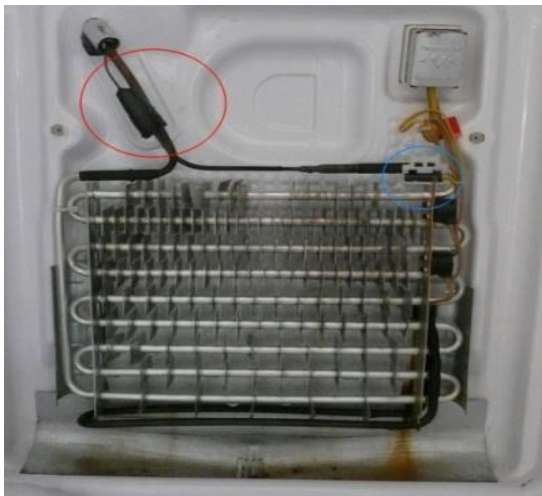


Fig.I.8. Evaporateur [10]

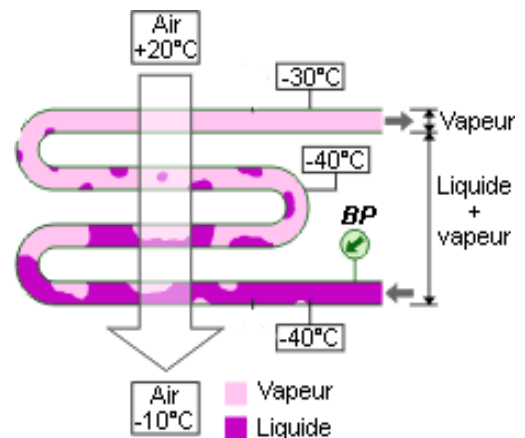


Fig.I.9. Fonctionnement d'évaporateur [10]

I.4. Les fluides frigorigènes :

Les échanges d'énergie (travail et chaleur) entre la machine frigorifique et le milieu extérieur sont réalisés au moyen d'un fluide frigorigène. Un fluide frigorigène peut se définir comme une substance chimique dont la température d'évaporation à la pression atmosphérique est inférieure à la température ambiante, c'est un fluide ou un mélange de fluides présentant des particularités physiques permettant d'utiliser un cycle de compression / relaxation pour transférer de la chaleur. En particulier, ils ont une faible température d'évaporation sous pression atmosphérique. Les réfrigérants sont utilisés pour refroidir les appareils de

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE

réfrigération (réfrigérateur, congélateur, climatiseur, etc.). Dans ces appareils, le réfrigérant sert également à transporter l'huile du compresseur. [10]

Les températures d'évaporation (d'ébullition) de certains fluides frigorigènes à la pression atmosphérique sont données dans le tableau suivant :

Fluide (réfrigérant)	Température d'ébullition (°C)
Eau – H ₂ O – R718	100
R11	23.3
R12	-29.8
R22	-40.7
R502	-45.6
Ammoniac - NH ₃ – R717	-33.3

Tab.I.1. Températures d'évaporation de certains fluides frigorigènes

Les réfrigérants peuvent être classés en quatre familles principales :

- Fluides inorganiques purs : eau, ammoniac, CO₂.
- Hydrocarbures : butane, isobutane, propane, propylène.
- Hydrocarbures halogénés hydrofluorocarbures (HFC) et hydrochlorofluorocarbures (HCFC) chlorofluorocarbures (CFC) et per fluorocarbures (PFC)...
- Autres fluides, utilisés assez rarement : éthers d'oxydes, alcools, composés trihalogénés, fluorés et chrome. [14]

Normalisation :

- **Les composés inorganiques :**

Les fluides de cette famille sont ceux de la série 700. Le fluide le plus utilisé de cette famille est l'ammoniac (NH₃) et il est désigné par R717 où R désigne Réfrigérant et le 7 des centaines

désigne la série 700, le 17 représentant les deux derniers chiffres désigne la masse molaire du corps (14 pour l'azote « N » et 3 pour l'hydrogène « H » [10])

- **Les composés organiques :**

Les composés organiques sont des dérivés du méthane (CH₄) et de l'éthane (C₂H₆). Leur désignation est basée sur la règle suivante :

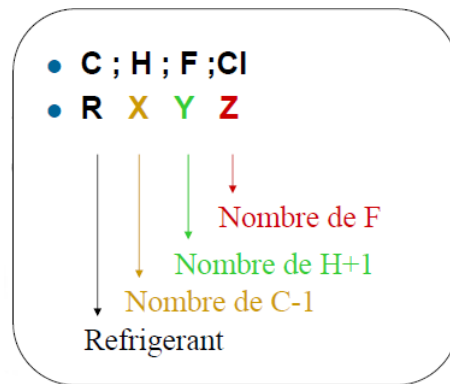


Fig.I.10. Désignation des composés organiques

On prend le R134a comme exemple, « CH₂FCF₃ » est la formule chimique du R134a :

-R représente le réfrigérant, le chiffre des unités est (2-1=1), le chiffre des dizaines est (2+1=3) et le chiffre des centaines est 4, d'où la désignation R134, l'indice « a » représente la différence de proportion de fluides purs pour les mélanges contenant le même composant.

I.4. Les domaines d'applications des circuits frigorifiques :

Les domaines d'application des installations frigorifiques sont très divers. Les applications les plus fréquentes sont la conservation des produits alimentaires et la climatisation d'ambiance. Le refroidissement industriel désigne les multiples applications de froid dans l'industrie chimique, pharmaceutique, plastique, agroalimentaire et mécanique ainsi que dans la pétrochimie et autres secteurs (p. ex. dans les centres de calcul). Les installations frigorifiques sont toutefois également utilisées dans l'industrie minière, pour le refroidissement du béton, pour les patinoires artificielles, en médecine et dans la recherche.

Souvent, les installations frigorifiques ne sont pas utilisées de manière optimale. Lorsqu'une installation de production est par exemple raccordée à un réseau de froid disponible (uniquement pour des raisons pratiques), l'installation est certes refroidie de manière fiable, mais un refroidissement avec la température ambiante serait néanmoins souvent suffisant. Cela s'applique par exemple aux extrudeuses, aux moteurs refroidis à l'eau, aux compresseurs d'air comprimé et à de nombreuses autres applications. [15]

I.5. Protection de l'environnement :

I.5.1. Ozone et récupération des fluides frigorigènes :

La diminution de la couche d'ozone dans certaines zones géographiques a sensibilisé nombre de scientifiques. Si les chlorofluorocarbones (CFC) et les hydro-fluorocarbones (HCFC) sont bien impliqués dans ce processus, il est établi que leur impact ne peut être analysé isolément, d'autres facteurs de pollution doivent également être étudiés simultanément. Une concertation mondiale, pour la protection de la couche d'ozone a débouché sur des réglementations.

Les CFC et HCFC étant mis en cause, le principe de la récupération de ceux-ci a débouché sur différentes techniques, méthodes et matériels, dont nous pouvons citer :

- Récupération : action de retirer le fluide frigorigène contenu dans un système frigorifique, pour le stocker dans un cylindre indépendant prévu à cet effet, en vue de son réemploi ou de sa destruction.
- Recyclage : c'est la transformation du produit ; ce qui n'est pas le cas dans les machines présentes sur le marché.
- Filtration : passage d'un liquide à travers un filtre pour éliminer des impuretés jugées indésirables (particules solides, huile, eau).
- Régénération : opération qui consiste à reformer, corriger de manière radicale, un produit que l'on a débarrassé de ses impuretés pour le ramener à l'état de neuf.

Ce cycle extrêmement complet, obtenu par différents procédés industriels, ne peut être effectué que par les producteurs de fluides ou leurs mandants.

La récupération des fluides frigorigènes s'avère nécessaire lors d'une intervention sur une partie de circuit ne pouvant pas être isolée ou lorsque l'installation doit être arrêtée définitivement ou démontée, ou alors lors d'un remplacement de fluide.

Les méthodes de récupération et les matériels utilisés diffèrent suivant la quantité de fluide contenue dans l'installation. Cela doit permettre une récupération maximale de fluide, un transfert rapide, une mise en œuvre facile, et un coût acceptable. [16]

I.5.2. Effet de serre :

À ce jour l'effet de serre préoccupe nombre de scientifiques. Certains fluides frigorigènes utilisés dans les installations frigorifiques ont une incidence non négligeable sur l'effet de serre. Il est à prévoir dans un avenir plus ou moins proche de nouvelles réglementations liées. [16]

I.6. La fuite du fluide frigorigène :

Toute fuite de gaz réfrigérant sur un groupe frigorifique peut entraîner des interruptions de service ou de production. Tous les équipements de réfrigération sont conçus pour un fonctionnement optimal avec une charge de réfrigérant précise. Une charge insuffisante causée par une fuite de réfrigérant de l'équipement ou du circuit froid peut entraîner immédiatement un mauvais fonctionnement et une consommation d'énergie excessive. Les gaz d'échappement peuvent également entraîner des blessures potentielles.

Par conséquent, la sous-charge des équipements de production de froid peut entraîner une baisse des performances et un arrêt total des équipements, entraînant une perte de service et de productivité de l'infrastructure. Qu'il s'agisse d'une panne de climatisation ou d'un groupe froid dans un entrepôt, un magasin ou une usine de fabrication, le fonctionnement d'un détecteur ou d'un système complet de détection de fluide frigorigène peut anticiper certains de ces événements et intervenir en amont. [17]

I.6.1. Détection des fuites de fluides frigorigène :

Divers équipements de mesure et de contrôle permettent de vérifier le bon fonctionnement des équipements de production de froid. Dans tous les domaines de l'industrie du froid, des détecteurs de gaz portables et des luminaires assurent la détection des fuites de fluide frigorigène.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE

Les détecteurs de gaz portables existent en différents modèles. Dans le cas des fluides frigorigènes, l'équipement portatif le plus couramment utilisé est un détecteur de fuite. Ces détecteurs sont conçus pour identifier les gaz réfrigérants, comme le détecteur de fuite de réfrigérant Tru Pointe IR. Ils contiennent généralement une sonde flexible et une longue durée de vie de la batterie pour effectuer des inspections.

Les détecteurs mono gaz portables classiques peuvent être utilisés pour extraire le gaz réfrigérant naturel. Les détecteurs de CO₂ portables fonctionnent comme EPI (équipement de protection individuelle) dans les unités chargées en CO₂.

Par exemple, ces dispositifs sont utilisés pour faire face au danger du dioxyde de carbone dans le transport réfrigéré des vaccins Covid-19.

Les travailleurs des installations utilisant des réfrigérants naturels et des hydrocarbures tels que le propane, le butane, l'isobutane et l'ammoniac peuvent également être équipés de détecteurs de gaz explosifs pour assurer leur sécurité. [17]



Fig.I.11. Détecteur de fluides frigorigènes Tru Pointe IR [17]

II.1. Introduction :

Après avoir donné un aperçu sur le circuit frigorifique ainsi que les fluides frigorigènes et afin de compléter leur description, nous allons présenter dans ce chapitre le comportement thermodynamique du système frigorifique bi-étagé en cascade.

II.1 Définition du circuit frigorifique en cascade :

Ce type de réfrigération permet de couvrir une gamme très large de température, jusqu'à -100°C , température impossible à obtenir avec des installations traditionnelles.

Une cascade repose sur le cycle frigorifique traditionnel qui peut être à compression de vapeur et changement d'états.

Une cascade est constituée d'une succession d'installation thermodynamique (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur), en générale deux voire trois en fonction de l'utilisation et de la température visée. Ces installations comprennent des circuits frigorifiques qui utilisent des fluides frigorigènes travaillant à des niveaux de température différents et couplés thermiquement par un échangeur [18].

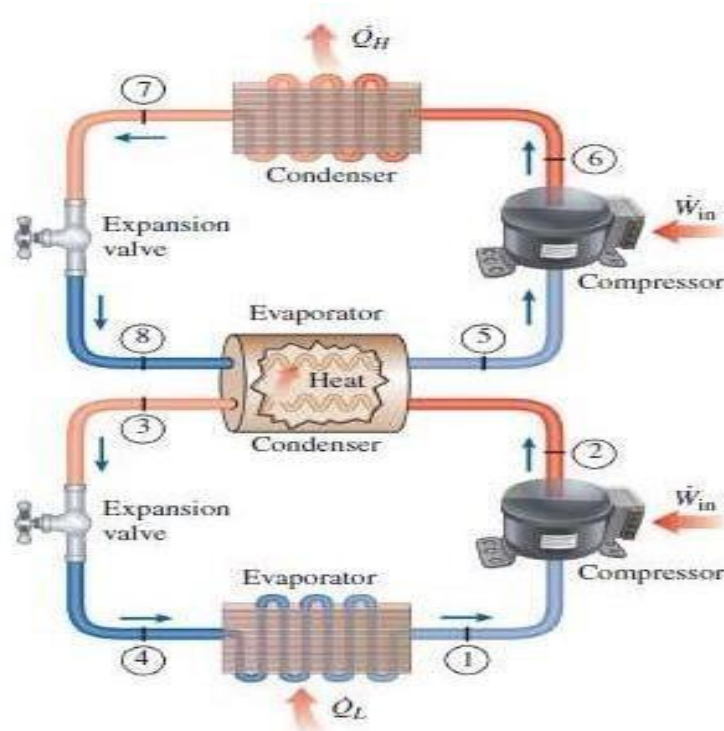


Fig.II.1 : Circuit frigorifique en cascade [19]

II.2. Les composants d'un circuit frigorifique en cascade à deux étages :

L'installation d'une unité de réfrigération à cycle en cascade à deux étages comprend les principaux équipements suivants :

- Deux compresseurs, un pour le cycle à basse température et un pour le cycle à haute température.
- Des évaporateurs pour les cycles à basse température et des condenseurs pour les cycles haute température.
- Un échangeur situé entre les deux cycles, assurant d'une part la condensation du fluide frigorigène du cycle à basse température, et d'autre part la vaporisation du fluide frigorigène du cycle à haute température.
- Régulation(détendeur) en température des sources froides ou chaudes (pour les sources temporisées), par démarrage et arrêt du compresseur sur des seuils de température haute et basse, ou via un régulateur PID commandé par le compresseur [20].

II.3. La description et le principe de fonctionnement du circuit frigorifique en cascade à deux étages :

Le multiétage implique une ou plusieurs pressions intermédiaires entre les pressions de rejet de chaleur et d'absorption de chaleur, et une série de compresseurs fonctionnant entre des intervalles de pression successifs. Le cycle en cascade est simplement une chaîne de cycles de compression de vapeur à un étage fonctionnant en série, de sorte que le condenseur d'un cycle à basse température fournit l'apport de chaleur à l'évaporateur du cycle à haute température.

Dans le cas d'une cascade frigorifique à deux étages, l'étage à haute pression possède une source chaude (condenseur) classique refroidie par air ou par eau. Sa source froide (évaporateur) est en contact avec la source chaude de l'étage basse pression grâce à un échangeur à contre-courant. L'évaporateur à air ou à eau de l'étage basse pression soustrait la chaleur au milieu considéré, Au niveau de l'évaporateur, on préfère en principe maintenir des pressions supérieures à la pression atmosphérique, pour éviter tout risque d'introduction d'humidité dans le circuit. [21]

CHAPITRE II : ETUDE DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE EN CASCADE

Voici un tableau reprenant les différentes caractéristiques du fluide selon son emplacement dans le cycle en cascade à deux étages :

Emplacement du fluide	Niveau de pression	Etat de fluide	Niveau de température
Compresseur (1-2)	Passage en haute pression du 1 ^{er} étage (MP)	Gazeux	Passage à température élevée du 1 ^{er} étage
Echangeur (2-3)	Haute pression du 1 ^{er} étage (MP)	Passage à l'état liquide	Passage de la température élevée vers la température de saturation du fluide du 1 ^{er} étage
Détendeur (3-4)	Passage à basse Pression (BP)	Liquide	Passage à basse température du 1 ^{er} étage
Evaporateur (4-1)	Basse pression	Passage à l'état gazeux	Température basse du 1 ^{er} étage
Compresseur (5-6)	Passage en haute Pression du 2 ^{ème} étage (HP)	Gazeux	Passage à température élevée du 2 ^{ème} étage
Condenseur (6-7)	Haute pression du 2 ^{ème} étage (HP)	Passage à l'état liquide	Passage de la température élevée vers la température de saturation du fluide du 2 ^{ème} étage
Détendeur (7-8)	Passage à basse Pression du 2 ^{ème} étage (MP)	Liquide	Passage à basse température du 2 ^{ème} étage
Echangeur (8-5)	Basse pression (MP)	Passage à l'état gazeux	Température basse du 2 ^{ème} étage

Tab.II.2. Les différentes caractéristiques du fluide dans le cycle en cascade

Notons que :

- Le point 2 et le point 6 correspondent à des vapeurs surchauffées.
- Une désurchauffe des vapeurs refoulées, se fait à partir des points 2 et 6 jusqu'à ce que la vapeur atteigne la température de saturation.

II.4. Avantages et inconvénients d'une cascade :

II.4.1. Avantages :

- Pour chacune des deux cellules élémentaires, on peut employer le fluide frigorigène qui convient le mieux au domaine de températures rencontré dans cette cellule.
- L'emploi de fluides frigorigènes à pression de vapeur élevée permet l'utilisation de compresseurs dont les débits volumiques sont plus réduits et qui sont donc moins chers.
- Par le choix des fluides frigorigènes, on peut obtenir des taux de compression convenables permettant d'avoir des rendements effectifs corrects.

CHAPITRE II : ETUDE DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE EN CASCADE

- Le domaine de températures qui peut être couvert par un fluide frigorigène unique est limité, vers le bas par son point triple et vers le haut par son point critique. Les cycles en cascade, qui utilisent des frigorigènes différents, permettent de couvrir des domaines de températures beaucoup plus vastes. Dans la pratique cet écart doit être suffisamment grand pour que le cycle soit performant.

II.4.2. Inconvénients :

- L'utilisation de fluides frigorigènes différents complique le circuit et la maintenance.
- Au niveau des couplages condenseur-évaporateur, les écarts de température constituent des irréversibilités thermodynamiques qui n'existaient pas dans les cycles bi-étagés.
- Nécessité de mettre en place un réservoir permettant de maintenir une pression convenable dans le circuit basse température (vase d'expansion).
- Dans la partie basse température de la machine, on emploie des fluides frigorigènes à basses températures d'ébullition qui ont donc des pressions de vapeur élevées. Si l'on arrête l'installation, les circuits reviennent à la température ambiante, la pression peut alors s'élever de manière dangereuse dans les cellules où sont confinés ces frigorigènes à forte tension de vapeur. [22]

II.5. L'analyse thermodynamique du cycle frigorifique en cascade à deux étages :

Les hypothèses suivantes sont faites pour simplifier l'analyse thermodynamique.

1. Tous les composants sont supposés fonctionner en régime permanent.
2. Les variations du potentiel et de l'énergie cinétique des fluides sont négligeables.
3. Les compresseurs des circuits à haute et basse température sont adiabatiques isentropiques
4. La perte de chaleur et les chutes de pression dans la tuyauterie reliant les composants sont négligeables.
5. Tous les dispositifs d'étranglement sont isenthalpiques.
6. Le fluide frigorigène sort du condenseur à l'état du liquide saturé.
7. Le fluide frigorigène sort de l'évaporateur à l'état du vapeur saturé.

CHAPITRE II : ETUDE DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE EN CASCADE

Sur la base des hypothèses décrites ci-dessus, les équations de bilan de masse et d'énergie sont appliquées dans chaque composant pour trouver le débit massique de chaque cycle, le travail apporté au deux compresseurs, les taux de transfert de chaleur du condenseur et de l'évaporateur.

1. Compresseur :

-La compression du fluide se fait en parallèle d'une surchauffe de ce fluide.



Fig.II.1. Passage du fluide par le compresseur

-Conservation d'énergie :

$$W_{Com A} + \dot{m}_A h_1 = \dot{m}_A h_2$$

$$W_{Com A} = \dot{m} (h_2 - h_1) \quad (II.1)$$

-De la même manière nous pouvons trouver le travail du compresseur du deuxième étage.

$$W_{Com B} = \dot{m} (h_6 - h_5) \quad (II.2)$$

1. Condenseur :

La condensation du fluide se fait à température constante, avec un dégagement de chaleur latente. La chaleur sensible mis en jeu est nulle du fait que le refroidissement de la vapeur qui rentre dans le condenseur est négligé.

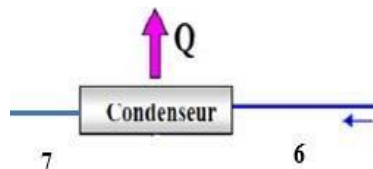


Fig.II.2. Passage du fluide par le condenseur

CHAPITRE II : ETUDE DU CIRCUIT FRIGORIFIQUE EN CASCADE

-Conservation d'énergie :

$$Q_{Con} + \dot{m}_{AH6} = \dot{m}_{AH7}$$

$$Q_{Con} = \dot{m} (h_7 - h_6) \quad (\text{II.3})$$

2. L'évaporateur :

L'énergie prélevée sur le circuit provoque un changement de phase du réfrigérant sans préchauffage sensible du frigorigène, ni surchauffe de la vapeur.

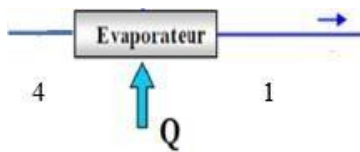


Fig.II.3. Passage du fluide par l'évaporateur

-Conservation d'énergie :

$$Q_{eva} + \dot{m}_{AH4} = \dot{m}_{AH1}$$

$$Q_{eva} = \dot{m} (h_1 - h_4) \quad (\text{II.4})$$

3. Détendeur :

Dans le détendeur la détente est supposée isenthalpique.



Fig.II.4. Passage du fluide par le Détendeur

-Détendeur du 1^{er} étage :

$$h_3 = h_4 \quad (\text{II.5})$$

-Détendeur du 2^{ème} étage :

$$h_7 = h_8 \quad (\text{II.6})$$

4. L'échangeur :

L'échangeur permet le transfert d'énergie du fluide provenant du compresseur du 1^{er} étage vers le fluide provenant du détendeur du 2^{ème} étage.



Fig.II.5. Passage du fluide par L'échangeur

-Conservation d'énergie :

Coté 1^{er} étage :

$$Q_{éch} = \dot{m}_A h_3 - \dot{m}_A h_2$$

Coté 2^{ème} étage :

$$Q_{éch} = \dot{m}_B h_8 - \dot{m}_B h_5$$

Nous pouvons déduire le débit massique de la cellule haute pression à partir du bilan enthalpique sur l'évapo-condenseur (l'échangeur) :

$$\dot{m}_A h_3 - \dot{m}_A h_2 = \dot{m}_B h_8 - \dot{m}_B h_5$$

$$\dot{m}_B = \dot{m}_A [(h_3 - h_2)/(h_8 - h_5)] \quad (\text{II.7})$$

5. Le coefficient de performance COP :

Le coefficient de performance est défini comme étant le rapport entre la chaleur extraite par l'évaporateur et le travail fourni par les des compresseurs.

Le calcul analytique du COP s'obtient à partir du bilan énergétique des deux cycles de la cascade idéale en supposant que le couplage est parfaitement assuré, que l'échangeur ainsi que les compresseurs et les canalisations sont adiabatiques :

$$COP = \dot{Q}_{eva} / [\dot{W}_{Com A} + \dot{W}_{Com B}]$$

$$COP = \dot{m} (h_1 - h_4) / [\dot{m}_A (h_2 - h_1) + \dot{m}_B (h_6 - h_5)] \quad (\text{II.8})$$

Dans notre étude, le choix des fluides frigorigènes, s'est basé sur une étude antérieure. [23]

III.1. Introduction :

Après avoir présenté dans les chapitres précédents une analyse thermodynamique du système de réfrigération en cascade à l'aide de fluides frigorigènes, nous allons présenter dans ce chapitre les résultats de la simulation de cette analyse.

La simulation a été faite sous le logiciel EES « Engineering Equation Solver ». C'est un programme général de résolution des équations non linéaires simultanées qui peut résoudre ces équations numériquement. Une caractéristique majeure d'EES est la base de données de haute précision sur les propriétés thermodynamiques qui est fournie pour des centaines de substances.

III.2. Présentation et discussion des résultats :

Pour rappel, le COP est le coefficient d'efficacité d'une installation produisant ou transférant de la chaleur. Au niveau du cycle frigorifique, il varie en fonction de l'écart de température ΔT entre la source froide et la source chaude. Dans ce qui suit nous allons voir l'effet des pressions de refoulement des compresseurs sur le COP, dans un premier lieu nous allons étudier le circuit frigorifique simple avec trois fluides différents (R134a, R161, NH3), ensuite nous allons faire une étude sur le cycle bi-étagé où nous allons utiliser les fluides déjà cités et enfin l'étude du cycle en cascade sera faite en combinant entre les fluides utilisés dans le cas bi-étagé ce qui va nous faire les trois combinaisons suivantes : (R134a, R161) ; (R134a, NH3) ; (R161, NH3).

III.2.1. Circuit frigorifique simple de R134a :

COP	\dot{m} [Kg/s]	BP[KPa]	HP[KPa]	\dot{Q}_{eva} [KJ/s]	\dot{W}_{com} [KJ/s]
2.886	0.6	200	1400	70.34	24.38

Sort	1 h_i [KJ/Kg]	2 P_i [KPa]	3 s_i [KJ/Kg]	4 T_i [C]
[1]	244,5	200	0,9377	-10,09
[2]	285,1	1400	0,9377	59,68
[3]	127,2	1400	0,4532	52,4
[4]	127,2	200	0,4921	-10,09

Tab.III.1. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R134a

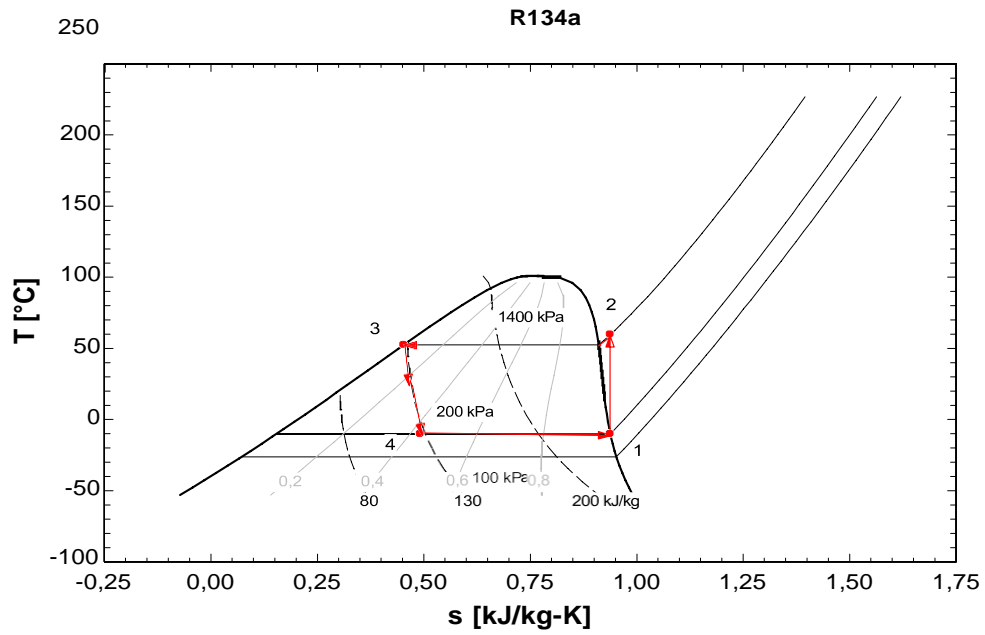


Fig.III.1. Diagramme T-S du cycle simple R134a

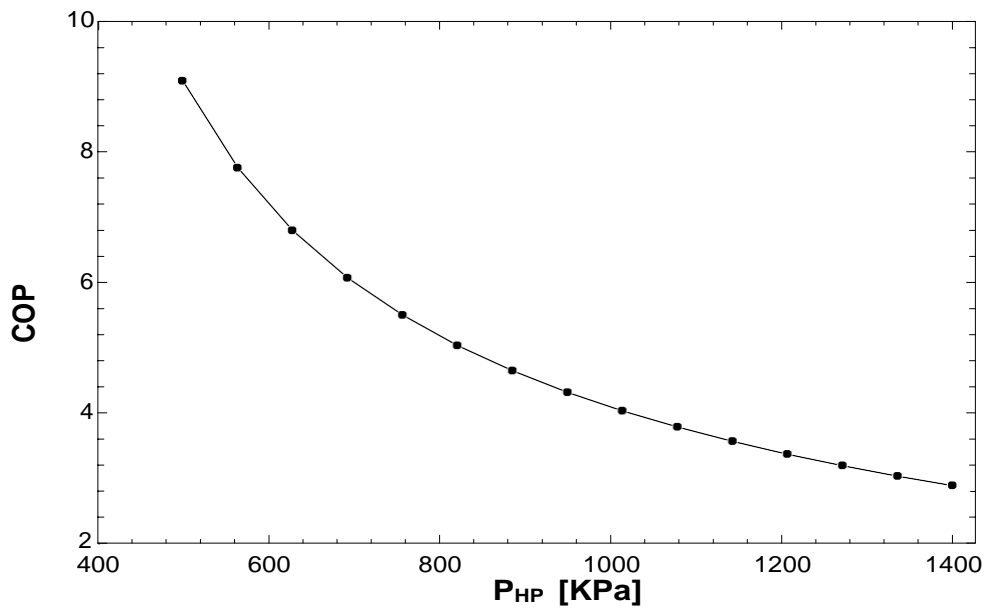


Fig.III.2. Effet de la haute pression sur le COP du cycle simple R134a

- La courbe du coefficient de performance du circuit frigorifique simple contenant le R134a montre clairement une diminution du COP en cas d'augmentation de la haute pression.

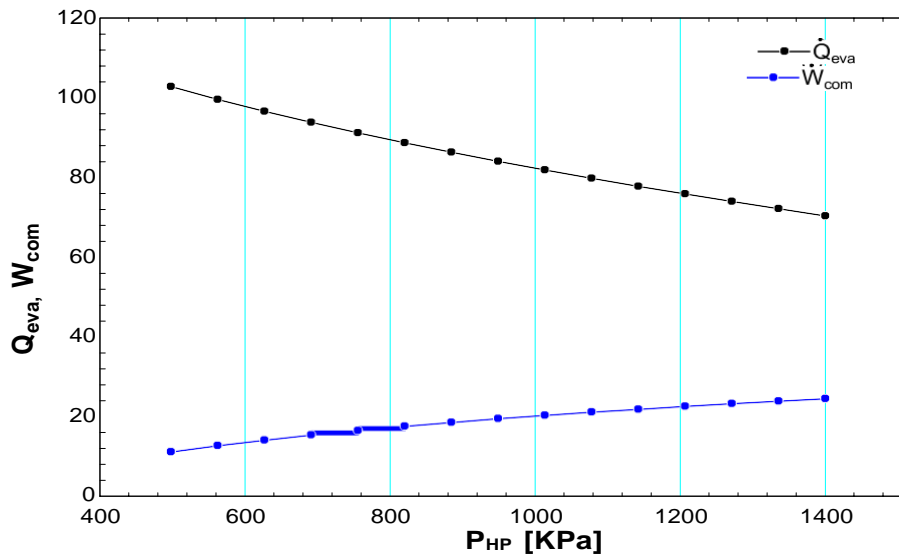


Fig.III.3. Effet de la haute pression sur le Q_{eva} ; \dot{w}_{com} du cycle simple R134a

- Pour les courbes de la chaleur reçu par l'évaporateur et du travail du compresseur nous remarquons une diminution de la chaleur et augmentation très lente du travail du compresseur lorsque la haute pression a été augmentée.

III.2.2. Circuit frigorifique simple de R161 :

COP	\dot{m} [Kg/s]	BP[KPa]	HP[KPa]	\dot{Q}_{eva} [KJ/s]	\dot{w}_{com} [KJ/s]
2.992	0.6	200	1400	161.3	53.9

Main				
Sort	1 h_i [KJ/Kg]	2 P_i [KPa]	3 s_i [KJ/Kg]	4 T_i [C]
[1]	562	200	2,448	-21,64
[2]	651,8	1400	2,448	69,54
[3]	293,3	1400	1,313	41,12
[4]	293,3	200	1,379	-21,64

Tab.III.2. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple R161

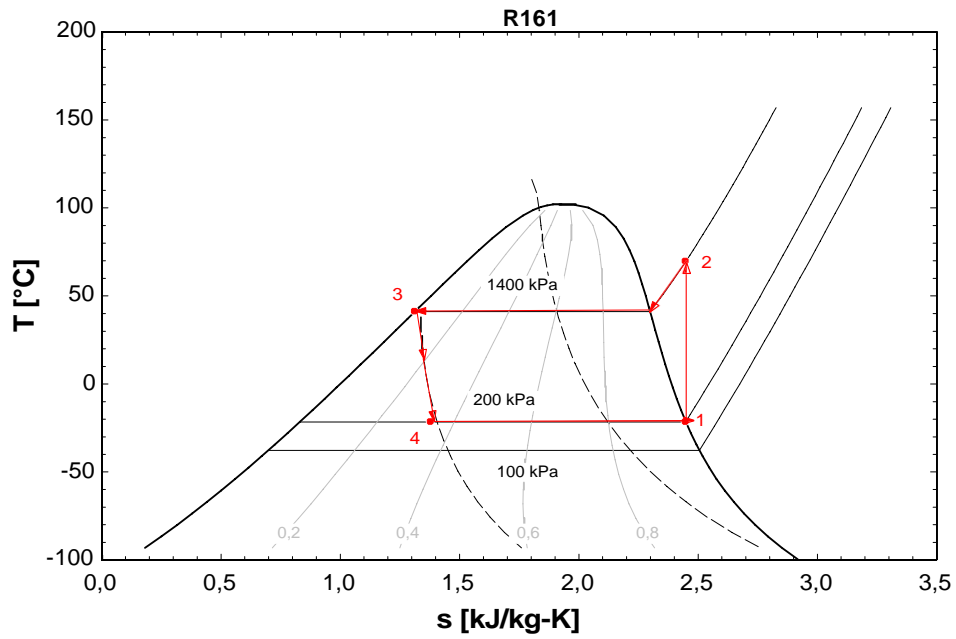


Fig.III.4. Diagramme T-S du cycle simple R161

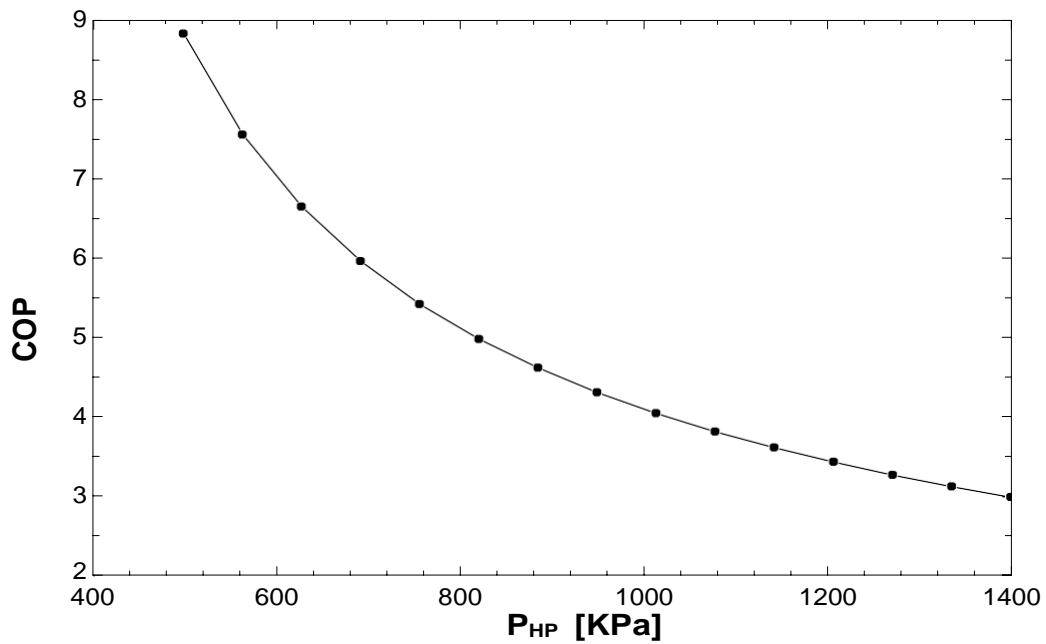


Figure.III.5. Effet de la haute pression sur le COP du cycle simple R161

- Nous constatons une diminution du coefficient de performance avec l'augmentation de la haute pression dans le cas du fluide R161 mais avec des valeurs légèrement plus importantes que celle du R134a.

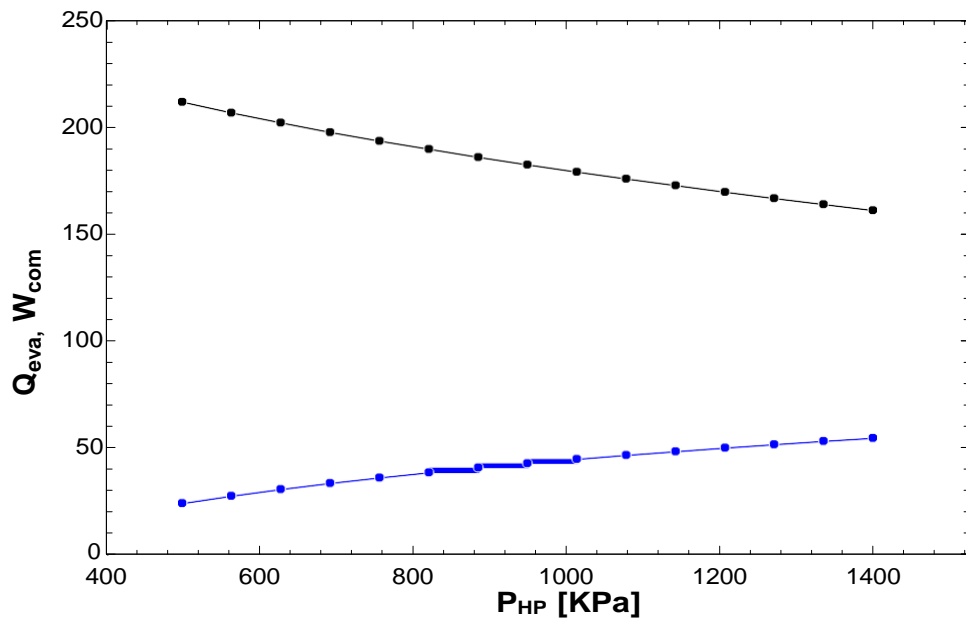


Fig.III.6. Effet de la haute pression sur le Q_{eva} ; \dot{w}_{com} du cycle simple R161

- Pour les courbes de la chaleur d'évaporateur et le travail du compresseur nous remarquons une diminution de la chaleur et une augmentation du travail du compresseur lorsque la haute pression est augmentée.

III.2.3. Circuit frigorifique simple de NH3 :

COP	m [Kg/s]	BP [KPa]	HP [KPa]	\dot{Q}_{eva} [KJ/s]	\dot{w}_{com} [KJ/s]
3.667	0.6	200	1400	640.3	174.6

Main				
Sort	1 h_i	2 P_i	3 s_i	4 T_i
[1]	1439	200	5,886	-18,85
[2]	1730	1400	5,886	123,4
[3]	372,1	1400	1,586	36,25
[4]	372,1	200	1,69	-18,85

Tab.III.3. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique simple NH3

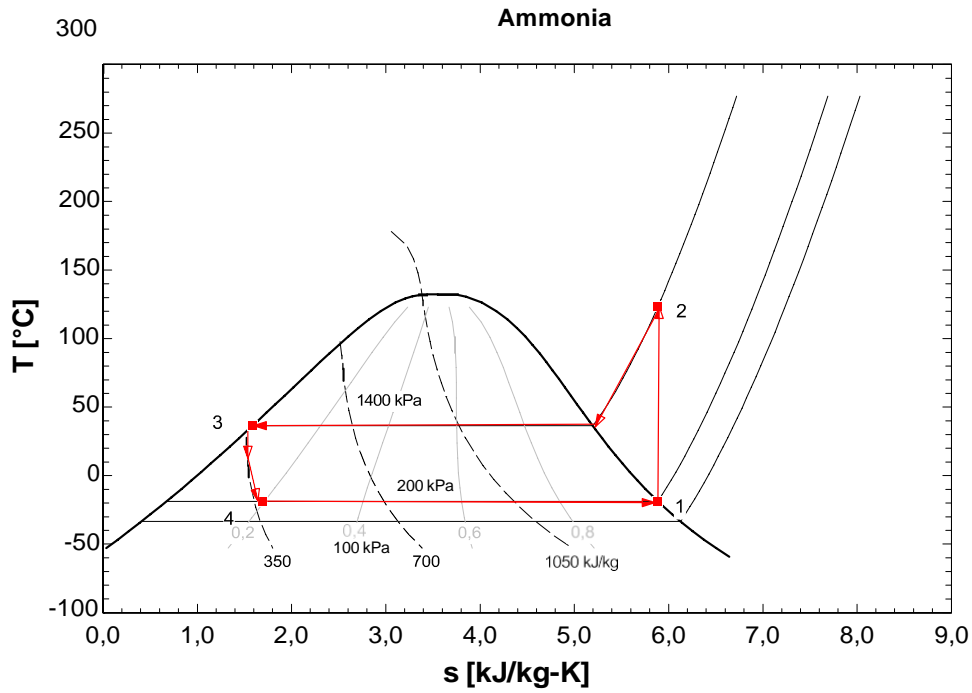


Fig.III.7. Diagramme T-S du cycle simple NH3

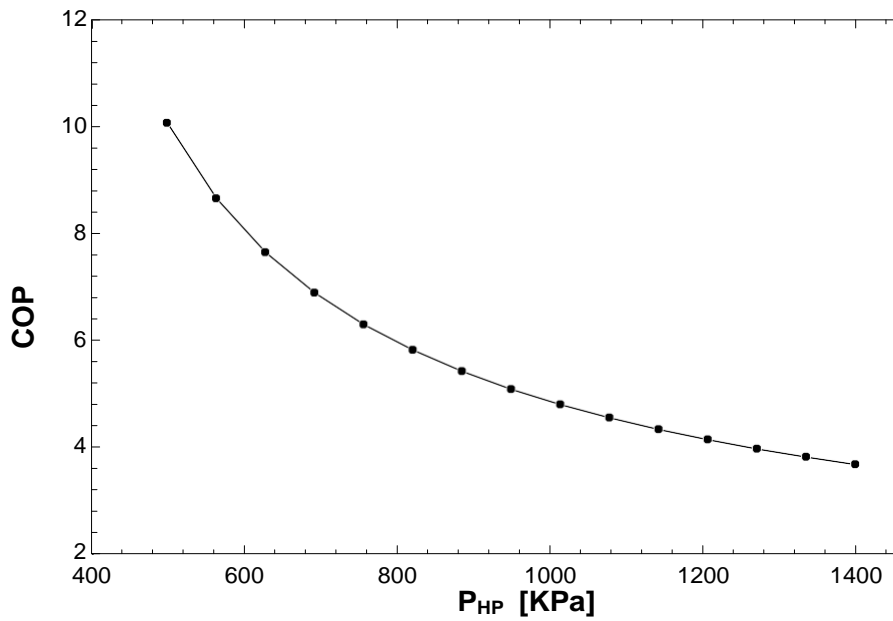


Fig .III.8. Effet de la haute pression sur le COP du cycle simple NH3

- La courbe du COP du circuit du fluide NH3 en fonction de la haute pression prend la même allure que celles des fluides R134a et le R161 mais nettement supérieure.
- D’après les résultats nous constatons que dans le cas d’un circuit simple le COP du cycle de NH3 est meilleur à celui du R161 et celui du R134a se place en dernier.

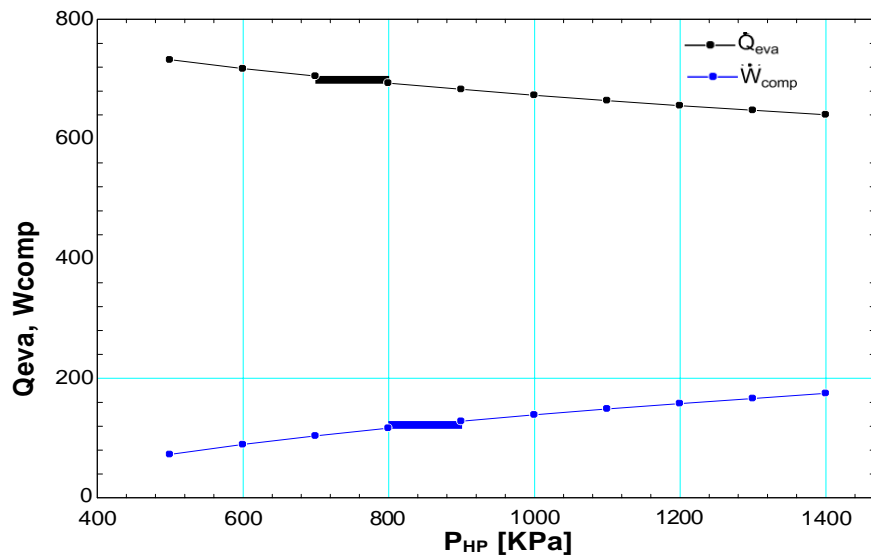


Fig.III.9. Effet de la haute pression sur le Q_{eva} ; \dot{w}_{com} du cycle simple NH3

- Pour les évolutions de la chaleur de l'évaporateur et du travail du compresseur nous remarquons une légère diminution de la chaleur et une légère augmentation du travail du compresseur avec la croissance de la haute pression.

III.2.4. Circuit frigorifique bi-étagé de R134a :

COP	\dot{m}_a [Kg/s]	\dot{m}_b [Kg/s]	BP [KPa]	HP [KPa]	MP [KPa]	\dot{Q}_{eva} [KJ/s]	\dot{W}_{comp} [KJ/s]	$\dot{W}_{comp A}$ [KJ/s]	$\dot{W}_{comp B}$ [KJ/s]
4.608	0.6	0.4369	200	1400	600	97.99	21.22	13.61	7.604

Sort	1 h_i [KJ/Kg]	2 P_i [KPa]	3 s_i [KJ/Kg]	4 T_i [C]
[1]	244.5	200	0.9377	-10.09
[2]	267.1	600	0.9377	26.29
[3]	81.51	600	0.308	21.55
[4]	81.51	200	0.3183	-10.09
[5]	262.4	600	0.9218	21.55
[6]	279.8	1400	0.9218	55.34
[7]	127.2	1400	0.4532	52.4
[8]	127.2	600	0.4631	21.55

Tab.III.4. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique bi-étagé de R134a

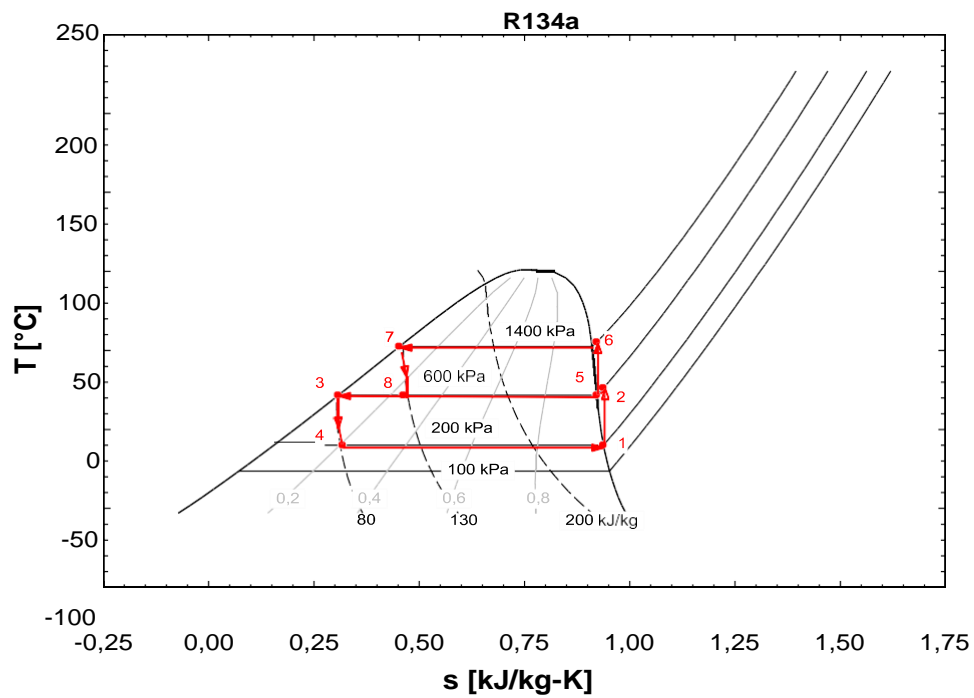


Fig.III.10. Diagramme T-S du cycle frigorifique bi-étagé de R134a

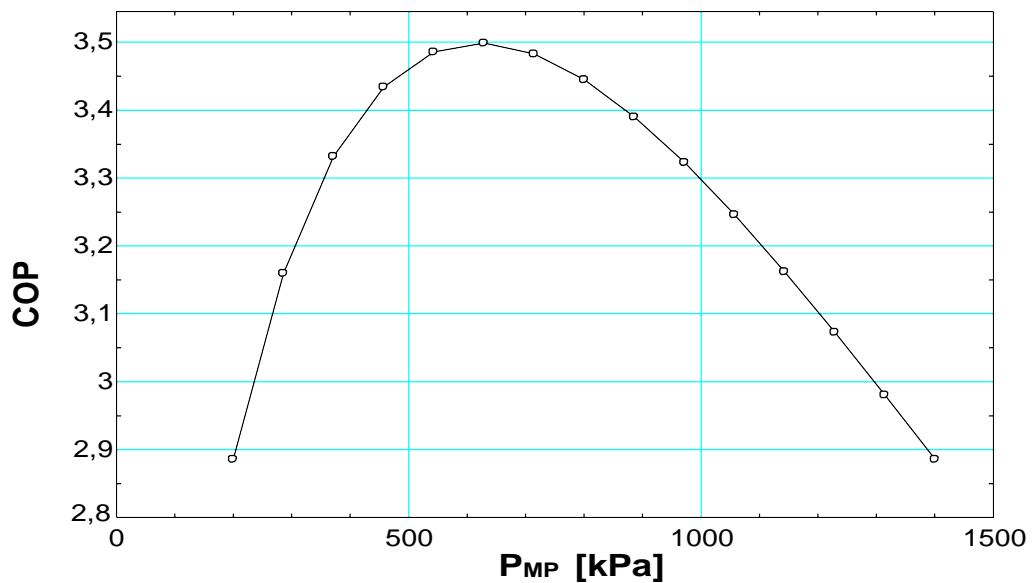


Fig.III.11. Effet de la moyenne pression sur le COP du bi-étagé de R134a

- Le profil du coefficient de performance croit jusqu'à un maximum de 3,5 avec l'augmentation de la haute pression du premier étage puis il subit une décroissance jusqu'à la valeur 2,88.

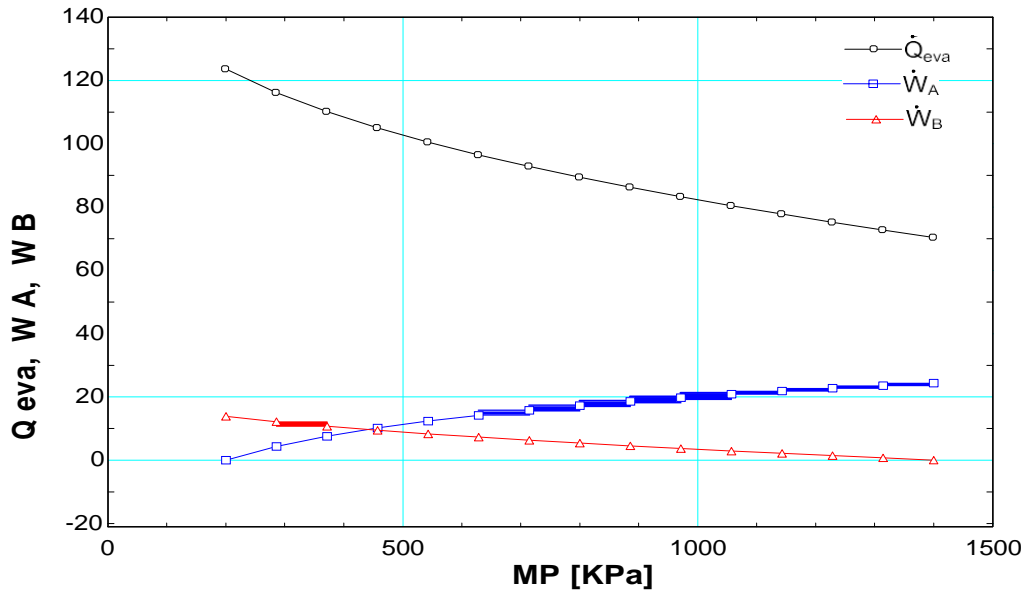


Fig.III.12. Effet de la moyenne pression sur le Q_{eva} , W_{comA} , W_{comB} du cycle bi-étagé R134a

- Nous remarquons une croissance du travail du premier compresseur avec décroissance de la chaleur reçue par l'évaporateur et du travail du compresseur du deuxième étage lorsque la moyenne pression augmente et le croisement des évolutions des travaux se fait à la pression 450 Kpa.

III.2.5. Circuit frigorifique bi-étagé de R161

COP	m_a [Kg/s]	m_b [Kg/s]	BP [KPa]	HP [KPa]	MP [KPa]	Q_{eva} [KJ/s]	W_{comp} [KJ/s]	W_{compA} [KJ/s]	W_{compB} [KJ/s]
3.681	0.6	0.6971	200	1400	600	204.1	55.43	29.09	26.34

Sort	1	2	3	4
	h_i	P_i	s_i	T_i
[1]	562	200	2,448	-21,64
[2]	610,5	600	2,448	27,57
[3]	221,9	600	1,078	10,04
[4]	221,9	200	1,096	-21,64
[5]	586	600	2,364	10,04
[6]	623,8	1400	2,364	52,94
[7]	293,3	1400	1,313	41,12
[8]	293,3	600	1,33	10,04

Tab.III.5. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique bi-étagé de R161

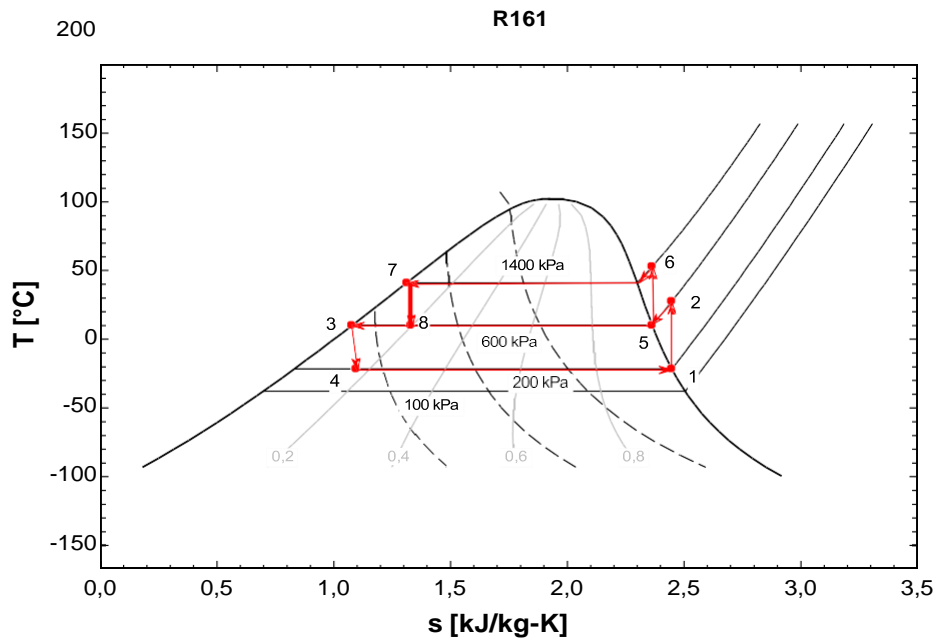


Fig.III.13. Diagramme T-S du cycle frigorifique bi-étagé de R161

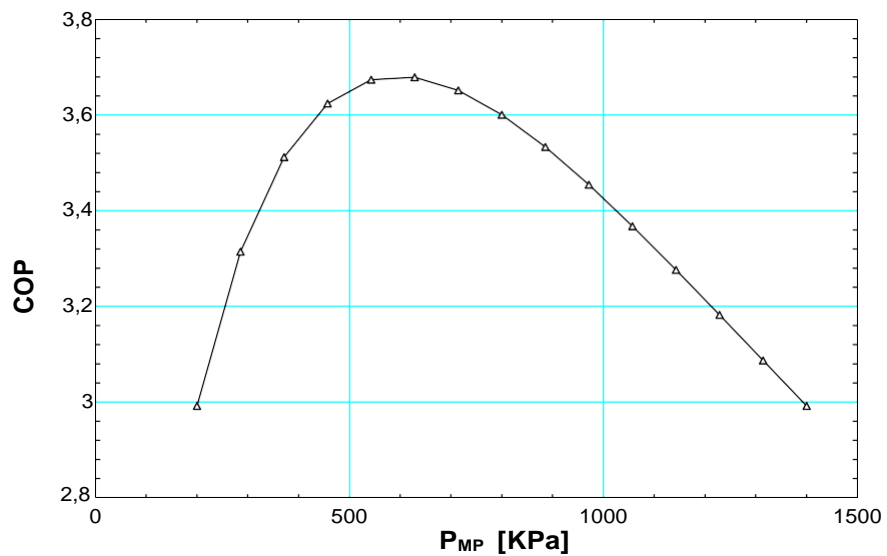


Fig.III.14. Effet de la moyenne pression sur le COP du bi-étagé de R161

- Nous constatons une augmentation rapide du coefficient de performance avec l'augmentation de la moyenne pression jusqu'à un maximum adéquat à la pression de refoulement du premier étage de 600 Kpa avant de diminuer.

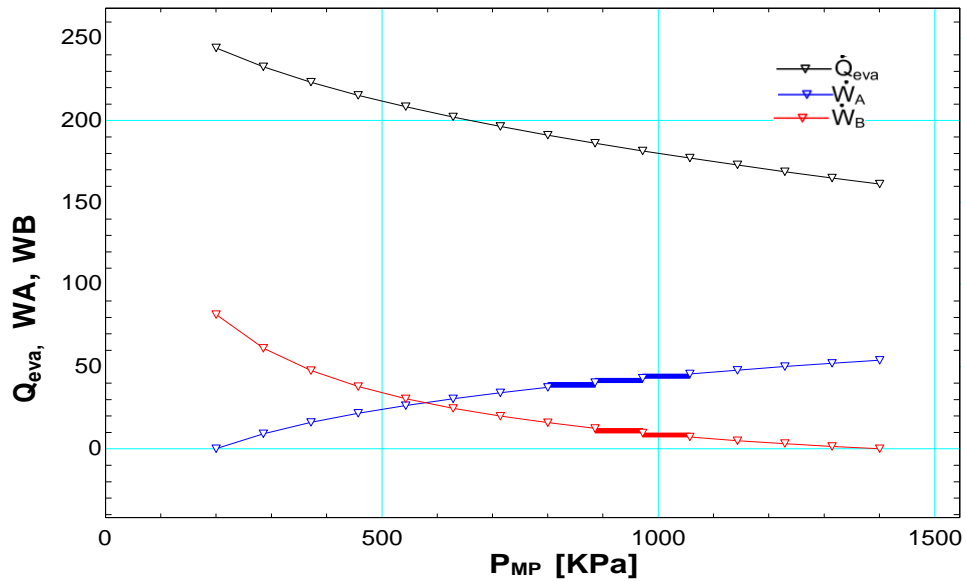


Fig.III.15. Effet de la moyenne pression sur le Q_{eva} , W_{comA} , W_{comB} du cycle bi-étagé R161

- Nous remarquons une augmentation du travail du premier compresseur avec une diminution de la chaleur d'évaporateur et le travail du deuxième compresseur lorsque la moyenne pression augmente.

III.2.6. Circuit frigorifique bi-étagé de NH3 :

COP	\dot{m}_a [Kg/s]	\dot{m}_b [Kg/s]	BP [KPa]	HP [KPa]	MP [KPa]	Q_{eva} [KJ/s]	W_{comp} [KJ/s]	W_{comA} [KJ/s]	W_{comB} [KJ/s]
4.325	0.6	0.6629	200	1400	600	717.7	166	89.19	76.77

Sort	1	2	3	4
	h_i	P_i	s_i	T_i
[1]	1439	200	5.886	-18.85
[2]	1588	600	5.886	54.56
[3]	243	600	1.154	9.273
[4]	243	200	1.182	-18.85
[5]	1471	600	5.503	9.273
[6]	1589	1400	5.503	69.4
[7]	372.1	1400	1.586	36.25
[8]	372.1	600	1.611	9.273

Tab.III.6. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique bi-étagé de NH3

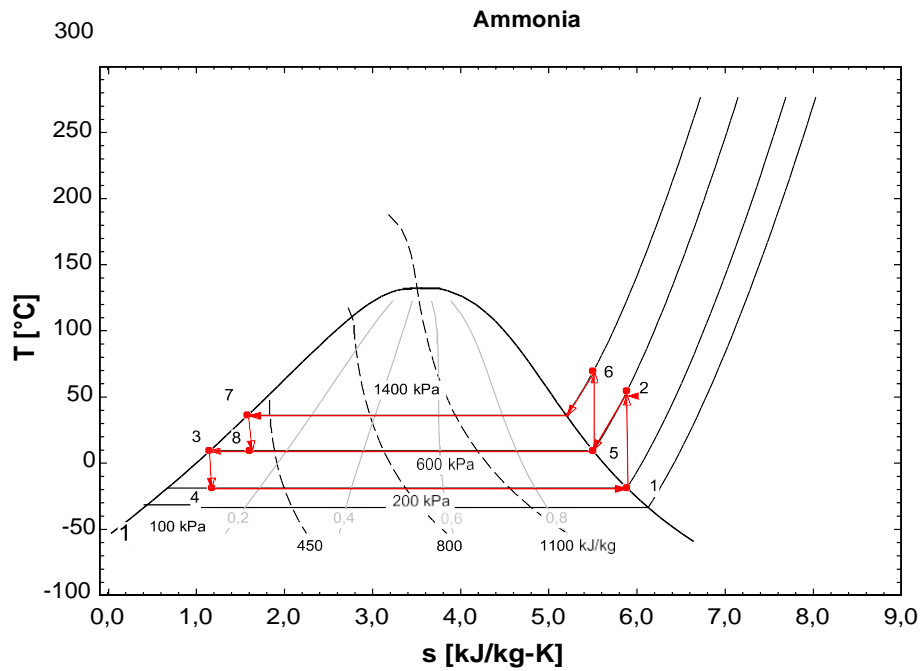


Fig.III.16. Diagramme T-S du cycle frigorifique bi-étagé de NH3

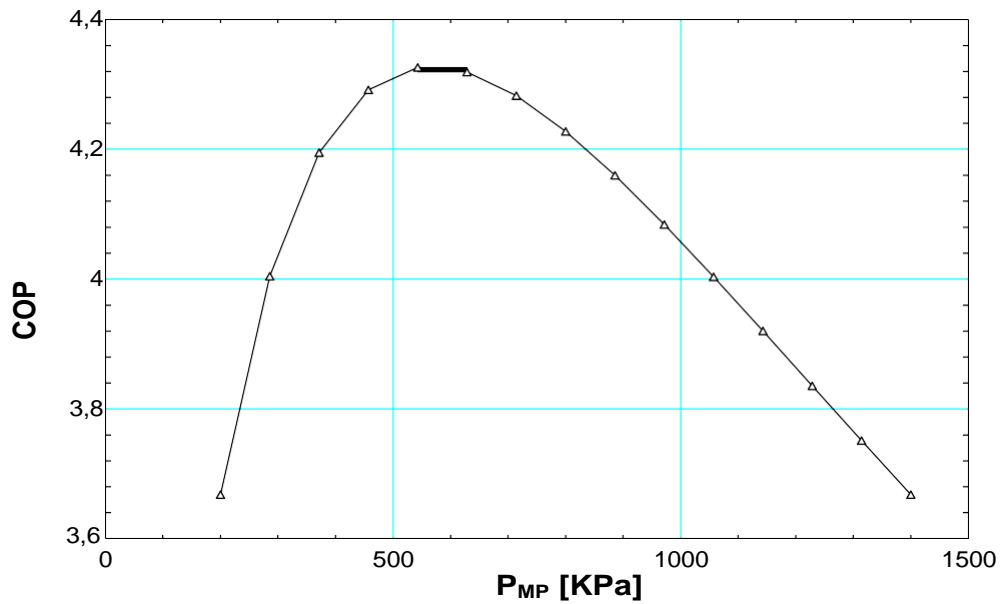


Fig.III.17. Effet de la moyenne pression sur le COP du bi-étagé de NH3

- Nous constatons une augmentation du coefficient de performance avec l'augmentation de la moyenne pression jusqu'à un maximum de 4.32 à la pression 550 Kpa avant de diminuer.

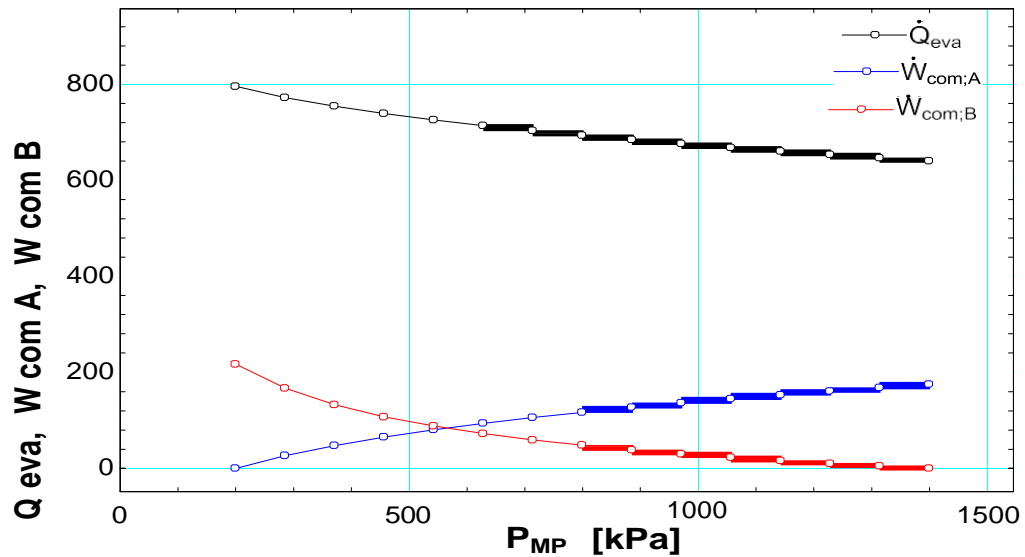


Fig.III.18. Effet de la moyenne pression sur le Q_{eva} , W_{comA} , W_{comB} du cycle bi-étagé NH3

- Nous remarquons une faible décroissance de la chaleur de l'évaporateur ainsi que celle du travail du deuxième compresseur et une augmentation du travail du premier compresseur lorsque la moyenne pression augmente.

III.2.7. Circuit frigorifique en cascade (R134a / R161) :

COP	\dot{m}_a [Kg/s]	\dot{m}_b [Kg/s]	BP [KPa]	HP [KPa]	MP [KPa]	Q_{eva} [KJ/s]	W_{comp} [KJ/s]	W_{compA} [KJ/s]	W_{compB} [KJ/s]
3.727	0.6	0.334	200	1400	600	97.77	26.23	13.61	12.62

Sort	1	2	3	4
	h_i	P_i	s_i	T_i
[1]	244,5	200	0,9377	-10,09
[2]	267,1	600	0,9377	26,29
[3]	81,51	600	0,308	21,55
[4]	81,51	200	0,3183	-10,09
[5]	586	600	2,364	10,04
[6]	623,8	1400	2,364	52,94
[7]	293,3	1400	1,313	41,12
[8]	293,3	600	1,33	10,04

Tab.III.7. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique en cascade (R134a / R161)

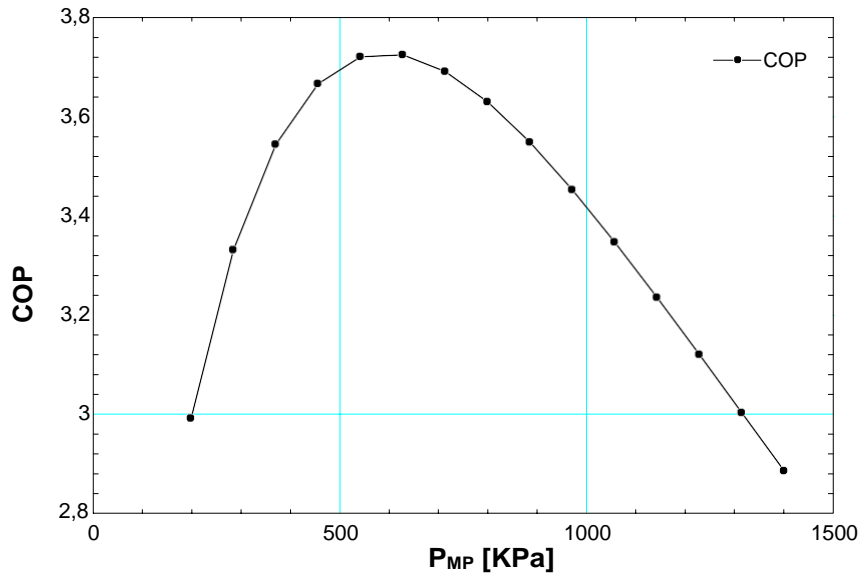


Fig.III.19. Effet de la moyenne pression sur le COP du cycle en cascade (R134a / R161)

- Nous voyons une augmentation du COP à partir de 3 avec l'augmentation de la moyenne pression jusqu'à atteindre un maximum de 3,75 avant de diminuer.

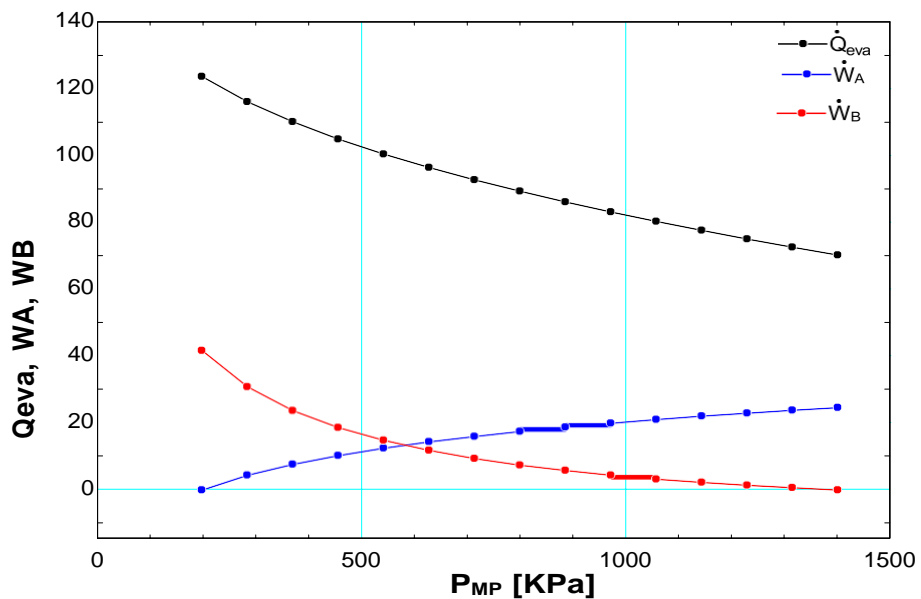


Fig.III.20. Effet de la moyenne pression sur le Q_{eva} , W_{comA} , W_{comB} du cycle en cascade (R134a / R161)

- La figure représente une évolution croissante du travail du premier compresseur avec une lente diminution de la chaleur de l'évaporateur ainsi que celle du travail du deuxième compresseur lorsque la moyenne pression augmente.

III.2.8. Circuit frigorifique en cascade (R134a/ NH3) :

COP	\dot{m}_a [Kg/s]	\dot{m}_b [Kg/s]	BP [KPa]	HP [KPa]	MP [KPa]	Q_{eva} [KJ/s]	W_{comp} [KJ/s]	W_{comA} [KJ/s]	W_{comB} [KJ/s]
3.83	0.6	0.1013	200	1400	600	97.77	25.53	13.61	11.91

Sort	1	2	3	4
	h_i [kJ/kg]	P_i [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [C]
[1]	244,5	200	0,9377	-10,09
[2]	267,1	600	0,9377	26,29
[3]	81,51	600	0,308	21,55
[4]	81,51	200	0,3183	-10,09
[5]	1471	600	5,503	9,273
[6]	1589	1400	5,503	69,4
[7]	372,2	1400	1,586	36,25
[8]	372,2	600	1,611	9,273

Tab.III.8. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique en cascade (R134a/ NH3)

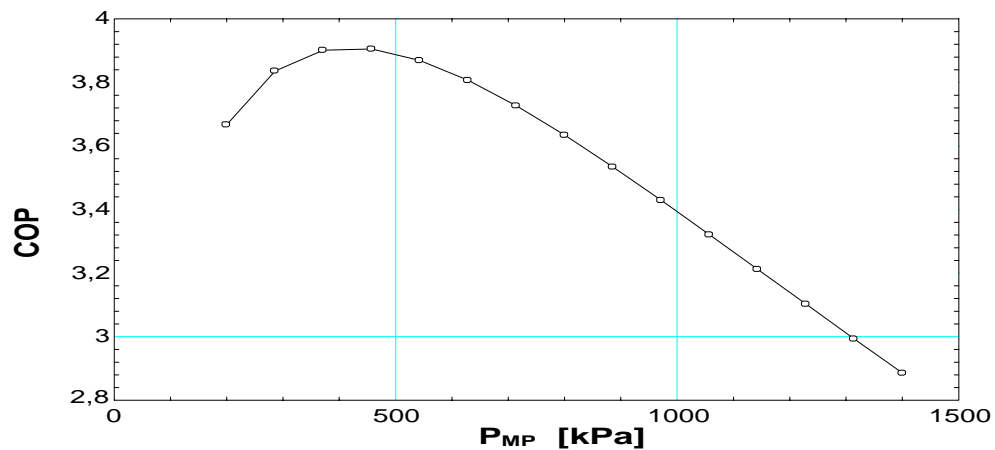


Fig.III.21. Effet de la moyenne pression sur le COP du cycle en cascade (R134a/NH3)

- La courbe du COP dans le cas de la combinaison R134a/ NH3 est croissante d'une façon rapide avec l'augmentation de la moyenne pression jusqu'à un maximum de l'ordre de 3,9 avant de diminuer d'une manière lente pour atteindre la valeur de 2.9.

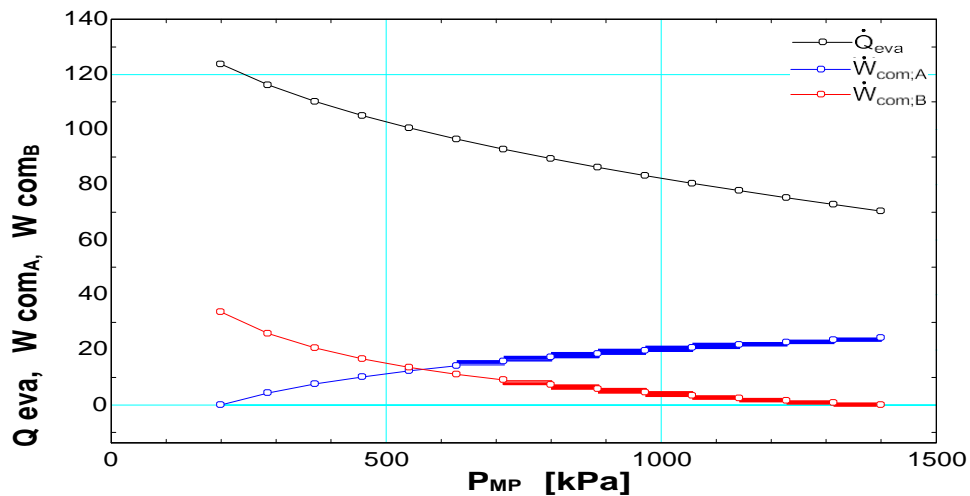


Fig.III.22. Effet de la moyenne pression sur le Q_{eva} , W_{comA} , W_{comB} du cycle en cascade (R134a /NH3)

- Nous remarquons une légère augmentation du travail du premier compresseur avec une légère diminution de la chaleur reçu par l'évaporateur et du travail du deuxième compresseur lorsque la moyenne pression augmente.

III.2.9. Circuit frigorifique en cascade (R161/ NH3) :

COP	m_a [Kg/s]	m_b [Kg/s]	BP [KPa]	HP [KPa]	MP [KPa]	Q_{eva} [KJ/s]	W_{comp} [KJ/s]	W_{comA} [KJ/s]	W_{comB} [KJ/s]
3.777	0.6	0.2121	200	1400	600	204.1	54.02	29.09	24.94

Main				
Sort	1 h_i [kJ/kg]	2 P_i [kPa]	3 s_i [kJ/kg-K]	4 T_i [C]
[1]	562	200	2,448	-21,64
[2]	610,5	600	2,448	27,57
[3]	221,9	600	1,078	10,04
[4]	221,9	200	1,096	-21,64
[5]	1471	600	5,503	9,273
[6]	1589	1400	5,503	69,4
[7]	372,2	1400	1,586	36,25
[8]	372,2	600	1,611	9,273

Tab.III.9. Paramètres thermodynamiques du cycle frigorifique en cascade (R161/ NH3)

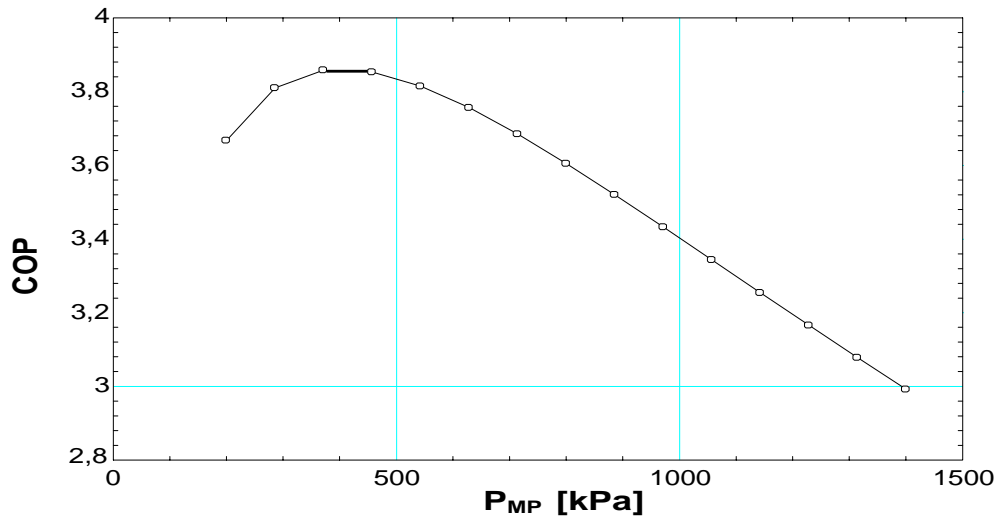


Fig.III.23. Effet de la moyenne pression sur le COP

du cycle en cascade (R161/ NH3)

- Nous voyons une augmentation du coefficient de performance pour une étroite marge de pression avec l'augmentation de la moyenne pression jusqu'à un maximum et ensuite reprendre une décroissance sur une large marge de pression.

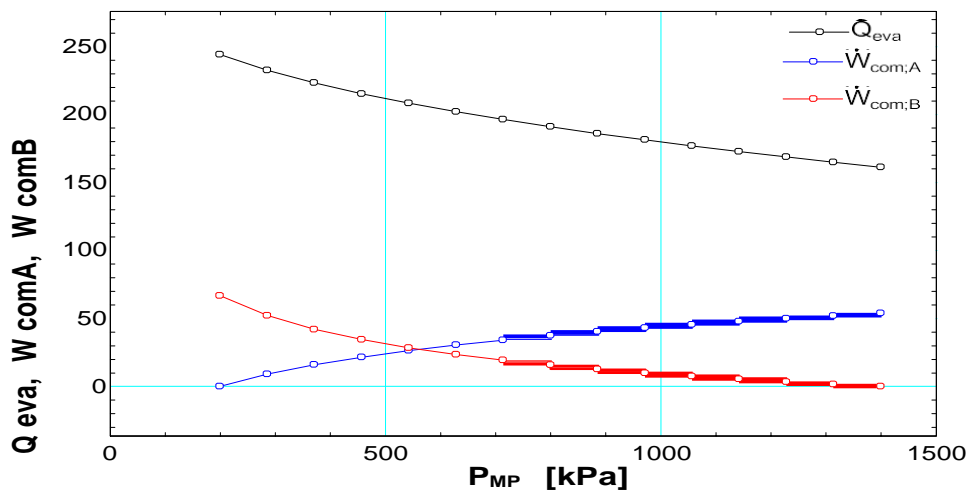


Fig.III.24. Effet de la moyenne pression sur le Q_{eva} , W_{comA} , W_{comB}

du cycle en cascade (R161/ NH3)

- Nous constatons une augmentation du travail du premier compresseur et une diminution de la chaleur de l'évaporateur et du travail du deuxième compresseur où le croisement des courbes des deux travaux se fait à la pression 580 Kpa lorsque la moyenne pression augmente.

CHAPITRE III : RESULTATS ET DISCUSSIONS

En fin nous pouvons faire un récapitulatif des résultats et les présenter sous forme de graphique à barres, cela va nous permettre de voir l'effet du type du circuit ainsi que le type du fluide sur le COP et ΔT l'écart entre la basse température et la haute température de manière concrète.

III.3.1. L'influence sur le COP :

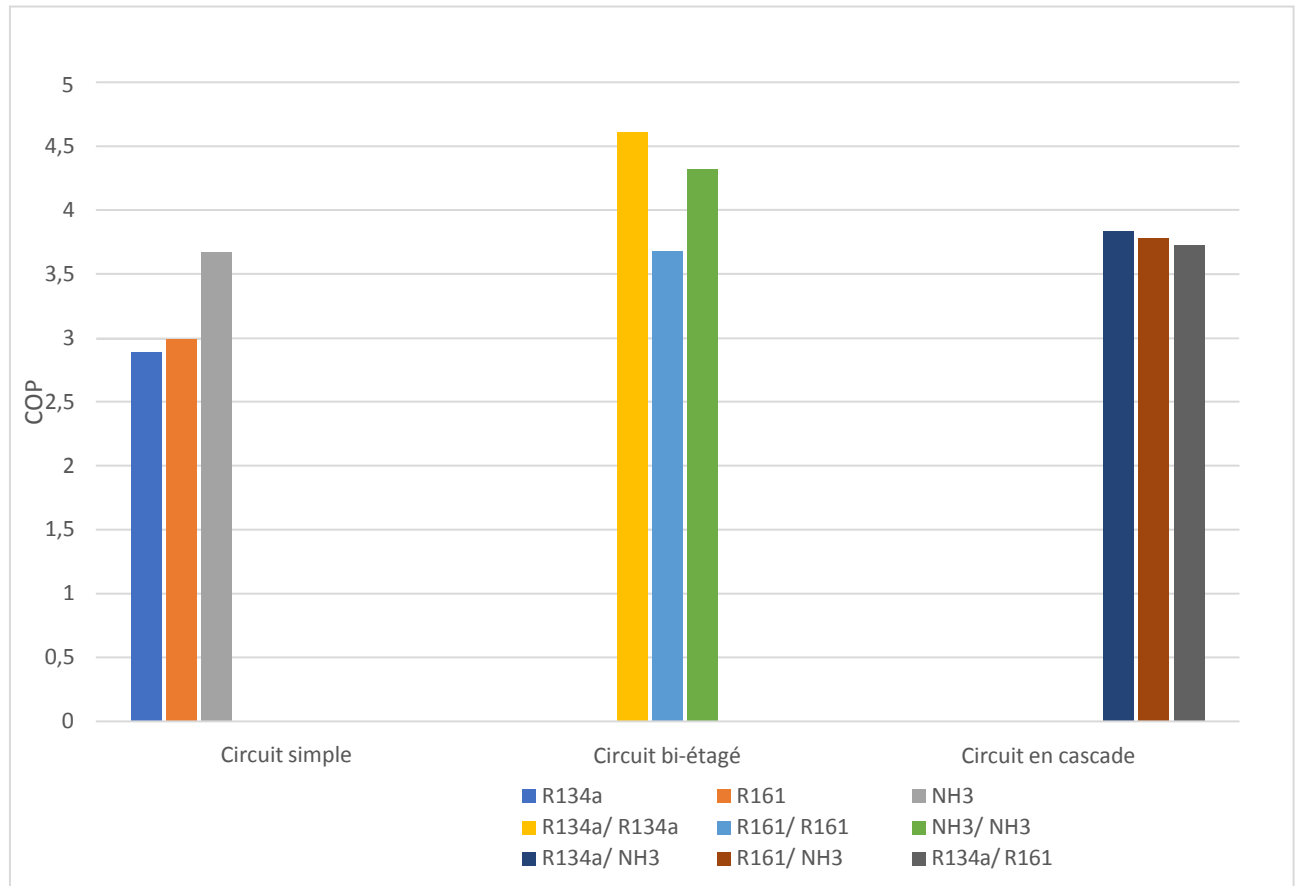


Fig.III.25. Le COP des différents cycles

- D'après le graphique du COP nous constatons que pour le cycle simple, le fluide NH3 donne un meilleur COP par rapport aux deux autres fluides.
- Nous avons aussi constaté que dans le cas du circuit en cascade les COPs des différents couples que nous avons choisi d'étudier se rapprochent, et le meilleur COP est celui du bi-étagé du fluide R134a

III.3.2. L'influence sur l'écart de la température :

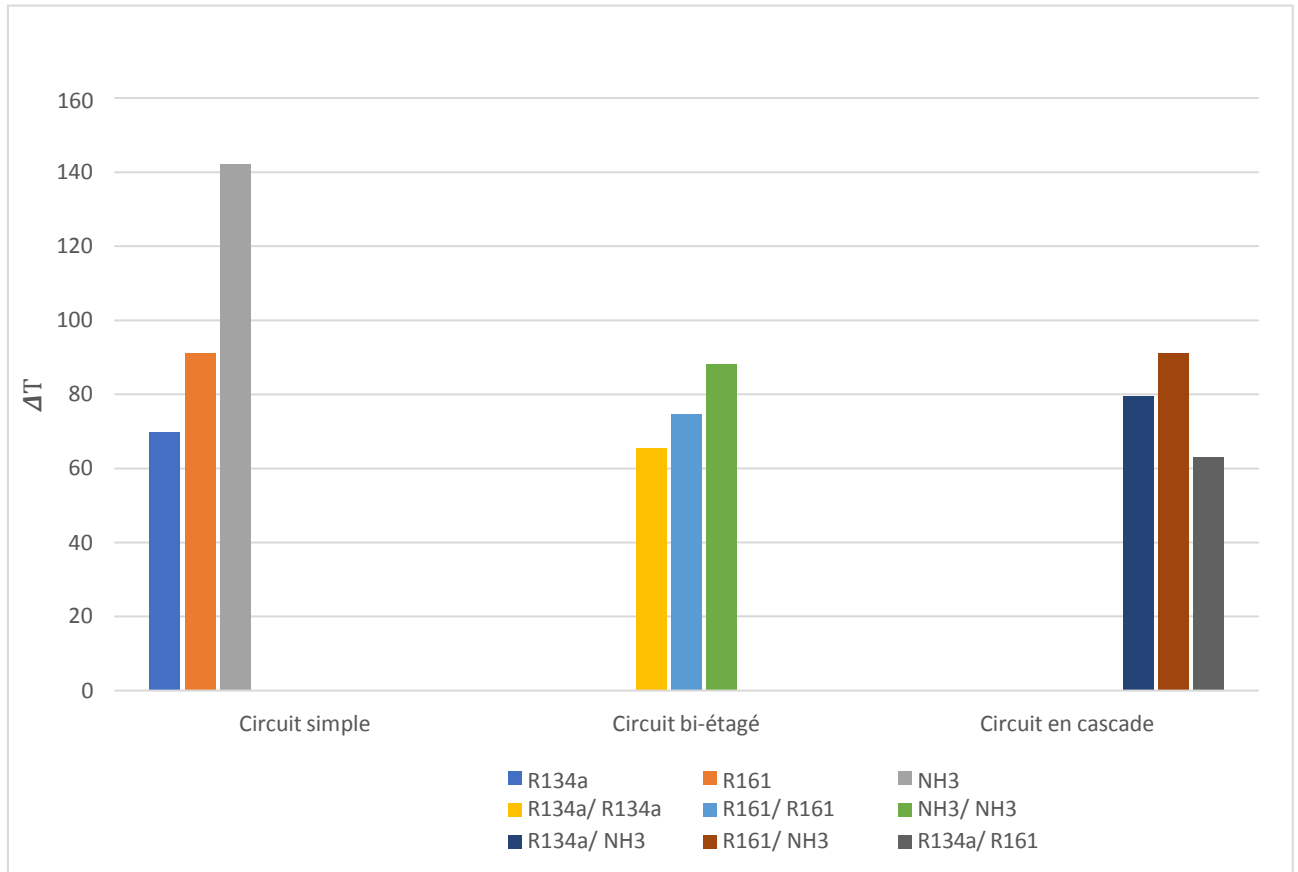


Fig.III.26. Le ΔT des différents cycles

- D'après le graphique de l'écart entre la basse température et la haute température du circuit nous apercevons que pour le cycle simple, le fluide NH3 possède un meilleur écart de température par rapport aux deux autres fluides. La même observation se fait sur le circuit bi-étagé.
- Par contre nous avons remarqué que dans le cas du circuit en cascade le ΔT du couple R161/NH3 est le plus important, et le plus bas c'est celui du couple R134a/R161.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de notre étude était de comprendre le fonctionnement du circuit frigorifique et voir l'effet des du type de fluide frigorigène ainsi que le type de circuit frigorifique sur le coefficient de performance et sur l'écart de température de ce circuit.

Les courbes obtenus montrent qu'en générale, l'augmentation de la pression de refoulement du compresseur du premier étage accroît les performances du circuit frigorifique.

Les résultats trouvés dans la phase de simulation montre qu'il existe une pression de refoulement du premier compresseur pour laquelle le coefficient de performance du circuit frigorifique est maximale et au-delà de cette pression toute augmentation se solde par un abaissement du COP.

Ce résultat nous apprend qu'il n'est pas nécessaire d'augmenter indéfiniment la pression de refoulement que nous avons considéré comme une pression moyenne du circuit à deux étages pour avoir de bonnes performances du circuit frigorifique.

D'autre part nous avons observé que dans le cas des circuits simples le COP est meilleur lorsqu'il s'agit d'un circuit à NH₃ parmi les trois fluides étudiés.

Comme nous avons déduit que lorsqu'il s'agit d'un circuit à deux étages, le circuit bi-étagé a donné un COP plus élevé que le circuit en cascade plus exactement celui du fluide R134a.

Les résultats ont aussi montré que l'écart entre la basse température et la haute température du circuit est influencé par le type de circuit et le type du fluide frigorigène.

Nous avons constaté que l'écart de température est considérable lorsqu'il s'agit du circuit simple à NH₃ par rapport à celui du R134a et du R161.

Nous avons aussi conclu que l'écart de température est important lorsqu'il s'agit du circuit bi-étagé contenant le fluide NH₃, et dans le cas du circuit en cascade le ΔT du couple R161/NH₃ est le plus important parmi les combinaisons étudiées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_thermique Date d'accès Le 10 avril 2022.
- [2] Gunthamburg , principes de base du génie frigorifique p15
- [3] Mouad diny, Etude Du Fonctionnement D'une Machine Frigorifique A Adsorption Et Modélisation Des Transferts De Chaleur Et De Masse Et Optimisation Du Fonctionnement De La Machine, Thèse De Doctorat.
- [4] <https://www.abcclim.net/le-circuit-frigorifique.html>. Date d'accès Le 12 Avril 2022
- [5] <https://climatisation.ooreka.fr/astuce/voir/659395/circuit-frigorifique>. Date d'accès Le 12 Avril 2022
- [6] <https://energieplus-lesite.be/techniques/climatisation8/composants-installation-frigorifique/compresseurs-frigorifiques/>. Date d'accès Le 27 Avril 2022
- [7] <https://airpn.com/compresseurs-a-vis/> Date d'accès Le 15 Mai 2022
- [8] Compresseur A Spirale Abcclim.Com. Date d'accès Le 17 Mai 2022
- [9] Compresseur Rotatif Meituo.En.Made-In-China.Com. Date d'accès Le 19 Mai 2022
- [10] Said Hamdaoui, Cours « Installations Frigorifiques », EST De Fès.
- [11] <https://www.dalkiafroidsolutions.com/principes-et-composants-dun-circuit-frigorifique> Date d'accès Le 20 Mai 2022
- [12] <https://www.climamaison.com/lexique/facteur-4.htm> Date d'accès Le 22 Mai 2022
- [13] <https://www.formationfroid.com/circuit-frigorifique/> Date d'accès Le 24 Mai 2022
- [14] <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/thermique-fluide-frigorigene-5754/>. Date d'accès Le 25 Mai 2022
- [15] Fiche Technique N° 27- Les Installations Frigorifiques Dans L'industrie
- [16] Pierre Rapin, Patrick Jacquard, Jean Desmons, Technologie Des Installations Frigorifiques, 10ème Édition Dunod.
- [17] <https://www.gazdetect.com/blog/pourquoi-detecter-les-fuites-de-fluide-frigorigene>. Date d'accès Le 02 Juin 2022
- [18] 4Students, Department of Mechanical Engineering, Pimpri Chinchwad College of Engineering, Pune, India., 5Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[19] <https://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/problem-1-consider-two-stage-cascade-refrigeration-system-operating-pressure-limits-14-mpa-q42076278>

Date d'accès Le 05 Juin 2022

[20] <https://azprocede.pagesperso-orange.fr/groupe%20frigo%20cycle%20cascade.html>

Date d'accès Le 08 Mai 2022

[21] Volodymyr Voloshchuk, Thermodynamic Of Vapor Compression Refrigeration Cycle, Maple Soft, June 2016

[22] Triki Zakaria, Cours « Production Industrielle De Froid », Université De Médéa

[23] ZhiliSun , Qifan Wang, BaominDai , Meng Wang , ZhiyuanXie , Options Of low Global Warming Potential Refrigerant Group for a three-stage cascade refrigeration system, International Journal of Refrigeration, 2018.

