

Université de Bouira
Akli Mohand Oulhadj



جامعة البويرة
أكلي محمد أولحاج

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique.

PROJET DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master par :
Medjdoub Mohamed Anis
Mebarki Abd EL Djalil

Spécialité : Génie Mécanique.
Option: Energétique.

THEME

**Etude et Simulation d'un Système de Réfrigération à
absorption Eau-Ammoniac**

Soutenu le 01 / 07 /2024

devant le jury composé

Président : Mr. Lekhal

Examineur : Mr. Laouari

Encadrant : Mr. Aberkane

2023/2024

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
X·O·V·E·X ·K·E·C·S·A·I·A ·B·A·X - X·E·O·E·O·t -



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Génie mécanique

Spécialité : Energétique

**Autorisation de déposer un mémoire de Master
pour soutenance**

Je soussigné, l'enseignant (e) :

ABERKANE Sofiane.....

L'encadreur du mémoire de fin d'études des étudiants :

- 1- ...Mebarki Abd EL Djalil.....
- 2- Medjdoub Mohamed Anis.....

Ayant le mémoire de fin d'études de Master intitulé :

Etude et Simulation d'un Système de Réfrigération à absorption Eau-Ammoniaque

Promotion : 2023/ 2024

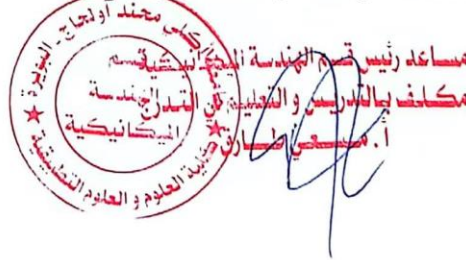
Et après voir et consulté le mémoire dans sa forme finale j'autorise les étudiants à l'imprimer
et la déposer pour la soutenance.

Signature du L'encadreur

A Soud

Bouira le :

Signature du chef de département





نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد (ة)..... م. ب. ر. ك. م. ع. ب. الج. ل. ب. ل. ن. الصفة: طالب، استاذ، باحث..... في.....
الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية:..... 1000609.FL8..... والصادرة بتاريخ 04-04-2016
المسجل (ة) بكلية / معهد..... العلوم و العلوم التطبيقية..... قسم..... هندسة..... ميكانيكية.....
والمكلف (ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها:..... Etude et simulation d'un système de régénération.....
..... a absorption eau - ammoniac.....
تحت إشراف الأستاذ (ة):..... أ. ب. ر. ك. م. ع. ب. ل. ن. س. م. ب. ن.
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 17-07-2024.....

توقيع المعني (ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

29 %

الامضاء:





نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنتاج بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة)..... مهديو.ب.ب. مسجدة. أنيس. الصفة: طالب، استاذ، باحث طالب
الحامل (تم) لبطاقة التعريف الوطنية: 10.07.3.003.4 والصادرة بتاريخ 20 1.6 - 0.4 - 20
المسجل (تم) بكلية / معهد علوم والعلوم التطبيقية قسم الهندسة الميكانيكية
والمكلف (تم) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Etude et simulation d'un système de réfrigération
à absorption eau - ammoniac
تحت إشراف الأستاذ(ة): أ. بركاني سنيان
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2024 - 07 - 17

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

29 %



امضاء:
أ. مسعودي طلال
رئيس قسم الهندسة الميكانيكية
بالتعاون مع
مستشار قسم العلوم التطبيقية





REMERCIEMENTS

A la fin de ce travail, premièrement on remercie Dieu qui nous a donné le Courage et la volonté d'aller jusqu'au bout afin d'amener ce modeste travail à sa fin.

Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur : **S. ABERKANE**, qui nous a dirigé et prêté une attention et une aide particulière du début jusqu'à la fin de notre projet d'étude.

On remercie également les membres du jurys d'avoir accepté d'examiner et de noter notre travail.

Enfin, nous tenons à exprimer notre Reconnaissance à nos familles qui nous ont donné une aide et un encouragement précieux du début jusqu'à la fin





Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de
me soutenir*

Et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes frères, Housseem, Moncef, Akrem

*Qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la
réalisation de ce travail.*

*A mon cher binôme **ABDELDJALIL***

Pour leur entente et leur sympathie.

Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

A mes cher(e)s ami (e)s, S. Khalile, BEN Karim, K. Amine, R. Chamsou.,

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour
et de la vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite
plus de succès.*

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Merci !

ANIS





Dédicace

Je dédie ce projet :

A ma chère mère,

A mon cher père,

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de
me soutenir*

Et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.

A mes sœur, Hedjir, Khadija,

Et mes frères, Aissa, Abde Razzak

*Qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la
réalisation de ce travail.*

A mon cher binôme Anis

Pour leur entente et leur sympathie.

Pour leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

A mes cher(e)s ami (e)s, G. Oussama, R. Yakoub, A. Lamine.

Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

*A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour
et de la vivacité.*

*A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus
de succès.*

A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.

Merci !

ABD EL DJALIL



Résumé :

L'objectif de notre travail de réaliser une modélisation et simulation d'une machine frigorifique à absorption simple effet utilisant le couple binaire ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$).

La simulation du modèle de la machine à absorption à simple effet eau/ ammoniac a été effectuée avec l'outil de simulation ASPEN HYSYS. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les données trouvées de la littérature.

Les résultats de l'analyse énergétique de la machine à absorption eau/ammoniac, avec une puissance frigorifique de 17 kW, sont présentés et discutés.

Mots clés : Modélisation, simulation, machine frigorifique à absorption, ASPEN HYSYS , la machine à absorption eau/ammoniac

Abstract :

The aim of our work is to model and simulate a single-acting absorption refrigeration machine using the binary couple ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$).

The model of the single-acting water/ammonia absorption machine was simulated using the ASPEN HYSYS simulation tool. The results obtained are in good agreement with the data found in the literature.

The results of the energy analysis of the water/ammonia absorption machine, with a cooling capacity of 17 kW, are presented and discussed.

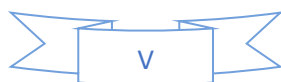
Keywords: Modeling, simulation, absorption refrigeration machine, ASPEN HYSYS, absorption machine water/ammonia

ملخص:

الهدف من عملنا هو نمذجة ومحاكاة آلة تبريد بالامتصاص أحادية المفعول باستخدام الزوج الثنائي ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$). تمت محاكاة نموذج آلة امتصاص الماء/الأمونيا أحادية المفعول باستخدام أداة المحاكاة ASPEN HYSYS. كانت النتائج التي تم الحصول عليها متوافقة بشكل جيد مع البيانات الموجودة في الأدبيات. كما تم عرض ومناقشة نتائج تحليل الطاقة لآلة امتصاص الماء/الأمونيا بقدرة تبريد 17 كيلواط. الكلمات المفتاحية: النمذجة، المحاكاة، آلة التبريد بالامتصاص، ASPEN HYSYS، آلة الامتصاص الماء/الأمونيا

Tables des matières

REMERCIEMENTS	I
Résumé	IV
Abstract	IV
ملخص.....	IV
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	X
Nomenclature	XI
Liste des indices	XI
Introduction générale	III
Introduction générale :.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique sur les machines à absorption	3
I.1. Introduction :	3
I.2. Etude bibliographique des systèmes de réfrigération par absorption : Error! Bookmark not defined.	
I.3. Définition d'une machine frigorifique :.....	3
I.4. Classification des machines frigorifiques selon le mode de fonctionnement :.....	4
I.4.1. Les phénomènes de transfert thermique :.....	4
I.4.2. Différents types de machines utilisant la vaporisation d'un frigorigène :.....	5
I.4.2.1. Machine frigorifique à compression de vapeur :.....	5
I.4.2.2. Machine frigorifique à éjection :	5
I.4.2.3. Machine frigorifique à sorption :.....	6
I.4.2.4. Machine frigorifique à absorption :	6
I.5. Intérêt de l'utilisation de l'absorption :.....	8
I.6. Système à absorption :	8
I.6.1. Généralité sur le refroidissement par systèmes à absorption :	8
I.6.2. Principe de fonctionnement :.....	9
I.6.3. Composantes de base d'une machine à absorption :.....	10



I.6.4. Les couples classiques utilisés dans l'absorption.....	11
I.6.4.1. Machine à absorption avec NH ₃ /H ₂ O :.....	11
I.6.4.2. Machine à absorption avec H ₂ O/LiBr :	12
I.6.5. Avantages et inconvénients :	13
I.6.5.1. Le mélange (ammoniac-eau) :	13
I.6.5.2. Le mélange (eau - bromure de lithium) :.....	14
I.7. Différentes configurations de la machine à absorption liquide :	14
I.7.1. Système à absorption à simple effet :.....	14
I.7.2. Cycles frigorifiques à plusieurs effets :	15
I.8. Diagrammes thermodynamiques :.....	18
I.8.1. Diagramme d'Oldham :.....	18
I.8.1.1. Zones dans un diagramme d'Oldham :	19
I.8.1.2. Utilisation des diagrammes d'Oldham :.....	19
I.8.2. Diagramme de Merkel :.....	20
I.9. Conclusion :	22
Chapitre II : Modélisation de la machine à absorption NH₃/H₂O.....	23
II.1. Introduction :	25
II.2. Objectif de la modélisation :.....	25
II.3. Présentation le cas d'étude :	25
II.4. Modélisation du cycle à simple effet avec échangeur de solution :.....	26
II.5. Bilan massique et enthalpique :	27
II.5.1. Analyse du Générateur:	28
II.5.2. Analyse du Condenseur	29
II.5.3. Analyse de l'Evaporateur	30
II.5.4. Analyse de l'Absorbeur	31
II.5.5. Pompe de solution	32
II.5.6. Echangeur de Chaleur	33
II.6. Conclusion :	34
Chapitre III : Simulation avec le logiciel Aspen Hysys.....	35
III.1. Introduction :	35
III.2. La simulation :	35
III.2.1. Modes de fonctionnement des simulateurs :.....	36
III.2.2. Utilisation de la simulation:.....	36
III.3. Définition du logiciel Aspen HYSYS:	36

III.4. Présentation du logiciel Aspen HYSYS :	37
III.4.1. Les modèles thermodynamiques de HYSYS :	37
III.4.1.1. Les équations d'état :	37
III.4.1.2. Equation de REDLICH-K WONG (RK):	37
III.4.1.3. Equation de SOAVE-REDLICH-KWONG (SRK):	37
III.4.1.4. Equation de PENG-ROBINSON :	38
III.5. Choix des composés (Components) :	38
III.6. Caractéristiques et concepts du simulateur Aspen HYSYS :	39
III.6.1. Caractéristiques principales de HYSYS:	39
III.6.2. Concepts de base du simulateur HYSYS :	40
III.7. Environnement de simulation :	41
III.8. Les équipements utilisés pour le cas étudié :	42
III.8.1. La Pompe :	42
III.8.1.1. Installation d'une pompe	42
III.8. 2.Echangeur de chaleur tube/calandre :	43
III.8.2.1. Installation de l'échangeur de chaleur tube/calandre	43
III.8.3. Le Générateur :	44
III.8.3.1 Installation du Générateur:	44
III.8.4. Mixeur :	45
III.8.4.1. Installation d'un mixeur :	45
III.8.5. Vanne de régulation :	46
III.8.5.1. Installation la Vanne de régulation :	46
III.8.6. Refroidisseur d'air :	47
III.8.6.1. Installation Refroidisseur d'air :	47
III.9. Les étapes de simulation pour le cas étudié.....	48
III.9.1. La première étape :	48
III.9.2. Deuxième étape :	48
III.9.3. La troisième étape :	49
III.9.4. La quatrième étape.....	50
III.10. Conclusion :	51
Chapitre IV : Résultats de la simulation et discussions.	52
IV .1. Introduction :	52
IV .2. Principaux paramètres des différents points du cycle de la machine à absorption liquide (NH3/H2O) :	52
IV. 3. Coefficient de performance en fonction de puissance.	53

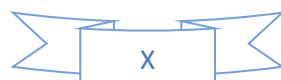
IV.4. La variation de température :.....	53
IV.5. Les valeurs (U A) des échangeurs de chaleurs :	55
IV.6. Analyse de sensibilité des performances d'un système :	56
IV .7. Conclusion :	57
Conclusion générale :	58
Références bibliographiques	59

Liste des figures

FIGURE I- 1: DIAGRAMME ENERGETIQUE D'UNE MACHINE FRIGORIFIQUE.....	3
FIGURE I- 2: MACHINE FRIGORIFIQUE A COMPRESSION DE VAPEUR	5
FIGURE I- 3: MACHINE FRIGORIFIQUE A EJECTION	6
FIGURE I- 4: PRINCIPE D'UN SYSTEME A SORPTION	6
FIGURE I- 5: MACHINE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION.....	7
FIGURE I- 6: STRUCTURE D'UNE MACHINE A ABSORPTION	9
FIGURE I- 7: STRUCTURE D'UNE MACHINE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION	11
FIGURE I- 8: MACHINE A ABSORPTION AVEC H ₂ O/LIBR.....	13
FIGURE I- 9: CYCLE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION A SIMPLE EFFET	15
FIGURE I- 10: CYCLE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION A DOUBLE EFFET OPERANT A TROIS NIVEAUX DE PRESSION, HAUTE MODEREE ET BASSE	16
FIGURE I- 11: CYCLE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION A DOUBLE EFFET OPERANT A DEUX NIVEAUX DE PRESSION	17
FIGURE I- 12: CYCLE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION A TRIPLE EFFET OPERANT A QUATRE NIVEAUX DE PRESSION	18
FIGURE I- 13: DIAGRAMME D'OLDHAM POUR LE COUPLE NH ₃ /H ₂ O	19
FIGURE I- 14: DIAGRAMME DE MERKEL NH ₃ /H ₂ O	21
FIGURE II- 1: REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU REFROIDISSEUR A ABSORPTION COMMERCIAL	25
FIGURE II- 2: LE GENERATEUR.....	28
FIGURE II- 3: CONDENSEUR.....	29
FIGURE II- 4: L'EVAPORATEUR.....	30
FIGURE II- 5: ABSORBEUR.....	31
FIGURE II- 6: POMPE DE SOLUTION	32
FIGURE II- 7: ECHANGEUR.....	33
FIGURE III- 1: REPRESENTATION D'UNE POMPE.....	42
FIGURE III- 2: PRINCIPE D'UN ECHANGEUR DE CHALEUR TUBES /CALANDRE.....	43
FIGURE III- 3: REPRESENTATION DU GENERATEUR	44
FIGURE III- 4: REPRESENTATION D'UN MIXEUR.....	45
FIGURE III- 5: VANNE DE REGULATION.....	46
FIGURE III- 6: REPRESENTATION REFROIDISSEUR D'AIR.....	47
FIGURE III- 7: SIMULATION D'UN SYSTEME DE REFRIGERATION A ABSORPTION (NH ₃ /H ₂ O) AVEC LOGICIEL ASPEN HYSYS	50
FIGURE IV- 1: VARIATION DE TEMPERATURE ENTRE LES RESULTATS DE SIMULATION DE MANSOURI ET AL ET NOTRE SIMULATION A 35°C.....	54

Liste des tableaux

TABLEAU I- 1:PROCESSUS D'ÉCHANGE DE CHALEUR DANS UN SYSTEME FRIGORIFIQUE	4
TABLEAU I- 2:LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES DIFFERENTS TYPES DE MACHINE	8
TABLEAU II-1:PARAMETRES DE FONCTIONNEMENT POUR LES CONDITIONS DE CONCEPTION.....	26
TABLEAU III- 1:ÉLÉMENTS DE MACHINE AVEC L'ENSEMBLE DE DONNEES D'ENTREE.	50
TABLEAU IV- 1:RESULTATS DE SIMULATION DU MODELE ASPEN-HYSYS A UNE TEMPERATURE DE L'AIR DE REFROIDISSEMENT 35°C	52
TABLEAU IV- 2: COMPARAISON DES PERFORMANCES ENTRE NOTRE ETUDE ET L'ETUDE EXPERIMENTALE DE KLEIN	53
TABLEAU IV- 3:ÉCART DE TEMPERATURE ENTRE LES RESULTATS DE SIMULATION DE MANSOURI ET AL [21] ET NOTRE SIMULATION A 35°C.....	54
TABLEAU IV- 4:VALEURS (UA) DES ECHANGEURS DE CHALEUR CALCULEES A UNE TEMPERATURE D'AIR DE REFROIDISSEMENT DE 35 °C.....	55
TABLEAU IV- 5:: LES VALEUR BASE DE LA SIMULATION ASPES HYSYS.....	56
TABLEAU IV- 6: ANALYSE DE SENSIBILITE DES PERFORMANCES A L'AUGMENTATION DES PARAMETRES DE CONCEPTION	57



Nomenclature

Nomenclature	Désignation	Unité
COP	Coefficient de performance	Sans dimension
U	Coefficient d'échange global	W/(m ² °C).
H	Enthalpie massique	kJ/Kg
Q	Puissance	Kw
P	Pression	Pa, bar
T	Température	K, °C
X	Concentration de solution	(%)
A	Surface d'échange	m ²
M	Débit massique	kg/s
DTLM	Moyenne logarithmique des écarts de température	°C.

Liste des indices

Abs	Absorbeur	/
Cond	Condenseur	/
Évap	Évaporateur	/
SCA	La solution refroidi par l'absorbeur	/
Rec	Rectificateur	/
Mix	Mixeur	/
RHX	Echangeur	/
Géné	Générateur	/

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

Avec un besoin toujours croissant d'énergie et des appréhensions environnementales croissantes à l'échelle mondiale, la recherche d'approches inventives et respectueuses de l'environnement en matière de production d'énergie et de réfrigération est devenue une nécessité absolue. Les énergies fossiles, qui ont longtemps été le socle de nos économies et de nos sociétés, révèlent aujourd'hui leurs contraintes, tant en termes d'accessibilité que de ramifications écologiques.

Les domaines industriels et domestiques, fortement dépendants du pétrole et du charbon, sont confrontés à un double dilemme : fournir un approvisionnement énergétique suffisant pour répondre à la demande croissante de la population mondiale tout en atténuant les émissions de gaz à effet de serre et l'impact écologique néfaste lié à leur utilisation.

Pour répondre aux exigences de durabilité et d'efficacité énergétique, les technologies de production d'énergie et de refroidissement doivent s'adapter. Les machines à absorption apparaissent comme une solution viable à cet égard, car elles ont le potentiel de générer du froid à l'aide de sources d'énergie renouvelables, réduisant ainsi la dépendance aux combustibles fossiles.

L'utilisation de la combinaison $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ dans les machines à absorption marque une progression notable dans ce domaine particulier. L'ammoniac (NH_3), facilement accessible et rentable, est absorbé par l'eau (H_2O) pour générer du froid, constituant ainsi un substitut très efficace et écologique aux systèmes de refroidissement traditionnels.

L'objectif de cette recherche est d'étudier la fonctionnalité d'une machine à absorption à effet unique qui utilise la combinaison $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, avec un accent particulier sur sa capacité à générer du froid en utilisant des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire. En effectuant des simulations numériques dans divers scénarios, nous visons à mieux comprendre les processus thermodynamiques fondamentaux en jeu et à évaluer l'efficacité de ce système dans divers environnements.

Notre objectif est de faciliter l'adoption de solutions de refroidissement durables et la transition vers un avenir plus propre et plus économe en énergie en analysant en profondeur les avantages et les obstacles liés à cette technologie, ainsi que sa possible mise en œuvre dans les milieux industriels et domestiques.

La structure de mémoire est la suivante :

Le premier chapitre de notre étude propose une analyse approfondie de la littérature existante sur l'absorption, en mettant particulièrement l'accent sur l'utilisation de mélanges tels que $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. Nous explorons également le thème du refroidissement de manière générale, en nous concentrant spécifiquement sur les machines à absorption.

Le deuxième chapitre approfondit les fonctions de chaque composant et explique en détail leurs principes de fonctionnement. Ces connaissances sont essentielles pour développer un modèle mathématique qui décrit les séquences interconnectées et les formules de calcul liées à la puissance, à l'efficacité et au coefficient de performance (COP)

Dans le chapitre suivant, l'accent est mis sur la modélisation par simulation et l'importance des simulateurs dans ce domaine. Pour faciliter nos recherches, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Aspen HYSYS.

Dans le quatrième chapitre de notre étude, nous approfondissons les résultats obtenus et menons des discussions pertinentes sur leur signification et leurs implications

Chapitre I : Etude bibliographique sur les machines à absorption.

I.1. Introduction :

De nos jours, l'utilisation de l'équipement frigorifique est intégrée dans notre quotidien, grâce à ses multiples applications, allant de la préservation des produits alimentaires, pharmaceutiques et autres à la climatisation.

Ce chapitre propose une analyse bibliographique sur l'évolution des méthodes de production de froid, en passant des méthodes les plus simples et naturelles à la conception et à la fabrication de machines frigorifiques très performantes. En particulier, celles qui utilisent des systèmes à absorption classiques sous différentes formes pour la réfrigération, ainsi que des sources d'énergie solaire ou toute autre source d'énergie renouvelable ou des émissions thermiques provenant des procédés industriels.

I.3. Définition d'une machine frigorifique :

Une machine frigorifique est un dispositif thermodynamique qui permet de refroidir un espace ou un système en utilisant une source de chaleur extérieure dont la température est plus élevée que celle de l'espace ou du système refroidi. Il s'agit essentiellement d'un système de refroidissement qui transfère la chaleur d'un environnement à haute température vers un environnement à plus basse température. La machine frigorifique peut être définie comme un dispositif permettant d'inverser le flux de chaleur, déplaçant la chaleur d'un corps chaud vers un corps froid, contrairement à sa direction naturelle. Cependant, pour réaliser ce transfert inverse, de l'énergie doit être dépensée. La quantité d'énergie nécessaire à ce transfert doit être inférieure à la quantité d'énergie thermique utile pour que le système soit rentable [11].

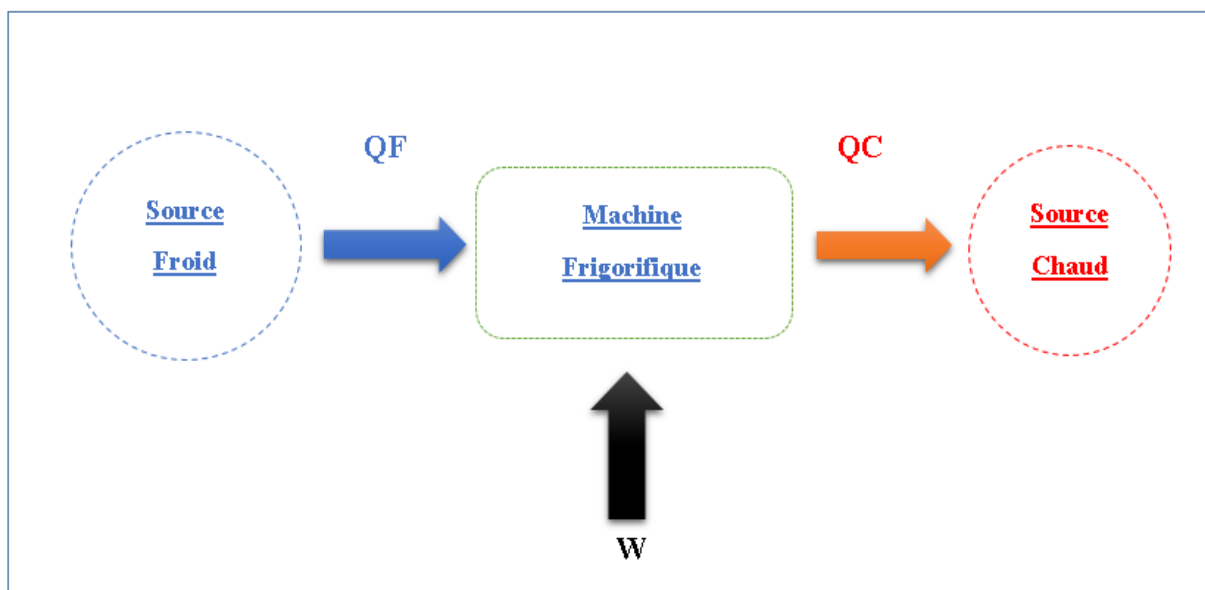


Figure I- 1:diagramme énergétique d'une machine frigorifique[11].

I.4. Classification des machines frigorifiques selon le mode de fonctionnement :

I.4.1. Les phénomènes de transfert thermique :

Afin de transférer la chaleur d'un environnement à température plus basse (source froide) vers un environnement à température plus élevée (dissipateur thermique), un fluide réfrigérant est utilisé comme caloporteur. Ce fluide est le siège de processus physico-chimiques qui permettent l'extraction, le transfert et le dégagement de chaleur. Ainsi, lors de l'extraction de chaleur d'une source froide, le réfrigérant subit un processus endothermique (qui absorbe la chaleur) lorsqu'il est en contact avec la source.

De même, afin de récupérer la chaleur emmagasinée par le réfrigérant et de la rediriger vers la source de chaleur, un processus exothermique (qui libère de la chaleur) est utilisé. En règle générale, une séquence de changements qui restaure cycliquement le réfrigérant à son état d'origine est décrite. Cette séquence répétitive d'opérations est appelée cycle de réfrigération. Le tableau [I.1] fournit une liste complète des processus endothermiques et exothermiques impliqués dans le transfert de chaleur d'une pompe à chaleur [12].

Phénomènes endothermiques (Absorbant de la chaleur)	Phénomènes exothermiques (Produisant de la chaleur)
Fusion d'un solide	Solidification d'un liquide
Vaporisation d'un liquide	Condensation d'une vapeur
Sublimation d'un solide	Condensation en phase solide
Désorption d'un gaz ou d'une Vapeur (D'un liquide ou d'un solide)	Absorption d'un gaz ou d'une vapeur (dans un liquide (absorption), dans un solide (adsorption))
Détente d'un gaz comprimé	Compression d'un gaz

Tableau I- 1:Processus d'échange de chaleur dans un système frigorifique [12] .

Le phénomène de vaporisation d'un liquide est utilisé dans la plupart des machines frigorifiques (et des pompes à chaleur) pour extraire des calories d'une source froide (extérieur). Le phénomène de condensation d'une vapeur permet alors de restituer des calories au milieu à chauffer.

I.4.2. Différents types de machines utilisant la vaporisation d'un frigorigène :

Ce paragraphe se limite à l'introduction de machines utilisant le phénomène d'évaporation du réfrigérant. Les modèles suivants se distinguent en fonction de la manière dont la vapeur est aspirée de l'évaporateur.

I.4.2.1. Machine frigorifique à compression de vapeur :

Il s'agit du type de refroidisseur le plus courant. Cela consiste à comprimer un réfrigérant gazeux, en augmentant sa pression et sa température. Le réfrigérant se condense ensuite dans l'échangeur thermique et libère sa chaleur vers l'environnement extérieur. Le réfrigérant liquide se détend dans le détendeur, devient un gaz et sa température chute. Le réfrigérant gazeux froid s'évapore dans le milieu refroidi. Puis le cycle recommence [13].

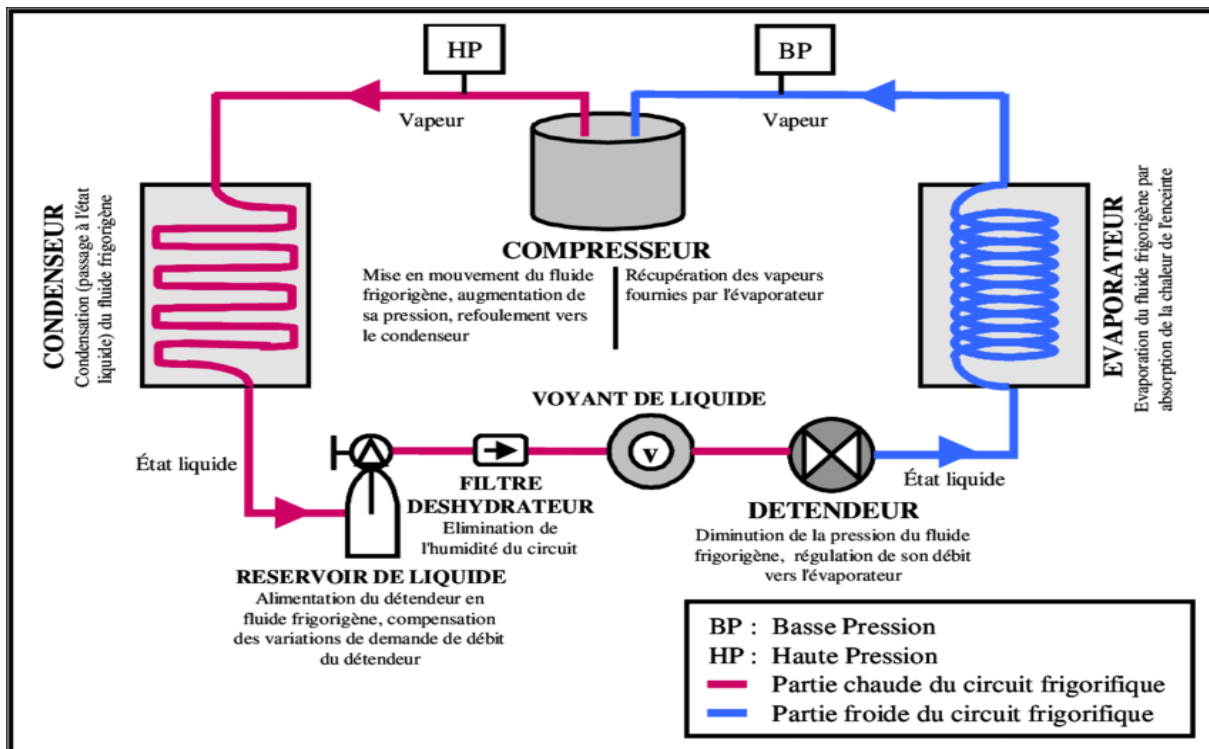


Figure I- 2: Machine frigorifique à compression de vapeur [13].

I.4.2.2. Machine frigorifique à éjection :

Un refroidisseur à éjecteur est un système de refroidissement qui utilise des éjecteurs pour créer le différentiel de pression nécessaire pour produire de l'air froid.

Contrairement aux systèmes de réfrigération à compression traditionnels qui utilisent des compresseurs mécaniques, les refroidisseurs à éjection ne comportent aucune pièce mobile, ce qui les rend plus silencieux et plus fiables.

Il fonctionne également avec diverses sources d'énergie telles que la vapeur, l'eau chaude et l'énergie solaire [13].

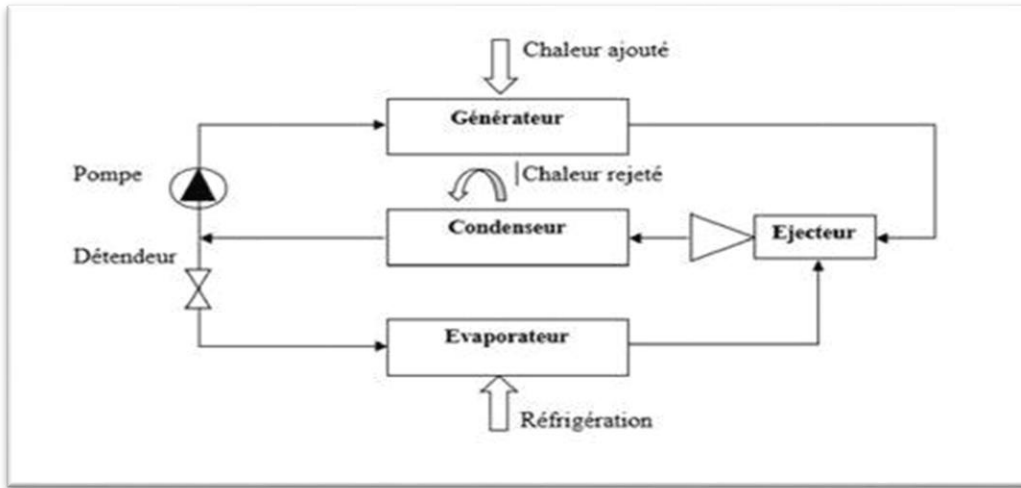


Figure I- 3: Machine frigorifique à éjection [13].

I.4.2.3. Machine frigorifique à sorption :

Ce type de réfrigérateur utilise un matériau adsorbant pour absorber le réfrigérant gazeux. Le matériau adsorbant est ensuite chauffé et le réfrigérant est désorbé. Le gaz réfrigérant se condense et se dilate ensuite pour produire de l'air froid. et le cycle recommence [13].

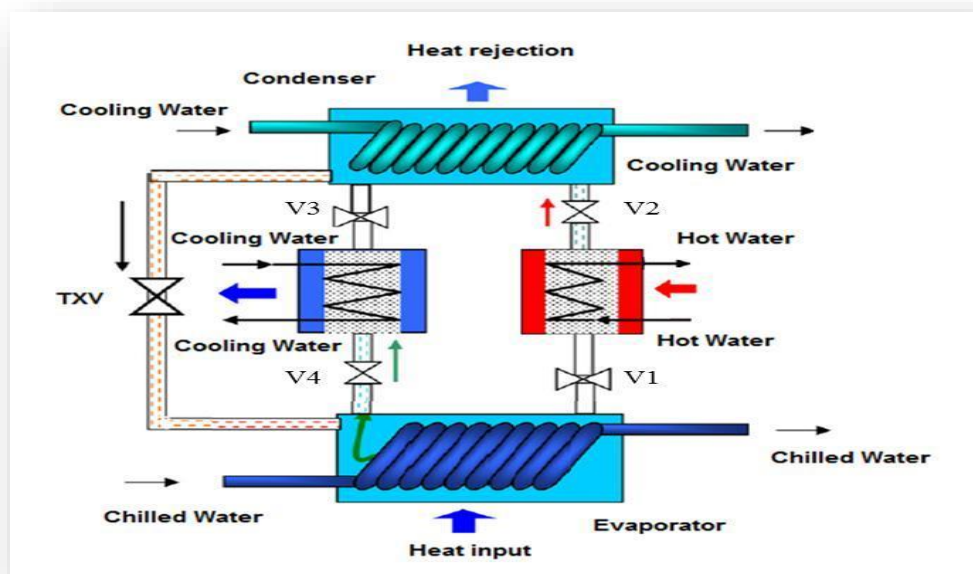


Figure I- 4: Principe d'un système à sorption [13].

I.4.2.4. Machine frigorifique à absorption :

Il s'agit d'un type de refroidisseur qui absorbe le réfrigérant gazeux dans un matériau absorbant liquide. La solution d'absorption est ensuite pompée vers un générateur où elle est chauffée. La chaleur provoque la désorption du réfrigérant de l'absorbant. Le réfrigérant gazeux se condense et se dilate ensuite pour produire de l'air froid. Puis le cycle recommence.

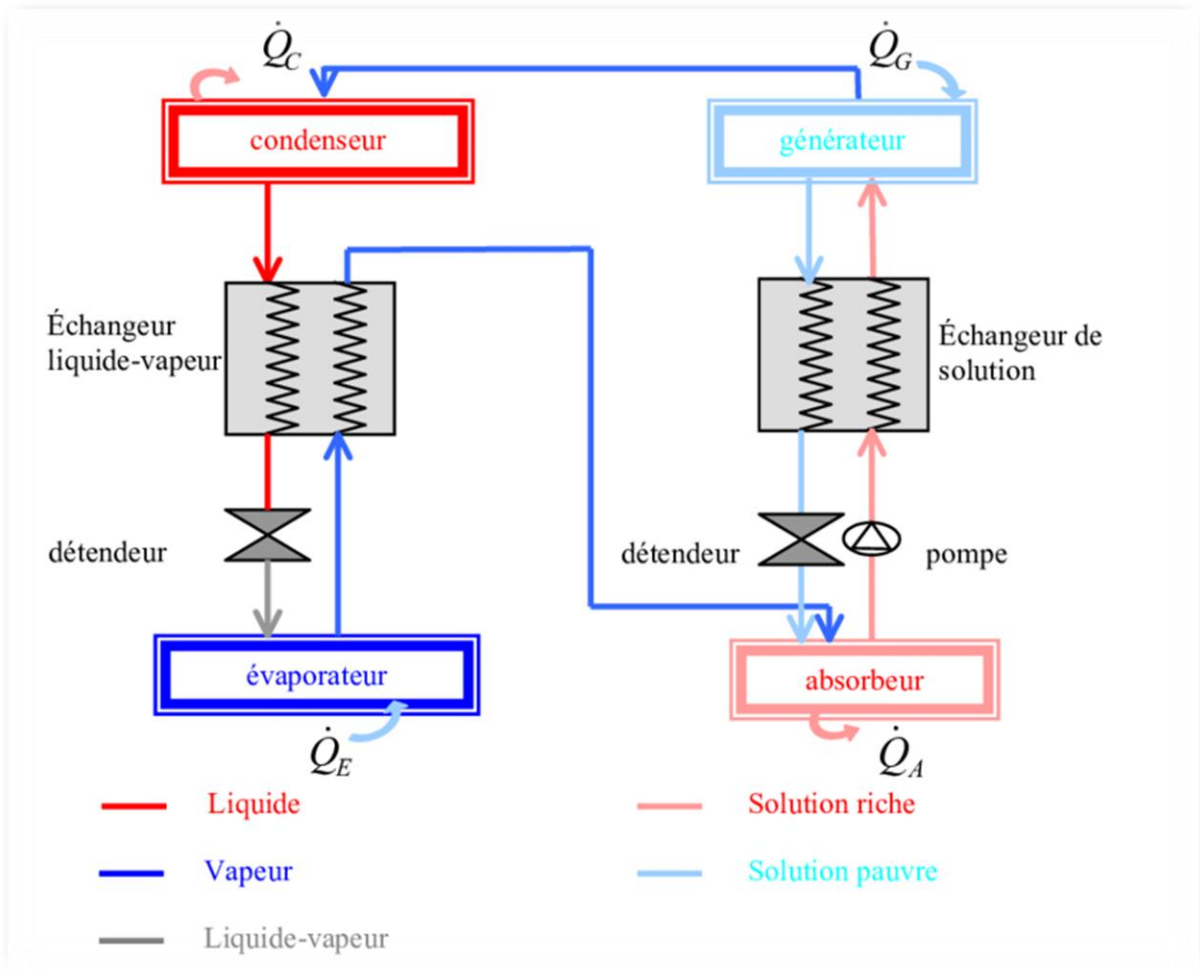


Figure I- 5: Machine frigorifique à absorption.

Ce tableau comparatif met en lumière les principales caractéristiques de trois grandes catégories de systèmes frigorifiques : les machines à compression, les machines à absorption liquide et les machines à sorption solide/absorption.

Feature	Machine à compression	Machine à absorption	Machine à Sorption
Fonctionnement	Compression Mécanique du fluide frigorigène	Absorption de Vapeur par un Liquide	Utilise l'absorption d'un fluide par un frigérant absorbant pour créer du froid,
Avantages	Efficacité élevée, Large gamme de puissance	Silencieuses, Utilisables avec Energies renouvelables	Meilleure efficacité énergétique, Moins de pièces mobiles

Inconvénients	Bruyantes, Vibrantes, impact environnemental du fluide frigorigènes	Moins Efficaces, plus Volumineuses, Plus chères	Technologie en développement Encombrement plus important
Applications	Réfrigérateurs, congélateurs climatisation (domestique , Commercial, Industriel)	Application silencieuses (hotellerie, camping), Récupération De chaleur Perdue	Production d'eau froide, Déshumidification, Climatisation

Tableau I- 2::Les avantages et les inconvénients des différents types de machine

I.5. Intérêt de l'utilisation de l'absorption :

Les machines à absorption, contrairement aux réfrigérateurs à compression mécanique, utilisent la ressource abondante et renouvelable de l'énergie solaire comme source d'énergie, ce qui en fait une option inépuisable et gratuite.

Nous déconseillons fortement son utilisation, notamment parce qu'il n'emploie pas de liquides dangereux progressivement interdits par les normes mondiales, comme les chlorofluorocarbures (CFC), censés contribuer à la détérioration de la couche d'ozone.

De plus, les rejets de ces émissions exacerbent l'effet de serre, entraînant une augmentation des températures moyennes mondiales. En revanche, lorsqu'il s'agit d'énergie mécanique, toute conversion d'énergie conduit à l'irréversibilité. Par conséquent, l'accent est mis sur la création d'un système de tri thermique qui élimine le besoin de travail mécanique, réduit le nombre de processus irréversibles et améliore finalement l'efficacité [14].

I.6. Système à absorption :

I.6.1. Généralité sur le refroidissement par systèmes à absorption :

La génération d'air froid grâce à la technologie est ancrée dans le concept d'absorption, connu depuis longtemps. Les Français ont été les pionniers dans ce domaine puisqu'ils ont créé le premier dispositif d'absorption en 1850[15]. Après la Seconde Guerre mondiale, la technologie d'absorption a connu des progrès significatifs au niveau industriel. Cette technologie éprouvée a été mise en œuvre dans différents pays. Les combinaisons les plus fréquemment utilisées incluent $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ et $\text{H}_2\text{O} /\text{LiBr}$.

Le potentiel de cristallisation de l'adsorbant présente un risque d'obstruction du circuit mécanique lorsque les températures d'évaporation descendent en dessous de 0°C. La plage de température de -10°C à -30°C est particulièrement cruciale, la paire initiale étant de la plus haute importance, malgré la pression plus élevée qui en résulte de 10 à 20 bars.

La température oscille autour de +5°C dans le deuxième scénario, ce qui pose des limites à l'application de la machine concernée en climatisation [16].

En règle générale, les absorbeurs ont un rendement inférieur à celui des compresseurs mécaniques. Il convient toutefois de noter que le coefficient de performance thermique d'un compresseur peut atteindre jusqu'à 3.

Les absorbeurs ont généralement un facteur d'environ 0,7, bien que les systèmes à simple et double effet puissent atteindre 1,4. L'utilisation de l'apport de chaleur dans les machines à absorption leur confère un avantage concurrentiel dans des scénarios spécifiques. Actuellement, des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité de ces systèmes ou les modifier pour fonctionner avec de nouvelles sources d'énergie à basse température [17].

I.6.2. Principe de fonctionnement :

Dans la figure [I.5], nous disposons d'une représentation visuelle des différents composants présents dans un système d'absorption de liquide. Pour mieux comprendre le fonctionnement de ces éléments, prenons l'exemple d'une machine à absorption fonctionnant avec le mélange ammoniac/eau [17].

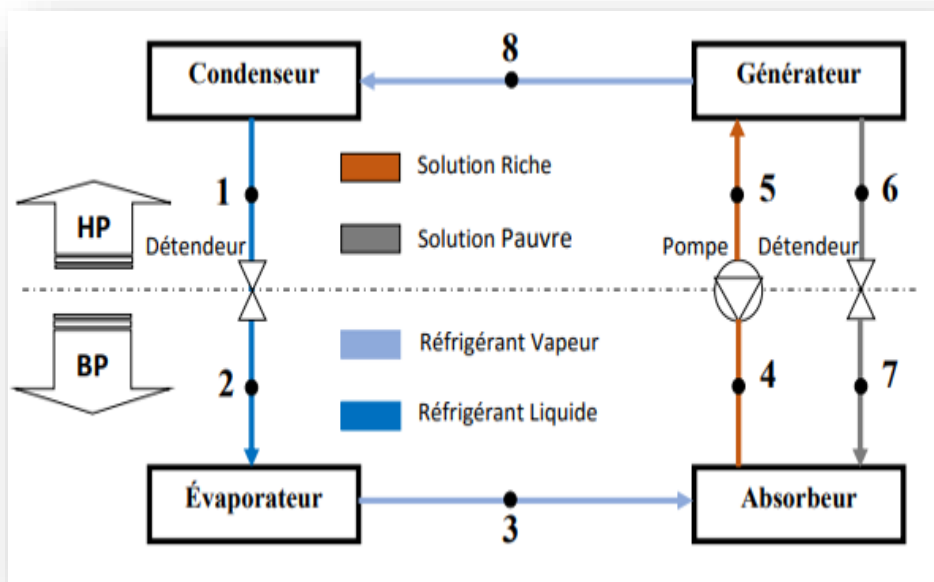


Figure I- 6: Structure d'une machine à absorption [17].

La machine à absorption composée d'un évaporateur, d'un condenseur, d'un absorbeur, d'un générateur et d'une pompe d'arrangement, la machine à absorption fonctionne sur un principe similaire à celui d'un système de compression. Dans l'évaporateur, le réfrigérant s'évapore, générant du froid, tandis que dans le condenseur, la chaleur est expulsée lorsque le réfrigérant se condense.

L'énergie mécanique générée par le compresseur est chargée de fournir l'énergie nécessaire pour augmenter la température et la pression du réfrigérant. Cependant, dans un système de rétention, l'absorption de la vapeur de réfrigérant est obtenue grâce aux efforts combinés de l'absorbeur, de la pompe et du générateur, plutôt que par un compresseur de vapeur mécanique. La vapeur produite par l'évaporateur est absorbée par l'absorbeur, qui est un liquide contenu dans l'absorbeur lui-même. L'absorbant, contenant maintenant la vapeur de réfrigérant, est ensuite pompé vers le générateur, où le réfrigérant est libéré sous forme de vapeur puis condensé dans le condenseur. L'absorbant concentré ou régénéré est ensuite

renvoyé vers l'absorbeur afin de capter de nouvelles vapeurs de réfrigérant. La vapeur est introduite dans le générateur à des températures élevées et expulsée de l'absorbeur à des températures plus basses [17].

I.6.3. Composantes de base d'une machine à absorption :

Les quatre composants de base d'une machine à absorption sont :

- **L'évaporateur :** L'évaporateur est l'endroit où le réfrigérant absorbe la chaleur de l'espace à refroidir. Le réfrigérant se vaporise dans l'évaporateur, ce qui le refroidit [17].
- **L'absorbeur :** L'absorbeur représente une composante essentielle dans les systèmes de réfrigération et de climatisation. Il s'agit du point où le réfrigérant gazeux est absorbé par un liquide absorbant spécifique. [17].
- **Le générateur ou concentrateur :**
Le générateur, également appelé concentrateur, est l'endroit où l'arrangement de réfrigérant-absorbant est chauffé. La chaleur provoque l'évaporation du réfrigérant de mélange, laissant derrière lui un concentré d'absorbant [17].
- **Le condenseur :**
Le condenseur est l'endroit où le réfrigérant gazeux provenant du générateur est comprimé et refroidi. Cela provoque la condensation du réfrigérant en liquide. Le réfrigérant liquide est ensuite renvoyé dans l'évaporateur pour recommencer le cycle [17].

I.6.4. Les couples classiques utilisés dans l'absorption :

Dans le domaine de l'absorption, de nombreux couples ont fait face à des défis rigoureux. Marcriss a mené une étude révélant une vaste gamme de plus de 40 composés réfrigérants et 200 absorbants à notre disposition. Néanmoins, les fluides prédominants employés sont les suivants [18] :

Deux combinaisons chimiques dignes de mention sont ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) et ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$).

I.6.4.1. Machine à absorption avec $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ [18] :

En utilisant les caractéristiques uniques de l'eau à des températures plus froides, cet appareil absorbe efficacement l'ammoniac, augmentant son volume de 1 000 fois à 0°C . Soumise à une chaleur de 100°C , la machine libère la quasi-totalité du gaz précédemment absorbé. Par conséquent, les vapeurs d'ammoniac condensées jouent un rôle crucial en fournissant l'effet de refroidissement souhaité au sein de l'évaporateur.

I.6.4.1.1. Description :

Schématiquement, un système d'absorption de liquide comprend les différents éléments représentés sur la figure [I.7].

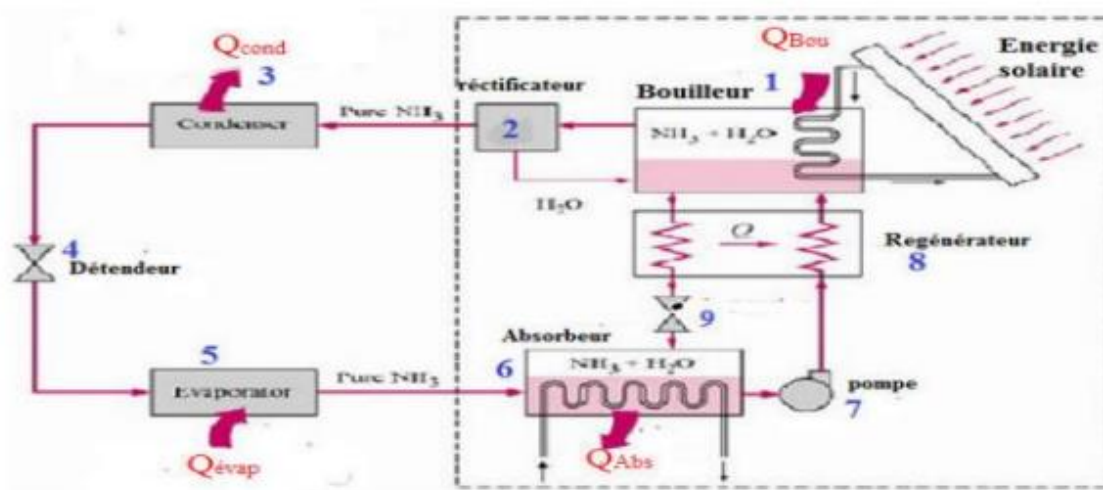


Figure I- 7: Structure d'une machine frigorifique à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ [18].

Approchant à un compresseur de vapeur, un système d'absorption se compose initialement d'un ensemble condenseur/détendeur/évaporateur à travers lequel circule uniquement du réfrigérant pur.

Cet ensemble intervient dans la partie « chimie » du processus qui modifie l'état du réfrigérant évaporé afin qu'il puisse se condenser à température ambiante.

I.6.4.1.2. Fonctionnement :

Le générateur (1) chauffe la solution d'ammoniac à l'aide d'un serpentin à vapeur. À mesure que la solubilité de l'ammoniac dans l'eau diminue, l'ammoniac gazeux est libéré à une pression qui correspond étroitement à la pression de vapeur saturée à la température d'ébullition de la solution. La solution restant dans la bouilloire, qui a perdu de l'ammoniac, est qualifiée de « mauvaise solution ». Le séparateur rectificateur (2) sépare mécaniquement l'ammoniac gazeux des gouttelettes d'eau présentes dans le liquide, puis il est condensé dans le condenseur (3). L'ammoniac liquide est introduit dans l'évaporateur (5) via le détendeur (4), où il s'évapore lentement sous une pression P_5 qui correspond à sa température d'évaporation T_5 . La vapeur résultant de cette évaporation est dirigée vers l'absorbeur (6), où elle se combine avec la solution pauvre issue de la chaudière. Le débit de la vapeur est régulé par une vanne de régulation (9). Pour garantir que l'absorbeur reste à une température presque identique à celle du milieu environnant, de l'eau circule, favorisant simultanément la dissolution optimale de l'ammoniac dans la solution pauvre. À l'inverse, le système élimine la chaleur produite lors du processus de dissolution de l'ammoniac dans l'eau. La concentration d'une solution d'ammoniac diluée est obtenue par absorption d'ammoniac, d'où le terme « solutions riches ». Une pompe (7) est utilisée pour égaliser la disparité de pression entre l'absorbeur et la chaudière, facilitant ainsi un circuit à deux liquides

- Ammoniac sensiblement pur. Un changement normal de réfrigérant se produit entre la sortie de la chaudière et l'entrée de l'absorbeur.

-La solution d'ammoniacque circule alternativement entre la chaudière et l'absorbeur sous forme de solution d'ammoniacque pauvre et de solution d'ammoniacque riche.

Le but de l'échangeur thermique (8) est d'augmenter le rendement de la machine en refroidissant la solution pauvre avant d'entrer dans l'absorbeur et en chauffant la solution riche avant de retourner à la chaudière, en faisant circuler les deux solutions dans des sens opposés.

Les régulateurs (4) et (9) et la pompe (7) assurent la séparation des circuits haute et basse pression.

C'est le seul rôle joué par le régulateur dans les compresseurs mécaniques.

Par conséquent, ce diagramme montre que le seul composant mécanique du système est la pompe à solution (7).

I.6.4.2. Machine à absorption avec $H_2O/LiBr$ [18] :

Si les mélanges $H_2O/LiBr$ offrent de nombreux avantages, leur utilisation se heurte à des inconvénients notables. Les systèmes de refroidissement utilisant des solutions $H_2O /LiBr$ sont

limités par le point de congélation de l'eau, ce qui limite leur efficacité à des températures inférieures à 0°C.

Ce mélange est spécifiquement utilisé dans les systèmes de climatisation pour produire de l'eau glacée. Cependant, il présente un inconvénient majeur en ce qui concerne sa plage de solubilité. À des températures et/ou des concentrations plus élevées, les solutions de bromure de lithium ont tendance à cristalliser, nécessitant une régulation constante de la température dans le circuit de refroidissement. De plus, les faibles niveaux de pression de ce mélange posent des problèmes. La pression dans l'évaporateur est inférieure à la pression atmosphérique, ce qui entraîne des problèmes d'étanchéité et de choix des matériaux [18].

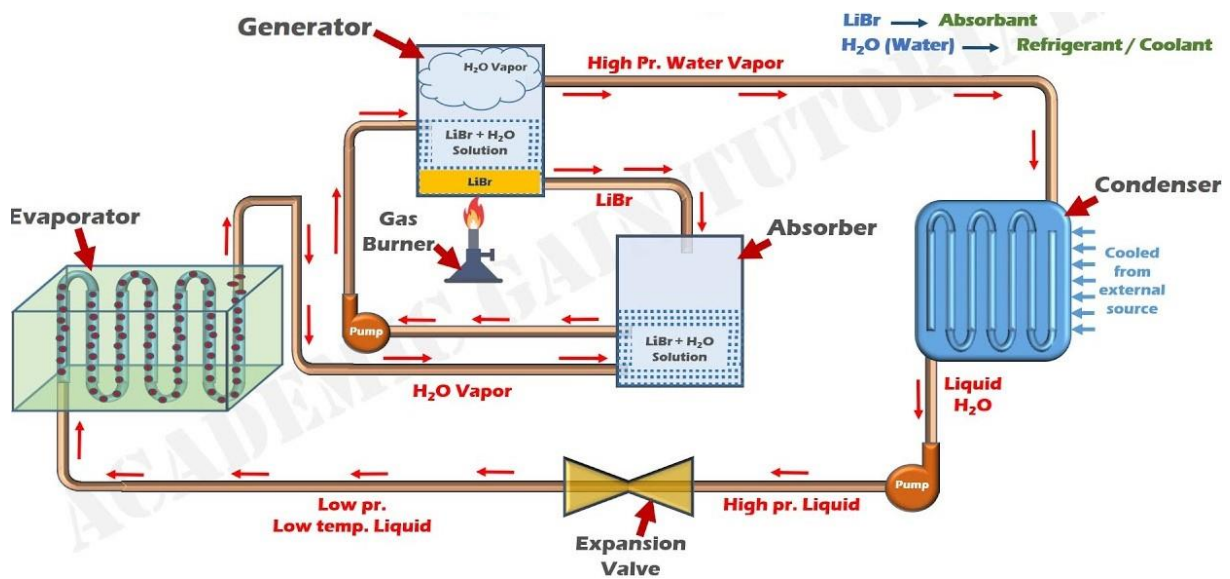


Figure I- 8: Machine à absorption avec H₂O/LiBr.

I.6.5. Avantages et inconvénients :

I.6.5.1. Le mélange (ammoniac-eau) :

- **Avantages :**

- Le coût abordable.
- Chaleur latente inférieure à la chaleur latente de l'eau.
- Ses utilisations sont incroyablement diverses et couvrent un large spectre.
- Sa polyvalence est encore renforcée par sa capacité à résister à des températures inférieures à zéro, ce qui le rend adapté à une variété d'applications.

- **Inconvénients :**

En raison de sa nature toxique, la réglementation restreint l'utilisation de l'ammoniac à des circonstances spécifiques. Dans le circuit réfrigérant, la vapeur émise par la chaudière contient de petites quantités d'ammoniac et de vapeur d'eau

I.6.5.2. Le mélange (eau - bromure de lithium) :**• Avantages :**

- Eau non toxique.
- Masse de chaleur latente importante par rapport aux autres fluides caloporteurs, ce qui constitue un avantage pour les grands systèmes car le débit requis est limité, réduisant ainsi l'encombrement et le coût.
- L'eau est un liquide inflammable.
- Faible viscosité.
- Nombre d'outils réduit.

• Inconvénients :

- Interdire les températures inférieures à zéro (0°C) pour éviter le gel, adapté à la climatisation et au stockage des aliments.
- Risques de cristallisation, notamment dus à des phénomènes transitoires.
- Le bromure de lithium (LiBr) coûte cher.
- Le système (H₂O - LiBr) fonctionne sous vide, à une pression bien inférieure à la pression atmosphérique.

I.7. Différentes configurations de la machine à absorption liquide [19] :

Les refroidisseurs à absorption ont fait l'objet de plusieurs études visant à améliorer leur fonctionnement et à augmenter leur efficacité. Ces recherches portent sur le développement de principes fonctionnels et la recherche de nouveaux liquides adaptés.

Par conséquent, de nombreuses études ont proposé diverses configurations de pompes à chaleur et de refroidisseurs à absorption de liquide.

Cette section décrit la configuration principale de cette machine

I.7.1. Système à absorption à simple effet :

La figure [I.7] montre un cycle de réfrigération à absorption, également appelé refroidissement par pompe.

Le cycle comprend divers composants tels que des condenseurs et des absorbeurs, qui libèrent de la chaleur indésirable dans l'environnement, et des chaudières (générateurs), qui extraient la chaleur des températures élevées.

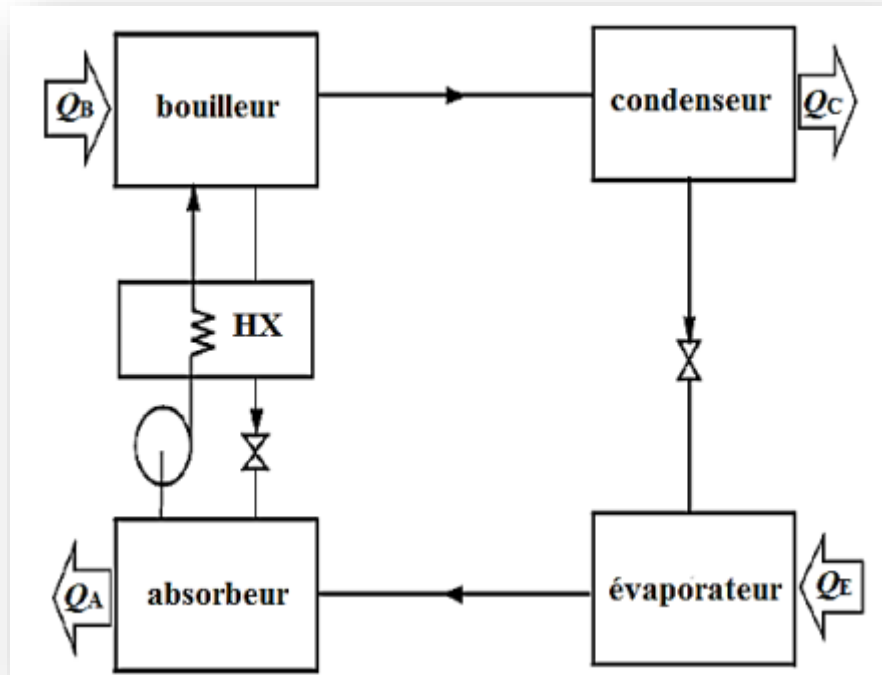


Figure I- 9: Cycle frigorifique à absorption à simple effet [19].

En transférant la chaleur et en utilisant une pompe d'évaporateur, la source de chaleur distribue efficacement l'air froid dans l'espace désigné, fournissant un effet de refroidissement précieux. Ce système polyvalent a la capacité de générer de l'air froid pour une multitude d'applications, telles que la climatisation des bâtiments, la création de glace, la conservation des aliments et la congélation rapide d'articles.

I.7.2. Cycles frigorifiques à plusieurs effets :

L'objectif des cycles de réfrigération multi-effets est d'améliorer l'efficacité des systèmes à absorption ou d'élargir leurs applications potentielles en incorporant des systèmes multi-étages ou multi-effets. De nombreuses variantes existent, en particulier dans les situations où l'air froid et la chaleur doivent être générés simultanément, comme avec les pompes de refroidissement thermique.

Entre les années 1956 et 1958, le cycle frigorifique à absorption à double effet a été introduit avec succès.

Dans la figure [I.9], un système H₂O/LiBr est représenté, illustrant un cycle. Au cours de ce cycle, la vapeur de réfrigérant, générée par le premier générateur d'effet, subit une condensation à haute pression dans le deuxième générateur d'effet.

La chaleur dégagée remplit plusieurs fonctions, notamment la génération de davantage de vapeur de réfrigérant dans le générateur du premier effet. De plus, la chaleur dérivée de la condensation des vapeurs du réfrigérant est utilisée dans la chaudière II.

Dans le cas où toute la vapeur du générateur initial se condense dans le deuxième générateur, le coefficient de performance (COP) du système devrait être deux fois plus élevé que celui d'un système comparable à simple effet

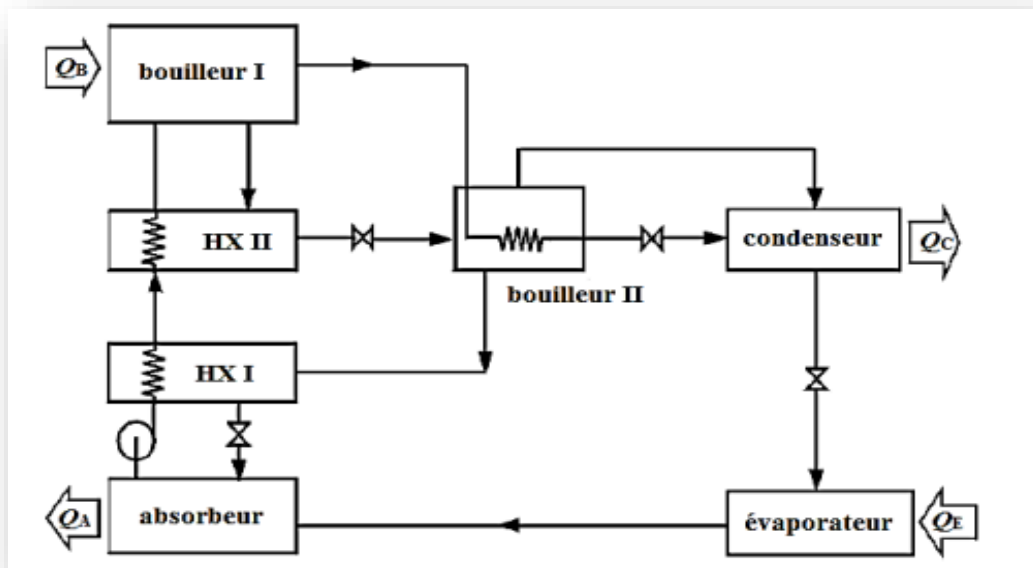


Figure I- 10: Cycle frigorifique à absorption à double effet opérant à trois niveaux de pression, haute modérée et basse [19].

Lors du remplacement du couple H₂O/LiBr par NH₃/H₂O, la chaudière à premier effet subit une augmentation significative de la pression maximale, conduisant à la configuration du cycle d'absorption à double effet tel que représenté sur la figure [I.10].

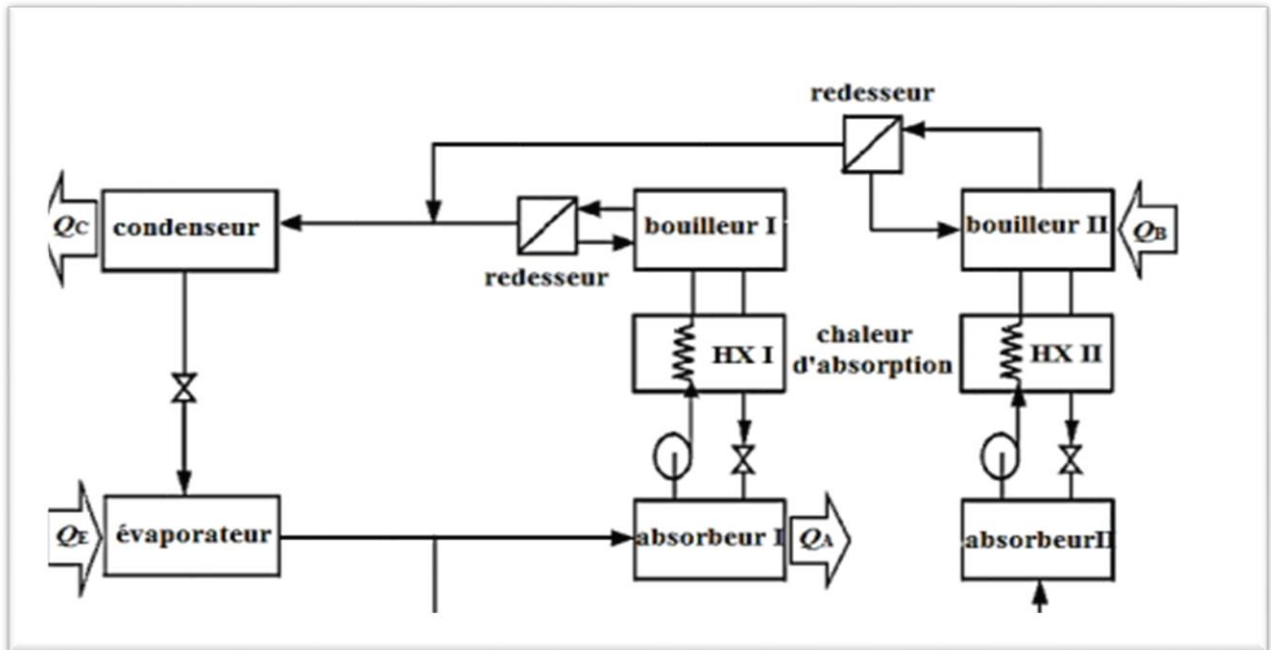


Figure I- 11: Cycle frigorifique à absorption à double effet opérant à deux niveaux de pression [19].

L'utilisation de ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$) dans ce système présente un paradoxe intéressant par rapport au système $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$, car il combine deux circuits simple effet distincts. En intégrant l'évaporateur et le condenseur à deux cycles dans une seule unité, ce système est capable de fonctionner avec seulement deux niveaux de pression, garantissant que la pression maximale reste dans des limites acceptables (en raison de la chaleur provenant d'une source externe).

En utilisant de l'eau comme absorbant, il n'y a aucun problème de cristallisation à l'intérieur de l'absorbant, ce qui lui permet de fonctionner efficacement même à des températures élevées et de transférer la chaleur à la chaudière. Cette configuration particulière de l'absorbeur appartient à la classification des systèmes DC à double effet.

Différents fluides de travail ont fait l'objet de recherches théoriques en relation avec les systèmes d'absorption à double effet.

Divers cycles d'absorption à effets multiples ont été examinés, notamment les cycles d'absorption à triple effet (Figure II.12) et les cycles d'absorption à quadruple effet. Il est important de noter que l'augmentation du COP n'est pas directement corrélée à la variation du nombre d'effets.

Bien qu'il puisse y avoir une plus grande quantité d'effets, le COP individuel de chaque effet est insuffisant par rapport à un système à effet unique. De plus, la complexité de la conception des

cycles s'intensifie avec l'inclusion de multiples effets, conduisant à la promotion exclusive des cycles à double effet.

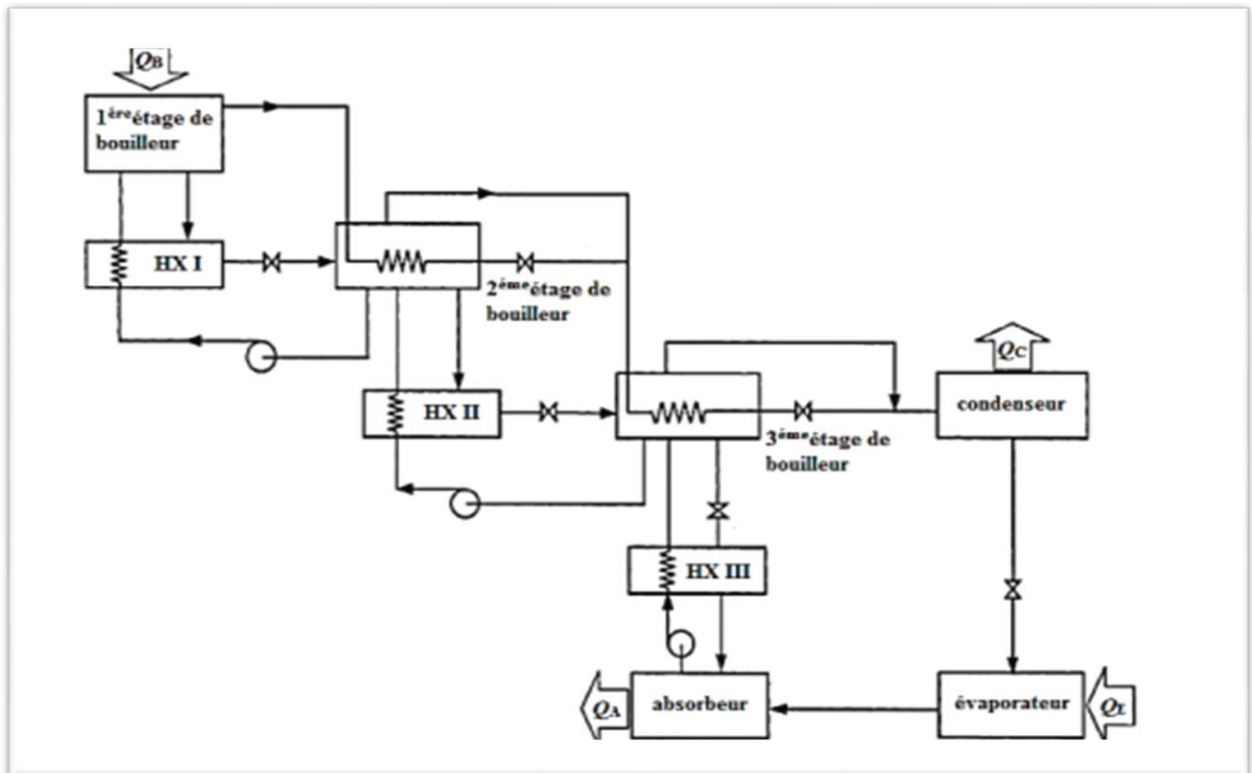


Figure I- 12: Cycle frigorifique à absorption à triple effet opérant à quatre niveaux de pression [19].

I.8. Diagrammes thermodynamiques [18] :

Les diagrammes thermodynamiques le plus utilisé pour le couple $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$:

I.8.1. Diagramme d'Oldham :

Il s'agit d'un diagramme (p, x) qui représente la pression (p) en fonction de la fraction massique du NH_3 (x) dans la solution pour différentes températures.

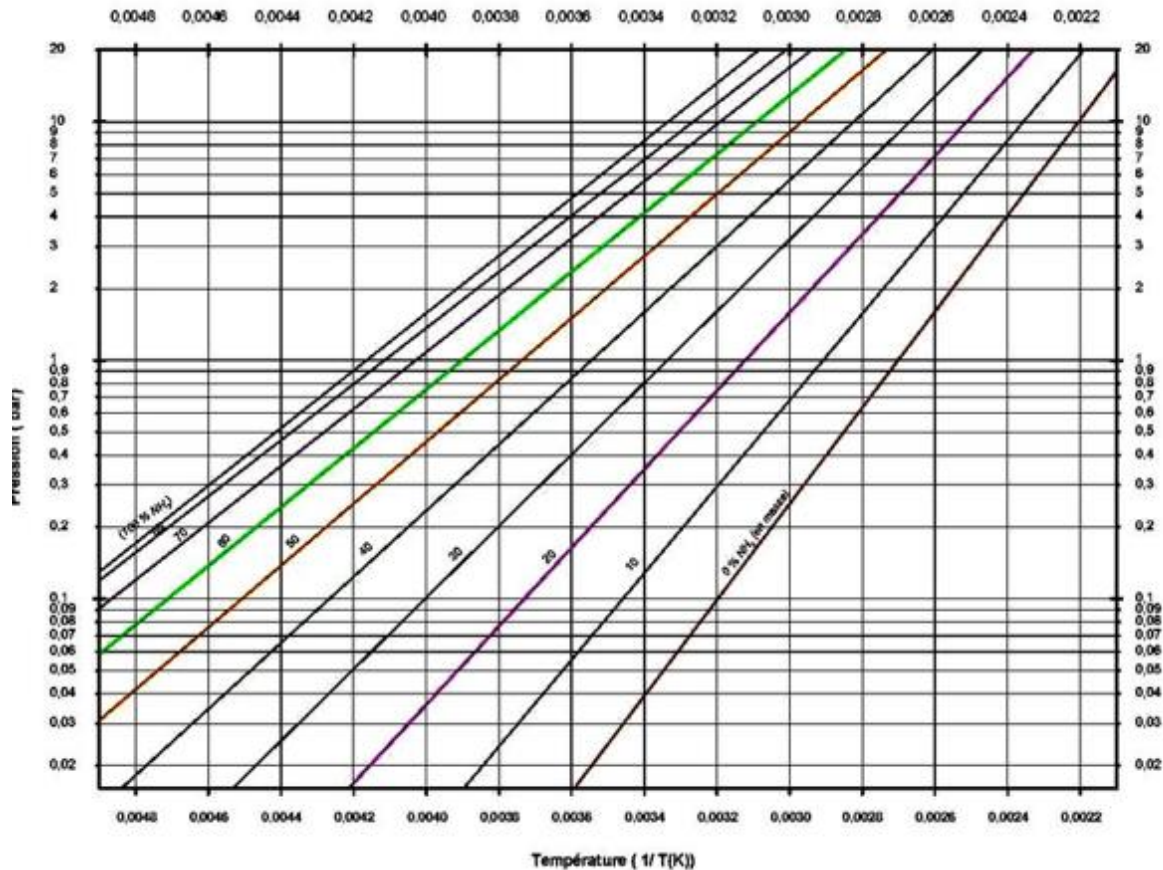


Figure I- 13: Diagramme d'Oldham pour le couple $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ [18].

I.8.1.1. Zones dans un diagramme d'Oldham :

Le diagramme d'Oldham est divisé en plusieurs zones :

- **Zone liquide** : Cette zone représente l'état dans lequel la solution est complètement liquide.
- **Zone Vapeur** : Cette zone représente la situation où la solution est complètement gazeuse (vapeur d'ammoniac).
- **Zone à deux phases** : Cette zone représente la situation où la solution est un mélange de liquide et de vapeur. La fraction massique de NH_3 dépend de la pression et de la température.

I.6.1.2. Utilisation des diagrammes d'Oldham :

À l'aide des diagrammes d'Oldham, vous pouvez :

- Déterminer la composition de la solution $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ en fonction de la pression et de la température.
- Déterminer la pression de saturation d'une solution $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ à une température spécifique.
- Visualisez les changements que subit le mélange $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ au cours d'un cycle de refroidissement à absorption.

I.8.2. Diagramme de Merkel :

Le diagramme de Merkel, également appelé diagramme enthalpie-concentration, est un outil important pour l'étude des machines à absorption. Contrairement au diagramme d'Oldham qui utilise la pression (p) sur l'axe horizontal, le diagramme de Merkel utilise l'enthalpie (h) du mélange $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$.

I.8.2.1. Zones du diagramme de Merkel

Le diagramme de Merkel, comme celui d'Oldham, est divisé en zones.

- **Zone Liquide** : Cette zone représente l'état dans lequel la solution est complètement liquide.
- **Zone Vapeur** : Cette zone représente la situation où la solution est complètement gazeuse (vapeur d'ammoniac).
- **Zone biphasique** : Cette zone représente la situation où la solution est un mélange de liquide et de vapeur.

I.8.2.2. Utilisation des diagrammes de Merkel

À l'aide des diagrammes de Merkel, vous pouvez :

- Visualisez le transfert de chaleur dans un refroidisseur à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$.

- Déterminer les enthalpies de solutions riches et pauvres à différents points du cycle.
- Analyser les performances du refroidisseur à l'aide du coefficient de performance (COP).

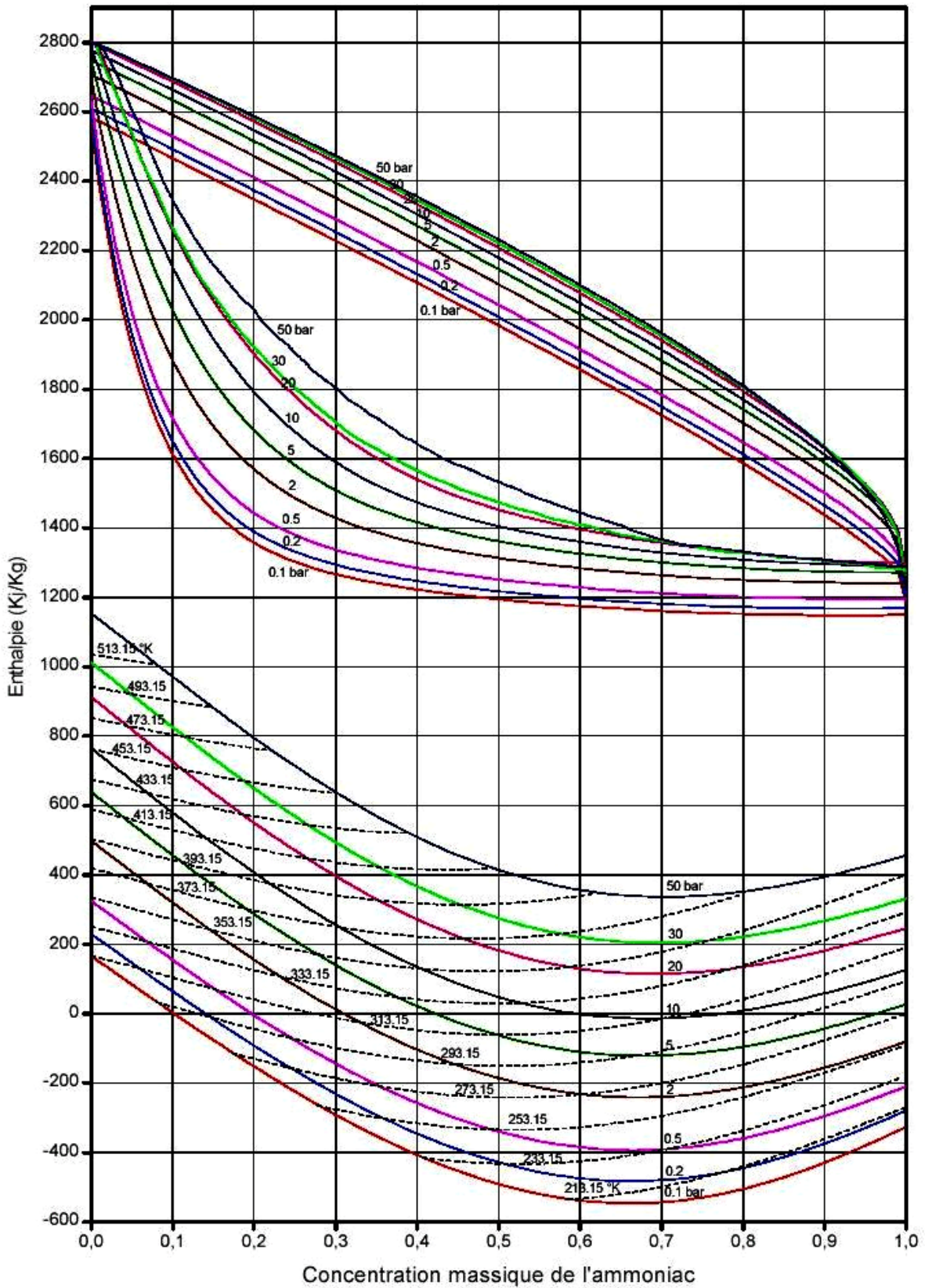


Figure I- 14: Diagramme de Merkel NH₃/H₂O [18].

I.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le fonctionnement du système de refroidissement ainsi que les avantages et les inconvénients des refroidisseurs à absorption.

Les machines à absorption constituent une technologie prometteuse pour produire de la chaleur froide de manière durable et efficace. Bien qu'il présente de nombreux avantages par rapport aux systèmes de réfrigération traditionnels à compression de vapeur, il existe également certaines limites à prendre en compte.

La poursuite de la recherche et du développement améliore les performances des absorbeurs et réduit les coûts, et devrait encore accroître l'adoption de cette technologie dans les années à venir.

**Chapitre II : Modélisation de
la machine à absorption
NH₃/H₂O**

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter le sujet de la modélisation de la machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. Elle explique comment la machine à absorption est utilisée dans diverses applications industrielles, telles que la production de froid, la climatisation et la récupération de chaleur. La modélisation de cette machine permet de mieux comprendre ses principes de fonctionnement et d'optimiser ses performances. Cette section donne un aperçu des principes de fonctionnement de la machine à absorption et de l'importance de son modèle mathématique.

II.2. Objectif de la modélisation :

L'objectif de la modélisation de la machine à absorption $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ est de développer un modèle mathématique précis et robuste qui représente de manière fiable le fonctionnement de l'appareil.

Ce modèle aide à analyser et à prédire les performances de la machine en fonction de différentes conditions de fonctionnement. Il identifie également les paramètres clés qui affectent les performances de la machine et détermine les actions correctives nécessaires pour optimiser son fonctionnement

II.3. Présentation le cas d'étude :

Cette présentation explorera en détail les machines à absorption à simple effet à l'aide d'une étude de cas spécifique. Nous examinons le fonctionnement, les composants et les performances, révélant les avantages et les défis de cette technologie de refroidissement.

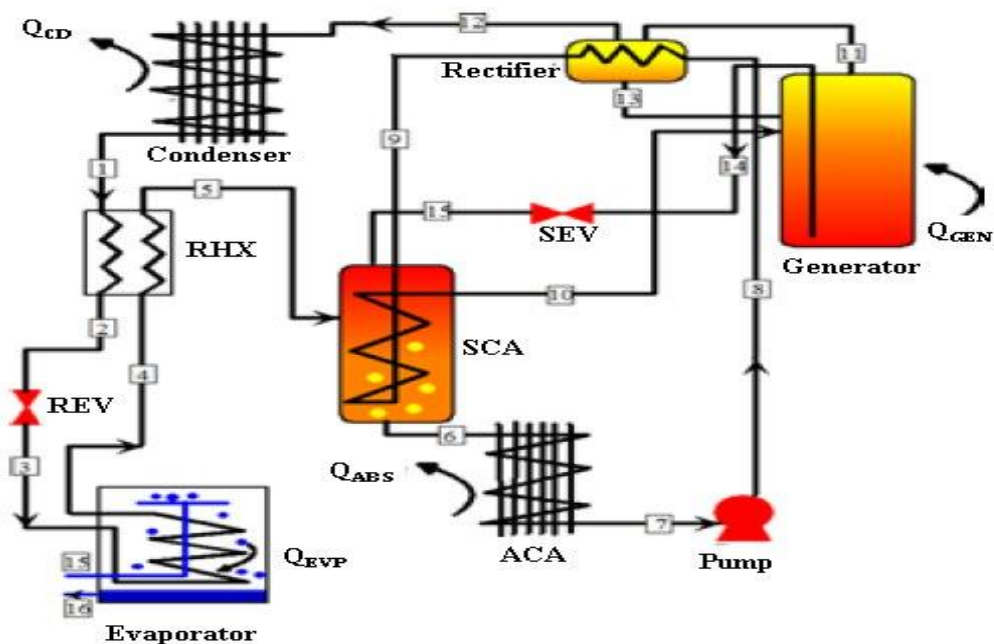


Figure II- 1:Représentation schématique du refroidisseur à absorption commercial [20]

Les données utilisées au début de l'étude de cas sont représentées dans ce tableau [II.1] :

Paramètre	Valeurs
Pression d'évaporation(bar)	4,936 bar
Pression de condensation (bar)	22,38 bar
Température de l'air (°C)	35 °C
Fraction massique de d'ammoniaque de la solution faible à la sortie du générateur	0,09
Débit massique de la solution riche	90, 718 kg/h
Température d'entrée d'eau	12 °C

Tableau II. 1:Paramètres de fonctionnement pour les conditions de conception.

II.4. Modélisation du cycle à simple effet avec échangeur de solution :

Le cycle à simple effet, représenté sur la figureII.1, contient les éléments de base suivants Un évaporateur, un condenseur, un générateur, un absorbeur et échangeur de solution. Le processus décrit implique une série d'étapes précises dans un système de réfrigération utilisant de l'ammoniac comme réfrigérant.

Voici une version plus détaillée du processus :

Le gaz réfrigérant contenant de l'ammoniac, une fois utilisé, est régénéré (11). Ce gaz régénéré est dirigé vers le Rectificateur (REC), une unité où il subit un refroidissement grâce à la solution riche en ammoniac (9) provenant de l'Appareil de Concentration d'Ammoniac (ACA). Ce refroidissement entraîne une condensation partielle de la vapeur, ce qui contribue à sa purification. L'ammoniac quasi pur résultant est ensuite acheminé vers le Condenseur à Air (CD), où il est refroidi davantage jusqu'à sa liquéfaction. Le liquide ainsi obtenu (1) est alors dirigé à travers deux autres composants : L'Échangeur de Chaleur du Réfrigérant (RHX), où il cède de la chaleur, et La Soupape d'Expansion du Réfrigérant (REV), où sa pression est réduite avant d'atteindre l'Évaporateur (EVP). À l'Évaporateur (EVP), le liquide d'ammoniac est vaporisé (4) en absorbant la chaleur de l'eau réfrigérée, qui se refroidit en conséquence. La vapeur d'ammoniac produite est dirigée vers l'absorbeur, où elle est dissoute dans la solution faible provenant du Générateur d'Ammoniac (GEN) (15). Ce processus d'absorption se déroule en deux étapes : Dans un premier temps, au Séparateur de Condensat d'Ammoniac (SCA), où

la chaleur récupérée est utilisée pour préchauffer la solution riche en ammoniac en route vers le GEN (9). Puis, dans l'Appareil de Concentration d'Ammoniac (ACA), pour achever le processus d'absorption. Ce processus détaillé permet de comprendre le cheminement précis du réfrigérant dans le système et les différentes étapes de purification et de régénération de l'ammoniac.

II.5. Bilan massique et enthalpique :

Pour évaluer les performances du cycle d'absorption illustré à la figure [II.1]

Nous avons fait ce qui suit : Faire les hypothèses de calcul suivantes :

- Aux points 12, 2, 3 et 4, le réfrigérant est dans un état pur.
- Il n'y a aucun changement de pression dans la tuyauterie autre que le régulateur et la pompe.
- Aux points 7 et 14, la solution est saturée.
- Le détendeur est adiabatique.
- Les pompes à solution sont isentropiques.
- Aucune perte de chaleur des différents composants.

Le coefficient de performance (COP) est défini par le rapport entre la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur et la quantité de chaleur fournie au générateur .

$$\text{COP} = \frac{Q_e}{Q_g} \quad (\text{II.1})$$

D'où :

Q_e : quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur.

Q_g : la quantité de chaleur absorbée fournit au générateur.

Remarque

- La modélisation thermodynamique réalisée pour différents circuits de refroidissement s'appuie sur les premiers principes de la thermodynamique.

La forme générale des équations de conservation de l'énergie et de la masse est :

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad (\text{II.2})$$

$$\sum Q + \sum W = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_i h_i \quad (\text{II.3})$$

$$\sum \dot{m}_i X_i = \sum \dot{m}_e X_e \quad (\text{II.4})$$

\dot{m} : représente le débit de (la solution, la vapeur d'eau ou bien l'eau liquide).

II.5.1. Analyse du Générateur:

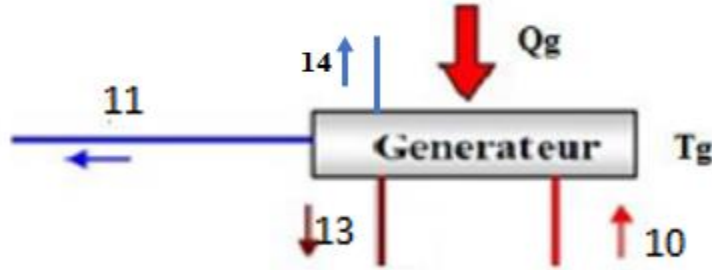


Figure II- 2: Le générateur.

❖ **Bilan massique:**

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} + \dot{m}_{13} + \dot{m}_{14} \quad (\text{II.5})$$

$$\dot{m}_{10} X_{10} = \dot{m}_{11} X_{11} + \dot{m}_{13} X_{13} + \dot{m}_{14} X_{14} \quad (\text{II.6})$$

❖ **Bilan enthalpique:**

$$Q_g = \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_{13} h_{13} + \dot{m}_{14} h_{14} - \dot{m}_{10} h_{10} \quad (\text{II.7})$$

h_{11} : Enthalpie de la vapeur de réfrigérant surchauffée à la température du générateur T_g et à la pression du condenseur.

h_{10} : Enthalpie liquide d'une solution diluée (riche en H₂O) à la température T_{10} et à la pression du condenseur.

h_{13} : Enthalpie liquide d'une solution concentrée (pauvre en H₂O) à la température du générateur T_g et à la pression de générateur.

II.5.2. Analyse du Condenseur:

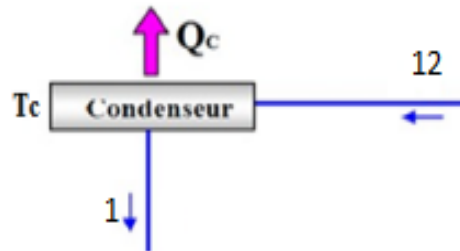


Figure II- 3: Condenseur.

❖ Bilan massique:

$$\dot{m}_{12} = \dot{m}_1 \quad (\text{II.8})$$

$$\dot{m}_{12}x_{12} = \dot{m}_1x_1 \quad \longrightarrow \quad x_{12} = x_1 \quad (\text{II.9})$$

❖ Bilan enthalpique:

$$\begin{aligned} Q_c &= \dot{m}h_{12} - \dot{m}_1h_1 \\ &= \dot{m}_1(h_{12} - h_1) \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

❖ Équations Constitutives:

$$Q_c = U_c A_c D T_{LMC} \quad (\text{II.11})$$

$$D T_{LMC} = \frac{(T_{12} - T_1)}{\ln \left(\frac{T_{12} - T_a}{T_1 - T_a} \right)} \quad (\text{II.12})$$

h_{12} : Enthalpie de la vapeur du réfrigérant à la température du générateur T_g et à la pression du condenseur.

h_1 : Enthalpie du réfrigérant liquide saturé à la température T_c et à la pression du condenseur.

\dot{m}_1 : Débit de réfrigérant.

Q_c : Puissance thermique échangée du Condenseur, $W=j/s$.

U_c : Coefficient de transfert thermique global du Condenseur, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$.

A_c : Surface d'échange du Condenseur, m^2 .

DT_{LMC} : moyenne logarithmique des écarts de température du Condenseur, $^\circ C$.

II.4.3. Analyse de l'Evaporateur:

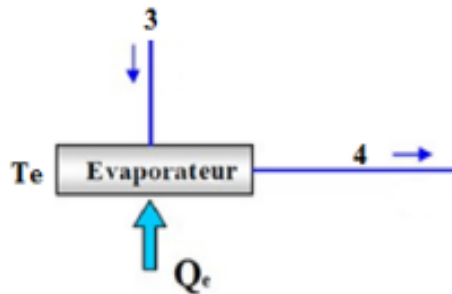


Figure II- 4: L'évaporateur.

❖ Bilan massique:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (II.13)$$

$$\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_3 x_3 \longrightarrow x_4 = x_3 \quad (II.14)$$

❖ Bilan enthalpique:

$$\begin{aligned} Q_{ev} &= \dot{m}_4 h_4 - \dot{m}_3 h_3 \\ &= \dot{m}_4 (h_4 - h_3) \end{aligned} \quad (II.15)$$

❖ Équations Constitutives:

$$Q_{EVP} = U_{ev} A_{ev} DTLM_{EV} \quad (II.16)$$

$$DTLM_{EV} = \frac{(T_{i,w}-T_3)-(T_{0,w}-T_4)}{\ln\left[\frac{(T_{i,w}-T_3)}{(T_{0,w}-T_4)}\right]} \quad (II.17)$$

h₃ : Enthalpie liquide à la température **T₃** et à la pression de l'évaporateur.

h₄ : Enthalpie de la vapeur saturée du frigorigène à la température **T_e** et la pression de l'évaporateur.

ṁ₃, ṁ₄ : Débit du réfrigérant.

Q_{EVP} : Puissance thermique échangée de l'Evaporateur, **W=j/s**.

U_{ev} : Coefficient de transfert thermique global de l'Evaporateur, **W/(m²°C)**.

A_{ev} : Surface d'échange de l'Evaporateur, **m²**.

DTLM_{EV} : moyenne logarithmique des écarts de température de l'Evaporateur, **°C**.

II.5.4. Analyse de l'Absorbeur:

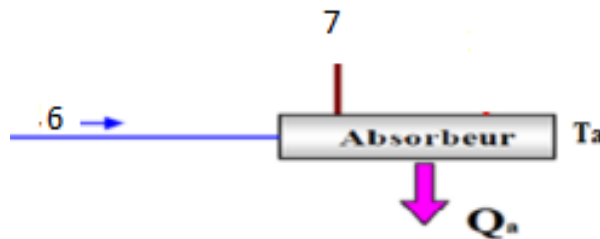


Figure II- 5: Absorbeur.

❖ **Bilan massique :**

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_7 \quad (II.18)$$

$$\dot{m}_6 x_6 = \dot{m}_7 x_7 \quad \longrightarrow \quad x_6 = x_7 \quad (II.19)$$

❖ **Bilan enthalpique :**

$$Q_a = \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_6 h_6 \quad (\text{II.20})$$

❖ **Équations Constitutives:**

$$Q_a = U_a A_a \text{DTLM}_a \quad (\text{II.21})$$

$$\text{DTLM}_a = \frac{(T_6 - T_7)}{\ln \frac{(T_6 - T_a)}{(T_7 - T_a)}} \quad (\text{II.22})$$

h₇ : Enthalpie liquide de la solution à la température de l'absorbeur **T_a**, à la pression de l'évaporateur et à la teneur en graisse.

h₆ : Enthalpie liquide de la solution à température **T₁₀**, pression de l'évaporateur et fraction pauvre.

ṁ₇ : Débit massique de solution riche.

ṁ₆ : Débit massique de solution pauvre.

Q_a : Puissance thermique échangée de l'Absorbeur., **W=j/s.**

U_a : Coefficient de transfert thermique global de l'Absorbeur, **W/(m²°C).**

A_a : Surface d'échange de l'Absorbeur, **m².**

DTLM_a : moyenne logarithmique des écarts de température de l'Absorbeur, **°C.**

II.5.5. Pompe de solution:



Figure II- 6: Pompe de solution

❖ **Bilan massique :**

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad (II.23)$$

$$\dot{m}_7 x_7 = \dot{m}_8 x_8 \quad \longrightarrow \quad x_7 = x_8 \quad (II.24)$$

❖ Bilan enthalpique:

$$W_p = \dot{m}_8 h_8 - \dot{m}_7 h_7 \quad (II.25)$$

\dot{m}_8 : Débit de solution riche.

h_8 : Enthalpie du liquide de la solution riche à la pression du condenseur.

II.5.6. Echangeur de Chaleur :

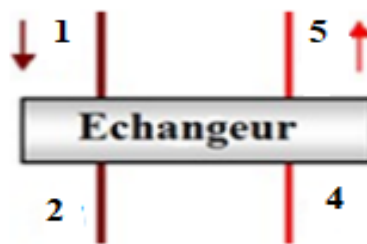


Figure II- 7: Echangeur.

❖ Bilan massique:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (II.26)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \quad (II.27)$$

$$\dot{m}_1 x_1 = \dot{m}_2 x_2 \quad (II.28)$$

$$\dot{m}_4 x_4 = \dot{m}_5 x_5 \quad (II.29)$$

❖ Équations Constitutives:

$$Q_e = U_e A_e \text{DTLM}_e \quad (\text{II.30})$$

$$\text{DTLM}_e = \frac{(T_2 - T_4) + (T_1 - T_5)}{\ln \frac{(T_2 - T_4)}{(T_1 - T_5)}} \quad (\text{II.31})$$

Q_e : Puissance thermique échangée de l'Echangeur., **W=j/s.**

U_e : Coefficient de transfert thermique global de l'Echangeur, **W/(m²°C).**

A_e : Surface d'échange de l'Echangeur, **m².**

DTLM_e : moyenne logarithmique des écarts de température de l'Echangeur, **°C.**

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation détaillée et une analyse thermodynamique pour un cycle d'absorption à simple effet avec un échangeur de solution basée sur le bilan massique enthalpique de chaque organe, la relation entre les différents débits massiques, Le modèle absorbeur NH₃/H₂O joue un rôle important dans la conception et l'optimisation des systèmes de réfrigération et de climatisation. En combinant une compréhension approfondie des propriétés thermodynamiques du couple NH₃/H₂O avec des techniques de modélisation avancées, des systèmes plus efficaces, plus durables et plus économiques peuvent être obtenus.

Chapitre III : Simulation avec le logiciel Aspen Hysys.

III.1. Introduction :

La simulation est un instrument employé dans divers secteurs de l'ingénierie et de la recherche en général, qui permet d'étudier le fonctionnement d'un système avant de le mettre en place et d'améliorer son efficacité en testant diverses solutions et conditions opératoires. Son utilisation repose sur la création d'un modèle du système, ce qui permet de créer des scénarios et d'en déduire le comportement du système physique étudié.

Il y a une multitude de logiciels pour simuler les procédés chimiques. Un certain nombre de logiciels les plus couramment utilisés à l'échelle mondiale sont présentés, tels que : (Aspen), (Chemcad), (DesignII), (Hysys), (Ideas), (Indiss), (Prosim), (ProII), (Sim42).

Le logiciel dont nous disposons est le logiciel HYSYS de la société Hyprotech qui est une filiale du groupe Aspen Tech. Le logiciel est disponible en deux versions : HYSYS Process (simulation statique) et HYSYS Plant (simulation dynamique).

III.2. La simulation :

Dans divers domaines de l'ingénierie et de la recherche en général, la simulation est un outil qui permet d'étudier le comportement d'un système avant de le mettre en place et d'améliorer son fonctionnement en testant différentes solutions et conditions opératoires. Son utilisation repose sur la création d'un modèle du système, ce qui permet de créer des scénarios afin de déduire le comportement du système physique étudié. Un modèle ne correspond pas à la réalité physique, mais il ne peut donner que les caractéristiques les plus essentielles du système étudié.

Le modèle d'un système physique peut être de différents types : du modèle de représentation qui repose uniquement sur des relations mathématiques qui traduisent les principales caractéristiques de son fonctionnement, au modèle de connaissance complexe qui découle de l'écriture des lois physiques

Encadrant les phénomènes impliqués. Le type de modèle choisi est principalement déterminé par les objectifs visés.

On peut considérer les simulateurs de procédés chimiques, qui sont couramment employés dans l'industrie chimique ou para chimique, comme des modèles de connaissance. Ils reposent sur l'analyse de bilans de masse et d'énergie, des équations d'équilibres thermodynamiques, Et peuvent fournir les informations essentielles pour la conception.

Ils sont principalement employés dans le but d'élaboration de nouvelles méthodes (dimensionnement d'appareil, analyse du fonctionnement pour diverses conditions opératoires,

optimisation), afin d'améliorer les procédés existants et d'évaluer les modifications apportées aux conditions opératoires.

III.2.1. Modes de fonctionnement des simulateurs :

Dans un simulateur, il existe deux modes de fonctionnement :

Le mode statique (ou stationnaire) et le mode dynamique.

Les simulateurs statiques vous permettent de résoudre des équations statiques qui correspondent au comportement en régime permanent (équilibre), et les simulateurs dynamiques vous permettent d'évaluer le comportement.

On observe l'évolution des variables au fil du temps en résolvant des systèmes d'équations différentielles. Les simulations industrielles les plus réputées à l'échelle mondiale concernant la thermodynamique sont :

- **Statiques** : ASPEN PLUS (Aspen Technologies), Design II de (Win Sim), Aspen HYSYS (Hyprotech), PRO/II (Simulation Sciences), PROMIS.
- **Dynamiques** : Aspen HYSYS (Hyprotech), ASPEN DYNAMICS (Aspen Technologies), Design II de (Win Sim), DEMY (Simulation Sciences Inc.)

III.2.2. Utilisation de la simulation:

Les différentes tâches qu'un simulateur de processus doit effectuer sont :

- **Domaines de conception** :
 - Les bilans de matières et d'énergie sont résolus.
 - Le calcul des dimensions des équipements.
 - L'analyse économique de la méthode.
 - L'amélioration du processus.
- **Afin de surveiller les procédés** :
 - Réadaptation des réglages de fonctionnement en cas de modifications de la composition de l'alimentation.
 - Analyse de l'efficacité des équipements.

III.3. Définition du logiciel Aspen HYSYS:

L'outil Aspen HYSYS permet de modéliser des processus de simulation en continu, de concevoir des performances, de suivre, d'optimiser et de planifier les activités pour les produits chimiques, les produits chimiques de spécialité, la pétrochimie et les industries métallurgie.

III.4. Présentation du logiciel Aspen HYSYS :

HYSYS ne se distingue pas par sa souplesse et son utilisation dans l'industrie, mais il présente l'avantage d'être convivial et simple à utiliser une fois que les éléments fondamentaux sont compris. HYSYS a été conçu pour le secteur du pétrole, mais il est également employé dans d'autres domaines chimiques. Les simulations se font à l'aide des outils des menus. De plus, il est équipé d'une interface graphique pour créer des diagrammes de flux de procédé (PDF – Diagrammes de flux de procédé).

III.4.1. Les modèles thermodynamiques de HYSYS :

III.4.1.1. Les équations d'état :

Les systèmes d'hydrocarbures et les systèmes presque idéaux sont fréquemment calculés en utilisant des modèles basés sur les équations d'état (SRK, PR etc.). Ils présentent des avantages par rapport aux autres modèles en utilisant des coefficients d'interaction-binaire. Les équations d'état sont généralement utilisées pour calculer toutes les caractéristiques des produits en fonction de la température et des fractions molaires.

III.4.1.2. Equation de REDLICH-K WONG (RK):

Considérer comme la plus simple des équations d'état, elle est très utilisée pour prédire d'état de la phase vapeur.

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{\sqrt{T} \frac{1}{V(V + b)}} \quad (\text{III. 1})$$

III.4.1.3. Equation de SOAVE-REDLICH-KWONG (SRK):

Cette équation modifiée celle de REDDITCH-KWONG, par l'introduction d'une fonction (T) qui dépend du facteur acentrique.

L'équation de SOAVE présente une forme générale similaire à celle de :

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b)} \quad (\text{III. 2})$$

SOAVE a introduit les relations suivantes pour exprimer la fonction $a(T_R)$:

$$a(T_R) = a(T_c) a(T_R) \quad (\text{III. 3})$$

Avec :

$$a(T_R) = [1 + m(1 - \sqrt{T_R})]^2 \quad (\text{III. 4})$$

Le coefficient m est calculé en fonction du facteur acentrique ω :

$$m = 0,480 + 1,574 \omega - 0,176 \omega^2 \quad (\text{III. 5})$$

III.4.1.4. Equation de PENG-ROBINSON :

La différence entre l'équation de **PENG-ROBINSON** et l'équation de **SOAVE** réside dans l'expression du concept d'attraction. Afin d'améliorer les résultats obtenus par l'équation de **SAOVE**, en particulier en ce qui concerne le calcul des densités en phase liquide, elle a été introduite sans modifier le nombre de Paramètres :

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{V(V+b)+b(v-b)} \quad (\text{III. 6})$$

Les termes (T_R) et b sont définis comme suit :

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} a(T_R) \quad (\text{III. 7})$$

La forme générale du terme (T_R) est identique à celle de l'équation de **SOAVE**.

Cependant, la relation entre le paramètre m et le facteur acentrique ω diffère :

$$m = 0.37464 + 1.54226 \omega - 0.26992 \omega^2 \quad (\text{III. 8})$$

On utilise fréquemment ces équations dans les modèles de simulation, ainsi que dans la production et le traitement de gaz.

III.5. Choix des composés (Components) :

La bibliothèque possède un grand nombre de compositions et elles sont organisées en groupes. Quand cela est envisageable, les composés peuvent être identifiés à l'aide de filtres et intégrés à la liste des composés du procédé à manipuler.

Il est envisageable que des difficultés se présentent lorsque :

- Les composés individuels du fluide ne peuvent pas être séparés, comme c'est le cas du pétrole.
- On ne trouve pas le composé dans la bibliothèque du logiciel.

Dans ces situations, il est fréquent de surmonter les difficultés en définissant un composé hypothétique, avec une quantité minimale de propriétés de base définies par l'utilisateur.

Le logiciel évaluera alors toutes les caractéristiques du composé. Au sein de ces Il est essentiel que l'utilisateur soit attentif afin de garantir que les composés se comportent correctement lors de la simulation.

III.6. Caractéristiques et concepts du simulateur Aspen HYSYS :

III.6.1. Caractéristiques principales de HYSYS:

Cette partie décrit brièvement les fonctionnalités clés qui font d'HYSYS une plateforme de simulation et de développement si puissante.

- (Environnement d'ingénierie intégré) :

Toutes les applications requises sont utilisées dans un environnement de simulation commun.

- Intègre les possibilités de modélisation en régimes stables ou stationnaires et dynamiques.

- Programmation HYSYS :

HYSYS inclut un moteur de macro interne qui prend en charge la même syntaxe que Microsoft Visual Basic.

HYSYS vous permet d'automatiser diverses tâches sans nécessiter un programme séparé.

Certaines fonctionnalités de HYSYS liées à la manière dont les calculs sont effectués sont :

- Gestion des événements (pilotée par les événements) :

HYSYS fournit des calculs interactifs (les calculs sont effectués automatiquement chaque fois que de nouvelles informations sont fournies) et un accès instantané aux informations (les informations sont accessibles à tout moment depuis n'importe quel environnement de simulation).

- Intelligence intégrée :

Les calculs des propriétés thermodynamiques sont effectués automatiquement dès que de nouvelles informations sont disponibles.

- Opérations modulaires :

Chaque flux ou unité d'opération peut effectuer tous les calculs requis en utilisant les informations spécifiées dans l'opération ou les informations envoyées par le flux.

Les informations sont envoyées dans les deux sens via des schémas de traitement.

- Algorithme de solution non séquentielle : Vous pouvez créer des organigrammes dans n'importe quel ordre.

III.6.2. Concepts de base du simulateur HYSYS :

Définir les principaux concepts fondamentaux et le vocabulaire associé utilisés lors de la phase

De construction d'un modèle dans le simulateur HYSYS.

- ``Flowsheet" : Il s'agit d'un ensemble d'objets ``Flowsheet Eléments" (Matériel Flow,).

Ceux-ci constituent tout ou partie des procédés simulés et utilisent la même base de données thermodynamique « Fluid Packages ».

Il comporte un certain nombre d'entités particulières : "Process Flow Diagram" (PFD), "Workbook"

- « Fluid Packages » :

Peut être utilisé pour définir et influencer les composants chimiques présents dans le processus simulé ainsi que les propriétés chimiques et physiques contenues dans la base d'information sur les corps purs.

Il permet également de définir des modèles thermodynamiques permettant de calculer les propriétés des mélanges et de définir la cinétique des réactions chimiques impliquées dans le procédé.

- « Process Flow Diagram » :

Ce diagramme vous permet de visualiser les flux et les opérations unitaires représentés par des symboles dans le schéma de flux, ainsi que les connexions entre les flux, les opérations unitaires et la table de propriétés.

- « Workbook »:

Il offre la possibilité d'accéder aux données sur les courants et les opérations unitaires en utilisant un tableau de données.

- « Desktop »:

Il s'agit de l'espace principal utilisé par HYSYS pour visualiser les fenêtres pendant la création.

- « Property view »:

Il renferme les données décrivant un objet (opération ou flux).

- « Cas de simulation » (fichier de modélisation) :

C'est l'ensemble des « Fluid Packages » « Flowsheets » et « Flowsheet Eléments » qui constituent le modèle.

III.7. Environnement de simulation :

Il y a 5 contextes de développement disponibles pour manipuler et représenter l'information dans le simulateur :

- **Environnement « Basis Manager »:**

Cet espace offre la possibilité de concevoir et de modifier le « Fluid Package ».

- **Environnement « Oil Caractérisation » :**

On l'emploie pour désigner les liquides de type pétrolier.

- **Environnement « Main Flowsheet »:**

Ceci permet de définir la topologie de l'organigramme principal de la simulation.

Il est utilisé pour organiser et définir les différents flux, opérations unitaires et « Sous-organigrammes » qui composent le processus simulé.

- **Environnement « Sub-Flowsheet »:**

Ceci permet de définir la topologie d'un sous-ensemble spécifique du schéma principal (opération en cours ou opérations spécifiques et autres sub-flowsheets).

- **Environnement « Column »:**

Il s'agit d'un objet spécial qui peut être utilisé pour définir la topologie de la colonne d'opération unitaire en cours de distillation.

IL passed son proper « Flowsheet », « Fluid Package », « PFD » et « Workbook ».

III.8. Les équipements utilisés pour le cas étudié :

III.8.1. La Pompe :

Un appareil mécanique qui permet de déplacer un liquide d'un endroit à un autre en augmentant sa pression.

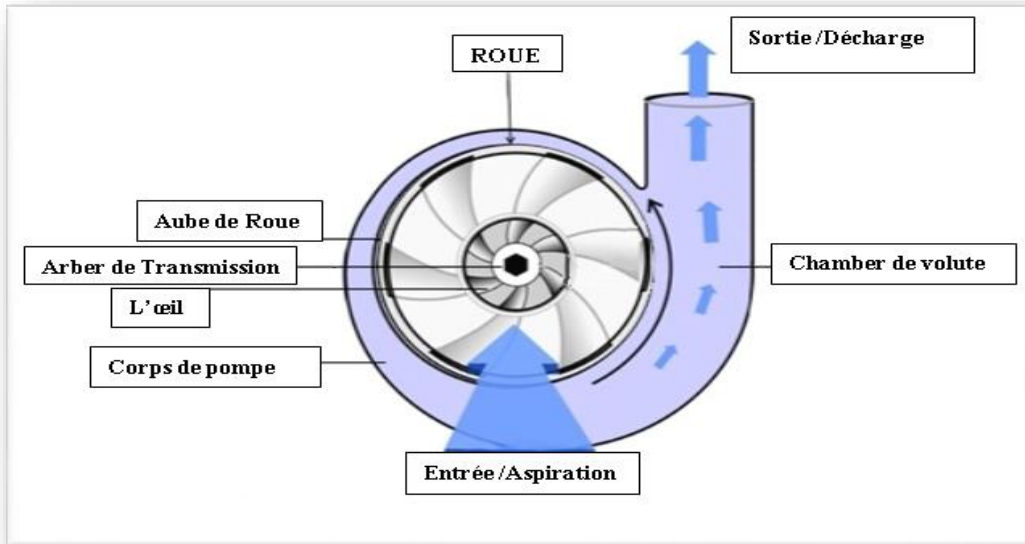
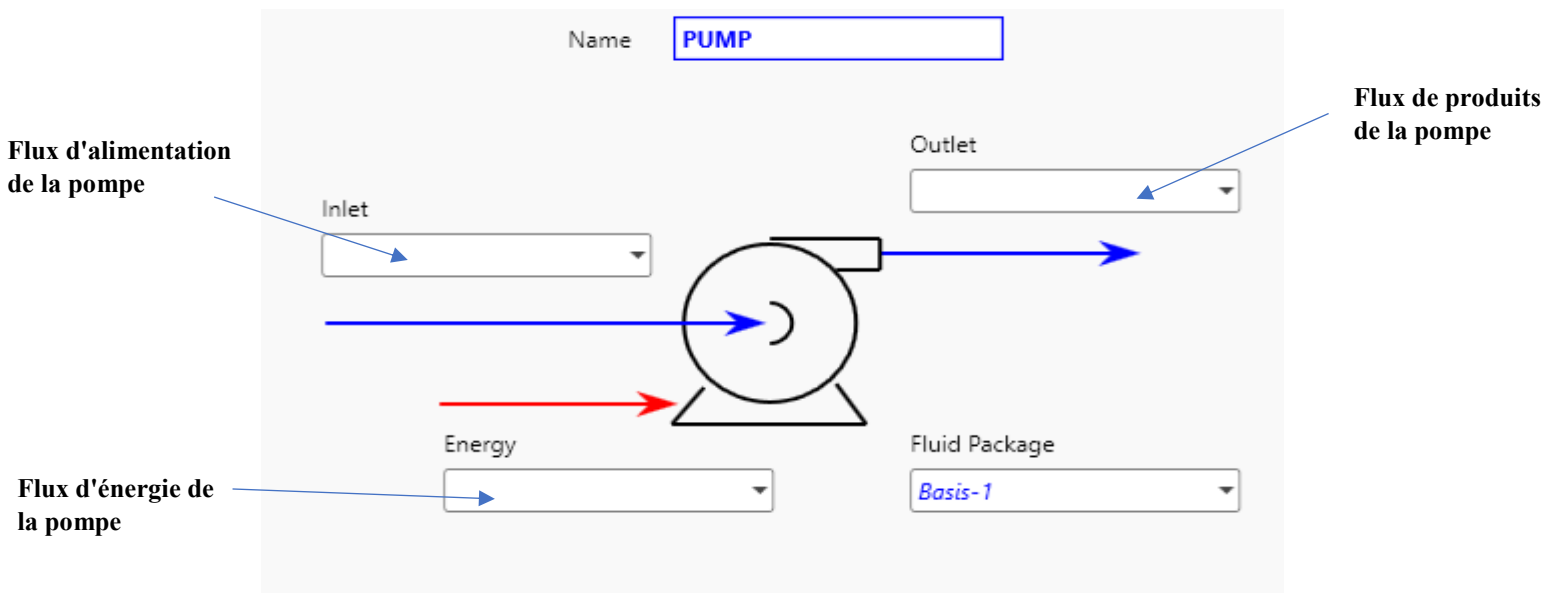


Figure III- 1: Représentation d'une pompe.

III.8.1.1. Installation d'une pompe :



III.8. 2.Echangeur de chaleur tube/calandre :

Un appareil qui permet de transmettre de la chaleur entre deux fluides. Il est constitué d'une série de tubes contenus dans une coque (ou calandre). Un liquide se déplace dans les tubes, l'autre autour des tubes et à l'intérieur de la coque.

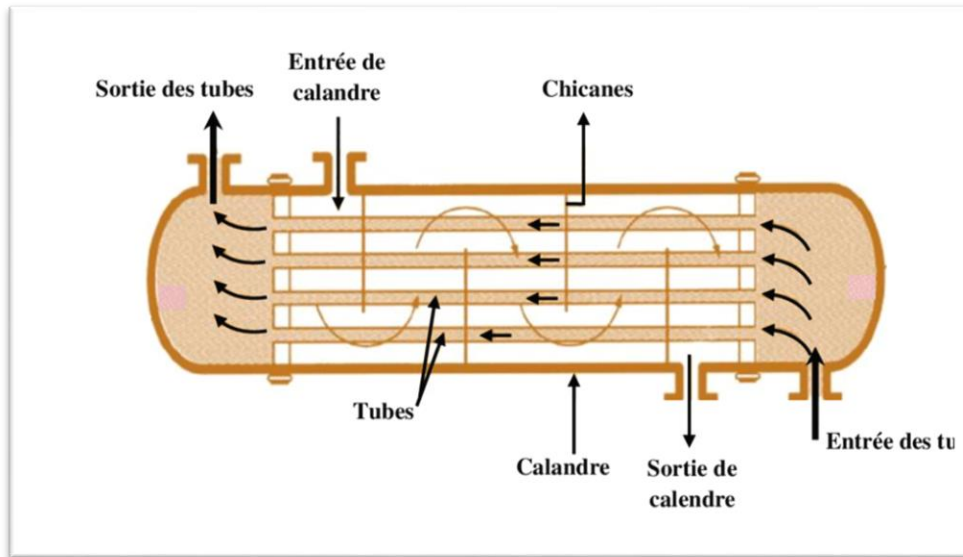
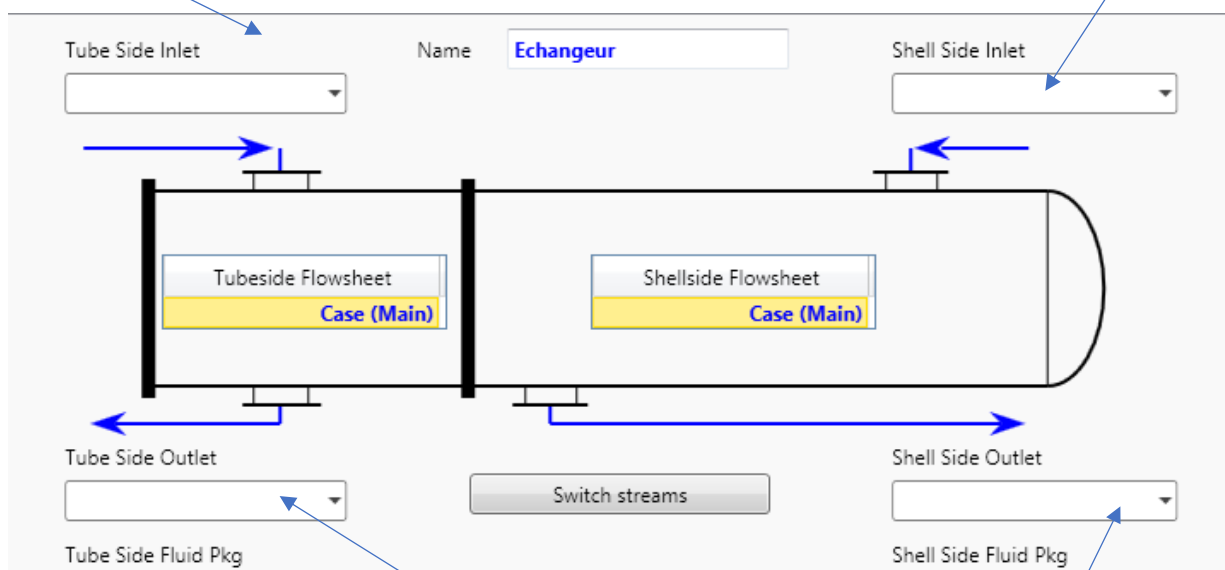


Figure III- 2: Principe d'un échangeur de chaleur tubes /Calandre

III.8.2.1. Installation de l'échangeur de chaleur tube/calandre :

Entrée côté tube

Entrée côté coque



Sortie côté tube

Sortie côté coque

III.8.3. Le Générateur :

Un élément essentiel du récepteur et un outil indispensable dans l'industrie chimique. Il sépare les composants d'un mélange liquide en profitant de leurs différences de températures d'ébullition.

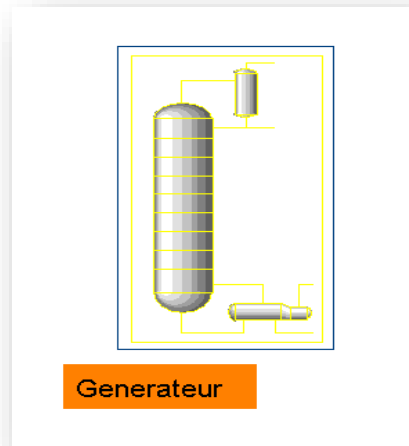
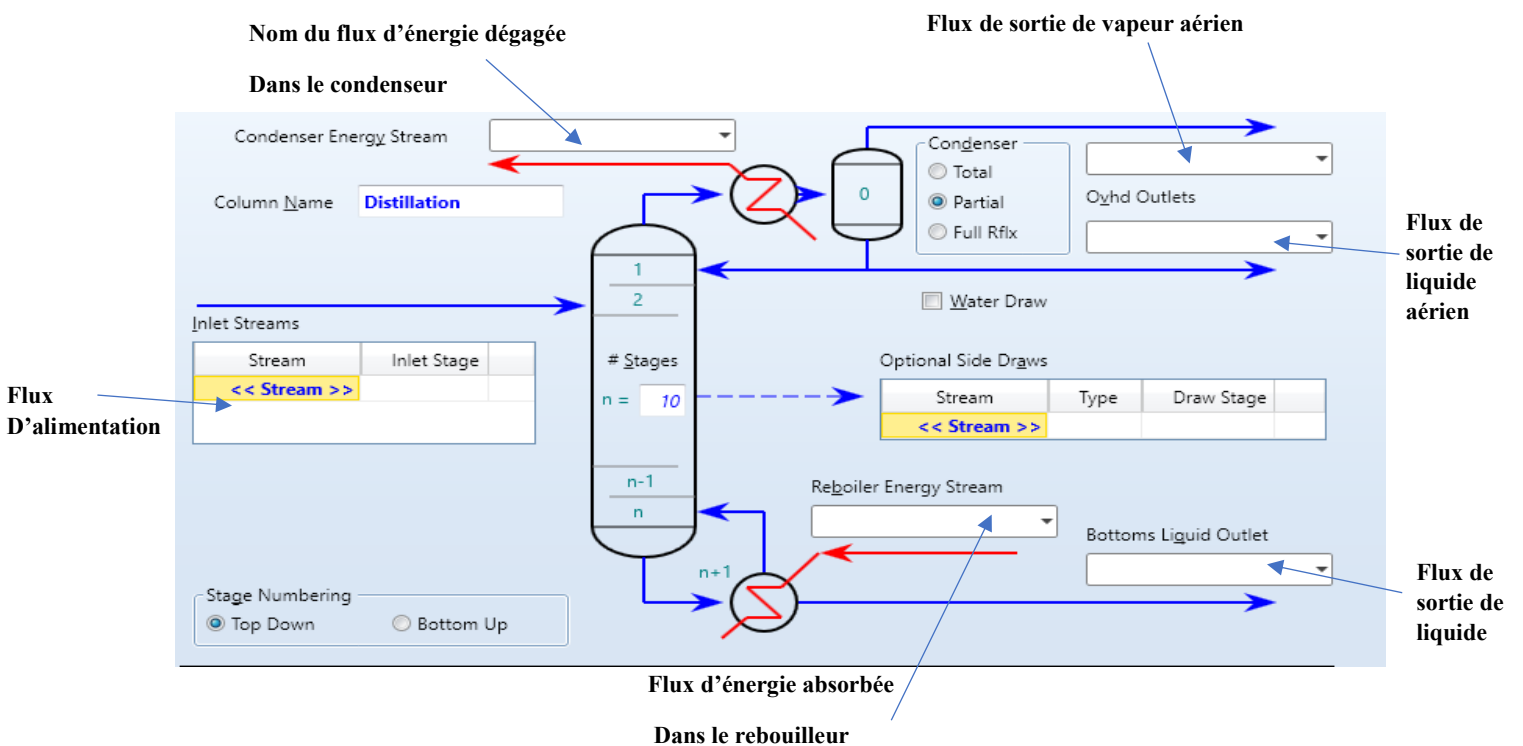


Figure III- 3: Représentation du Générateur

III.8.3.1 Installation du Générateur:



III.8.4. Mixeur :

Permet de combiner plusieurs flux en un seul flux de sortie.

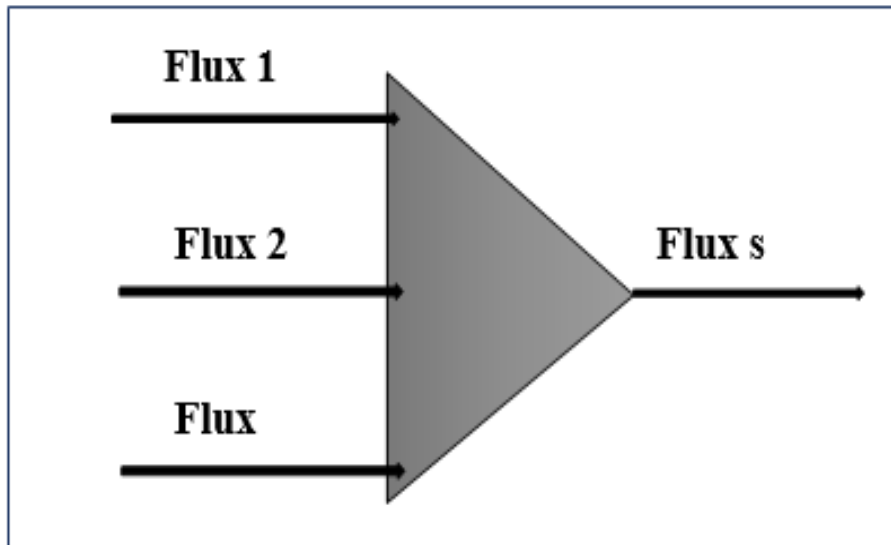


Figure III- 4: Représentation d'un mixeur.

III.8.4.1. Installation d'un mixeur :

Nom du mélangeur

Name

Inlets

- << Stream >>

Outlet

Fluid Package

Basis-1

III.8.5. Vanne de régulation :

Un dispositif automatisé qui permet de réguler le flux, la pression ou la température d'un liquide dans un système.

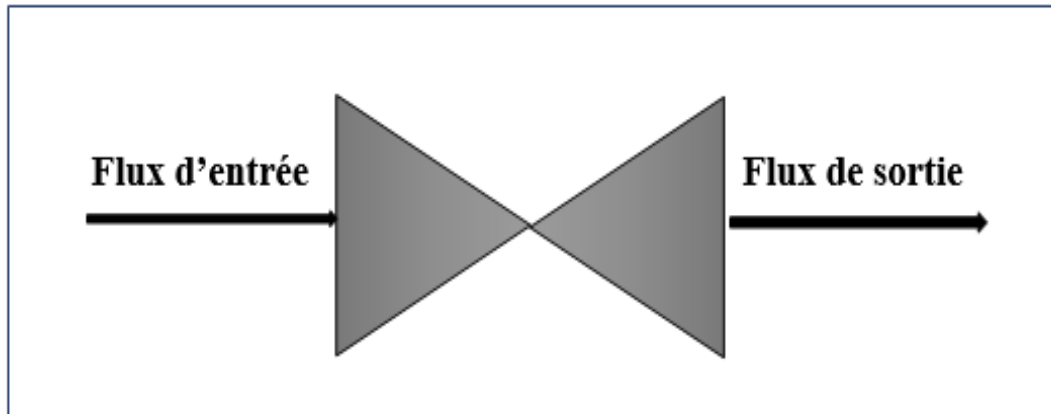


Figure III- 5: Vanne de régulation.

III.8.5.1. Installation la Vanne de régulation :

Name

Inlet

Outlet

Fluid Package

Nom de l'alimentation

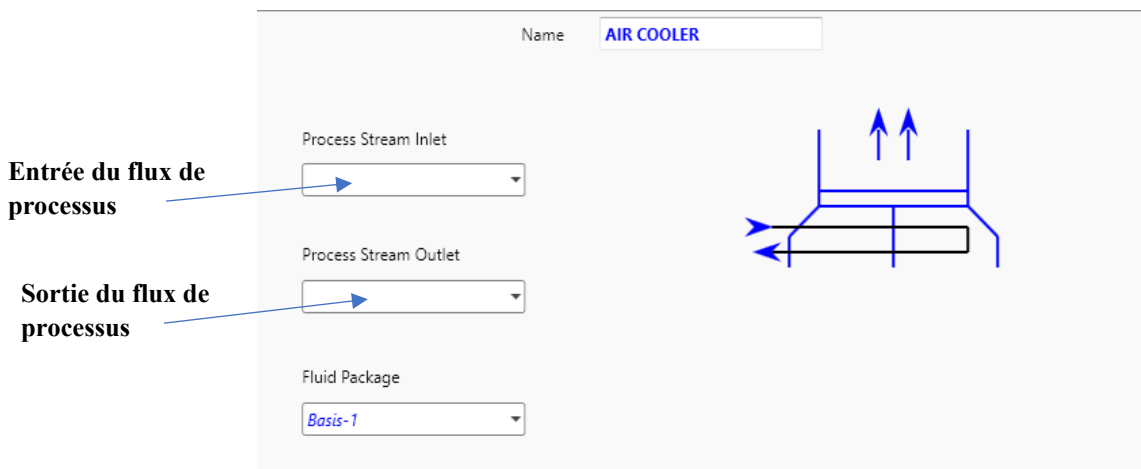
Nom de la sortie

III.8.6. Refroidisseur d'air :



Figure III- 6: Représentation Refroidisseur d'air.

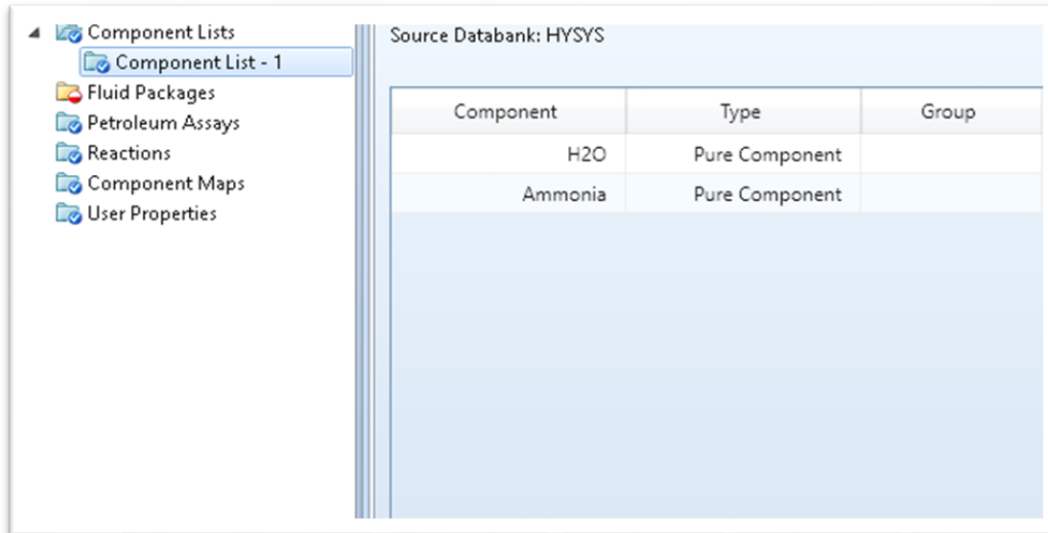
III.8.6.1. Installation Refroidisseur d'air :



III.9. Les étapes de simulation pour le cas étudié

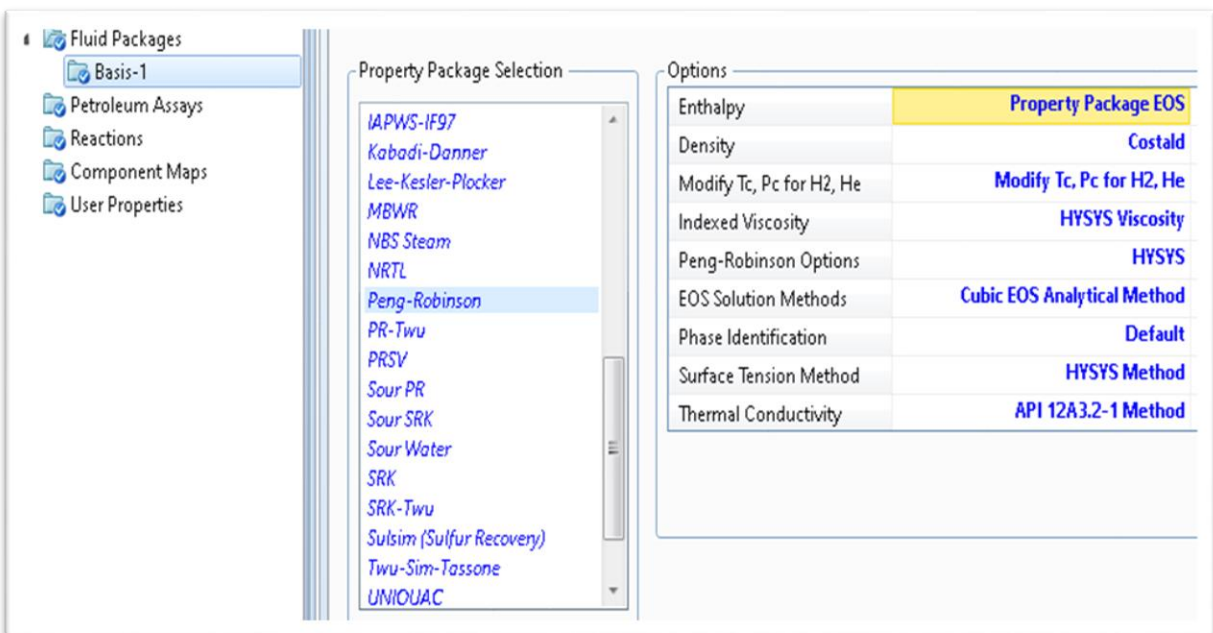
III.9.1. La première étape :

La première étape consiste à choisir les composants de ce processus, qui sont : eau-ammoniac ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$)



III.9.2. Deuxième étape :

La deuxième étape consiste à choisir l'équation thermodynamique représentée par : Equation de **PENG-ROBINSON**



L'équation de **PENG ROBINSON** est la plus préconisée pour les systèmes d'hydrocarbures,

Car elle permet de résoudre efficacement les problèmes d'équilibre et de résolution des problèmes, La prédiction de densités liquides est plus fiable que les autres équations en ce qui concerne les valeurs réelles.

III.9.3. La troisième étape :

Cela implique de créer un diagramme de processus à l'aide d'un logiciel de simulation comme montré dans la figure (III.7) et de faire les spécifications et les valeurs dont nous avons besoin. Nous exécutons ensuite le programme.

La Table III.1 présente les différents éléments de la machine utilisés dans ASPEN HYSYS ainsi que les données d'entrée pour ces éléments dans le cas d'une température de l'air de 35 °C.

Éléments de la machine	Valeurs d'entrée
Point d'état 1	Pression (bar)= 4,936 bar Température (°C) = 45,2°C Débit massique total (kg/h) = 90,718 kg /h Fraction de vapeur = 0 Fraction massique de NH ₃ = 0,437 Fraction massique de H ₂ O = 0,563
Pompe	Rendement isentropique = 1 Haute pression = 22,38 bar Perte de pression = 0 bar
Échangeur de chaleur de la solution (SHX)	Température de sortie du fluide chaud =115°C Perte de pression = 0 bar
Échangeur de chaleur de refroidissement (RHX)	Perte de pression = 0 bar
Générateur	Ratio massique de reflux = 0.03 La pression du condenseur = 22.38 bar La pression du rebouilleur = 22.38 bar Perte de pression = 0 bar La masse de vapeur = 35.65 kg/ h La masse de liquide = 55.04 kg/h

Condenseur	Pincement de temperature =13,5°C Temperature d'air =35°C Perte de pression = 0 bar
Absorbeur	Pincement de temperature =8,5°C Perte de pression = 0 bar
Evaporateur	Pincement de temperature = 2,5 °C Perte de pression = 0 bar Eau : temperature d'entrée =12°C Fraction de vapeur = 0

Tableau III- 1:Éléments de machine avec l'ensemble de données d'entrée.

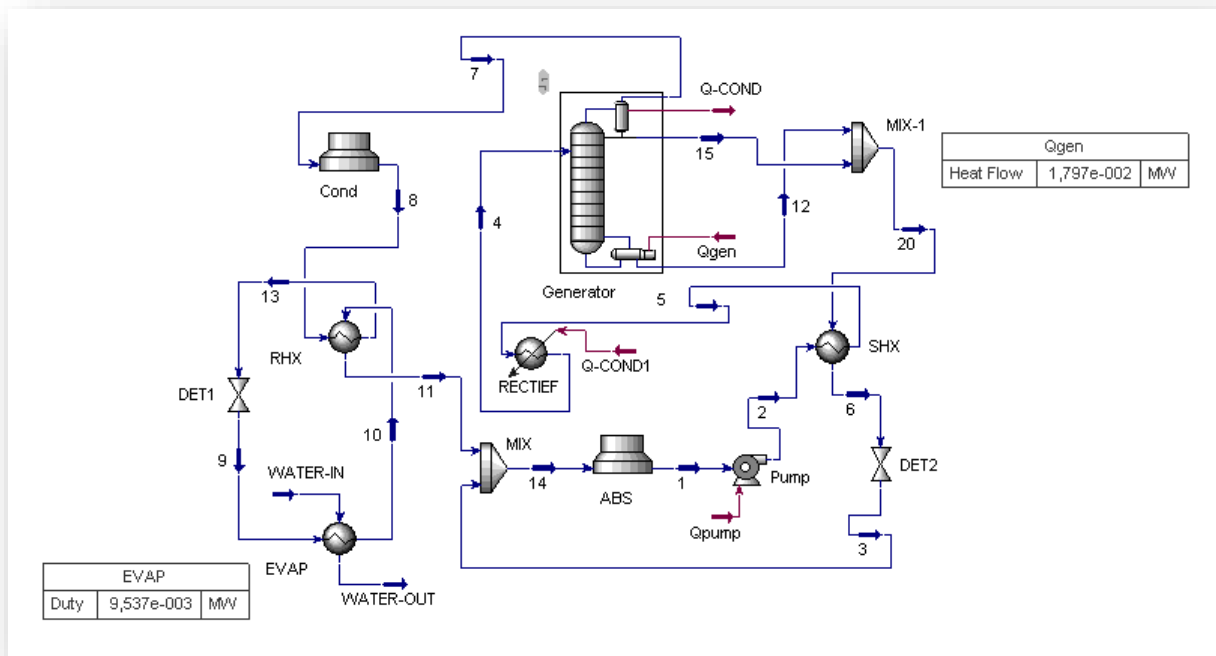


Figure III- 7: Simulation d'un système de réfrigération à Absorption (NH₃/H₂O) avec logiciel Aspen HYSYS

III.9.4. La quatrième étape :

Interprétation des résultats, Cette étape consiste à rédiger et analyser les résultats obtenus dans ce processus.

III.10. Conclusion :

Ce chapitre donne un aperçu de la modélisation par simulation, du fonctionnement des simulateurs et de leur rôle sur le terrain.

Quant à l'étude pratique, nous avons choisi de la réaliser à l'aide du logiciel Aspen HYSYS.

Chapitre IV : Résultats de la simulation et discussions.

IV .1. Introduction :

Ce chapitre présente les résultats d'une simulation numérique d'un système de réfrigération par absorption ammoniacque-eau. La modélisation a été effectuée à l'aide des logiciels Aspen HYSYS, permettant d'obtenir les caractéristiques thermodynamiques et les performances du cycle à différents points de fonctionnement.

IV .2. Principaux paramètres des différents points du cycle de la machine à absorption liquide (NH₃/H₂O) :

Le tableau présente les résultats d'une simulation du modèle Aspen-HYSYS à 35°C, montrant les valeurs de pression, température, fraction de vapeur, débit massique, et fraction massique de NH₃ à dans tous les points du système.

Point D'état	De	A	Pression (bar)	Température (°C)	Fraction de vapeur	Débit massique (kg/h)	NH ₃ fraction massique (%)
1	Absorber	Pump	4.936	43.45	0	90.72	43.70
2	Pump	SHX	22.38	43.58	0	90.72	45.09
3	DET2	Mixer	4.936	115.3	0	55.07	9.48
4	Rectief	Générateur	22.38	111.4	0.0489	90.72	45.09
5	SHX	Rectief	22.38	92.32	0	90.72	47.38
6	SHX	DET2	22.38	115	0	55.07	9.48
7	Générateur	Condenser	22.38	102.4	1	35.65	97.29
8	Condenser	H-EXCH	22.38	48.50	0	35.65	97.43
9	DET1	Evaporateur	4.936	4.931	0.0909	35.65	97.43
10	Evaporateur	H-EXCH	4.936	9.450	0.8324	35.65	97.43
11	H-EXCH	Mixer	4.936	14.85	0.9008	35.65	97.43
12	Générateur	Mixer-1	22.38	194.1	0	55.07	9.47
13	H-EXCH	DET1	22.38	28.66	0	35.65	97.43
14	Mixer	Absorber	4.936	89.3	0.2853	90.72	45.09
15	Générateur	Mixer 1	22.38	102.4	0	2.520e-2	47.38
20	Mixer-1	SHX	22.38	194.1	0	55.07	9.01

Tableau IV- 1:Résultats de simulation du modèle Aspen-HYSYS à une température de l'air de refroidissement 35°C

Les données expérimentales rapportées par Klein [22] et les résultats de simulation obtenus par Mansouri et al. [21] sont utilisés pour valider notre modèle Aspen-Hysys. Les paramètres de validation employés sont : le COP (coefficient de performance), les puissances échangées et les températures mesurées à différents emplacements dans la machine.

IV. 3. Coefficient de performance en fonction de puissance.

Le tableau IV.2 montre les puissances thermiques dans les principaux composants de la machine à absorption et le COP rapportés par Klein [22] ainsi que les valeurs obtenues dans le présent travail. En ce qui concerne les puissances thermiques, l'erreur maximale est observée dans le générateur, qui est inférieure à 6 %. L'erreur obtenue dans le COP est d'environ 5,35 %

Paramètre	Valeurs de la présente étude	Valeurs de Klein [22]	Erreur relative (%)
Q générateur (kW)	17,97	17	5.7
Q évaporateur (kW)	9,537	9.59	0.55
Q condenseur ((kW)	12,69	-	-
Q absorbeur (kW)	14,11	-	-
COP	0.53	0,56	5.35

Tableau IV- 2: Comparaison des performances entre notre étude et l'étude expérimentale de Klein [22] .

La comparaison montre une bonne corcordane entre les deux études, ce qui montre la robustesse du modèle proposé et simulé sur Aspen Hysys.

IV.4. La variation de température :

Dans le tableau IV.3 et la Figure (IV.1) les valeurs de température obtenus par mansouri et al [21] dans leur simulation sur Aspen Plus sont comparées aux valeurs correspondantes obtenues dans le présent travail.

Point D'état	ASPEN-PLUS Simulation Température (°C)	ASPEN-HYSYS Simulation Température (°C)
1	45,2	43,45

2	46,6	43,58
3	115,3	115,3
4	108,1	111,4
5	64,3	92,32
6	115	115
7	105,6	102,4
8	48,5	48,50
9	4,9	4,931
10	9,5	9,450
11	16,7	14,85
13	24	28,66
14	76	89,3
20	192,6	194,1

Tableau IV- 3:Écart de température entre les résultats de simulation de Mansouri et al [21] et notre simulation à 35°C

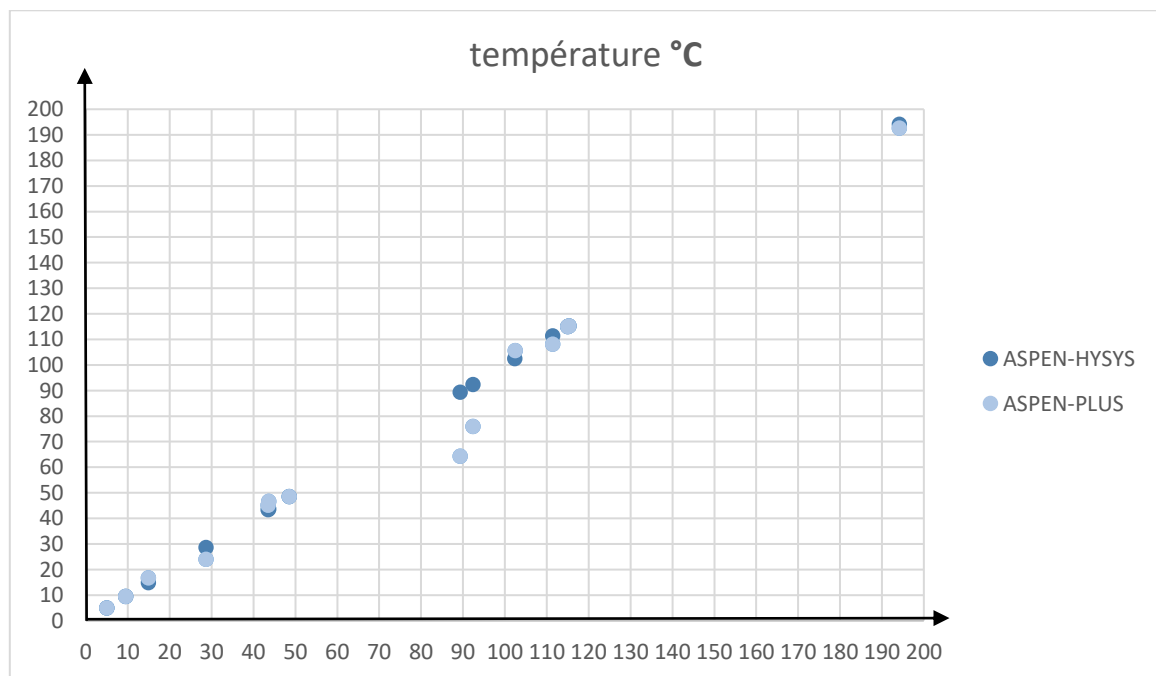


Figure IV- 1: Variation de température entre les résultats de simulation de Mansouri et al [21] et notre simulation à 35°C

Cette comparaison montre une bonne concordance entre les résultats du modèle Aspen-Hysys et les résultats de simulation de Mansouri et al, à l'exception de deux points de mesure, à savoir : 5 (solution riche en ammoniac sortante de l'échangeur de chaleur intermédiaire entre le générateur et la pompe) pour lequel la différence de température est supérieure à 20 °C et 14 (solution pauvre en ammoniac entrant dans l'absorbeur) pour lequel la différence de température est supérieure à 10 °C. hormis ces deux points qui ne sont pas de bonne qualité les deux points restants sont en bon accord. Les résultats commentés ci-dessus valident le modèle développé dans Aspen-Hysys pour la machine à absorption ammoniac/eau.

IV.5. Les valeurs (U A) des échangeurs de chaleurs :

Échangeur de chaleur	ASPEN HYSYS [UA](W/C)	ASPEN PLUS [UA](W/C)
Condenseur	378,89	390
Évaporateur	4083,33	3304.9
Absorbeur	658,61	630
Echangeur de chaleur de refroidissement (RHX)	40,28	55.09

Tableau IV- 4: Valeurs (UA) des échangeurs de chaleur calculées à une température d'air de refroidissement de 35 °C

Dans une première partie nous avons essayé de comparer les valeurs de (UA) des échangeurs de chaleur qui interviennent dans notre modèle avec celui de l'étude de Mansouri et al. Nous avons constaté qu'il y a un bon accord entre les valeurs des échangeurs de chaleur à air, à savoir : le condenseur et l'absorbeur, contrairement aux échangeurs de chaleur tubes et calandre utilisées pour modéliser l'évaporateur et l'échangeur de refroidissement.

En deuxième partie nous avons refait la simulation en utilisant les valeurs de (UA) comme des inputs de départ et nous avons tombé sur les mêmes résultats de températures et de coefficient de performance. Sur la base de ces résultats, il est conclu que la version de ce modèle qui inclut les valeurs de (UA) des différents échangeurs de chaleur en tant que paramètres d'entrée pourrait

être très utile pour prédire les conditions de fonctionnement internes et le coefficient de performance de la machine à absorption en tenant compte de la taille réelle des échangeurs de chaleur.

IV.6. Analyse de sensibilité des performances d'un système :

L'analyse de sensibilité est une technique cruciale utilisée pour évaluer la robustesse et la fiabilité des modèles et systèmes complexes. Elle permet de comprendre comment les changements dans les variables d'entrée affectent les résultats, en identifiant les facteurs les plus influents et en quantifiant leur impact.

Variable	Température de l'eau d'entrée (°C)	Pression du Evaporateur (Bar)	Débit massique de l'eau (Kg/s)	Q Evaporateur (KW)
Valeur de base	11.95	4.936	0.4548	9.537

Tableau IV- 5:: les valeur base de la simulation aspes hysys

Pourcentage De Changement	Variable	Valeur	Q Évaporateur (kw)	Augmentation de la capacité %
-5%	T	11.35	8.367	-0.012
	P	4.6892	9.658	+0.001
	m	0.4320	9.062	-0.005
+5%	T	12.55	10.71	+0.012
	P	5.1828	9.392	-0.0015

	\dot{m}	0.4775	10.02	+0.005
--	-----------------------------	---------------	--------------	---------------

Tableau IV- 6: Analyse de sensibilité des performances à l'augmentation des paramètres de conception .

D'après le tableau 5 et 6, il semble s'agir d'une analyse de sensibilité d'un système thermique, probablement un échangeur de chaleur ou un système de réfrigération. Le tableau 6 montre comment les performances du système, en particulier le taux de transfert de chaleur de l'évaporateur et la capacité du système, sont affectées par des modifications de certains paramètres de conception.

Ces paramètres sont la température (T), la pression (P) et le débit massique (\dot{m}). Une diminution ou une augmentation de 5 % de ces paramètres entraîne des changements dans les performances du système. Par exemple, une augmentation de 5 % de la température entraîne une augmentation du taux de transfert de chaleur de l'évaporateur et de la capacité du système.

Ce type d'analyse est crucial pour la conception et l'optimisation des systèmes thermiques. Il aide les ingénieurs à comprendre comment des changements dans les paramètres de conception peuvent avoir un impact sur les performances du système, ce qui peut guider la prise de décision dans la conception et l'exploitation du système.

Il est important de noter que les impacts spécifiques dépendront de la nature exacte du système et du contexte dans lequel il est utilisé. Par conséquent, une analyse et une interprétation plus poussées seraient nécessaires pour comprendre pleinement les implications de ces résultats.

IV .7. Conclusion :

Le chapitre 4, intitulé "Résultats de la simulation et discussions", fournit une analyse complète des performances du système dans des conditions spécifiques, en particulier à une température de l'air de refroidissement de 35°C. Les résultats du chapitre, principalement présentés dans le tableau 1, donnent des indications précieuses sur le comportement et l'efficacité du système dans ces conditions.

Cependant, le chapitre pourrait bénéficier d'une discussion plus détaillée des résultats présentés dans les tableaux 2 et 3. Cela permettrait d'obtenir une compréhension plus globale des performances du système dans un éventail plus large de conditions.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'objectif principal de cette recherche était d'examiner les systèmes de réfrigération à absorption et d'approfondir leurs principes de fonctionnement, leurs avantages, leurs contraintes ainsi que le processus de modélisation et de simulation de ces systèmes. Les sections suivantes présentent les principaux points saillants abordés dans chaque chapitre.

Dans ce chapitre, nous avons présenté un examen approfondi des systèmes de réfrigération à absorption, en nous concentrant spécifiquement sur ceux qui utilisent des mélanges NH₃/H₂O. Ces machines présentent un grand potentiel en tant que solution durable pour la production de froid. Cependant, il reste encore des obstacles à surmonter, notamment le coût et la nécessité d'améliorer les performances.

L'utilisation de la modélisation mathématique a facilité une compréhension plus approfondie de la fonctionnalité des machines à absorption et l'amélioration de leur efficacité. L'objectif principal était de construire un modèle résilient capable d'évaluer et de prévoir les performances des machines dans différentes circonstances opérationnelles.

Des recherches sur l'utilisation de la simulation, en utilisant spécifiquement le logiciel Aspen HYSYS, ont été entreprises pour examiner et améliorer la fonctionnalité des systèmes de réfrigération à absorption. La simulation offre la possibilité d'évaluer différentes approches et paramètres de fonctionnement avant la mise en œuvre réelle, ce qui entraîne une conception améliorée du système et une efficacité accrue.

En présentant et en analysant les résultats de la simulation, nous avons pu examiner l'efficacité du système de réfrigération à absorption dans divers scénarios. Cette analyse nous a permis d'identifier les facteurs clés qui ont un impact sur l'efficacité et de suggérer des améliorations pour maximiser les performances.

La viabilité et la durabilité des systèmes de réfrigération à absorption pour répondre aux exigences de refroidissement ont été présentées dans cette étude. En utilisant la modélisation mathématique et la simulation informatique, une compréhension plus complète de ces systèmes a été obtenue, conduisant à l'identification de domaines à améliorer pour faciliter leur mise en œuvre généralisée dans diverses industries. La recherche et le développement continus sont essentiels pour surmonter les obstacles existants et optimiser les avantages offerts par les machines à absorption.

Références bibliographiques

- [1] Sergio Hanriot, Pedro Brito, Cristiana Maia, Attenister Rêgo, Attenistie Régo, analyse des paramètres de fonctionnement d'un système de réfrigération à absorption d'eau à l'ammoniaque alimenté par des gaz d'échappement automobiles, université de minas Gérais, Brazil, 2019.
- [2] M. Wirtz, H.T. Phan, B. stutz, F. Boudehenn, Modélisation numérique d'un générateur à plaques et filins tombants pour machine à absorption NH₃/H₂O, Université Grenoble alpes, CEA, LITEN, DTBH. F-38000 Grenoble, France, 2018.
- [3] A. Khaliq and K. Rajesh, "Exergetic analysis of solar powered absorption refrigeration system using LiBr-H₂O and NH₃-H₂O as working fluids," International Journal of Exergy, vol. 4, pp. 1–18, 2007.
- [4] N. BenEzzine, M. Barhoumi, K. Mejbri, S. Chemkhi, and A. Bellagi, "Solar cooling with the absorption principle: First and Second Law analysis of an ammonia-water double-generator absorption chiller," Desalination, vol. 168, pp. 137–144, 2004.
- [5] K. Mejbri and a. Bellagi, "Modelling of the thermodynamic properties of the water–ammonia mixture by three different approaches," International Journal of Refrigeration, vol. 29, no. 2, pp. 211–218, Mar, 2006.
- [6] D. Kong, "Thermodynamic and Experimental Analysis of an Ammonia-Water Absorption Chiller," Energy and Power Engineering, vol. 02, no. 04, pp. 298–305, 2010.
- [7]. Kalkan, E. A. Young et A. Celiktas, « Solar thermal air conditioning technology reducing the footprint of solar thermal air conditioning, » Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, p. 6352–6383, 2012.
- [8] A. A. Al-Alili, Y. Hwang et R. Radermacher, « Review of solar thermal air conditioning technologies, » International Journal of Refrigeration, vol. 39, p. 4–22, 2014.
- [9] O. Ayadi, M. Aprile et M. Motta, « Solar cooling systems utilizing concentrating solar collectors-An overview, » Energy Procedia, vol. 30, p. 875 – 883, 2012.

- [10] H. Tabor, « Use of Solar Energy for Cooling Purposes, » Solar Energy, vol. 6, pp. 136-142, 1962.
- [11] C. Schein, R. Radermacher, Scroll compressor simulation model. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power 123 (2001) Pages 217-225.
- [12] Marynowski T, Etude expérimentale et numérique d'un écoulement supersonique dans un éjecteur avec et sans flux induit, Université de Sherbrooke, 200.
- [13] Akteriana S, Improving the energy efficiency of traditional multi-stage steam-jet ejector vacuum systems for deodorizing edible oils, 11th International Congress on Engineering and Food, 2011.
- [14] Mohamed Amziane, Etude Comparative Entre Les Systèmes De Climatisation Classiques Et Solaires Application à La Climatisation d'un Immeuble, thèse de magister, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2014.
- [15] F. Yettou1, A. Gama, C. Hamouda et A. Malek, « Revue des Energies Renouvelables », publication du n°3 du volume 19 de la revue des énergies, 2008.
- [16] F. Allab, « étude et conception d'un dispositif de réfrigération magnétique base sur l'effet magnéto-calorique », thèse pour obtenir le grade de docteur en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, Mai 2008.
- [17] C. A. Dhoub, « Dynamics modelling and simulation of a photovoltaïque réfrigération plant
», Renewable Energy, May 2002.
- [18] Castaing-Lasvignottes, J. "Aspects thermodynamiques et technico-économiques des systèmes à absorption liquide."CNAM, Institut Français du froid industriel 51, 2001.
- [19] EE IIT, Kharagpur, India ,2008.
- [20] El May, S., Boukholda, I. and Bellagi, A. (2011) 'Energetic and exergetic analysis of a commercial ammonia–water absorption chiller', Int. J. Exergy, Vol. 8, No. 1, pp.33–50.
- [21] R. Mansouri et al. / Energy 93 (2015) 2374e2383
- [22] Klein 1982