

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR



ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : installation énergétique et turbomachine

Par :

Hamida Amina

Larbi Cherif Mohamed Adel

Thème

**EVALUATION ENERGETIQUE ET EXERGETIQUE D'UN SYSTEME DE
REFRIGERATION PAR ABSORPTION**

Soutenu le 25/06/2025 devant le jury composé de :

Mr	SADAoui Djamel	Président
Mr	BOUTALBI Nadir	Rapporteur
Mr	HAMTACHE Brahim	Examineur

Année universitaire :2024/2025

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : HANIDA
Prénom : ANINA
Matricule : 171733001141
Spécialité et/ou Option : Installation Energetique et Turbomachine
Département : Genie Mecanique
Faculté : Science et Technologie
Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master

Intitulé : Evaluation Energetique et Exergetique d'un Systeme
de Refrigeration par absorption

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
29/10/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes règlementaires)

Populaire et Démocratique Algérienne République
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Déclaration sur l'honneur
Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans
l'élaboration d'un travail de recherche

Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020 (*)
fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat

Je soussigné,

Nom : LARBI Cherif.....
Prénom : Mohamed ADEL.....
Matricule : 181833000974.....
Spécialité et/ou Option : Installation Energetique et Turbomachine.....
Département : Genie Mecanique.....
Faculté : Science et Technologie.....
Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (Licence, Master, Autres à préciser) : Master.....

Intitulé : Evaluation Energetique et Exergetique d'un Systeme
de Refrigeration par absorption.....

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques,
et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans
l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le
29/10/2025

Signature de l'intéressé

(*) Lu et approuvé

(*) Arrêté ministériel disponible sur le site www.univ-bejaia.dz/formation (rubrique textes règlementaires)

Remerciements

Un grand merci à tous ceux qui ont contribué pour la réalisation de ce mémoire.

Bien évidemment je m'adresse à notre encadrant Mr.BOUTALBI Nadir Qui a toujours cru en nous, son dévouement au travail est un exemple pour chacun de nous rare sont les personnes avec une telle persévérance. L'admiration l'oblige.

Ainsi je ne peux oublier nos très chère assistance celle qui s'acharnes au département. Toujours à l'écoute et à notre disposition, alors merci à elles car mine de rien ce n'est pas facile.

Et sans oublie tous les enseignements qui grâce à eux nous sommes là aujourd'hui.

Dédicace

*La patience est un arbre dont la racine est amère, Mais dont les fruits sont doux.
Sur ces paroles, Je dédier ce mémoire, À ma persévérance, Ainsi à toutes les personnes qui
mon soutenues.*

Sommaire

Remerciements	i
Dédicace	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	vi
Nomenclature	vii
Introduction générale	1
Chapitre I : Rappel théorique et analyse du système de la réfrigération par absorption	3
I.1. Introduction	3
I.2. Typologies des systèmes de réfrigération	4
I.2.1. Typologies des systèmes de réfrigération	4
I.2.2. Systèmes mécano-frigorifiques	5
a. Système à compression de vapeur	5
b. Système thermoélectrique	6
I.2.3. SYSTEMES THERMO-FRIGORIFIQUE	6
a. Système adsorption et thermochimique	7
b. Système a éjection	8
c. Système par absorption	9
I.3. Avantages et Inconvénients de la réfrigération par absorption	9
I.3.1. Avantages	9
I.3.2. Inconvénients	10
I.4. Principe de fonctionnement du système réfrigération par absorption	10
I.4.1. Le fonctionnement des machines frigorifique a absorption :	11
a. Le fonctionnement des différents organes	11
i.Evaporateur :	11
ii.Générateur :	12
iii.Absorbeur :	12
iv.Pompe :	13
v.Régénérateur :	14
vi.Condenseur :	15
vii.Détendeur :	16
b. Mode de fonctionnement	16
I.5. Cycle thermodynamique	18
I.5.1. Thermodynamique	18

I.5.2. Principe thermodynamique de la réfrigération.....	18
a.Premier principe de la thermodynamique	18
b.Deuxième principe de thermodynamique	19
I.6. Cycle thermodynamique.....	19
I.6.1. Différents cycles d'absorption	19
a. Système a absorption a plusieurs effets	19
b. Système a absorption a simple effet.....	20
I.7. Fluides frigorigènes.....	20
I.7.1. Propriété des fluides frigorigènes.....	20
I.7.2. Ammoniac	21
I.7.3. Avantage et inconvénient du fluide d'ammoniac.....	21
I.7.4. Ammoniac mélangé a l'eau.....	21
I.8. Conclusion.....	22
Chapitre II : Modélisation et analyse thermodynamique	23
II.1. Introduction.....	23
II.2. Modélisation	23
II.2.1. Importance de la modélisation dans les machines frigorigènes par absorption..	23
II.2.2. Schéma du cycle modélisé	24
II.2.3. Hypothèses	25
II.3. Analyse Energétique et Exégétique	26
II.3.1. Analyse Energétique	26
a. Bilan de Masse	26
b. Bilan énergétique	27
II.3.2. Analyse exégétique	28
a. Bilan d'exergie	29
i. Condenseur (points 1-2)	29
ii. Bilan d'exergie - détenteur (points 2-3)	29
iii. Bilan d'exergie – évaporateur (points 3-4).....	29
iv. Bilan d'exergie - absorbeur (points 4-5-10)	29
b. Méthode globale d'évaluation	29
i. Pompe (5-6).....	30
ii. Régénérateur (6-7-8-9)	30
iii. Générateur thermique (7-8-1).....	30
iv. Détendeur (9-10).....	30
v. Performance du cycle	30
II.4. Indicateurs de performance appliqués au système $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$	30
II.4.1. Coefficient de performance (COP)	31

II.4.2. Facteur d'utilisation de l'énergie (UEF)	31
II.4.3. Efficacité exégétique.....	32
II.5. Outils et logiciels de modélisation.....	32
II.5.1. Thermoptim.....	32
II.5.2. Engineering Equation Solver (EES)	33
II.5.3. MATLAB.....	33
II.6. Conclusion	35
Chapitre III : Application au système de réfrigération par absorption à simple effet....	36
III.1. Introduction	36
III.2. Présentation du système étudié.....	36
III.3. Hypothèses de modélisation.....	38
III.4. Méthodologie de simulation.....	39
III.5. Conclusion.....	41
Chapitre IV : Etude des effets de température et discussion finale	42
IV.1. Introduction	42
IV.2. Etude de l'effet de la température de l'évaporateur	43
IV.3. Etude de l'effet de la température de condenseur	46
IV.4. Etude de l'effet de la température de l'absorbeur	49
IV.5. Comparaison avec la littérature scientifique.....	51
IV.5.1.Température de l'évaporateur	51
IV.5.2.Température du condenseur	52
IV.5.3.Température de l'absorbeur	52
IV.6.Conclusion.....	53
Conclusion générale	54
Références bibliographiques	56
Abstract	Erreur ! Signet non défini.
Résumé	Erreur ! Signet non défini.
المخلص	Erreur ! Signet non défini.

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma d'un système à compression	5
Figure I.2 : Schéma d'un système adsorption et thermochimique.....	7
Figure I.3 : Schéma d'un système a éjection.....	8
Figure I.4 : Schéma d'un système par absorption	9
Figure I.5 : Schéma d'un évaporateur	11
Figure I.6 : Schéma d'un générateur	12
Figure I.7 : Schéma d'un absorbeur	12
Figure I.8 : Schéma d'une pompe.....	13
Figure I.9 : Schéma d'un évaporateur	14
Figure I.10 : Illustration d'un condenseur	15
Figure I.11 : Illustration d'un détendeur.....	16
Figure I.12 : La fonction d'un système réfrigérant par absorption.....	16
Figure I.13 : cycle d'un système de réfrigération par absorption	19
Figure II.1 : Schéma du cycle de réfrigération par absorption $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$	24
Figure IV.1 : Évolution du COP en fonction de la température de l'évaporateur pour différentes températures du générateur	43
Figure IV.2 : Évolution du rendement exergetique en fonction de la température de l'évaporateur pour différentes températures du générateur	44
Figure IV.3 : Évolution de l'irréversibilité totale en fonction de la température de l'évaporateur pour différentes températures du générateur	45
Figure IV.4 : Évolution du COP en fonction de la température du condenseur pour différentes températures du générateur	46
Figure IV.5 : Évolution du rendement exergetique en fonction de la température du condenseur pour différentes températures du générateur	47
Figure IV.6 : Évolution de l'irréversibilité totale en fonction de la température du condenseur pour différentes températures du générateur	48
Figure IV.7 : Évolution du COP en fonction de la température de l'absorbeur pour différentes températures du générateur	49
Figure IV.8 : Évolution du rendement exégétique en fonction de la température de l'absorbeur pour différentes températures du générateur	50
Figure IV.9 : Évolution de l'irréversibilité totale en fonction de la température de l'absorbeur pour différentes valeurs de T_{gen}	51

Nomenclature

Symboles	Définition	Unité (SI)
cop	: Le coefficient de performance	-
ex	: L'exergie spécifique	kJ kg^{-1}
h	: L'enthalpie	kJ kg^{-1}
I	: Irréversibilité	$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
\dot{m}	: Débit massique	kg s^{-1}
η	: Le rendement	-
\dot{Q}	: Flux thermique	kW
s	: L'entropie	$\text{kJ kg}^{-1}\text{K}^{-1}$
T	: Température	K
w	: Le travail reçu	KJ
x	: Concentration massique	-

Indices

Symboles	Définition
ab	: Absorbeur
cd	: Condenseur
evap	: Evaporateur
gen	: Générateur
p	: Pompe
tot	: Totale
v	: Volume

Introduction

Introduction générale

La maîtrise des transferts thermiques et des cycles frigorifiques constitue un enjeu central dans le développement de technologies énergétiques durables, notamment dans les secteurs de la réfrigération, de la climatisation et du conditionnement d'air. Aujourd'hui, la majorité des systèmes domestiques et industriels reposent encore sur des cycles à compression mécanique, fortement dépendants de l'énergie électrique et utilisant des fluides frigorigènes dont plusieurs présentent un impact environnemental négatif, tant sur le réchauffement climatique que sur la couche d'ozone(O_3).

Face aux contraintes environnementales croissantes, à la hausse du coût des énergies fossiles et à la nécessité de limiter les émissions de gaz à effet de serre, il devient impératif d'adopter des alternatives plus écologiques. Les systèmes de réfrigération par absorption, qui appartiennent à la famille des cycles à sorption (absorption et adsorption), s'inscrivent pleinement dans cette logique. Ces systèmes utilisent des fluides naturels tels que l'eau, l'ammoniac ou encore certains alcools, réputés pour leur faible impact environnemental. De plus, ils permettent le recours à des sources thermiques renouvelables ou résiduelles, telles que l'énergie solaire, la biomasse ou la chaleur fatale industrielle, en substitution de l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement d'un compresseur.

Le principe de fonctionnement repose sur la circulation d'un fluide frigorigène au sein d'un cycle thermodynamique, assurée non pas par une compression mécanique, mais par un processus d'absorption thermique, couplé à une pompe à faible consommation. Ce fonctionnement permet d'envisager des configurations plus robustes, silencieuses et autonomes, particulièrement adaptées aux zones à ressources énergétiques limitées ou non raccordées au réseau électrique. Dans les régions arides ou fortement ensoleillées, comme le Sahara, la réfrigération solaire par absorption apparaît comme une solution prometteuse, la demande en froid coïncidant avec les périodes de fort ensoleillement [1].

Parmi les couples de fluides fréquemment utilisés, le système ammoniac-eau (NH_3 - H_2O), se distingue par des propriétés thermo physiques favorables. Le premier permet de fonctionner à des températures relativement basses et présente un bon rendement énergétique, tandis que le second est largement utilisé dans les systèmes à simple effet pour la climatisation. Cependant, la performance de ces systèmes reste conditionnée par de nombreux paramètres de fonctionnement, notamment les températures de l'évaporateur, du générateur,

du condenseur et de l'absorbeur. L'ajout d'un échangeur récupérateur (ou régénérateur) entre les circuits de la solution pauvre et de la solution riche permet également d'améliorer le COP (Coefficient de Performance), bien que cette amélioration dépende fortement des conditions de fonctionnement.

Dans ce contexte, la modélisation et l'analyse thermodynamique approfondie des cycles à absorption prennent tout leur sens. Plusieurs chercheurs, ont démontré l'intérêt croissant de ces systèmes en lien avec les objectifs de durabilité énergétique. Des travaux de simulation avancés, basés sur la conservation de la masse, de l'énergie et de l'exergie, permettent de mieux comprendre les phénomènes d'irréversibilité, d'identifier les pertes internes et de cibler les leviers d'optimisation.

Le présent travail s'inscrit dans cette dynamique. Il a pour objectif de développer une modélisation rigoureuse d'un système de réfrigération par absorption à simple effet, basé sur le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, à l'aide du logiciel Engineering Equation Solver (EES). Après avoir formulé les bilans énergétiques et exergétiques de chaque composant, une étude paramétrique sera réalisée pour analyser l'influence de différents facteurs sur les performances globales du cycle. Enfin, les résultats seront comparés à ceux de la littérature scientifique, afin de valider la modélisation et d'identifier les possibilités d'amélioration.

Chapitre I

Rappel théorique et analyse du système de la réfrigération par absorption

I. Rappel théorique et analyse du système de la réfrigération par absorption

I.1. Introduction

L'usage de la réfrigération remonte à l'Antiquité, époque à laquelle l'homme exploitait des procédés naturels pour conserver les denrées périssables. On retrouve notamment l'emploi de grottes ou de lieux humides comme espaces de stockage, tirant parti des basses températures ambiantes. Au Moyen Âge, les caves jouaient un rôle similaire, servant de garde-manger dans les habitations. Ce n'est qu'à la Renaissance que l'usage de la glace se généralise pour rafraîchir les boissons ou prolonger la durée de conservation des aliments.

Le principe fondamental de la réfrigération est de réduire la température d'un espace par extraction de chaleur a ainsi toujours été présent dans les civilisations humaines, bien avant les premières avancées scientifiques. Nos ancêtres associaient souvent les basses températures naturelles à l'utilisation de blocs de glace pour obtenir des effets de refroidissement rudimentaires.

De nos jours, le domaine de la réfrigération couvre un large éventail d'applications, tant industrielles que domestiques. Le marché connaît une croissance soutenue, stimulée par les besoins liés à l'alimentation, à la santé, au transport de denrées sensibles ou au confort thermique [2]. Les technologies modernes s'appuient sur les lois fondamentales de la thermodynamique pour produire du froid de manière contrôlée et efficace.

L'évolution de la réfrigération est marquée par des découvertes majeures et des innovations technologiques, que l'on peut résumer chronologiquement comme suit :

- **1805** : Présentation par Oliver Evans d'un prototype de machine frigorifique à compression d'éther fonctionnant en cycle fermé.
- **1824** : Publication du traité de Sadi Carnot, posant les bases des deux principes fondamentaux de la thermodynamique.
- **1844** : John Gorrie conçoit une machine à détente d'air pour la production de froid.
- **1850** : Gorrie obtient un brevet anglais ; son invention suscite une vive polémique aux États-Unis.

- **1854** : James Harrison met au point le premier réfrigérateur fonctionnel basé sur la compression de vapeur.
- **1858** : Charles Tellier développe une machine à circulation d'ammoniac liquéfié.
- **1859** : Ferdinand Carré brevète la première machine frigorifique à absorption.
- **1865** : Tellier installe une machine à compression chez le chocolatier Menier.
- **1872** : David Boyle obtient un brevet pour un compresseur à ammoniac.
- **1876** : Le navire '*Le Frigorifique*' transporte de la viande réfrigérée de Rouen à Buenos Aires.
- **1913** : Commercialisation du premier réfrigérateur domestique (*Domelre*).
- **1919** : Lancement de la marque *Frigidaire*.
- **1931** : Début de la fabrication industrielle de réfrigérateurs par *Electrolux*.
- **1938** : Introduction du premier groupe frigorifique pour remorques par *Thermo King*.
- **1939** : Conception du premier réfrigérateur à double compartiment (températures différenciées).
- **1944** : Développement du réfrigérateur à absorption par la société suisse *Sibir*.
- **1997** : Le prix Nobel de physique récompense la technologie de refroidissement par laser.
- **1998** : *Daewoo* commercialise un réfrigérateur à porte à cristaux liquides ("miroir magique").
- **1999** : Apparition des premiers prototypes de réfrigérateurs solaires à adsorption, utilisés en Afrique.
- **2002** : Plus de 99 % des foyers sont équipés de réfrigérateurs à usage domestique.

I.2. Typologies des systèmes de réfrigération

I.2.1. Typologies des systèmes de réfrigération

On distingue généralement deux grandes catégories de systèmes de réfrigération, selon le type d'énergie utilisée pour leur fonctionnement :

- **Les systèmes de réfrigération mécanique**, qui consomment de l'énergie mécanique (souvent d'origine électrique) pour actionner un compresseur. Ces systèmes sont les plus répandus dans les applications domestiques et industrielles classiques.
- **Les systèmes de réfrigération thermique**, qui fonctionnent principalement grâce à une source de chaleur (énergie thermique) et reposent sur des procédés tels que l'absorption, l'adsorption ou encore l'éjection. Ils sont particulièrement adaptés aux environnements où la chaleur est disponible en abondance ou récupérable à faible coût (solaire, biomasse, chaleur résiduelle) [03].

I.2.2. Systèmes mécano-frigorifiques

Les systèmes mécano-frigorifiques sont les plus largement utilisés en réfrigération, notamment pour les applications domestiques, commerciales et industrielles. Leur fonctionnement repose sur l'utilisation d'un apport d'énergie mécanique (généralement électrique) pour assurer la circulation d'un fluide frigorigène dans un cycle thermodynamique fermé.

On distingue principalement deux types : les systèmes à compression de vapeur, les plus courants, et les systèmes à cycle de gaz. À ceux-ci s'ajoutent les systèmes thermoélectriques, qui utilisent l'électricité selon un principe différent, sans pièces mécaniques mobiles.

a. Système à compression de vapeur

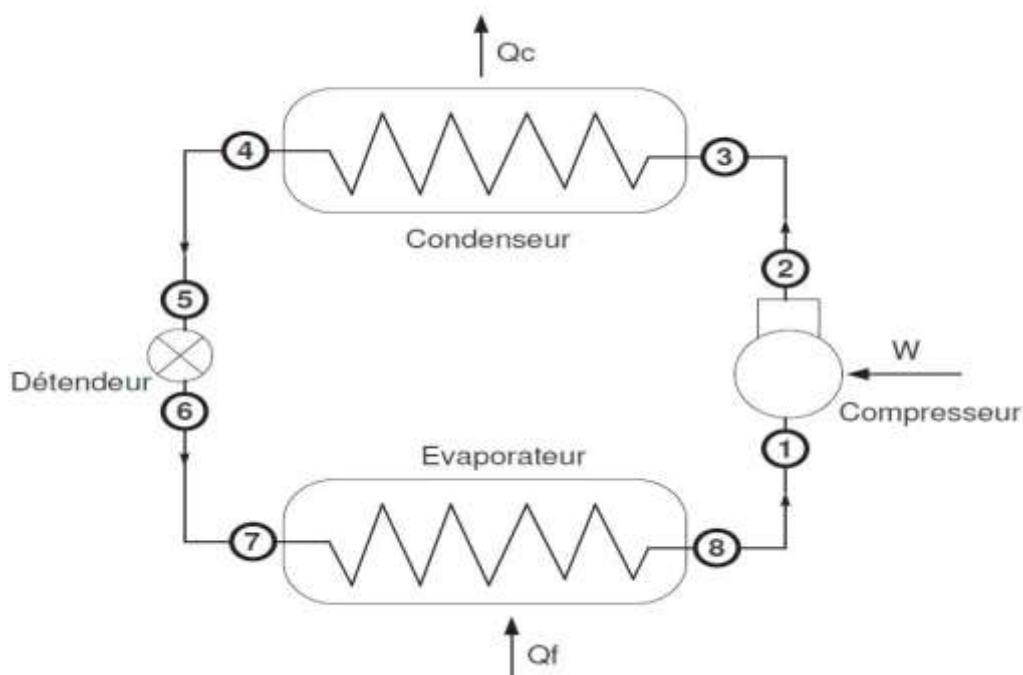


Figure I.1 : Schéma d'un système à compression

Le réfrigérant (le fluide actif du cycle frigorifique) s'évapore dans l'évaporateur, produisant un refroidissement utile. La vapeur ainsi produite est aspirée et comprimée par un compresseur mécanique. Elle est ensuite évacuée vers le condenseur où elle est liquéfiée. Le liquide ainsi obtenu est renvoyé à l'évaporateur via un régulateur (ou détendeur). Ce système est de loin le plus courant.

Système utilisant des cycles à gaz

Ici, le fluide de travail reste à l'état gazeux pendant le cycle de réfrigération. Le gaz est comprimé pour se réchauffer, puis refroidi à température ambiante sous pression, puis détendu pour abaisser sa température [04].

b. Système thermoélectrique

Les systèmes de refroidissement thermoélectriques utilisent l'effet Peltier pour transférer la chaleur. Un courant électrique crée une différence de température entre les deux faces du module. La face froide absorbe la chaleur de l'environnement à refroidir, tandis que la face chaude la dissipe.

Rappelons juste Le principe de base est l'effet Peltier, qui est le phénomène de transfert de chaleur lorsqu'un courant électrique traverse un matériau thermoélectrique (comme un module Peltier) [05]. Une jonction (point de contact) entre les deux matériaux se refroidit, tandis que l'autre jonction chauffe.

I.2.3. SYSTEMES THERMO-FRIGORIFIQUE

Un système thermo-frigorifique est un ensemble de composants qui utilisent les principes de la thermodynamique pour produire du froid ou transférer de la chaleur. Ces systèmes sont utilisés dans les climatisations, les réfrigérateurs, les congélateurs, les chambres froides et les pompes à chaleur.

a. Système adsorption et thermochimique

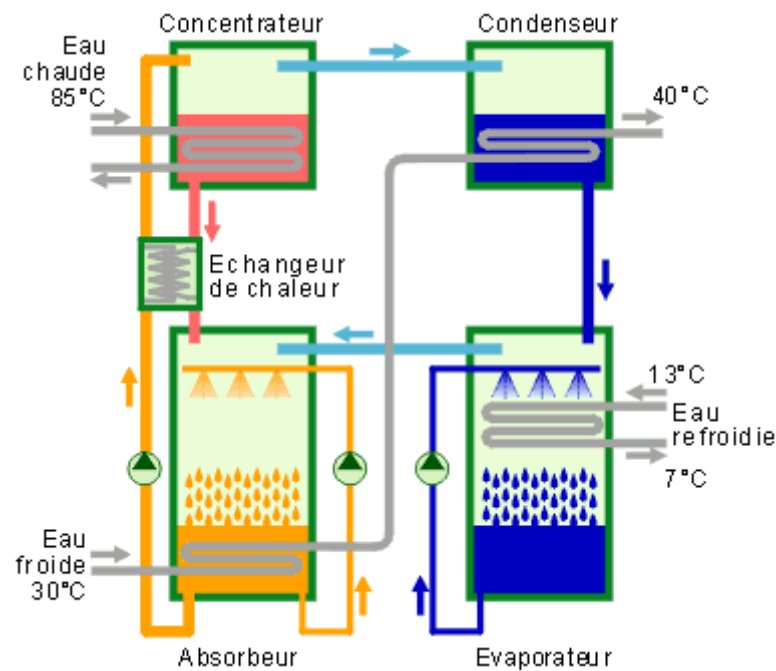


Figure I.2 : Schéma d'un système adsorption et thermochimique

Ils ont fait leur apparition plus tard, principalement durant la première moitié du 20^e siècle. Leur mode d'opération repose sur les effets thermiques qui surviennent lors de la sorption ou la désorption physique d'un gaz sur un solide (systèmes à adsorption), ou encore lors de la création ou décomposition,

La continuité naturelle de la composition chimique avec un gaz frigorigène (systèmes thermo-chimiques) est interrompue[06]. Actuellement, ils font l'objet de nombreuses études, bien qu'ils soient encore peu utilisés.

b. Système a éjection

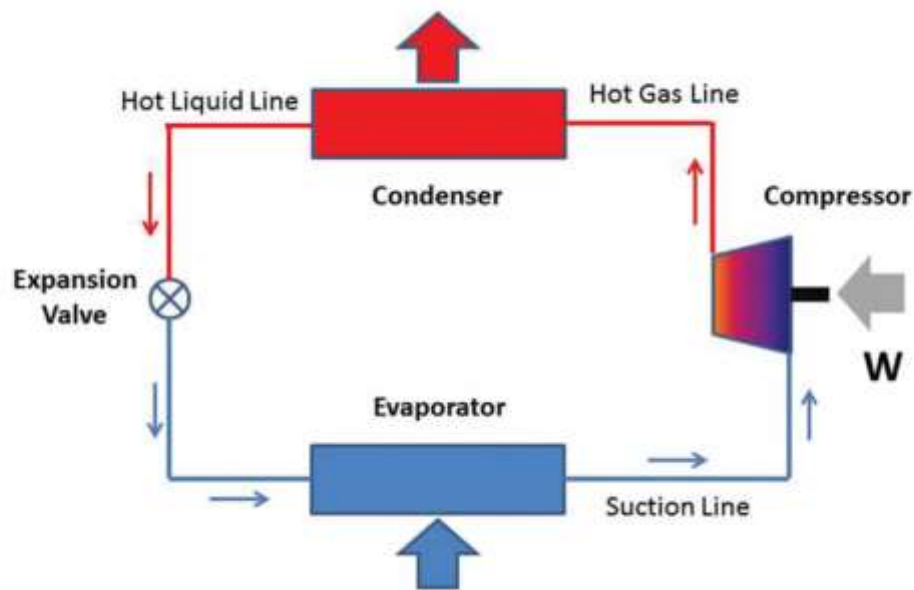


Figure I.3 : Schéma d'un système a éjection

L'abaissement de température de l'eau, qui se vaporise sous basse pression est obtenue en aspirant la vapeur formée au moyen d'un éjecteur, ou trompe, alimenté par un jet de vapeur vive provenant d'une chaudière. L'éjecteur est une tuyère d'abord convergente.

L'accroissement de la vitesse du jet diminue la pression, ce qui permet l'aspiration voulue (puis lentement divergente) l'augmentation progressive de la section offerte à la vapeur ralentit sa vitesse et la pression remonte. Ce système qui a des créneaux d'utilisation bien spécifique est peu répandu.

c. Système par absorption

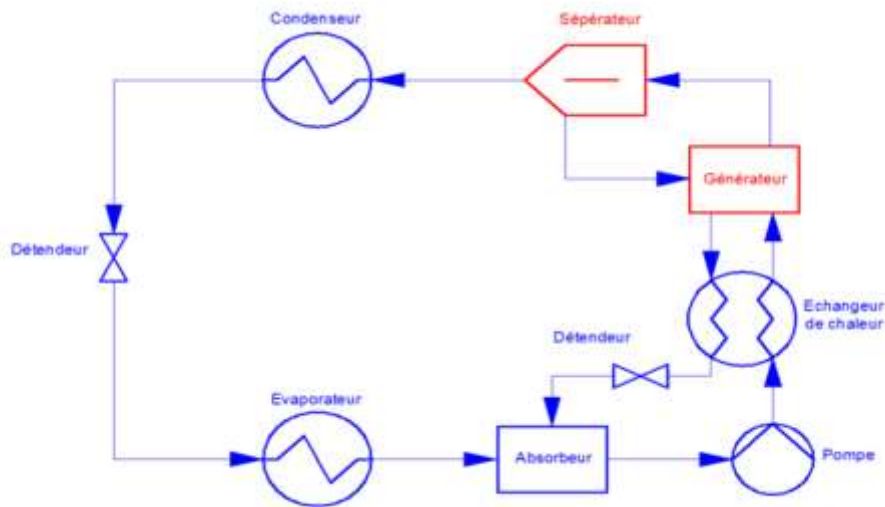


Figure I.4 : Schéma d'un système par absorption

Même si leur importance est considérablement moindre par rapport aux systèmes à compression, ce sont actuellement les uniques installations thermo-frigorifiques qui connaissent une certaine progression. Dans ce système, la circulation du fluide frigorigène n'est pas assurée par un compresseur mécanique, mais par le transport, via une pompe, d'un liquide absorbant dont la concentration en frigorigène absorbé est influencée par la température et la pression. Le système nécessite peu de travail mécanique, cependant il consomme de la chaleur en contrepartie.

I.3. Avantages et Inconvénients de la réfrigération par absorption

I.3.1. Avantages

- Une source de chaleur peut être utilisée comme énergie : du gaz naturel, la biomasse et l'énergie solaire.
- Avantageux pour les endroits sans électricité voir très peu.
- Sans bruit, car il ne contient pas de compresseur mécanique.
- Constituer de pièces mobiles compare à des systèmes de maintenance classique, la maintenance est réduite.
- Pas de contrainte au niveau du déplacement, l'utilisation est possible dans des endroits insolites [07].

I.3.2. Inconvénients

- Rendement énergétique faible, le cop faible (Ce qui donne une performance faible vis-à-vis a la réfrigération classique).
- Temps de refroidissement plus long.
- Le cout initial élevé.
- Moins adapté aux usage domestiques du a ses capacités et ses performances.
- Pas fonctionnel sans source d'énergie(chaleur) constante ou continue.
- Système complexe [07].

I.4. Principe de fonctionnement du système réfrigération par absorption

La réfrigération par absorption est un procédé thermodynamique de production de froid qui utilise une source de chaleur pour transférer un fluide frigorigène à travers un cycle, remplaçant ainsi le compresseur mécanique utilisé dans les systèmes à compression de vapeur conventionnels et plus courants.

Ce système fonctionne en cycle fermé dans lequel le fluide frigorigène passe de l'état liquide à l'état gazeux pour produire du froid, tandis que l'absorbant assure son transport thermique à travers le système.

Dans ce procédé repose un couple de fluide frigorigène et absorbant, un exemple avec la solution ammoniac et eau. Le fluide frigorigène ici est l'ammoniac tandis que l'eau est l'absorbant.

La caractéristique de ce procédé est qu'il crée et produit du froid à partir d'énergie thermique [05], ce qu'il le rend particulièrement adapté lorsqu'on dispose d'une source de chaleur.

I.4.1. Le fonctionnement des machines frigorifique a absorption :

a. Le fonctionnement des différents organes

i. Evaporateur :

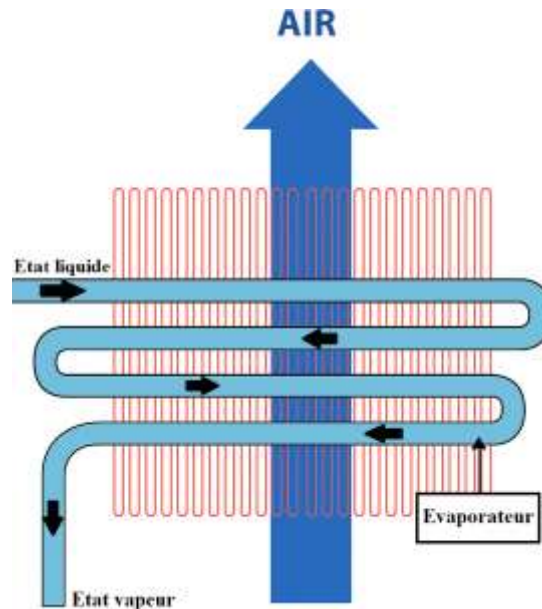


Figure I.5 : Schéma d'un Evaporateur

L'évaporateur est un appareil d'échange thermique qui exploite fluide pour capter la chaleur d'un autre environnement (tel que l'air dans une salle). Ce mécanisme de transfert thermique convertit le liquide en gaz (vapeur). Dans notre système l'évaporateur va produire l'effet frigorifique a base pression et basse température s'évapore en absorbant la chaleur du milieu a refroidir.

ii. Générateur :

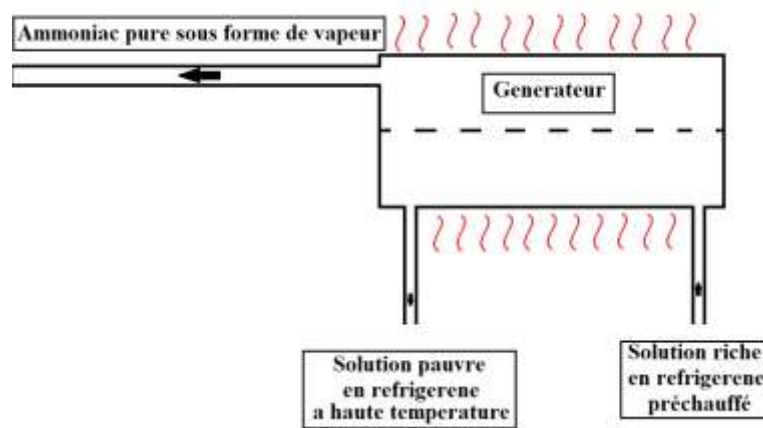


Figure I.6 : Schéma d'un Générateur

En physique, un générateur est un dispositif qui transforme une forme d'énergie en une autre, généralement en énergie électrique. Il peut être de nature électrique, thermique, mécanique, entre autres, et sert à produire de l'électricité ou à générer d'autres formes d'énergie. Pour obtenir une solution pauvre en frigorigène, celui-ci se sépare du liquide absorbant sous forme d'une vapeur pure, grâce à une source de chaleur qui chauffe la solution.

iii. Absorbeur :

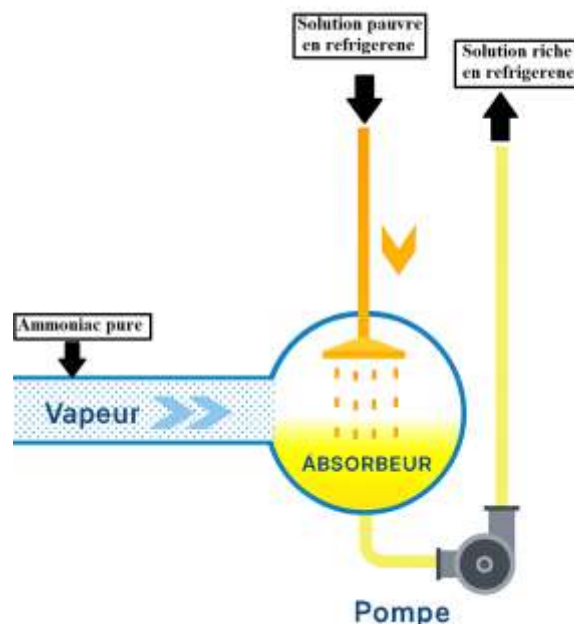


Figure I.7 : Schéma d'un Absorbeur

Dans un système de réfrigération à absorption, l'absorbeur joue un rôle clé en permettant la réabsorption du réfrigérant vaporisé sous basse température et pression. Il le mélange avec l'absorbant afin de créer une solution concentrée qui sera par la suite dirigée vers le générateur pour régénérer le cycle. Le fluide devient concentré en frigorigène car ce dernier est absorbé par un liquide absorbant.

iv. Pompe :

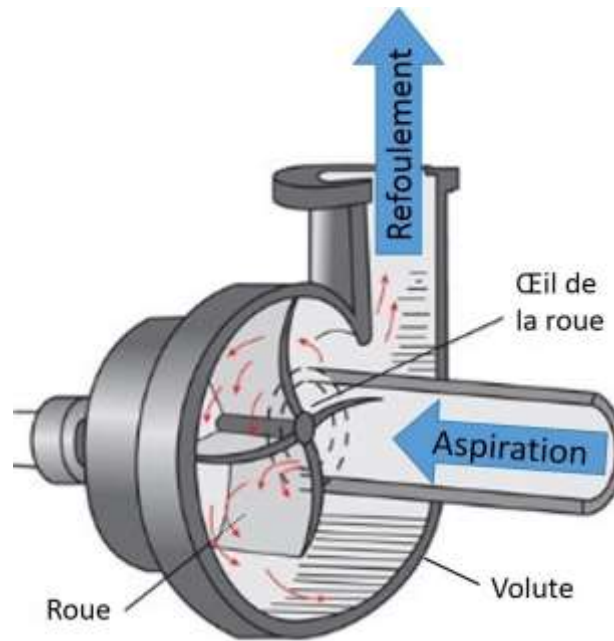


Figure I.8 : Schéma d'une pompe

En général, les pompes opèrent en établissant un écart de pression entre l'entrée et la sortie. Cet écart incite le fluide à circuler à travers la pompe et en direction de son lieu de destination. Ici la pompe va envoyer le fluide à haute pression vers le générateur.

v. Régénérateur :

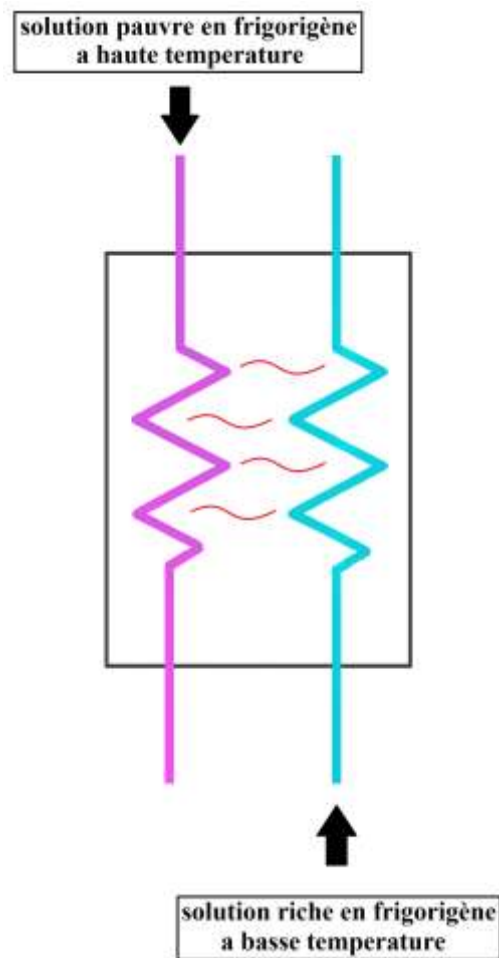


Figure I.9 : Schéma d'un évaporateur

Un récupérateur, également appelé régénérateur dans certains contextes, est un dispositif destiné à améliorer l'efficacité des cycles thermodynamiques en assurant un échange de chaleur interne. Dans un système de réfrigération par absorption, il permet d'utiliser la chaleur de la solution pauvre, en provenance du générateur, pour préchauffer la solution riche en provenance de l'absorbeur. Ce transfert thermique interne réduit la quantité de chaleur nécessaire dans le générateur, ce qui permet d'augmenter le rendement énergétique global du système.

vi. Condenseur :

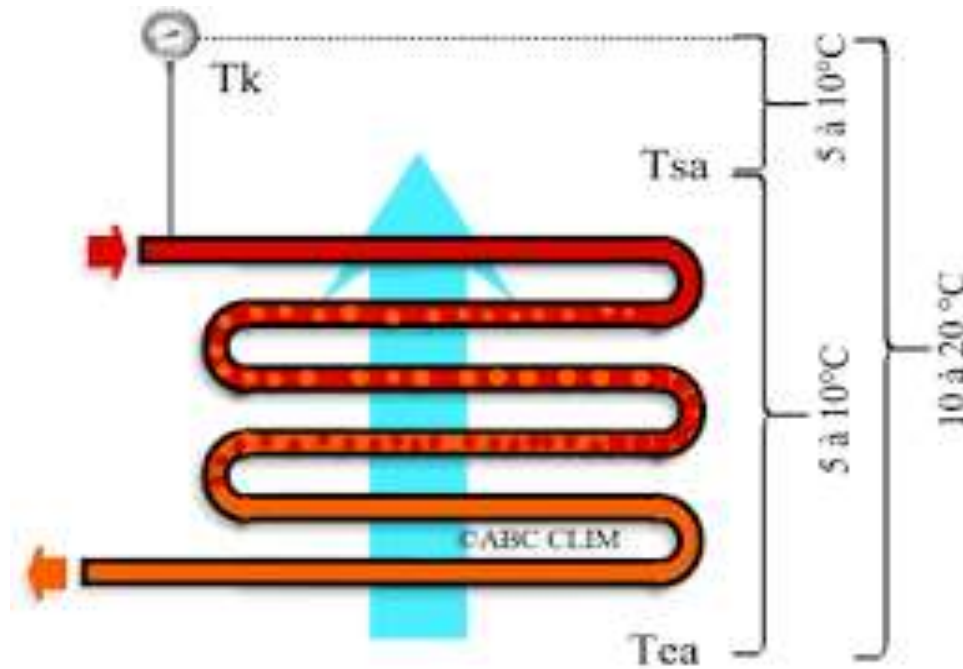


Figure I.10 : Illustration d'un condenseur

Un condenseur est un dispositif dont la mission primordiale est de convertir la vapeur en liquide, soit de réaliser une condensation, en utilisant une surface froide ou un échangeur thermique, qui est maintenue à basse température grâce à l'écoulement d'un fluide réfrigérant. Le fluide réfrigérant est soumis à un transfert de chaleur latente provenant du corps, ce qui représente un changement de phase à température stable.

En d'autres termes il permet au fluide frigorigène de rejeter la chaleur absorbée tout en restant à la même pression ce qui engendre une condensation et le change d'un état vapeur à un état liquide.

vii. Détendeur :

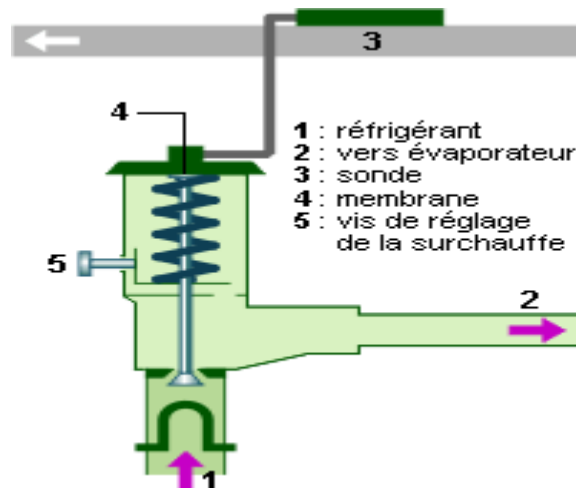


Figure I.11: Illustration d'un détendeur

Le détendeur se trouve entre le condenseur et l'évaporateur. Le détendeur reçoit le fluide frigorigène qui est sous forme liquide et à une pression élevée. Lorsque le fluide traverse le détendeur en passant par une petite ouverture ou buse, sa pression et sa température diminuent.

Cette détente provoque l'évaporation d'une partie du liquide, ce qui absorbe de la chaleur et contribue au refroidissement de l'évaporateur.

b. Le fonctionnement de globale

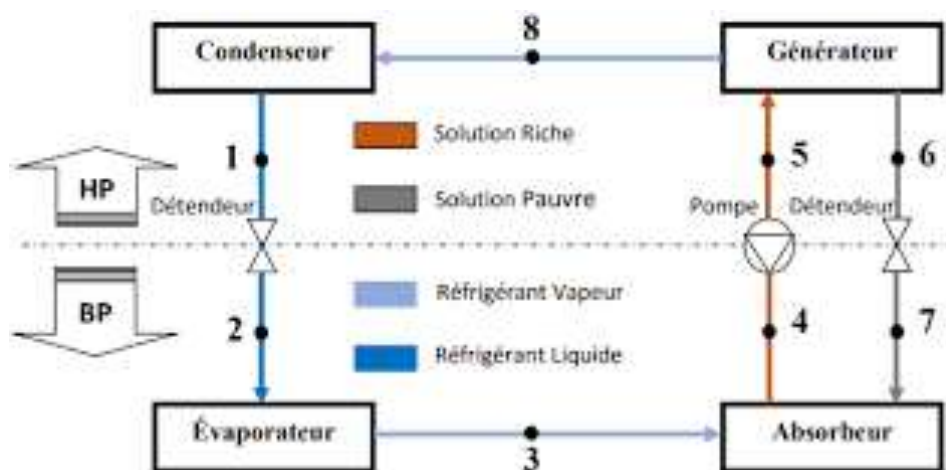


Figure I.12: La fonction d'un système réfrigérant par absorption

Le système de réfrigération par absorption repose sur une architecture thermodynamique complexe, composée de plusieurs composants fonctionnant en synergie

pour produire du froid à partir d'une source de chaleur.

Contrairement aux systèmes à compression mécanique, le cycle d'absorption utilise un réfrigérant et un absorbant pour former une solution qui subit des modifications physiques et thermiques au niveau de sept composants principaux :

L'évaporateur, l'absorbeur, la pompe, le générateur, le condenseur, les détendeurs et l'échangeur de chaleur. Le cycle débute dans l'évaporateur, où le réfrigérant, un liquide à basse pression, bout, absorbant la chaleur de l'enceinte à refroidir. Ce changement d'état de liquide à vapeur extrait l'énergie thermique, générant ainsi l'effet de refroidissement. Le fluide, désormais sous forme de vapeur à basse pression, poursuit son chemin vers l'absorbeur

Dans cette dernière, la vapeur de réfrigérant entre en contact avec un absorbant liquide froid par exemple de l'eau dans le cas de la vapeur de $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$. Le réfrigérant se dissout ensuite dans l'absorbant, créant une solution de réfrigérant dite « riche ». Ce processus d'absorption est exothermique : il libère de la chaleur qui doit être évacuée vers l'extérieur, généralement par un système de refroidissement (air ou eau). L'absorbeur est donc une étape clé, car il détermine la capacité du cycle à récupérer et à faire circuler le réfrigérant.

La solution riche est ensuite acheminée vers une pompe, un élément mécanique qui augmente sa pression pour s'adapter aux conditions de fonctionnement du générateur. Contrairement au compresseur utilisé dans les systèmes à compression de vapeur, la pompe consomme peu d'énergie car elle fonctionne sur liquide (plutôt que sur gaz), ce qui constitue l'un des avantages énergétiques du cycle d'absorption.

La solution à haute pression atteint ensuite un générateur, également appelé chaudière, où elle est exposée à une source de chaleur externe (gaz naturel, énergie solaire, vapeur industrielle, etc.). Sous l'effet de cette chaleur, le fluide frigorigène se désorbe de la solution absorbante : il se sépare et s'évapore, créant une vapeur propre qui servira à produire du froid. La solution restante, désormais dépourvue de fluide frigorigène, est appelée « solution pauvre ». La vapeur de fluide frigorigène quitte ensuite le générateur pour entrer dans le condenseur, où elle est refroidie et condensée à haute pression, passant ainsi de l'état gazeux à l'état liquide. Ce changement d'état s'accompagne d'un dégagement de chaleur dans le milieu ambiant. Le fluide frigorigène liquide est ensuite détendu par le détendeur, un dispositif qui abaisse sa pression et sa température, le préparant à rentrer dans l'évaporateur pour un nouveau cycle d'évaporation

Parallèlement, la solution pauvre en réfrigérant issue du générateur est renvoyée vers l'absorbeur à travers un second détendeur, qui réduit sa pression. Avant cela, elle passe par un échangeur de chaleur, appelé également régénérateur, où elle croise la solution riche ascendante. Cet échange thermique permet de préchauffer la solution riche entrant dans le générateur tout en refroidissant la solution pauvre sortante, optimisant ainsi le rendement thermique global du système.

I.5. Cycle thermodynamique

I.5.1. Thermodynamique

La thermodynamique est la branche de la physique qui étudie la relation entre chaleur, travail et énergie, ainsi que les propriétés des systèmes en fonction de la température et d'autres variables d'état. Elle se concentre sur la conversion d'énergie et les échanges thermiques entre différents systèmes. Autrement dit, la thermodynamique étudie comment l'énergie (notamment sous forme de chaleur) est convertie en travail (et vice versa), et comment ces conversions affectent les propriétés de la matière.

Un exemple très connu de Denis Papin (physicien français, 1647-1714) a eu l'idée d'utiliser la vapeur pour construire une machine en regardant l'eau bouillir dans un récipient. Voyant la vapeur soulever un couvercle, il s'est rendu compte qu'elle pouvait également pousser un piston, produisant ainsi un travail [12].

La motivation initiale était donc de répondre à un besoin industriel clé de l'époque : trouver les meilleures conditions pour convertir la chaleur en travail [11].

- **Macroscopiquement** : Nous nous intéressons aux propriétés de la matière à l'échelle volumique ou macroscopique, où les propriétés sont décrites par des variables d'état macroscopiques (P , V , T , m , etc.).
- **Microscopique** : Nous nous intéressons aux propriétés de la matière à l'échelle microscopique ou atomique (P_i , V_i , E_i , ...)

I.5.2. Principe thermodynamique de la réfrigération

a. Premier principe de la thermodynamique

L'énergie totale est conservée : la chaleur extraite + le travail fourni égale la chaleur rejetée. En d'autre terme l'énergie ne peut être ni créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à une autre.

b. Deuxième principe de thermodynamique

Ce principe concerne l'entropie du système isolé, l'entropie a tendance à augmenter avec le temps, ou rester constante lors d'une transformation réversible.

Plus simplement, La chaleur ne peut pas naturellement passer d'un corps froid à un coup chaud : il faut fournir de l'énergie thermique pour inverser le flux naturel de chaleur. [06]

I.6. Cycle thermodynamique

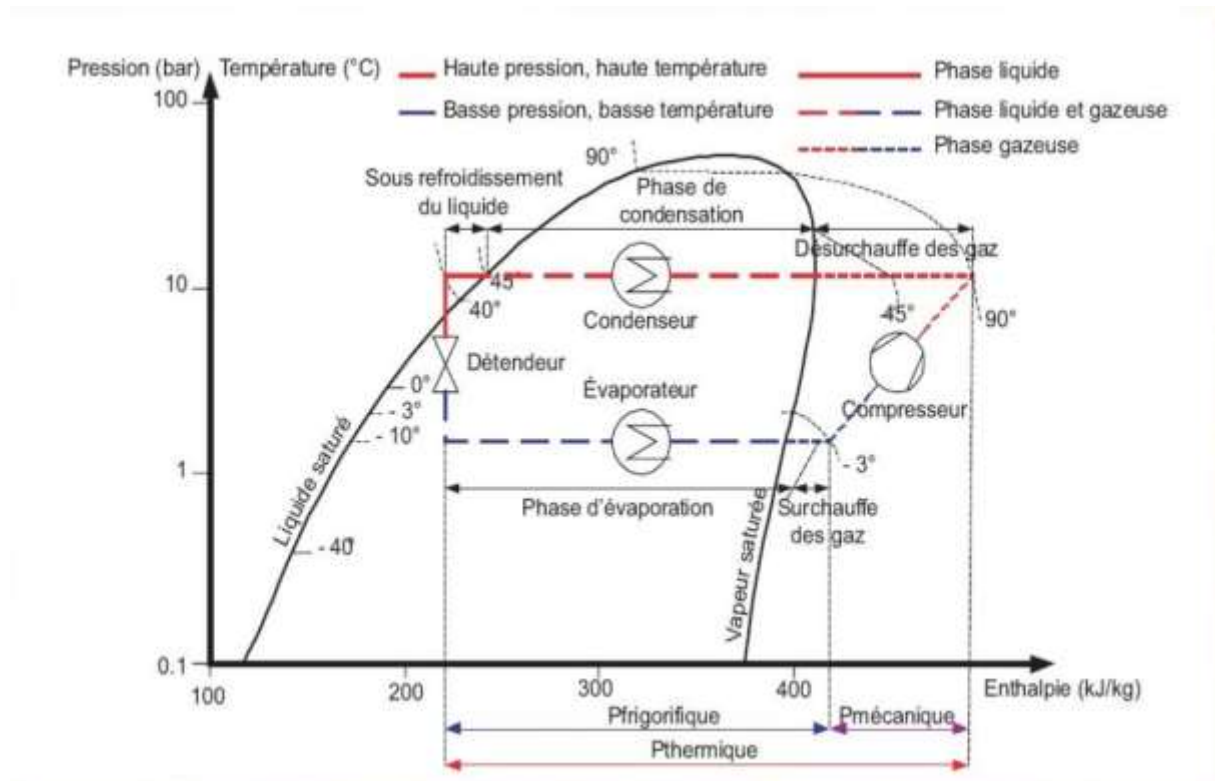


Figure I.13: cycle d'un système de réfrigération par absorption

I.6.1. Différents cycles d'absorption

a. Système à absorption à plusieurs effets

Dans un système à effets multiples, une série de générateurs est utilisée pour réduire progressivement la pression. La chaleur est fournie au générateur supérieur, qui fonctionne à la pression la plus élevée. L'enthalpie de vapeur produite par ce générateur est utilisée pour générer légèrement plus de vapeur de réfrigérant dans le générateur de l'étage suivant, et ainsi de suite. De cette façon, l'apport de chaleur au système est efficacement utilisé en générant davantage de vapeur de réfrigérant, améliorant ainsi le coefficient de performance (COP).

b. Système a absorption a simple effet

Les systèmes à absorption a simple effet est le plus utilisé a cause de sa simplicité, on le trouve dans diverses installations tel que la climatisation des bâtiments, la production du froid pour des usages multiples, la production de la glace, la conservation des aliments et leur congélation rapide [05].

Il fonctionne à deux pressions :

L'une correspondant au générateur du condenseur (côté haute pression) et l'autre à l'absorption de l'évaporateur.

L'évaporateur et l'absorbeur fonctionnent à la même pression, ce qui permet de les placer dans une seule cuve.

De même, le générateur et le condenseur peuvent être placés dans une cuve séparée, où les deux composants fonctionnent à la même pression.

Le système à double coque est donc constitué de deux cuves fonctionnant à haute et basse pression

I.7. Les fluides frigorigènes

Les fluides frigorigènes sont des substances ou des mélanges de substances, utilisés dans les circuits de systèmes frigorifiques tels que : des chambres froides, des réfrigérateurs, des pompes à chaleur, ils se caractérisent par leurs comportements sous pression atmosphérique.

Un fluide frigorigène agit comme le « carburant » d'un système de réfrigération où il subit divers processus tels que l'évaporation, la compression, la liquéfaction et la détente en circulant à travers le système [07]. Celui-ci est chargé de la transmission de la chaleur en recevant, sous la température ambiante, l'énergie par évaporation et en la restituant, au-dessus de la température ambiante, par liquéfaction.

Ce dernier, facilite les transferts thermiques dans un système de réfrigération grâce à ses transformations d'état : évaporation et condensation.

I.7.1. Propriété des fluides frigorigènes

- Haute chaleur latente de vaporisation (permet au fluide d'absorber plus de chaleur lors de l'évaporation, ce qui améliore l'efficacité du transfert thermique)

- Point d'ébullition, sous pression atmosphérique, suffisamment bas en tenant compte des conditions opérationnelles souhaitées (température d'évaporation).
- Taux de compression faible, soit un faible rapport entre les pressions de refoulement et d'aspiration.
- L'utilisation d'un compresseur et de conduites de petite taille est rendue possible par le faible volume massique de la vapeur saturée.
- Température seuil extrêmement haute.
- La composition chimique demeure constante dans les conditions d'opération de l'appareil frigorifique.

I.7.2. Ammoniac

L'ammoniac est une molécule chimique constituée d'un atome d'azote et de trois atomes d'hydrogène (NH₃). Il possède des caractéristiques thermodynamiques bénéfiques, y compris une importante capacité de refroidissement et un potentiel de réchauffement global (PRG) égal à 0 ^[08]. L'ammoniac est aussi un bon conducteur de chaleur, ce qui contribue à l'optimisation de l'efficacité énergétique des équipements frigorifiques qui exploitent ce gaz.

I.7.3. L'avantage et inconvénient du fluide d'ammoniac

L'ammoniac présente plusieurs atouts, tels que sa performance énergétique, son faible impact sur le réchauffement global et son coût modique. Toutefois, l'ammoniac comporte également des désavantages, y compris sa toxicité et sa capacité à être inflammable en présence d'air à certaines concentrations [09].

I.7.4. Ammoniac mélangé à l'eau

Utiliser beaucoup plus dans les systèmes d'absorption exploitant le potentiel de l'ammoniac à se mélanger à l'eau pour établir un cycle réfrigérant. Dans ces dispositifs, l'eau absorbe l'ammoniac, puis la désorption à une pression inférieure génère un refroidissement.

Les systèmes d'absorption ammoniac-eau conviennent particulièrement aux usages qui requièrent une génération constante de froid et peuvent être exploités dans des dispositifs de climatisation ou de réfrigération.

I.8. Conclusion

En conclusion, chaque composant du système de réfrigération par absorption remplit une fonction précise et indispensable au bon déroulement du cycle. L'évaporateur est chargé de produire le froid en absorbant la chaleur du milieu à refroidir. L'absorbeur, quant à lui, capte le fluide frigorigène en le dissolvant dans l'absorbant. La pompe assure la circulation de la solution en l'envoyant vers le générateur, où les deux composants sont séparés par l'apport de chaleur. Le réfrigérant purifié est ensuite condensé dans le condenseur, tandis que les détendeurs régulent la pression avant que les fluides ne soient redirigés vers les zones de basse pression. Enfin, l'échangeur de chaleur optimise le rendement global du système en récupérant l'énergie thermique disponible dans la solution pauvre.

Ce fonctionnement cyclique, qui repose essentiellement sur l'apport d'une source de chaleur au lieu d'une énergie mécanique importante, confère aux systèmes à absorption une efficacité particulière dans les contextes où la chaleur est disponible en abondance, comme dans les installations industrielles ou les systèmes couplés à l'énergie solaire.

Il convient de rappeler que l'un des couples les plus couramment utilisés dans ces systèmes est l'ammoniac-eau ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$). Dans ce cas, l'ammoniac joue le rôle de fluide frigorigène, tandis que l'eau agit comme absorbant. Ce couple présente de nombreux avantages, notamment une bonne efficacité à basse température et une disponibilité facile des composants. Cependant, en raison de la toxicité et de l'inflammabilité de l'ammoniac, des précautions particulières doivent être prises en matière de sécurité, ce qui limite son usage à des applications industrielles ou techniques bien encadrées.

Chapitre II

Modélisation et analyse thermodynamique

II. Modélisation et analyse thermique

II.1. Introduction

Dans le cadre de l'étude et de l'optimisation des systèmes de réfrigération par absorption, la modélisation thermodynamique constitue une étape cruciale permettant de décrire, de simuler et d'analyser le comportement du cycle en conditions stationnaires. Le couple ammoniac-eau ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) est largement utilisé dans ce type de système en raison de ses propriétés thermophysiques favorables, notamment sa capacité à produire du froid à partir d'une source de chaleur de basse ou moyenne température.

Ce chapitre présente une modélisation détaillée du cycle à absorption simple effet basé sur le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, la première partie est consacrée à la présentation du schéma du système et aux hypothèses de modélisation. Ensuite, les équations d'équilibre massique, énergétique et exergetique sont établies pour chaque composant principal.

II.2. Modélisation

L'approche de modélisation consiste à décomposer les systèmes complexes en éléments essentiels afin de les représenter, les examiner et les comprendre. Elle offre aux ingénieurs et chercheurs la possibilité d'étudier divers scénarios et d'améliorer les performances sans intervenir sur le système réel.

La modélisation est le processus de création de représentations théoriques capturant les aspects fondamentaux et le comportement dynamique d'un système. L'objectif est de faciliter la compréhension, la conception et la gestion de systèmes complexes. Ces représentations peuvent être élaborées à l'aide de différentes méthodes et outils, tels que les diagrammes de flux de données, les modèles mathématiques ou les simulations [10].

II.2.1. Importance de la modélisation dans les machines frigorifiques par absorption

La modélisation permet d'acquérir une compréhension intuitive du fonctionnement interne du système, notamment des échanges de chaleur et de masse, et d'analyser l'impact de différents paramètres (température, pression, débit) sur ses performances. Il devient ainsi possible de simuler diverses configurations et de tester les effets de modifications sans intervenir physiquement sur le système.

Elle contribue également à la recherche et au développement de nouvelles combinaisons de fluides frigorigènes, à la fois plus efficaces et respectueuses de l'environnement, tout en optimisant la conception des composants du cycle. Grâce à cet outil, il est possible de définir les conditions d'opération idéales pour un système à absorption, dans le but d'en améliorer le rendement et de réduire sa consommation énergétique et exergetique.

La possibilité de tester le système dans une large gamme de conditions, sans recourir à des essais physiques coûteux et complexes, permet aussi d'évaluer son comportement dans des scénarios extrêmes, et d'en vérifier la robustesse [11].

En somme, la modélisation s'impose comme un levier essentiel pour comprendre, affiner et perfectionner les systèmes de réfrigération par absorption, tout en soutenant leur intégration dans des solutions énergétiques durables.

II.2.2. Schéma du cycle modélisé

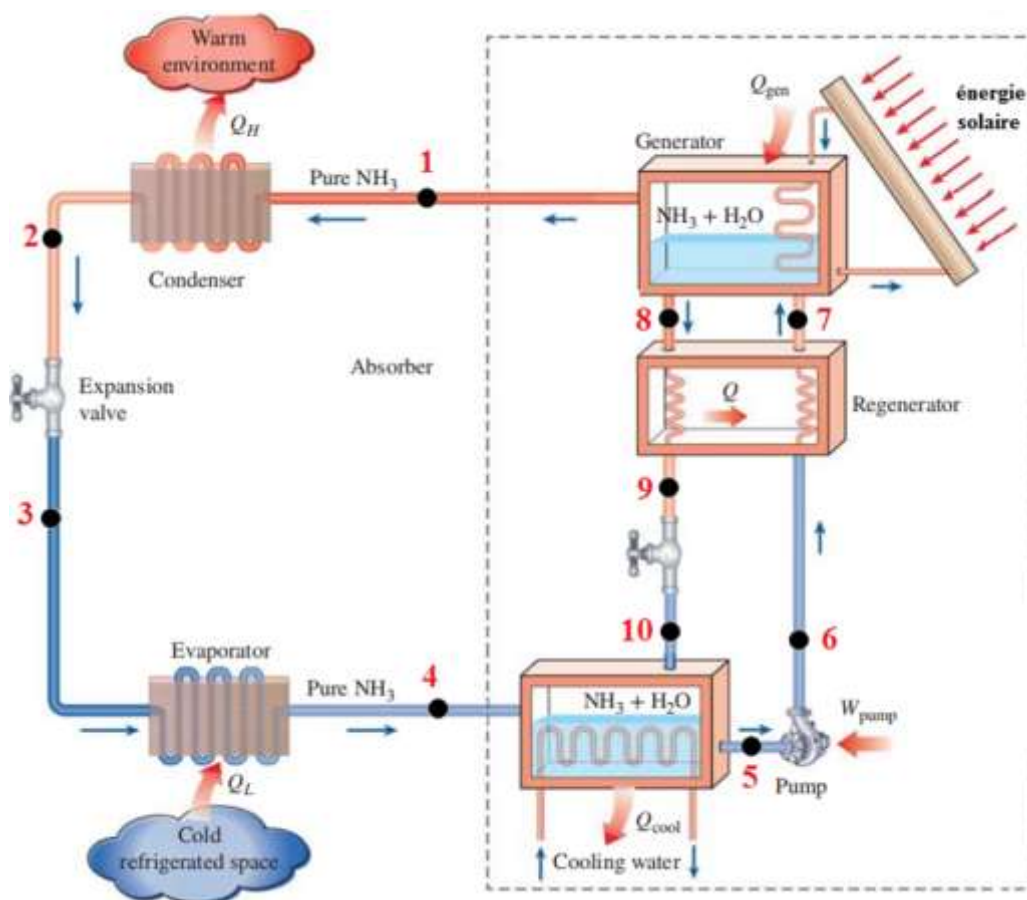


Figure II.1 : Schéma du cycle de réfrigération par absorption $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$

Le schéma ci-dessous représente un cycle de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$. Il comporte 10 points de contrôle, identifiés pour permettre l'analyse thermodynamique de chaque étape.

Point 1 \rightarrow 2 : Ammoniac pur en sortie du générateur, se condense dans le condenseur en cédant de la chaleur Q_H .

Point 2 \rightarrow 3 : Détente de l'ammoniac liquide dans la vanne de détente (chute de pression).

Point 3 \rightarrow 4 : L'ammoniac s'évapore dans l'évaporateur en absorbant de la chaleur Q_L (effet frigorifique).

Point 4 \rightarrow 5 : L'ammoniac gazeux est absorbé dans la solution $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

Point 5 \rightarrow 6 : La solution riche en NH_3 est pompée à haute pression (consommation de travail W_{pump}).

Point 6 \rightarrow 7 : La solution est préchauffée dans l'échangeur de récupération (régénérateur).

Point 7 \rightarrow 8 : Dans le générateur, la chaleur solaire Q_{gen} permet de séparer NH_3 et H_2O .

Point 8 \rightarrow 9 : Le liquide pauvre en NH_3 passe dans l'échangeur pour céder de la chaleur à la solution entrante.

Point 9 \rightarrow 10 \rightarrow 5 : Retour dans l'absorbeur où le cycle se referme.

Ce cycle a été modélisé en régime stationnaire avec les hypothèses thermodynamiques précisées précédemment. Chaque point peut être caractérisé par des grandeurs telles que température, pression, concentration, enthalpie, et débit massique.

II.2.3. Hypothèses

Dans le cadre de cette étude, plusieurs hypothèses simplificatrices ont été formulées afin de faciliter la modélisation du cycle de réfrigération par absorption fonctionnant avec le couple ammoniac/eau ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$). Ces hypothèses permettent de réduire la complexité du système sans compromettre la validité globale des résultats :

- Le système fonctionne en régime permanent, c'est-à-dire que toutes les grandeurs thermodynamiques sont considérées comme constantes dans le temps.
- Les variations d'énergie cinétique et potentielle sont supposées négligeables tout au long du cycle.

- Le système est considéré comme adiabatique, ce qui signifie qu'il n'y a aucune perte thermique vers l'environnement.
- Les pertes de charge dans les conduites, les échangeurs de chaleur et les autres éléments du circuit sont également négligées.
- Le fluide frigorigène (NH_3) ainsi que la solution ammoniac-eau ($\text{NH}_3\text{--H}_2\text{O}$) dans le générateur et l'absorbeur sont supposés être en équilibre thermodynamique à leurs températures et pressions respectives.
- Le réfrigérant est supposé être à l'état de saturation à la sortie du condenseur (liquide saturé) et de l'évaporateur (vapeur saturée).
- La solution riche sortant de l'absorbeur, ainsi que la solution pauvre sortant du générateur, sont toutes deux considérées comme étant à l'état saturé.
- Seul le fluide frigorigène pur (NH_3) circule à travers le condenseur, la vanne de détente et l'évaporateur ; aucun mélange n'est présent dans ces composants.
- Le processus de rectification est supposé s'effectuer intégralement dans le générateur, sans colonne de rectification séparée.

II.3. Analyse Energétique et Exégétique

II.3.1. Analyse Energétique

L'évaluation énergétique est une approche qui permet d'apprécier l'utilisation et l'efficacité de l'énergie dans divers systèmes. Elle est indispensable pour saisir comment l'énergie est transformée et exploitée dans le but d'améliorer la performance et de diminuer les pertes[09].

a. Bilans de Masse

Égalité des débits NH_3 pur (condenseur, vanne, évaporateur)

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_4 = \dot{m} \quad (\text{II.1})$$

Débit de solution riche (absorbeur \rightarrow générateur)

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_7 = \dot{m}_a \quad (\text{II.2})$$

Débit de solution pauvre (générateur \rightarrow absorbeur)

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_b \quad (\text{II.3})$$

Fraction massique NH_3 dans les mélanges

$$X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = X_r \quad (\text{II.4})$$

$$X_5 = X_6 = X_7 = X_a \quad (\text{II.5})$$

$$X_8 = X_9 = X_{10} = X_b \quad (\text{II.6})$$

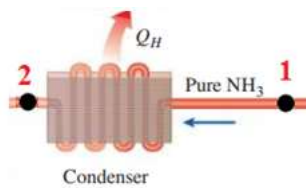
Relation globale entre flux massiques (absorbeur, générateur)

$$\dot{m} + \dot{m}_b = \dot{m}_a \quad (\text{II.7})$$

$$\dot{m} \cdot X_r + \dot{m}_b \cdot X_b = \dot{m}_a \cdot X_a \quad (\text{II.8})$$

b. Bilan Energétique

i. Condenser : points (1-2)



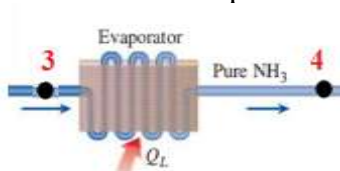
$$\dot{m} \cdot h_1 = \dot{Q}_{cd} + \dot{m} \cdot h_2 \quad (\text{II.9})$$

ii. Vanne d'expansion (détendeur) : points (2-3)



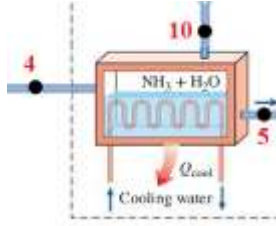
$$h_2 = h_3 \quad (\text{II.10})$$

iii. Évaporateur : points (3-4)



$$\dot{m} \cdot h_4 = \dot{Q}_{evap} + \dot{m} \cdot h_3 \quad (\text{II.11})$$

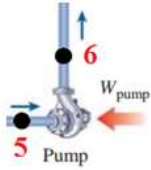
iv. Absorbeur : points (4-5-10)



$$\dot{m} \cdot h_4 + \dot{m}_b \cdot h_{10} = \dot{m}_a \cdot h_5 + \dot{Q}_{ab}$$

(II.12)

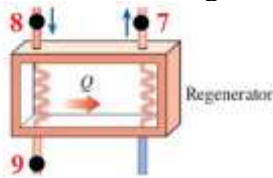
v. Pompe : points (5-6)



$$\dot{W}_p = \dot{m}_a \cdot (h_6 - h_5)$$

(II.13)

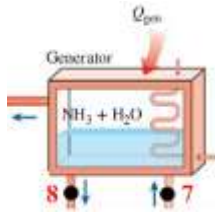
vi. Régénérateur (6-7-8-9)



$$\dot{m}_a \cdot h_6 + \dot{m}_b \cdot h_8 = \dot{m}_a \cdot h_7 + \dot{m}_b \cdot h_9$$

(II.14)

vii. Générateur **thermique** (7-8-1)



$$\dot{m}_a \cdot h_7 + \dot{Q}_{gen} = \dot{m} \cdot h_1 + \dot{m}_b \cdot h_8$$

(II.15)

viii. Détendeur : points (9-10)



$$h_9 = h_{10}$$

(II.16)

II.3.2. Analyse Exégétique

L'analyse exergetique est une méthode d'évaluation de l'efficacité d'un système thermodynamique, axée spécifiquement sur la qualité de l'énergie utilisée. Contrairement à l'analyse énergétique traditionnelle, qui se limite à quantifier l'énergie, l'analyse exergetique prend en compte la capacité de cette énergie à produire un travail utile. Elle identifie les pertes exergetiques, c'est-à-dire le potentiel de travail gaspillé, et met en évidence les améliorations

possibles dans les parties du système où ces pertes sont les plus importantes [11]. En résumé, cette approche se concentre sur la valeur utile de l'énergie, plutôt que sur sa seule quantité, offrant ainsi une compréhension plus approfondie de l'efficacité réelle d'un système.

a. Bilan d'exergie

i. Condenseur (points 1-2)

$$ex_1 = (h_1 - h_0) - T_0 \cdot (s_1 - s_0) \quad (II.17)$$

$$ex_2 = (h_2 - h_0) - T_0 \cdot (s_2 - s_0) \quad (II.18)$$

$$I_{cd} = \dot{m} \cdot ex_1 - \dot{m} \cdot ex_2 + \dot{Q}_{cd} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{cd}}\right) \quad (II.19)$$

ii. Bilan d'exergie - Détendeur (points 2-3)

$$ex_3 = (h_3 - h_0) - T_0 \cdot (s_3 - s_0) \quad (II.20)$$

$$I_{v1} = \dot{m} \cdot ex_2 - \dot{m} \cdot ex_3 \quad (II.21)$$

iii. Bilan d'exergie - Évaporateur (points 3-4)

$$ex_4 = (h_4 - h_0) - T_0 \cdot (s_4 - s_0) \quad (II.22)$$

$$I_{evap} = \dot{m} \cdot ex_3 - \dot{m} \cdot ex_4 + \dot{Q}_{evap} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{evap}}\right) \quad (II.23)$$

iv. Bilan d'exergie - Absorbeur (points 4-5-10)

$$ex_{10} = (h_{10} - h_0) - T_0 \cdot (s_{10} - s_0) \quad (II.24)$$

$$I_{ab} = (\dot{m} \cdot ex_4 + \dot{m}_b \cdot ex_{10}) - (\dot{m}_a \cdot ex_5 + \dot{Q}_{ab} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{ab}}\right)) \quad (II.25)$$

b. Méthode globale d'évaluation

$$I_{totale} = I_{cd} + I_{v1} + I_e + I_{ab} + I_p + I_{v2} + I_{gén} + I_{reg} \quad (II.26)$$

$$I_{totale} = (\text{exergie fournie}) - (\text{exergie utile}) \quad (II.27)$$

$$\eta_{ex} = 1 - \frac{\text{irrversibilité}}{\text{exergie fournie}} \quad (\text{II.28})$$

i. Pompe (5-6)

$$ex_6 = (h_6 - h_0) - T_0 \cdot (s_6 - s_0) \quad (\text{II.29})$$

$$I_p = \dot{m}_a \cdot (ex_6 - ex_5) + W_p \quad (\text{II.30})$$

ii. Régénérateur (6-7-8-9)

$$ex_7 = (h_7 - h_0) - T_0 \cdot (s_7 - s_0) \quad (\text{II.31})$$

$$ex_8 = (h_8 - h_0) - T_0 \cdot (s_8 - s_0) \quad (\text{II.32})$$

$$ex_9 = (h_9 - h_0) - T_0 \cdot (s_9 - s_0) \quad (\text{II.33})$$

$$I_{reg} = (\dot{m}_a \cdot ex_6 + \dot{m}_b \cdot ex_8) - (\dot{m}_a \cdot ex_7 + \dot{m}_b \cdot ex_9) \quad (\text{II.34})$$

iii. Générateur thermique (7-8-1)

$$I_{gen} = \dot{m}_a \cdot ex_7 - (\dot{m}_r \cdot ex_2 + \dot{m}_b \cdot ex_8) + \dot{Q}_{gen} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{gen}}\right) \quad (\text{II.35})$$

iv. Détendeur (9-10)

$$ex_3 = (h_3 - h_0) - T_0 \cdot (s_3 - s_0) \quad (\text{II.36})$$

$$I_{v2} = \dot{m}_b \cdot (ex_9 - ex_{10}) \quad (\text{II.37})$$

v. Performance du cycle

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{Q}_{gen} + W_p} \quad (\text{II.38})$$

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{Q}_{evap} \cdot \left|1 - \frac{T_0}{T_{evap}}\right|}{\dot{Q}_{gen} \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{gen}}\right) + W_p} \quad (\text{II.39})$$

II.4. Indicateurs de performance appliqués au système NH₃-H₂O

Le couple ammoniac-eau se distingue par sa capacité à produire du froid à des températures très basses, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications industrielles

ou aux contextes où l'utilisation de l'électricité est limitée. L'évaluation de la performance de ce système repose sur plusieurs indicateurs thermodynamiques, chacun apportant un éclairage spécifique.

II.4.1. Coefficient de performance (COP)

Le coefficient de performance, noté COP, est défini comme le rapport entre l'effet frigorifique fourni par l'évaporateur et la chaleur absorbée par le générateur :

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_{\text{gen}}} \quad (\text{II.40})$$

Dans le cas du couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, l'ammoniac joue le rôle de réfrigérant, tandis que l'eau agit comme absorbant. Le COP typique d'un tel système oscille généralement entre 0,5 et 0,7 selon les conditions de fonctionnement. Ce rendement relativement modeste s'explique par le fait que le système consomme de la chaleur pour régénérer le réfrigérant dans le générateur, au lieu d'une énergie mécanique comme dans les cycles à compression.

Ce coefficient varie significativement avec la température d'évaporation, la température de la source chaude, mais aussi avec le degré de sous-refroidissement dans le condenseur et la désurchauffe du gaz en sortie de générateur.

II.4.2. Facteur d'utilisation de l'énergie (UEF)

Le facteur d'utilisation de l'énergie (UEF) permet de tenir compte non seulement de la chaleur injectée dans le système, mais aussi des pertes thermiques annexes et de la qualité de l'énergie utilisée.

$$\text{UEF} = \frac{Q_{\text{utile}}}{Q_{\text{source}}} \quad (\text{II.41})$$

Dans les applications où la chaleur est récupérée à partir de sources de basse température (solaire thermique, cogénération, etc.), le UEF devient un indicateur particulièrement pertinent, car il permet d'évaluer la performance du système dans une logique de valorisation énergétique globale.

II.4.3. Efficacité exergétique

L'analyse exergétique permet d'évaluer la qualité de la conversion énergétique, en considérant la capacité d'un flux énergétique à effectuer un travail utile. Elle se base sur la seconde loi de la thermodynamique.

$$\eta_{\text{ex}} = \frac{\text{Exergie}_{\text{évaporateur}}}{\text{Exergie}_{\text{générateur}}} \quad (\text{II.42})$$

Cette approche est indispensable dans le cadre de systèmes à absorption, car elle met en évidence les déperditions d'exergie liées à l'irréversibilité des transferts thermiques (particulièrement au niveau du générateur et de l'absorbeur). Un système $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ bien conçu peut atteindre une efficacité exergétique de 25 à 35 %, ce qui est correct pour des systèmes thermiques alimentés par des sources de chaleur à température modérée (~100–150 °C).

II.5. Outils et logiciels de modélisation

La modélisation précise du cycle $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ nécessite une approche rigoureuse, car les équilibres thermodynamiques de ce système sont non linéaires, couplés, et fortement dépendants de la température et de la pression. Plusieurs outils sont donc mobilisés pour simuler et analyser son comportement.

II.5.1. Thermoptim

Thermoptim est un logiciel d'analyse thermodynamique développé dans le cadre de l'enseignement supérieur français. Il permet de modéliser graphiquement des cycles énergétiques complexes, sans nécessiter une connaissance approfondie en programmation. Pour un cycle d'absorption $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, Thermoptim facilite :

- * L'assemblage du cycle complet, avec ses composants : générateur, absorbeur, condenseur, évaporateur, détendeur, échangeur interne.

- * Le calage des paramètres thermodynamiques (pressions, températures, enthalpies) à chaque point du cycle.

- * Le calcul automatique des bilans énergétiques, avec estimation du COP, des pertes, et du rendement global.

Thermoptim est particulièrement utile dans la phase de conception préliminaire : il offre une représentation graphique du cycle qui permet d'identifier rapidement les postes de consommation ou de perte énergétique. Bien qu'il ne prenne pas en compte les équilibres d'absorption ou les propriétés complexes de l'ammoniac, il permet une première approximation cohérente du comportement global du système.

II.5.2. Engineering Equation Solver (EES)

EES est un outil puissant de résolution numérique d'équations. Contrairement à Thermoptim, il ne repose pas sur une interface graphique, mais sur l'écriture directe des équations thermodynamiques. Il intègre une base de données complète sur les propriétés thermo-physiques des fluides, dont le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, ce qui permet de :

- * Modéliser l'équilibre liquide-vapeur du couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ avec précision,
- * Résoudre les équations de conservation de l'énergie et de la masse sur chaque composant du cycle,
- * Réaliser des études paramétriques en fonction de variables d'entrée : température source, concentration en NH_3 , etc.

Un modèle typique dans EES peut inclure jusqu'à une trentaine d'équations couplées, et permet de tracer les courbes de performance du système (COP, exergie, température, enthalpie) en fonction des conditions opératoires. Ce logiciel est particulièrement recommandé pour valider les hypothèses physiques du modèle avant de passer à la simulation dynamique.

II.5.3. MATLAB

MATLAB est un environnement de calcul numérique permettant la programmation de modèles dynamiques complexes. Il s'agit d'un outil incontournable pour les phases avancées de simulation. Dans le contexte d'un système $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, il permet :

- * La programmation d'un modèle temporel du cycle (transitoire),
- * La simulation du comportement dynamique du système en réponse à des perturbations (variation de température de la source, arrêts/démarrages),
- * L'intégration d'une commande automatique pour optimiser le fonctionnement (via Simulink ou algorithmes de régulation PID).

MATLAB permet également d'intégrer des données expérimentales (par exemple issues d'une installation réelle) et de les confronter aux résultats de simulation. La possibilité d'utiliser des packages spécialisés (comme REFPROP ou CoolProp via des interfaces) permet d'obtenir des données thermodynamiques fiables pour le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

II.6. Conclusion

L'évaluation des performances du cycle $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ repose donc sur une combinaison cohérente d'indicateurs thermodynamiques (COP, UEF, exergie) et sur des outils numériques complémentaires. Thermoptim fournit une vue macroscopique, utile pour la conception initiale, EES permet une analyse thermodynamique fine à l'équilibre, et MATLAB offre la possibilité de pousser la modélisation jusqu'à des scénarios dynamiques complexes.

Cette approche méthodologique garantit une compréhension approfondie du comportement du système dans différentes configurations de fonctionnement, et permet d'envisager des pistes d'optimisation en lien avec les contraintes énergétiques actuelles.

Chapitre III

Application au système de

réfrigération par

absorption à simple effet

III. Application au système de réfrigération par absorption à simple effet

III.1. Introduction

Dans le cadre de cette étude, l'analyse du système de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple ammoniac-eau ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$) repose sur une approche numérique basée sur la simulation thermodynamique. L'objectif de ce chapitre est de détailler les étapes de modélisation du cycle, d'expliquer le fonctionnement des composants principaux, puis de présenter les résultats issus des calculs de simulation dans un régime permanent.

Le système étudié est constitué de quatre éléments principaux — générateur, condenseur, évaporateur et absorbeur — ainsi que d'organes annexes comme la pompe, les détendeurs et les échangeurs internes. Chaque sous-système est modélisé à partir des lois de conservation de la masse et de l'énergie, ainsi que par une analyse exergetique permettant d'évaluer les pertes irréversibles.

La modélisation est réalisée sous l'hypothèse d'un régime stationnaire, en considérant un comportement idéal des composants, à l'exception des irréversibilités internes étudiées séparément. L'utilisation des équations d'état du couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, couplée à des relations énergétiques spécifiques à chaque composant, permet de simuler le comportement global du cycle en fonction de paramètres clés tels que la température des échangeurs thermiques.

La simulation permet ainsi de tracer l'évolution de plusieurs indicateurs de performance — notamment le coefficient de performance (COP), le rendement exergetique et l'irréversibilité totale — en fonction de la variation des températures des quatre principaux échangeurs. Les résultats obtenus sont ensuite interprétés à travers une discussion comparative avec des travaux de référence, dans l'objectif d'identifier les leviers potentiels d'optimisation du cycle.

III.2. Présentation du système étudié

Le système étudié dans ce travail est un cycle de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple ammoniac-eau ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$). Ce type de cycle est particulièrement adapté aux applications nécessitant une production de froid à partir de sources thermiques de basse ou moyenne température, tout en évitant le recours aux réfrigérants à fort potentiel de réchauffement global.

Le fonctionnement du cycle repose sur l'absorption de l'ammoniac gazeux dans l'eau, suivie de sa désorption par apport de chaleur dans un générateur. L'ammoniac pur, une fois

séparé de l'eau, circule à travers les composants classiques du cycle frigorifique (condenseur, détendeur, évaporateur), avant de revenir vers l'absorbeur pour recommencer un nouveau cycle.

Le système modélisé se compose des éléments suivants :

- Un évaporateur, où l'ammoniac liquide s'évapore en absorbant la chaleur du milieu à refroidir (Q_L)
- Un absorbeur, où l'ammoniac gazeux est absorbé dans une solution aqueuse d'ammoniac ;
- Une pompe, permettant d'élever la pression de la solution riche ;
- Un générateur, où la chaleur (source thermique classique) permet la désorption de l'ammoniac.
- Un condenseur, où l'ammoniac gazeux est liquéfié (Q_H) ;
- Une vanne de détente, abaissant la pression de l'ammoniac liquide avant son passage dans l'évaporateur
- Un échangeur de solution (ou régénérateur), permettant un préchauffage de la solution riche grâce à la solution pauvre sortant du générateur.

Dans ce modèle, les pertes de charge dans les conduites et composants sont négligées. Le générateur est alimenté par une source de chaleur idéale à température constante, sans prise en compte de l'intermittence ou des spécificités d'un système solaire.

Un modèle thermodynamique basé sur les équilibres de phase du couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$. Les propriétés du fluide sont extraites à l'aide d'une base de données thermodynamiques intégrée dans le logiciel EES (Engineering Equation Solver), permettant une analyse des performances (COP, bilan énergétique et exergétique) sur la base de conditions opératoires réalistes.

Les plages de température utilisées pour les calculs sont les suivantes :

- Température du générateur : entre 80 °C et 120 °C
- Température de l'absorbeur : entre 20 °C et 50 °C
- Température du condenseur : entre 25 °C et 75 °C
- Température de l'évaporateur : entre -30 °C et 15 °C

Ces plages ont été choisies afin d'évaluer le comportement du cycle dans différents contextes d'application (froid négatif, climatisation, conditions tropicales, etc.), tout en respectant les limites opérationnelles du couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$. Les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel EES (Engineering Equation Solver), qui permet d'extraire les propriétés thermodynamiques du mélange $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ et de réaliser des bilans énergétiques et exergétiques précis.

III.3. Hypothèses de modélisation

Dans le cadre de cette étude, la modélisation du cycle de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ repose sur les hypothèses suivantes:

Hypothèses générales

- Les pertes de charge dans les conduites, échangeurs et composants sont négligées.
- L'énergie nécessaire au générateur est fournie par une source thermique idéale, sans variation ni intermittence (pas de modélisation de source solaire).

Hypothèses thermodynamiques

- Les propriétés du couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ sont extraites à partir de bases de données intégrées dans le logiciel EES (Engineering Equation Solver), à partir de corrélations expérimentales fiables.
- Les mélanges $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ sont supposés en équilibre thermodynamique dans l'absorbeur et le générateur.
- Les échangeurs (condenseur, évaporateur, régénérateur) sont supposés idéaux : efficacité thermique de 100 %, sauf indication contraire dans les variantes étudiées.
- La pompe est modélisée avec un rendement isentropique de 0,75 : le travail utile est donc calculé en tenant compte de cette perte mécanique.

Cadre de simulation

- La simulation est réalisée pour des températures de fonctionnement variables :
- Générateur : 80 °C à 120 °C
- Absorbeur : 20 °C à 50 °C
- Condenseur : 25 °C à 75 °C
- Évaporateur : -30 °C à 15 °C
- Les pressions, concentrations en ammoniac et enthalpies spécifiques sont calculées automatiquement par EES en fonction des équilibres imposés.
- Le coefficient de performance (COP) ainsi que le rendement exergétique sont calculés à chaque configuration.

Les conditions de référence pour l'évaluation de l'exergie sont fixées à :

- Température de référence : 25 °C
- Pression de référence : 1 Bar

Ces valeurs correspondent à l'état de mort du système, utilisé comme base de référence pour le calcul des exergies physiques, la localisation des irréversibilités, et l'évaluation du rendement exergétique. Elles sont communément admises dans les analyses exergétiques des

systèmes thermodynamiques, notamment selon les normes ASHRAE et les méthodologies de référence en énergétique.

III.4. Méthodologie de simulation

La modélisation du cycle de réfrigération par absorption $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ à simple effet a été réalisée à l'aide du logiciel Engineering Equation Solver (EES). Ce choix se justifie par la capacité d'EES à :

- gérer des équilibres thermodynamiques complexes entre deux fluides,
- accéder aux propriétés du mélange $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ via des bases de données intégrées fiables,
- effectuer des résolutions paramétriques, nécessaires pour explorer plusieurs conditions de fonctionnement.

III.4.1. Variables d'entrée

Les simulations sont réalisées en faisant varier les températures clés du cycle dans les plages suivantes :

- Générateur : 80 °C à 120 °C
- Absorbeur : 20 °C à 50 °C
- Condenseur : 25 °C à 75 °C
- Évaporateur : -30 °C à 15 °C

La concentration massique en ammoniac dans la solution est calculée automatiquement selon les équilibres liquide-vapeur à chaque étape du cycle.

III.4.2. Hypothèses intégrées au modèle EES

- Régime stationnaire.
- Aucune perte de charge.
- Rendement de la pompe fixé à 0.75, permettant de calculer le travail réel de compression de la solution riche.
- Échangeurs idéaux sauf précision contraire.
- Propriétés extraites directement des fonctions internes d'EES pour le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

III.4.3. Données calculées

Le programme calcule automatiquement, pour chaque configuration thermique :

- Le coefficient de performance (COP)
- Le rendement exergetique global du cycle : rapport entre l'exergie utile produite (froid) et l'exergie apportée.
- Les températures, pressions, concentrations et enthalpies aux différents points du cycle (évaporateur, absorbeur, générateur, condenseur).

L'ensemble des résultats issus de ces simulations est présenté et discuté dans le chapitre suivant.

III.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté une modélisation thermodynamique complète d'un système de réfrigération par absorption à simple effet, basé sur le couple ammoniac-eau ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$). L'objectif principal était d'établir un cadre de simulation rigoureux, permettant de comprendre le comportement du cycle et d'évaluer ses performances sous différentes configurations thermiques, à partir de principes physiques fondamentaux et de données thermodynamiques fiables.

Le cycle étudié repose sur une architecture classique composée de sept éléments : un évaporateur, un absorbeur, une pompe, un générateur, un condenseur, une vanne de détente et un échangeur de solution. Ces composants interagissent selon une logique circulaire dans laquelle l'ammoniac passe par des phases d'absorption, de désorption, de condensation et d'évaporation, permettant ainsi la production de froid à partir d'une source thermique.

La modélisation a été réalisée sous EES (Engineering Equation Solver), logiciel reconnu pour sa capacité à intégrer des équilibres thermodynamiques complexes et à manipuler des bases de données précises sur les mélanges $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$. Les propriétés thermodynamiques ont été extraites directement des fonctions internes du logiciel, garantissant la cohérence des bilans d'énergie et d'exergie. Un cadre de simulation paramétrique a été défini, dans lequel les températures des quatre composants principaux ont été systématiquement variées dans des plages représentatives d'usages réels (de -30 °C à 120 °C).

La modélisation s'appuie sur des hypothèses solides, telles que le régime stationnaire, l'absence de pertes de charge, des échangeurs thermiques idéalisés, et une pompe modélisée avec un rendement isentropique constant de 0,75. Ces hypothèses visent à simplifier le comportement du système tout en conservant un bon niveau de réalisme dans les résultats simulés. En particulier, la prise en compte des équilibres liquide-vapeur dans le générateur et l'absorbeur permet une représentation fidèle du fonctionnement thermochimique du cycle.

Le modèle ainsi établi calcule automatiquement, pour chaque configuration thermique, des variables fondamentales telles que les pressions, les concentrations en ammoniac, les enthalpies spécifiques, ainsi que deux indicateurs clés de performance : le coefficient de performance (COP) et le rendement exergetique global. Les conditions de référence exergetique ont été fixées selon les normes couramment admises (25 °C , 1 bar), permettant une évaluation rigoureuse de la qualité de l'énergie transformée.

Chapitre IV

Etude des effets de

température et discussion

finale

IV. Etude des effets de température et discussion finale

IV.1. Introduction

L'efficacité d'un système de réfrigération par absorption à simple effet dépend fortement des températures de fonctionnement de ses quatre composants clés : le générateur, le condenseur, l'évaporateur et l'absorbeur. Ce chapitre vise à analyser l'influence de ces températures sur les performances thermodynamiques globales du cycle utilisant le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, à travers une étude de sensibilité thermique basée sur des simulations numériques.

Trois indicateurs principaux ont été retenus pour cette évaluation : le coefficient de performance (COP), le rendement exergetique, et l'irréversibilité totale du système. L'évolution de chacun de ces paramètres a été étudiée en fonction de la température de chaque composant, dans le cadre d'un régime stationnaire.

Les résultats obtenus sont discutés en détail, puis comparés à ceux issus de la littérature scientifique récente. Cette mise en perspective permet de valider les tendances observées, d'identifier les éventuelles divergences, et de proposer des pistes d'optimisation concrètes. Enfin, une synthèse générale est proposée afin de dégager les comportements thermiques dominants et leurs implications sur la conception et l'amélioration des cycles $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$.

IV.2. Etude de l'effet de la température de l'évaporateur

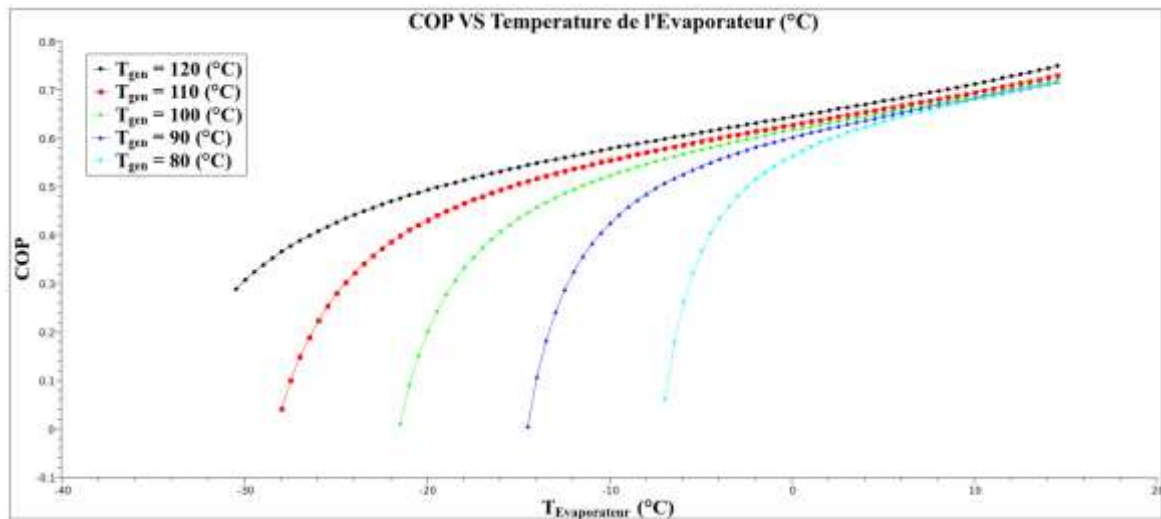


Figure 14.1 : Évolution du COP en fonction de la température de l'évaporateur pour différentes températures du générateur

La figure montre que, quel que soit la valeur de température du générateur considérée (80°C, 100°C, 110°C, 120°C), le COP tend à s'améliorer à mesure que l'évaporateur voit sa température s'élever. C'est une tendance tout à fait conforme à ce que l'on pourrait attendre. Le graphique met clairement en évidence que, pour une température d'évaporateur donnée, un COP plus important est réalisable lorsque la température du générateur est plus importante. Chaque courbe illustre une plage de fonctionnement où le COP devient significatif. Par exemple, pour $T_{\text{gen}} = 80^\circ\text{C}$, le COP ne devient notable qu'à partir de températures d'évaporation supérieures à -9°C . En revanche, pour $T_{\text{gen}} = 120^\circ\text{C}$, un fonctionnement efficace est possible dès -31°C . Cela démontre que les générateurs à haute température peuvent être utilisés pour des applications demandant un froid plus profond, tout en conservant un bon rendement. En résumé, plus la température de l'évaporateur est élevée, plus le COP est favorable, même avec une source de chaleur modérée. Cela ouvre la voie à l'utilisation de sources thermiques de récupération à basse exergie, ce qui réduit les coûts et l'impact environnemental.

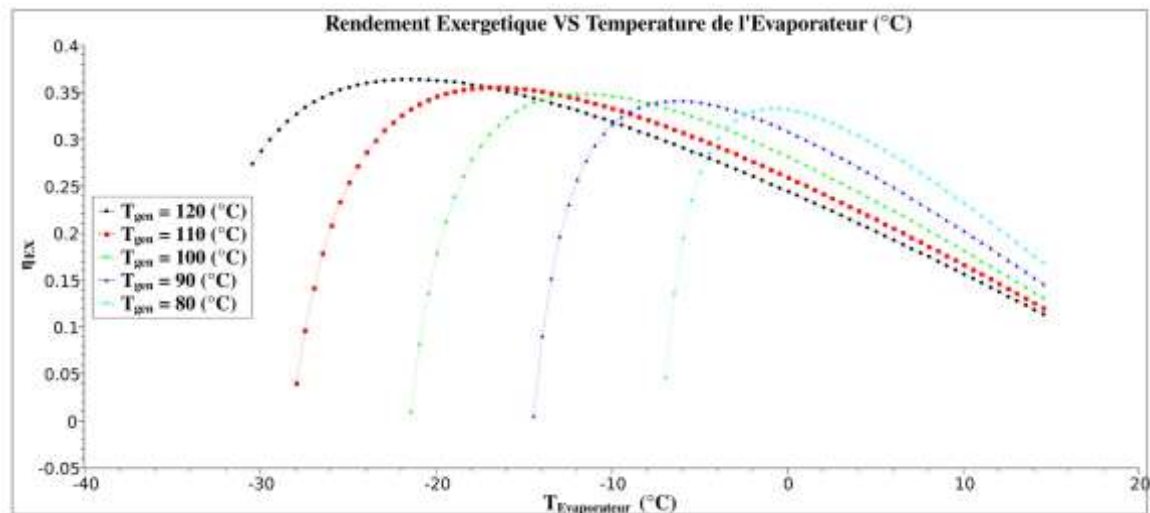


Figure 15.2 : Évolution du rendement exergetique en fonction de la température de l'évaporateur pour différentes températures du générateur

La figure présente l'évolution du rendement exergetique en fonction de la température de l'évaporateur, pour quatre températures de générateur (80°C, 100°C, 110°C et 120°C). Il est observé que, quelle que soit la valeur de T_{gen} , le rendement exergetique atteint un maximum à une certaine température d'évaporation, indiquant un point d'équilibre optimal entre l'apport d'énergie et les pertes internes du cycle.

L'élévation de la température du générateur déplace le maximum du rendement exergetique vers des températures d'évaporation plus basses, tout en augmentant la valeur maximale atteinte. Cela traduit une meilleure aptitude à convertir l'exergie thermique disponible en effet frigorifique utile. Toutefois, au-delà de 7°C, le rendement exergetique chute brusquement, indépendamment de la température du générateur, en raison de la réduction du gradient thermique nécessaire à une bonne absorption.

En synthèse, l'amélioration du rendement exergetique passe par l'optimisation conjointe de T_{evap} et T_{gen} , afin de réduire les pertes et maximiser la qualité du froid produit.

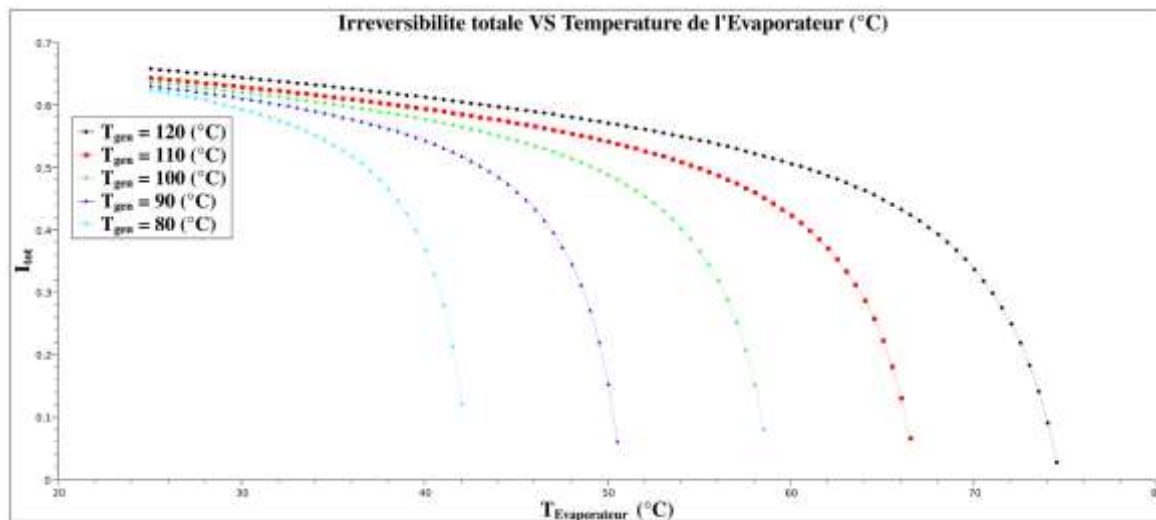


Figure 16: Évolution de l'irrégibilité totale en fonction de la température de l'évaporateur pour différentes températures du générateur

Cette figure révèle que l'irrégibilité totale du cycle diminue avec l'augmentation de la température de l'évaporateur, ce qui indique une réduction des pertes exergétiques. De plus, une température de générateur plus élevée entraîne une irrégibilité plus faible pour une même $T_{évap}$, illustrant l'intérêt des sources de chaleur de meilleure qualité. Lorsque la $T_{évap}$ est trop basse, les irrégibilités augmentent brutalement, rendant le fonctionnement non viable. Par exemple, avec $T_{gen} = 80$ °C, le seuil critique se situe vers -8 °C, alors qu'avec 120 °C, il est possible de descendre à -28 °C. Ainsi, la maîtrise de T_{gen} est déterminante pour étendre la plage de fonctionnement et améliorer la robustesse du système.

IV.3. Etude de l'effet de la température de condenseur

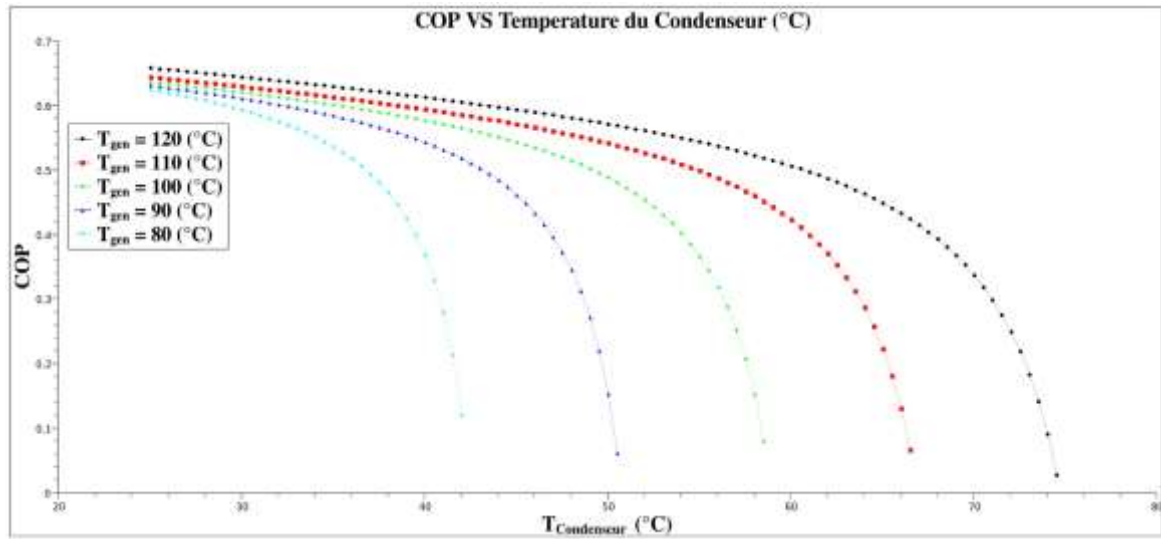


Figure 17: Évolution du COP en fonction de la température du condenseur pour différentes températures du générateur

Ce graphique met en évidence une dégradation du COP à mesure que la température du condenseur augmente. Cette dégradation est attribuable à la diminution du gradient thermique entre l'évaporateur et le condenseur, rendant la condensation du fluide moins efficace. L'effet est d'autant plus marqué lorsque T_{gen} est faible. En revanche, un générateur à haute température permet de limiter la baisse du COP.

Ainsi, pour maximiser le COP, il est recommandé de maintenir une température de condenseur aussi basse que possible, tout en utilisant une source de chaleur à température élevée. Cela permet à la fois de réduire les pertes thermodynamiques et d'augmenter la plage de fonctionnement efficace du cycle.

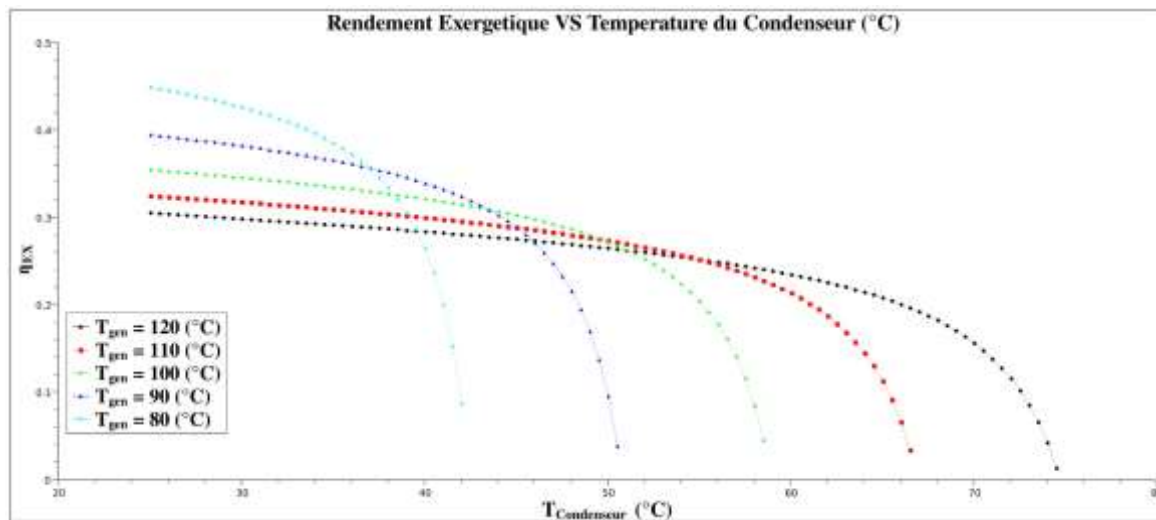


Figure 18: Évolution du rendement exergetique en fonction de la température du condenseur pour différentes températures du générateur

Le rendement exergetique, tout comme le COP, diminue avec l'augmentation de T_{cd} . Toutefois, ce graphique révèle une information cruciale : il existe des croisements de performances selon les couples T_{cd} / T_{gen} . Une source à 80°C peut parfois être plus avantageuse en termes d'exergie qu'une source à 120°C, si la T_{cd} est suffisamment basse. Cela montre l'intérêt d'une analyse exergetique fine pour ajuster le dimensionnement du système en fonction des conditions réelles d'exploitation. Elle permet d'identifier la température de générateur optimale selon les fluctuations de T_{cd} , ce qu'une analyse en termes de COP seul ne permettrait pas de détecter.

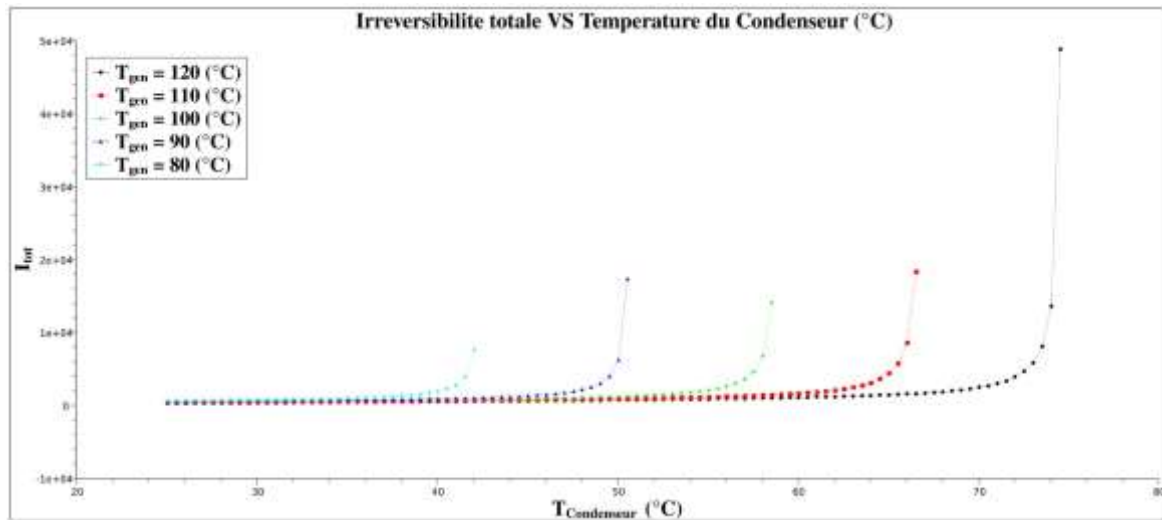


Figure 19: Évolution de l'irréversibilité totale en fonction de la température du condenseur pour différentes températures du générateur

Cette figure confirme que l'irréversibilité totale s'accroît avec l'augmentation de T_{cd} . Cette tendance est plus prononcée lorsque T_{gen} est faible. Par conséquent, une source thermique à haute température permet non seulement d'obtenir un COP supérieur, mais aussi de réduire les pertes internes.

Le graphique permet également de visualiser les limites de fonctionnement. Au-delà de certaines T_{cd} critiques (ex. $> 35^{\circ}\text{C}$ pour $T_{gen} = 80^{\circ}\text{C}$), les pertes deviennent si importantes que le système perd toute efficacité. En revanche, avec un générateur à 120°C , une exploitation jusqu'à 65°C reste possible.

IV.4. Etude de l'effet de la température de l'absorbeur

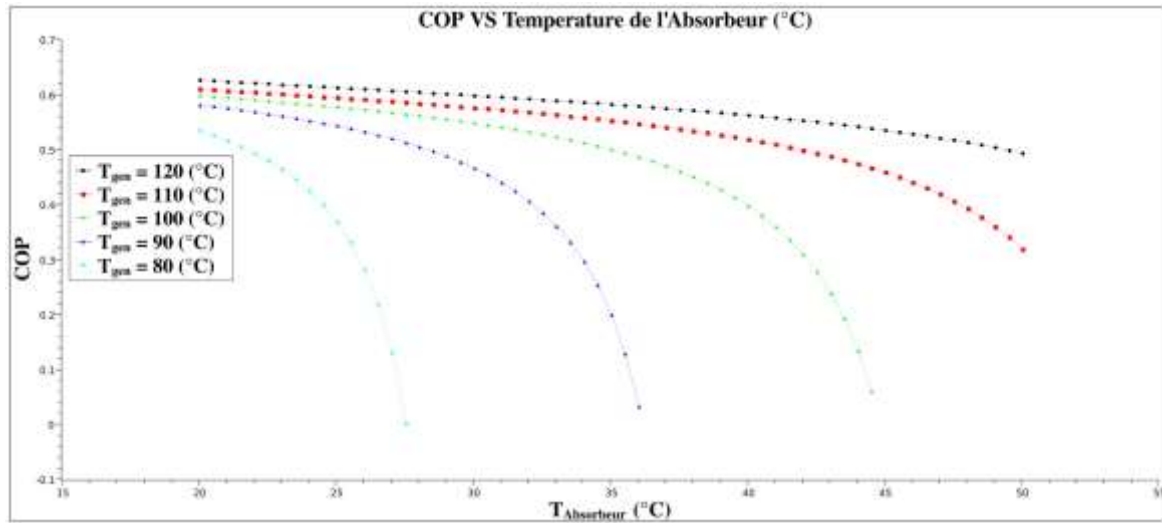


Figure 20.7 : Évolution du COP en fonction de la température de l'absorbeur pour différentes températures du générateur

Cette figure présente l'influence de la température de l'absorbeur sur le coefficient de performance. On observe une diminution du COP à mesure que la température de l'absorbeur augmente, quelle que soit la valeur de T_{gen} . Ce phénomène est attribuable à une baisse de l'efficacité du transfert de masse et de chaleur dans l'absorbeur, causée par une réduction du gradient thermique entre l'évaporateur et l'absorbeur.

Cependant, une température de générateur élevée atténue partiellement cette dégradation, permettant au système de conserver un COP relativement stable sur une plage plus large de températures d'absorption. Cela souligne le rôle essentiel du générateur pour compenser les pertes liées à l'augmentation de T_{ab} .

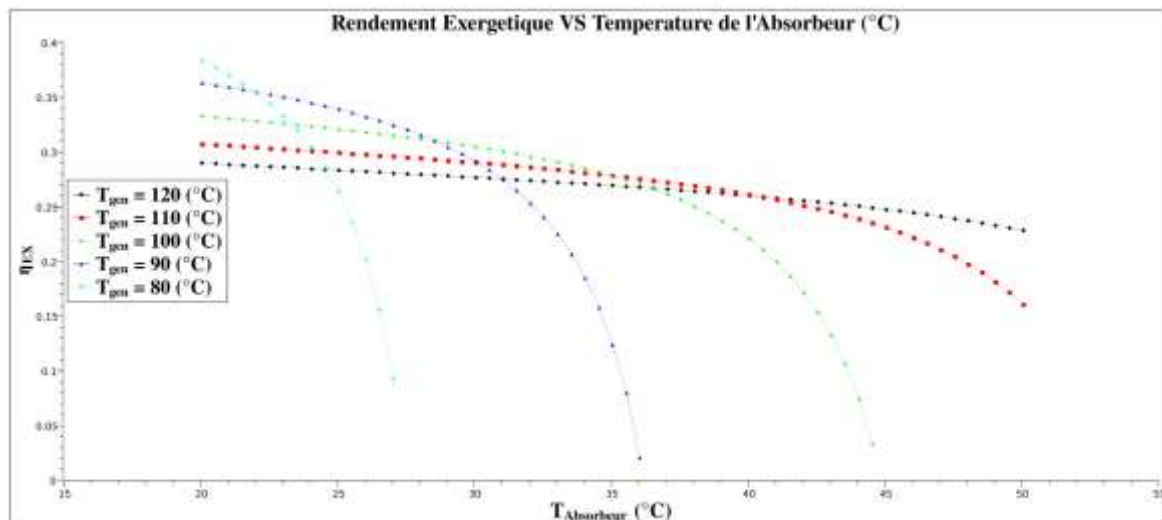


Figure 21.8 : Évolution du rendement exégétique en fonction de la température de l'absorbeur pour différentes températures du générateur

Le rendement exégétique diminue avec la température de l'absorbeur. Cette tendance s'explique par la perte de qualité de l'échange thermique au sein de l'absorbeur, résultant en une exergie dissipée plus importante. La figure met en évidence que cette baisse est plus lente lorsque T_{gen} est élevée, ce qui suggère une meilleure capacité du système à gérer les irrégularités thermiques internes.

L'analyse de cette figure est importante pour déterminer les limites supérieures acceptables pour T_{ab} . Elle montre qu'une conception exégétique optimale doit inclure un contrôle rigoureux de cette température.

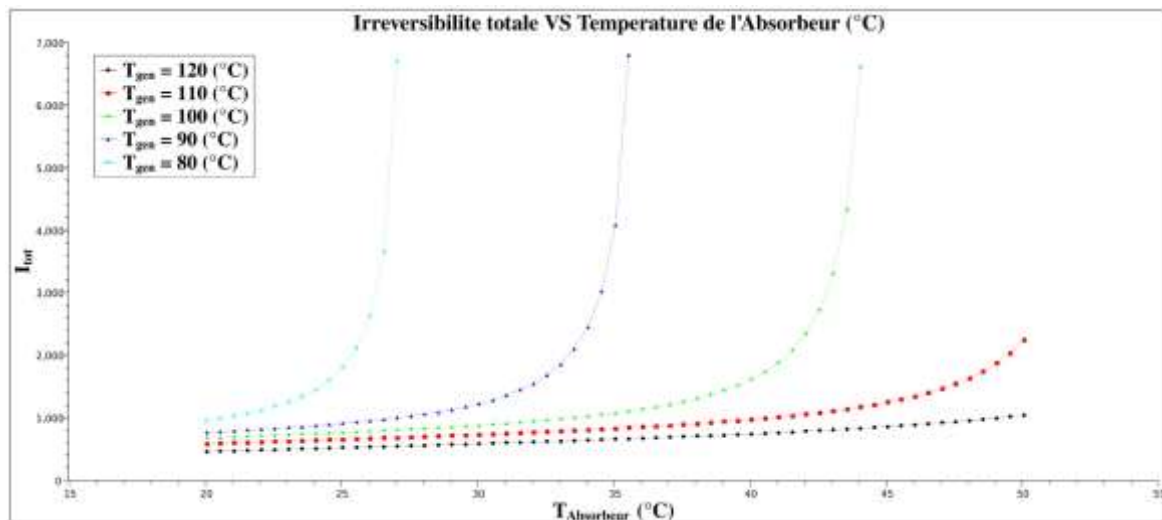


Figure 22.9 : Évolution de l'irréversibilité totale en fonction de la température de l'absorbant pour différentes valeurs de T_{gen}

Comme attendu, l'irréversibilité totale croît avec l'augmentation de la température de l'absorbant. Cette augmentation est conséquence directe d'une diminution du gradient de température dans le système, ce qui rend les transferts thermiques moins efficaces. Les différences observées entre les courbes selon T_{gen} montrent que l'utilisation d'une source chaude plus puissante limite cette augmentation.

Ainsi, un contrôle précis de T_{abs} est nécessaire pour garantir une faible destruction d'exergie. Cette figure complète l'analyse du rendement exergetique, en mettant en évidence l'impact direct des pertes internes sur la performance globale.

IV.5. Comparaison avec la littérature scientifique

Les tendances observées pour chacun des composants du cycle $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ sont en accord avec plusieurs travaux scientifiques publiés.

IV.5.1. Température de l'évaporateur

L'augmentation de la température de l'évaporateur améliore le COP, réduit l'irréversibilité et augmente le rendement exergetique. Ces résultats concordent avec ceux obtenus par M. Berdasco , M. Valles , A. Coronas dans leur étude sur l'analyse exergetique d'un système à absorption $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ [17], ainsi qu'avec les observations faites dans " Exergy Analysis of a Vapor Absorption Refrigeration System Using Carbon Dioxide as Refrigerant"[19]. Ces travaux soulignent que la hausse de T_{evap} favorise une meilleure extraction de chaleur utile, ce qui accroît l'efficacité du cycle. Toutefois, les gains deviennent marginaux au-delà d'un certain seuil.

IV.5.2. Température du condenseur

Une élévation de la température du condenseur entraîne une dégradation rapide du COP et du rendement exergetique, ainsi qu'une augmentation des pertes internes. Cette tendance est confirmée par l'analyse exergetique et energetique d'un system de réfrigération par absorption de Natnale Sitotaw[18], qui met en garde contre les conditions climatiques chaudes pouvant altérer les performances du cycle $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$. cet article souligne que les pertes exergetiques deviennent critiques au-delà de 55–60 °C. Des résultats similaires apparaissent dans le rapport intitulé " Exergy Analysis of a Vapor Absorption Refrigeration System Using Carbon Dioxide as Refrigerant Exergy Analysis of a Vapor Absorption Refrigeration System Using Carbon Dioxide as Refrigerant "[19], qui met en évidence l'impact disproportionné de la température de condensation sur l'ensemble du cycle.

IV.5.3. Température de l'absorbeur

L'élévation de T_{abs} entraîne une baisse de la capacité d'absorption de l'ammoniac, ce qui se traduit par une diminution du COP, une hausse de l'irréversibilité totale, et une baisse du rendement exergetique. Ce comportement est en accord avec les conclusions tirées de " Performance enhancement of absorption refrigeration systems : An overview " [20] qui attribuent cette baisse de performance à la diminution du gradient de concentration entre les phases. Ces résultats mettent en lumière la sensibilité du processus d'absorption à la température, et la nécessité de maintenir T_{abs} dans une plage optimale.

IV.6. Conclusion

L'analyse des résultats met en évidence le rôle déterminant de chacun des quatre composants principaux dans le rendement global du cycle de réfrigération à absorption $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$:

- **Évaporateur**

L'augmentation de la température de l'évaporateur améliore nettement le COP, réduit l'irréversibilité et élève le rendement exégetique. Cependant, au-delà d'un certain seuil, les gains deviennent marginaux. Il est donc crucial de cibler une température d'évaporation optimale, suffisamment élevée pour maximiser les performances sans pénaliser le reste du cycle.

- **Condenseur**

Une élévation de la température du condenseur entraîne une dégradation rapide du COP et du rendement exégetique, accompagnée d'une forte hausse de l'irréversibilité. Ce composant constitue une contrainte majeure, notamment dans des environnements chauds. Il doit donc fonctionner à une température aussi basse que possible pour maintenir l'efficacité du cycle.

- **Absorbeur**

L'augmentation de la température de l'absorbeur diminue la capacité d'absorption de l'ammoniac, ce qui entraîne une baisse du COP, une chute du rendement exégetique et une hausse significative des pertes internes. La stabilité du fonctionnement dépend donc du maintien d'une température modérée dans l'absorbeur.

- **Générateur**

Une température de générateur élevée améliore la qualité de l'exergie injectée, augmente le COP et diminue l'irréversibilité dans l'ensemble du cycle. Elle permet également de compenser partiellement les effets négatifs liés à une température élevée dans le condenseur ou l'absorbeur. Toutefois, une température trop élevée peut poser des contraintes techniques ou énergétiques (coût, disponibilité de la source chaude).

En résumé Pour optimiser le cycle, il est essentiel de maximiser T_{evap} et T_{gen} , et de minimiser T_{cd} et T_{ab} . Une régulation fine et adaptée aux conditions d'usage est indispensable pour atteindre un équilibre performant entre rendement énergétique et exégetique.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans un contexte mondial marqué par la nécessité de recourir à des solutions énergétiques durables, le recours aux systèmes de réfrigération à absorption s'impose comme une alternative prometteuse aux systèmes traditionnels à compression de vapeur. Ce travail s'est inscrit dans cette dynamique, en se concentrant sur la modélisation, l'analyse énergétique et exergetique d'un système de réfrigération à absorption à simple effet utilisant le couple ammoniac-eau ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$). Ce couple est reconnu pour ses propriétés thermodynamiques avantageuses, notamment sa capacité à fonctionner avec des températures de source de chaleur modérées. L'objectif principal de ce mémoire était de mettre en œuvre une approche de modélisation rigoureuse, reposant sur l'outil Engineering Equation Solver (EES), afin d'évaluer les performances d'un tel système dans des configurations réalistes. Le cycle étudié intègre les composants classiques (évaporateur, absorbeur, générateur, condenseur, vanne de détente, régénérateur et pompe) et a été simulé sous différentes conditions de température, représentatives de divers contextes climatiques et industriels.

Les résultats ont mis en évidence plusieurs tendances majeures. D'une part, la température de l'évaporateur joue un rôle central dans l'optimisation du coefficient de performance (COP) : plus elle est élevée, plus le COP s'améliore, tant que les limites physiques du système sont respectées. D'autre part, les températures du condenseur et de l'absorbeur influencent négativement le rendement du système lorsqu'elles augmentent, en raison de la dégradation des échanges thermiques et de la réduction des gradients nécessaires à l'absorption efficace de l'ammoniac. À l'inverse, une température de générateur plus élevée permet d'améliorer la qualité de l'exergie injectée, en réduisant les pertes internes et en étendant la plage de fonctionnement viable du système.

Sur le plan exergetique, l'analyse a permis de quantifier les zones critiques de perte, notamment au niveau du générateur et de l'absorbeur, confirmant la pertinence d'une approche couplée énergie/exergie pour concevoir des cycles optimisés. Le rendement exergetique atteint jusqu'à 35 % dans les meilleures conditions, ce qui est très compétitif pour un système alimenté thermiquement.

Mais au-delà de l'analyse théorique, ce travail s'inscrit aussi dans une perspective d'application concrète, notamment dans la région ensoleillée à forte température tel que le Sahara. Dans ces environnements, les systèmes à compression sont peu adaptés, car ils nécessitent une alimentation électrique continue et un entretien régulier des compresseurs mécaniques, souvent incompatible avec les contraintes d'isolement ou d'accès limité aux

réseaux. À l'inverse, un système à absorption peut être alimenté par une source thermique gratuite et renouvelable, comme l'énergie solaire, la biomasse ou même la chaleur résiduelle industrielle.

Ce potentiel est particulièrement rentable dans le Sahara, où :

- L'ensoleillement est exceptionnel (> 3000 h/an), permettant un fonctionnement stable toute l'année ;
- La demande en froid (conservation alimentaire, médicaments, climatisation) est élevée ;
- L'accès à l'électricité est souvent instable voire inexistant dans certaines zones reculées ;
- L'entretien réduit du système (pas de compresseur, moins de pièces mobiles) constitue un avantage logistique majeur.

De plus, l'utilisation de réfrigérants naturels comme l'ammoniac (NH_3), malgré sa toxicité, présente un très faible impact environnemental ($\text{PRG} = 0$), ce qui renforce l'intérêt écologique de cette technologie, notamment dans un contexte de lutte contre le changement climatique.

L'ensemble de ces éléments converge vers une conclusion forte : la réfrigération par absorption, notamment à simple effet avec le couple $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, constitue une solution énergétique robuste, durable et adaptée aux zones où les températures sont élevées. Les performances, bien que moindres en COP que les systèmes à compression, peuvent être largement compensées par l'utilisation de sources thermiques gratuites ou peu coûteuses, en particulier dans les pays du Sud et les régions à fort potentiel solaire.

Pour renforcer l'exploitation de ce système dans des régions comme le Sahara, plusieurs pistes peuvent être explorées :

- Intégration avec des capteurs solaires thermiques plans ou à concentration pour assurer l'alimentation du générateur ;
- Développement de systèmes hybrides (absorption + stockage thermique) pour assurer la continuité du froid même la nuit ;
- Utilisation de matériaux absorbants ou échangeurs plus performants pour réduire les pertes exégétiques ;
- Simulation dynamique pour intégrer les variations réelles de température, en particulier avec l'intermittence solaire.

Enfin, ce travail montre que la modélisation est un outil incontournable pour concevoir, tester et optimiser ces systèmes avant leur mise en œuvre. Elle permet non seulement de prédire les performances, mais aussi d'identifier les leviers d'amélioration.

Références Bibliographique

Références bibliographiques

- [1] TOUAIBI, Rabah, ELENA, MICHEL *et al* Etude paramétrique d'un système de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple Eau Bromure de lithium. *Efficacité énergétique—sources d'énergies renouvelables—protection de l'environnement COFRET*, 2012, vol. 12.
- [2] DJEFAFLIA Mohamed. *Étude d'une machine frigorifique à absorption liquide NH₃/H₂O*. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, Domaine : Sciences et Techniques, Filière : Master, Spécialité : Énergétique et Environnement. Université A, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Mécanique. Directeur du mémoire : Pr. Boumaraf Latra. Année : 2023
- [3] INSTITUT INTERNATIONAL DU FROID. *Aperçu sur l'histoire de la production du froid*. Paris : IIF/IIR, s.d. Disponible en ligne : www.iifiir.org
- [4] BELACHI Abdallah. *Etude d'un mini cycle de réfrigération à absorption (H₂O-LiBr)*. Thèse de doctorat. UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [5] Chávez-Islas, Heard Grossmann, Synthesis and optimization of an ammonia–water absorption refrigeration cycle considering different types of heat exchangers. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(6), 2972–2990, 2009
- [6] FEROUANI Khaled. *Influence du rejet de chaleur sur les performances d'une machine à absorption*. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique, option Génie Énergétique. Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté de Technologie, Département de Génie Mécanique, 2023
- [7] OUARGLI-SAKER Rachida. *Cours de thermodynamique*. Support pédagogique destiné aux étudiants de 1^{re} année Génie des Procédés. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran « Mohamed Boudiaf », Faculté de Chimie, Département de Génie des Matériaux, Année universitaire 2015–2016. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique.
- [8] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. *Thermodynamics: An Engineering Approach* (8^e éd.). New York : McGraw-Hill Education, 2015.

- [9] HACINI Chaïma. *Calcul des performances d'une machine frigorifique à compression de vapeur utilisant les fluides R22 et R134a*. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, Domaine : Sciences et Technologie, Filière : Master, Spécialité : Énergétique. Université Badji Mokhtar Annaba, Faculté des Sciences de l'Ingéniorat, Département de Génie Mécanique. Directeur du mémoire : Pr. Boumaraf L. Année : 2019.
- [10] EFTIMOV Vasil. *Projet de gestion d'élimination des HCFC (PGEH) – Activités habilitantes liées à l'Amendement de Kigali au Protocole de Montréal en Tunisie*. Publié par l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE) et l'Organisation des Nations Unies pour le Développement Industriel (ONUDI). Projet dirigé par Youssef Hammami (ANPE), Adnan Atwa, Andrés Celave, Rodica Ivan, Regina Vellmer, Franziska Menten (ONUDI). Revu par Youssef Hammami et Andrés Celave. [s.d.]
- [11] S.A. Adewusi, S.M. Zubair, *Second law based thermodynamic analysis of ammonia–water absorption systems*, Energy Conversion and Management, vol. 45, pp. 2355–2369, 2004.
- [12] HMIDA Abir, CHEKIR Nihel, BEN BRAHIM Ammar. *Modélisation d'une machine par absorption et bilan frigorifique d'une chambre froide*. Unité de recherche Thermodynamique Appliquée, Département Génie Chimique – Procédés, École Nationale d'Ingénieurs de Gabès,
- [13] J. Assaf, M. Al-Shayah, H. Qandil, *Energy and exergy analysis of solar-assisted absorption cooling systems*, Renewable Energy, vol. 35, no. 5, pp. 1024–1030, 2010.
- [14] LEE, Shun-Fu et SHERIF, S. A. Thermodynamic analysis of a lithium bromide/water absorption system for cooling and heating applications. *International journal of energy research*, vol. 25, no 11, p. 1019-1031, 2001.
- [15] N. Yamankaradeniz, S.Canbazoglu, S.Baskaya, *Dynamic simulation of a LiBr-H₂O absorption refrigeration system using EES*, Applied Thermal Engineering, vol. 133, pp. 634–642, 2018.
- [16] Sylvain Quoilin, Martijn Van Den Broek, Sébastien Declaye, Pierre Dewallef, Vincent Lemort, *Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 22, pp. 168–186, 2013.
- [17] BERDASCO, Manel VALLÈS, M., et Alberto CORONAS, Thermodynamic analysis of an ammonia/water absorption–resorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, vol. 103, p. 51-60, 2019.

[18] Natnale Sitotaw, “Energy and Exergy Analysis of Single Effect Water-LiBr Vapour Absorption Refrigeration System”, *International Journal of Advanced Science Computing and Engineering*, Vol. 4, No. 3, pp. 175-187, 2022.

[19] Gautam, Samsheer; Roy, Apoorva; and Aggarwal, Bhuvan, “Exergy Analysis of a Vapor Absorption Refrigeration System Using Carbon Dioxide as Refrigerant”, *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Paper 1850, 2018.

[20] VERMA, Abhishek, KAUSHIK, Subhash Chandra, et TYAGI, Sudhir Kumar. Performance enhancement of absorption refrigeration systems: An overview. *Journal of Thermal Engineering*, vol. 9, no 4, p. 1100-1113, 2023.

[21] FLORES, Víctor Hugo Flores, ROMÁN, Jesús Cerezo, et ALPÍREZ, Gisela Montero. Performance analysis of different working fluids for an absorption refrigeration cycle. *American Journal of Environmental Engineering, DOI*, vol. 10, p. 1-10, 2014.

Abstract

This thesis investigates a single-effect absorption refrigeration system using the $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ pair, known for its low environmental impact and good thermodynamic performance. Unlike conventional systems, it uses thermal energy (solar, biomass, or waste heat) instead of electricity, making it suitable for remote or off-grid areas.

The cycle is modeled using Engineering Equation Solver (EES) software to establish mass, energy, and exergy balances. A parametric study analyzes how operating temperatures affect system performance, especially the Coefficient of Performance (COP).

Results show that integrating a heat exchanger improves both energy and exergy efficiency, confirming the system's potential for sustainable cooling applications.

Keywords: engineering equation solver, coefficient of performance, thermodynamic, exergy, energy
 $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$

Résumé

Ce travail de recherche s'intéresse à un système de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple ammoniac-eau ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$), reconnu pour ses qualités thermodynamiques et son faible impact environnemental. Contrairement aux systèmes à compression mécanique, ce type de cycle fonctionne à partir d'une source de chaleur, ce qui le rend adapté aux contextes où l'électricité est limitée ou coûteuse.

La modélisation du cycle est réalisée à l'aide du logiciel Engineering Equation Solver (EES), permettant d'établir les bilans de masse, d'énergie et d'exergie pour l'ensemble des composants. Une étude paramétrique est menée afin d'analyser l'effet des températures de fonctionnement sur les performances thermiques et exergetiques du système.

Les résultats obtenus confirment la viabilité de ce procédé, notamment lorsqu'un échangeur de chaleur est intégré, et soulignent son intérêt pour des applications en milieu solaire ou isolé.

Mot clé : ammoniac-eau, thermodynamique, modélisation, engineering equation solver, exergie.

الملخص

يُعنى هذا العمل البحثي بدراسة نظام تبريد بالامتصاص ذو تأثير بسيط يستخدم مزيج الأمونياك-الماء المعروف بخصائصه الديناميكية الحرارية الجيدة وتأثيره البيئي المنخفض. وعلى عكس أنظمة التبريد بالضغط الميكانيكي، فإن هذا النوع من الدورات يعمل اعتماداً على مصدر حراري، مما يجعله مناسباً للبيئات التي تكون فيها الكهرباء محدودة أو مكلفة. تمت نمذجة الدورة باستخدام برنامج Engineering Equation Solver (EES)، مما سمح بإجراء موازنات الكتلة والطاقة والإكسرجي لجميع مكونات النظام. كما تم إجراء دراسة معلمية لتحليل تأثير درجات حرارة التشغيل على الأداء الحراري والإكسرجي للنظام. تؤكد النتائج المتحصّل عليها جدوى هذا النظام، خاصة عند دمج مبادل حراري ضمنه، وتبرز أهميته في التطبيقات المرتبطة بالبيئات المعزولة أو التي تعتمد على الطاقة الشمسية.

الكلمات المفتاحية: Engineering Equation Solver (EES)، الإكسرجي، الأمونيا-الماء، الديناميكا الحرارية، النمذجة، برنامج