



UNIVERSITE DE BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie
Mécanique:

En Spécialité : ENERGETIQUE
Thème

**Simulation d'une machine frigorifique à absorption sous
TRNSYS**

Promoteur : A.LAAFER

Réalisé par :

Tchantchane ryadh oussama

Abu Breik Abdalrazeq

Statut	Nom et Prénom	Grade
Président	BOUGUERA El Hadi	Professeur
Examineur	ABDI Hamid	MCA
Encadrant	LAAFER Abdelkader	MAB

Année Universités 2022/2023

Dédicace

Je dédie ce travail à :

A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la

Responsabilité...merci ma MERE.

A celui qui a été toujours la source d'inscription

Et de courage ...merci mon PERE.

Ames sœurs MARIA AZHAR et CHAIMA.

Ames toute Amies surtout AHMED KHALIDA et FATEH

A la promotion de Master II.

RYADH OUSSAMA

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Ma première patrie est la Palestine

Mon deuxième pays est l'Algérie

Ma très chère mère,

Mon cher père,

Mes chers frères et sœurs,

Et mes amis d'Algérie et de Palestine.

Notamment Oday et Mohamed et Abdelhak.

A tous mes amis, de ma filière génie mécanique énergétique.

ABDALRAZEQ ABU BREIK

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier notre DIEU, notre créateur Pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à tous les professeurs qui nous ont aidés tout au long de notre cursus universitaire.

*En particulier notre encadreur **Mr : A.LAAFER** pour ses conseils et l'aide qu'il nous a apportés et **Mr : O.KETFI** pour son disponibilité et son accessibilité.*

Nos derniers remerciements, vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'aboutissement de ce travail

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur le refroidissement par absorption et état de l'art	3
Introduction.....	4
1. Le refroidissement (systèmes existants).....	4
1.1. Définition du refroidissement	4
1.2. Les systèmes existants	4
2. Les systèmes à absorption	9
2.1. L'histoire des systèmes de réfrigération à absorption.....	9
2.2. Similitudes entre les cycles de compression et d'absorption de vapeur.....	10
2.3. Différences entre les cycles de compression et d'absorption de vapeur	11
2.4. Différentes machines à absorption.....	12
2.5. Intérêt de la production de froid par absorption.....	14
2.6. Les Applications de système réfrigération par absorption.....	14
2.7. Le principe	15
2.8. Fonctionnement.....	15
2.9. Composants des systèmes de réfrigération à absorption.....	16
2.10. Les fluides frigorigènes	22
3. Etat de l'art.....	25
Conclusion.....	28
Chapitre 2 : Analyse énergétique de la machine frigorifique à absorption et Modélisation de la réfrigération.....	29
Introduction.....	30

1.	Analyse thermodynamique.....	30
1.1.	Le cycle de base	30
1.2.	La production de froide par absorption.....	31
2.	Modélisation de la réfrigération	34
2.1.	Le Bureau	34
2.2.	Charges thermiques des murs Q_w	35
2.3.	Taux de transfert de chaleur des infiltrations d'air Q_a	36
2.4.	Taux de transfert de chaleur dû à l'éclairage Q_l	36
2.5.	Charges thermiques dues aux personnes Q_p	37
2.6.	Charges thermiques engendrées par différentes machines Q_m	37
2.7.	Charge thermique due aux moteurs de ventilateur Q_{fan}	37
2.8.	La fraction solaire	38
	Conclusion.....	39
	Chapitre 3 : Résultats De Simulation Et Discussion	40
1.	Aperçu sur TRNSYS	41
1.1.	Description du logiciel	41
1.2.	TRNSYS Simulation Studio	42
1.3.	TRNBuild.....	42
1.4.	Avantages du logiciel TRNSYS	43
1.5.	Inconvénients du logiciel TRNSYS.....	43
2.	Présentation du modèle de l'installation à étudié.....	44
2.1.	Simulation de météo :	44
2.2.	Simulation de panneau solaire	45
3.	Meteonorm	47

3.1.	La variation de température ambiante extérieure pendant l'année	47
3.2.	La variation de la durée de l'ensoleillement pendant l'année.....	49
3.3.	La variation du rayonnement diffus et du rayonnement global pendant l'année...	50
3.4.	La variation de rayonnement global pendant l'année	51
4.	Simulation TRNSYS	52
4.1.	La climatisation solaire thermique	52
4.2.	Description du rôle des composants de l'installation	53
4.3.	Les types TRNSYS	55
5.	Rendement du cycle total (cycle frigorifique+ capteur).....	58
	Conclusion générale.....	60
	Bibliographie	

Liste des Figures

FIGURE 1-1 : LA PREMIERE MACHINE A GLACE A REFRIGERATION PAR ABSORPTION, UTILISANT DE L'EAU ET DE L'ACIDE SULFURIQUE	10
FIGURE 1-2 : CYCLE A SIMPLE EFFET AVEC ECHANGEUR DE SOLUTION (EX) QUI PERMET DE REDUIRE LA CHALEUR FOURNIE AU GENERATEUR [10].	12
FIGURE 1-3 : CYCLE A ABSORPTION A DOUBLE EFFET [11].....	13
FIGURE 1-4: SCHEMA DE SYSTEME DE MACHINE A ABSORPTION.....	17
FIGURE 1-5: SCHEMA DU GENERATEUR	18
FIGURE 1-6 : SCHEMA DE L'ABSORBEUR.....	19
FIGURE 1-7: SCHEMA DU CONDENSEUR	20
FIGURE 1-8: SCHEMA DE L'EVAPORATEUR	21
FIGURE 1-9: SCHEMA DE LA POMPE	21
FIGURE 1-10: (A) SCHEMA DU DETENDEUR POUR SOLUTION FAIBLE, (B) SCHEMA DU DETENDEUR POUR LE REFRIGERANT	22
FIGURE 2-1 : STRUCTURE D'UNE MACHINE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$).....	30
FIGURE 3-1:TRNSYS SIMULATION STUDIO	42
FIGURE 3-2: INTERFACE DU LOGICIEL TRNBUILD	43
FIGURE 3-3: BOUCLE DE SIMULATION DE METEO SUR LE LOGICIEL TRNSYS	44
FIGURE 3-4: VARIATION DE LA TEMPERATURE AMBIANTE A BECHAR.....	44
FIGURE 3-5: VARIATION DE L'HUMIDITE RELATIVE A BECHAR	45
FIGURE 3-6: BOUCLE DE SIMULATION DE PANNEAU SOLAIRE PLAN SUR LE LOGICIEL TRNSYS	45
FIGURE 3-7: DEBIT DE SORTIE DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN.....	46
FIGURE 3-8: GAIN D'ENERGIE UTILE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN.....	46
FIGURE 3-9. LA VARIATION DE TEMPERATURE DURANT UNE ANNEE A BECHAR	47
FIGURE 3-10: LA VARIATION DE TEMPERATURE DURANT UNE ANNEE A ALGER.....	48
FIGURE 3-11: LA VARIATION DE DUREE DE L'ENSOLEILLEMENT ET DUREE ASTRONOMIQUE DE JOUR DURANT UNE ANNEE A BECHAR	49
FIGURE 3-12: LA VARIATION DE DUREE DE L'ENSOLEILLEMENT ET DUREE ASTRONOMIQUE DE JOUR DURANT UNE ANNEE A ALGER	49
FIGURE 3-13: LA VARIATION DE RAYONNEMENT DIFFUS ET RAYONNEMENT GLOBAL DURANT UNE ANNEE A BECHAR	50
FIGURE 3-14: LA VARIATION DE RAYONNEMENT DIFFUS ET RAYONNEMENT GLOBAL DURANT UNE ANNEE A ALGER	51
FIGURE 3-15: LA VARIATION DE RAYONNEMENT GLOBAL DURANT UNE ANNEE A BECHAR	51
FIGURE 3-16: LA VARIATION DE RAYONNEMENT GLOBAL DURANT UNE ANNEE A ALGER	52
FIGURE 3-17: LES COMPOSANTS DE L'INSTALLATION THERMIQUE.....	53
FIGURE 3-18: BESOINS DE CHAUFFAGE ET CLIMATISATION.....	56
FIGURE 3-19: VARIATION DE TEMPERATURE DE CAPTEUR.....	56
FIGURE 3-20: VARIATION D'ENERGIE UTILE PRODUIT PAR LE CAPTEUR.....	57
FIGURE 3-21: VARIATION DE COP D'UNE MACHINE A ABSORPTION (CAPTEUR PLAN)	58
FIGURE 3-22: VARIATION DE COP D'UNE MACHINE A ABSORPTION (PERFORMANCE MAP COLLECTOR)	58

Liste des Tableaux

TABLEAU 1-1: NOM, NOM EN CLOTURE ET FORMULE CHIMIQUE DE REFRIGERANTS NATURELS.....	23
TABLEAU 3-1: PARAMETRES DU CAPTEUR SOLAIRE PLAN.....	54
TABLEAU 3-2: LES TYPES TRNSYS.....	55

Nomenclature

Symboles	Description	Unité
COP	Coefficient de performance	(sans dimension)
T	température	°C, K
h	l'enthalpie	kJ/kg
W	Travail	kW
P	Pression	kPa
BP	Basse pression	kPa
HP	haute pression	kPa
Q_{ab}	La puissance thermique a l'absorbeur	W
Q_c	La puissance thermique au condenseur	W
Q_g	La puissance thermique au générateur	W
Q_E	La puissance thermique a l'évaporateur	W

Q_A	Quantité de chaleur dégagée de réaction endothermique	kJ/kg
T_a	Température ambiante	°C
T_C	Température du condenseur	°C
T_E	Température de l'évaporateur	°C
T_B	Température du bouilleur (générateur)	°C
A_c	Surface des collecteurs	m ²
S	Surface du mur	m ²
K	le coefficient global de transfert de chaleur	W/m ² .K
h_e	Le coefficient de transfert thermique par convection externe	W/m ² .K
h_i	Le coefficient de transfert thermique par convection interne	W/m ² .K
e_i	L'épaisseur du mur	M
λ_i	La conductivité thermique du mur	W/m.K
D	le débit d'air	m ³ /h
Q_{aux}	La puissance thermique du système auxiliaire	W
Q_s	La puissance thermique utile du champ solaire	W
t	le nombre d'heures d'éclairage par jour	H

w	la puissance des lampes en kilowatts	kW
G	le rayonnement solaire	W/m ²
A _c	Surface des collecteurs	m ²

Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
HFC	hydro fluor carbone
HCFC	hydro chlorofluorocarbure
LiBr	Symbole chimique du bromure de lithium
NH ₃	Symbole chimique de l'Ammoniac
TRNSYS	TRaNsient SYstems Simulation
S.F	la fraction solaire

Résumé

Le but de cette étude est de présenter la mise en place d'une simulation pour un système de climatisation solaire. Nous examinons la modélisation de ces systèmes de refroidissement en utilisant les composants disponibles dans la bibliothèque du logiciel de calcul TRNSYS.

Dans notre étude, nous analysons les variations de température et les besoins énergétiques estivaux d'un bureau situé à Bechar. De plus, nous avons réalisé une étude sur un cycle frigorifique à absorption qui fonctionne grâce à l'énergie solaire.

Il est envisageable de substituer les systèmes de réfrigération traditionnels par des systèmes de réfrigération à absorption, à condition d'utiliser des capteurs solaires performants munis de surfaces de captage appropriées.

Mot Clé : machine à absorption, simulation trnsys, énergie solaire, environnement

Abstract

The aim of this study is to present the implementation of a simulation for a solar air-conditioning system. We examine the modeling of these cooling systems using components available in the TRNSYS calculation software library.

In our study, we analyze the temperature variations and summer energy requirements of an office located in Bechar. In addition, we have carried out a study of an absorption refrigeration cycle powered by solar energy.

Traditional refrigeration systems can be replaced by absorption refrigeration systems, provided that high-performance solar collectors with suitable collector surfaces are used.

Key Words: absorption machine, TRNSYS Simulation, solar energy, environment

المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو تقديم تنفيذ محاكاة لنظام تكييف الهواء الشمسي. نقوم بفحص نمذجة أنظمة التبريد هذه (trnsys) باستخدام المكونات المتوفرة في مكتبة برامج حساب

في دراستنا، نقوم بتحليل التغيرات في درجات الحرارة ومتطلبات الطاقة الصيفية لمكتب يقع في بشار. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بإجراء دراسة لدورة التبريد بالامتصاص المشغلة بالطاقة الشمسية

يمكن استبدال أنظمة التبريد التقليدية بأنظمة التبريد بالامتصاص، بشرط استخدام مجمعات الطاقة الشمسية عالية الأداء مع أسطح تجميع مناسبة.

الكلمات المفتاحية: ماكينة الامتصاص، محاكاة ترنزيس، الطاقة الشمسية، البيئة

Introduction générale

La réfrigération joue un rôle essentiel dans notre vie quotidienne, que ce soit pour préserver nos aliments ou pour maintenir des conditions climatiques agréables dans nos maisons et lieux de travail. Les systèmes traditionnels de réfrigération par compression de vapeur ont longtemps été la technologie dominante, mais ils ont des limites en termes de consommation d'énergie et d'impact sur l'environnement. Face aux préoccupations croissantes concernant le changement climatique et l'efficacité énergétique, il est nécessaire de développer des alternatives de réfrigération qui réduisent les émissions de gaz à effet de serre et la consommation d'énergie.

L'une de ces alternatives est la réfrigération par absorption. Les systèmes de réfrigération par absorption adoptent une approche différente des systèmes de compression de vapeur traditionnels en utilisant un réfrigérant et un absorbant pour produire du froid. Bien que cette technologie existe depuis plus d'un siècle, elle a été largement négligée jusqu'à récemment en raison de la domination de la réfrigération par compression de vapeur.

Les systèmes de réfrigération par absorption offrent de nombreux avantages potentiels, tels qu'une consommation d'énergie réduite, des émissions de gaz à effet de serre plus faibles et une meilleure durabilité. Cependant, ils présentent également leurs propres défis et limitations uniques qui doivent être pris en compte [1].

Dans ce travail, notre objectif était de déterminer la faisabilité de l'utilisation de machines à absorption pour la réfrigération en modélisant et en simulant leur fonctionnement. Pour cela, nous avons divisé notre travail en trois chapitres. Ainsi, la structure de notre mémoire était organisée de la manière suivante :

Chapitre I : Dans ce chapitre, on présente des généralités sur la machine frigorifique à absorption, les premières parties sur les différents systèmes existant de refroidissement après en aborde en détaille les systèmes à absorption, les différents machines à absorption, le principe de fonctionnement, les avantages et les inconvénient de la machine à absorption et les fluides frigorigène et finalement on a l'état de l'art.

Chapitre II : Dans ce chapitre nous allons effectuer une étude thermodynamique des machines à absorption à simple effet dans une salle, en prenant comme exemple le couple (H₂O/LiBr) comme fluide de fonctionnement.

Chapitre III : Dans ce chapitre, nous allons procéder à la simulation d'une machine frigorifique à absorption en utilisant le logiciel TRNSYS et en se basant sur les données fournies par Meteonorm. Cette simulation a été réalisée sur un bureau. Par la suite, nous analyserons les résultats obtenus et en discuterons.

L'objectif de notre travail, Dans le but d'optimiser les performances des systèmes de refroidissement par absorption, une alternative écologique a été mise en œuvre en remplaçant le gaz par des panneaux solaires respectueux de l'environnement.

**Chapitre 1 : Généralités sur le refroidissement par
absorption et état de l'art**

Introduction

La technologie du refroidissement par absorption constitue une solution novatrice qui se présente comme une alternative aux méthodes classiques de climatisation. Contrairement aux systèmes de compression mécanique traditionnels, le refroidissement par absorption repose sur un procédé thermochimique. Explorons en détail comment ce procédé permet d'extraire la chaleur de l'environnement pour générer du froid. En comprenant les principes fondamentaux du refroidissement par absorption, vous pourrez pleinement apprécier les nombreux avantages qu'il offre, notamment en termes d'efficacité énergétique et de réduction de l'impact sur l'environnement.

1. Le refroidissement (systèmes existants)

1.1. Définition du refroidissement

Un système de refroidissement est une installation qui abaisse la température d'un ensemble industriel, d'un ensemble mécanique, d'un local ou d'un immeuble [2].

1.2. Les systèmes existants

1.2.1 Systèmes mécano-frigorifiques

Parmi eux, deux familles se détachent :

- les systèmes à compression de vapeurs liquéfiables.
- les systèmes utilisant des cycles à gaz.

1.2.1.1 Systèmes à compression de vapeur

Le cycle frigorifique utilise un fluide actif appelé frigorigène, qui se transforme en vapeur dans un évaporateur pour produire du froid utile. La vapeur est ensuite aspirée et comprimée par un compresseur mécanique, puis refoulée dans un condenseur où elle se liquéfie. Le liquide ainsi formé retourne vers l'évaporateur en passant par un régleur (ou détenteur). Ce système est le plus largement utilisé.

Une première description du cycle a été donnée en 1805 par Oliver Evans, un Américain (1755-1819). Cependant, le premier brevet et le premier modèle fonctionnant avec de l'éther éthylique ont été développés par Jacob Perkins, un Américain travaillant en Angleterre, en 1835. Les premières machines à compression qui ont connu un succès industriel ont été créées par James Harrison, un Écossais émigré en Australie (1816-1893), avec des brevets déposés en 1855-56-57. Ces machines étaient fabriquées en Angleterre et pouvaient produire de la glace ou refroidir des saumures, des liquides frigoprotecteurs. L'éther éthylique était utilisé comme frigorigène à l'époque [3].

Par la suite, de nouveaux frigorigènes ont été introduits successivement. Charles Tellier, un Français (1828-1913), a utilisé le diméthyléther. Thaddeus Lowe, un Américain (1832-1913), a utilisé le dioxyde de carbone (CO_2), qui est actuellement réapparu après une période d'oubli. L'ammoniac (NH_3), d'abord expérimenté par Tellier en 1862, est devenu un réfrigérant majeur grâce aux travaux de l'Américain David Boyle (1837-1891) et surtout de l'Allemand Carl von Linde (1842-1934), et il est toujours utilisé aujourd'hui. Le dioxyde de soufre (SO_2) a été utilisé par le Suisse Raoul Pierre Pictet (1846-1929), mais a disparu au seuil de la Seconde Guerre mondiale. Le chlorure de méthyle (chlorométhane) (CH_3Cl) a été utilisé pour la première fois par le Français C. Vincent en 1878 et a connu une longue carrière commerciale, disparaissant seulement dans les années 1960.

Les hydrocarbures fluorés ont été développés dans le but de trouver des frigorigènes sûrs (non toxiques et non inflammables) et ont été inspirés par les travaux de Swarts à Gand entre 1893 et 1907. Une équipe américaine de la Frigidaire Corporation, dirigée par Thomas Midgley, a mis au point en 1930 les premiers frigorigènes fluorés. Le premier CFC, le R12 (CF_2Cl_2), est apparu en 1931, suivi du premier HCFC, le R22 (CHF_2Cl), en 1934, et du premier mélange azéotropique, le R502 (R22/R115), en 1961.

Depuis la publication en 1974 d'un article des lauréats américains du prix Nobel F.S. Rowland et M.J. Molina, qui a révélé les effets nocifs du chlore sur la couche d'ozone stratosphérique, les frigorigènes chlorés tels que les CFC et les HCFC sont soumis à des processus d'élimination par le biais du Protocole de Montréal (1987) et de ses amendements. Actuellement, des frigorigènes fluorés non chlorés sont proposés, tels que le R134a, ainsi que des mélanges de HFC tels que le R410A, le R407C, le R404A, qui ont une influence plus ou moins forte sur l'effet de serre. On propose également l'utilisation (ou le retour) de frigorigènes "naturels" tels que l'ammoniac, les hydrocarbures, l'eau et le CO_2 , qui ont une

action très faible ou nulle sur l'effet de serre. Au fil du temps, les composants des systèmes de compression ont également beaucoup évolué. Par exemple, les lourds compresseurs à pistons lents et encombrants du XIXe siècle ont cédé la place, 100 ans plus tard, à des machines rapides et légères. De nouveaux types de compresseurs sont apparus, tels que les compresseurs à vis bi-rotor (A.Lysholm en Suède - 1934), les compresseurs à vis mono-rotor (B. Zimmern en France - 1967), les compresseurs "spiro-orbitaux" (scroll) dans les années 70 (brevet du Français Léon Creux - 1905) et les compresseurs centrifuges (travaux fondamentaux de l'ingénieur français Auguste Rateau en 1890, puis de l'Américain Willis Carrier en 1911).

Pour les petites machines, des groupes frigorifiques hermétiques ont été développés pour limiter les fuites de frigorigène. Le premier du genre était la curieuse machine de l'abbé Audiffren en 1905. Les groupes hermétiques sont maintenant largement utilisés. Parallèlement, les échangeurs thermiques (condenseurs et évaporateurs) ont été améliorés et allégés au fil du temps [2].

1.2.1.2 Systèmes utilisant des cycles à gaz

Dans ce contexte, le liquide en mouvement ne subit pas de changement d'état pendant le cycle de réfrigération, mais reste à l'état gazeux. Lorsqu'il est comprimé, le gaz se réchauffe, puis il est refroidi sous pression jusqu'à atteindre la température ambiante. Ensuite, il est détendu, ce qui entraîne une baisse de sa température.

La première "machine à air" à cycle ouvert a été inventée par John Gorrie (1803-1855), un scientifique américain, dans le but de refroidir de la saumure à une température de $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ (brevets déposés en 1850-1851). Inspiré du moteur à air chaud du pasteur Robert Stirling (1837), l'écossais Alexander Kirk (1830-1892) a créé une machine à cycle fermé qui a régulièrement produit une température de $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant environ dix ans à partir de 1864. D'autres contributeurs notables à cette technique incluent l'allemand Franz Windhausen (1829-1904), l'américain Leicester Allen (1832-1912) et le français Paul Giffard (1837-1897).

Le développement de ces systèmes a été moins important que celui des machines à compression de vapeur en raison de leur efficacité réduite dans les domaines courants de la réfrigération, de la congélation et de la climatisation. Cependant, elles sont à l'origine de la plupart des cycles cryogéniques utilisés pour la liquéfaction des gaz et la production de basses températures.

1.2.2 Systèmes thermoélectriques

Le scientifique français Jean Charles Peltier (1785-1845) fit une découverte en 1834. Il observa qu'en faisant passer un courant continu à travers une jonction de deux métaux différents, il se produisait une libération ou une absorption de chaleur à cette jonction, en fonction du sens du courant. Bien que cela ait suscité un grand intérêt scientifique à l'époque, la thermoélectricité ne s'est réellement développée qu'entre les années 1940 et 1960, grâce aux avancées dans la compréhension des semi-conducteurs. Cependant, les espoirs initialement suscités ont été rapidement déçus et les applications actuelles sont limitées.

1.2.3 Systèmes thermo-frigorifiques

Parmi les différentes catégories de systèmes de réfrigération qui utilisent de l'énergie thermique, on peut identifier :

- les systèmes à absorption.
- les systèmes à adsorption et thermochimiques.
- les systèmes à éjection.

1.2.3.1 Systèmes frigorifiques continus à absorption

Bien que leur importance soit considérablement moindre que celle des systèmes de compression, ces systèmes thermo-frigorifiques connaissent actuellement un certain niveau de développement. Ils se distinguent par le fait que la circulation du frigorigène n'est pas assurée par un compresseur mécanique, mais plutôt par la circulation d'un liquide absorbant, pompé, dont la teneur en frigorigène absorbé dépend de la température et de la pression. L'énergie mécanique requise est très faible, mais en contrepartie, le système consomme de la chaleur.

Le pionnier de ces systèmes est un inventeur français du nom de Ferdinand Carré (1824-1900), qui a déposé en 1859 le premier brevet d'une machine à absorption continue utilisant le couple frigorigène : ammoniac - absorbant : eau. Ces machines sont rapidement devenues opérationnelles. L'étude thermodynamique de ces systèmes n'a commencé qu'en 1913 avec l'allemand Edmund Altenkirch et s'est poursuivie pendant la première moitié du 20ème siècle. Il convient également de mentionner les travaux de l'italien Guido Maïuri sur ces machines, ainsi que ceux des suédois von Platen et Munters sur le cycle d'absorption-diffusion pour les réfrigérateurs à absorption sans pompe (1920). Dans les années 40, aux États-Unis, est apparue la machine à absorption eau-bromure de lithium, où l'eau est utilisée comme

frigorigène ; cette adaptation du cycle de Carré est depuis largement utilisée dans les systèmes de climatisation [4].

Bien que les systèmes à absorption discontinus aient fait leur apparition assez tôt (par exemple, les appareils de refroidissement des carafes d'eau d'Edmond Carré en 1866), leur développement a été limité.

1.2.3.2 Systèmes frigorifiques à adsorption et thermochimiques

Faraday a introduit la première technologie d'adsorption de vapeur en 1848, en utilisant un adsorbant solide. Les cycles d'adsorption ont été d'abord utilisés dans la réfrigération et les pompes à chaleur dans le début des années 1990 [5]. Leur fonctionnement repose sur les effets thermiques qui se produisent lors de la capture ou de la libération physique d'un gaz par un matériau solide (systèmes d'adsorption) ou lors de la formation ou de la décomposition de composés chimiques avec un fluide frigorigène (systèmes thermochimiques) [2]. Les couples les plus utilisés sont le charbon actif-méthanol, charbon actif-ammoniac, zéolithe-eau et silicagel-eau [6].

Ce fonctionnement est naturellement discontinu. Bien qu'ils soient encore peu utilisés, ils font actuellement l'objet de nombreuses recherches.

1.2.4 Système frigorifique à éjection

Bien qu'il puisse être utilisé avec d'autres réfrigérants, c'est avec l'eau que le dispositif frigorifique à éjection a fait son apparition en 1908. L'idée originale provient du Français Maurice Leblanc (1857-1923).

La réduction de température de l'eau, qui s'évapore sous faible pression, est obtenue en aspirant la vapeur formée à l'aide d'un éjecteur, également appelé trompe, alimenté par un jet de vapeur vive provenant d'une chaudière. L'éjecteur est d'abord conçu comme une buse convergente - l'augmentation de la vitesse du jet réduit la pression, permettant ainsi l'aspiration désirée - puis il se dilate progressivement pour devenir divergent - l'élargissement graduel de la section disponible pour la vapeur ralentit sa vitesse et la pression augmente. Ce système, qui présente des utilisations spécifiques limitées, est peu répandu [2].

2. Les systèmes à absorption

2.1. L'histoire des systèmes de réfrigération à absorption

Edmond Carré est crédité du développement de la première machine de réfrigération par absorption en 1850. Pour le fluide de travail, il utilisait un mélange d'eau et d'acide sulfurique (H_2SO_4), illustré à la figure 1.1, nécessitant une grande quantité de cet acide pour absorber une faible quantité de vapeur d'eau, permettant ainsi le processus de réfrigération [7]. Cependant, en 1859, Ferdinand Carré opta pour un autre fluide de travail, à savoir le mélange ammoniaque-eau, en raison de ses propriétés : stabilité, bas point d'ébullition normal ($44^\circ C$) et affinité élevée de l'ammoniac pour l'eau [8].

Ces machines furent presque immédiatement opérationnelles. L'étude thermodynamique de ces machines a commencé en 1913 avec l'Allemand Edmund Altenkirch et s'est poursuivie pendant la première moitié du XXe siècle. Il a également examiné les travaux italiens de Guido Maïuri sur ces machines et les travaux de Platen et Munters sur le cycle d'absorption-diffusion pour les réfrigérateurs à absorption sans pompe (1920). Dans les années 1940, aux États-Unis, une machine d'absorption eau-bromure de lithium a été développée, où l'eau est le fluide frigorigène. Cette adaptation du cycle de Carré est largement utilisée dans la climatisation à grande échelle. [2]

Actuellement et en raison de la conscience écologique de plus en plus grandissante, l'utilisation de l'énergie renouvelable est devenu un recours plus fréquent et en même temps très attractif, créant un cadre de renaissance et de développement pour les pompes à chaleur, dépassant les défauts techniques qui ont pu stopper l'essor de la première génération vers les années 80. Par conséquent, les machines à absorption s'avèrent être des systèmes assez fiables et économiques tout en n'ayant aucune incidence négative envers l'environnement [9].

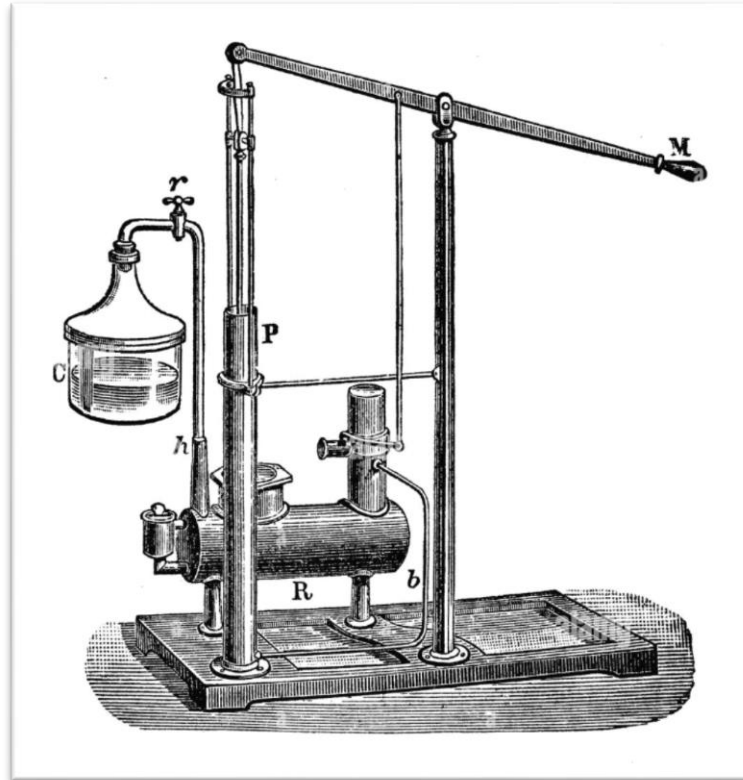


Figure 1-1 : La première machine à glace à réfrigération par absorption, utilisant de l'eau et de l'acide sulfurique

2.2. Similitudes entre les cycles de compression et d'absorption de vapeur

Le cycle de base d'un refroidisseur à absorption est similaire au cycle traditionnel d'un refroidisseur à compression de vapeur en ce sens que [10] :

1. Les deux cycles font circuler le réfrigérant à l'intérieur du refroidisseur pour transférer la chaleur d'un fluide à l'autre.
2. Les deux cycles comprennent un dispositif pour augmenter la pression du réfrigérant et un dispositif d'expansion pour maintenir la différence de pression interne, qui est essentielle au processus global de transfert de chaleur.
3. La vapeur du réfrigérant est condensée à une pression et une température élevées, rejetant la chaleur dans l'environnement.
4. La vapeur du réfrigérant est vaporisée à basse pression et à basse température, absorbant la chaleur du flux d'eau réfrigérée.

2.3. Différences entre les cycles de compression et d'absorption de vapeur

Le cycle de base du refroidisseur à absorption diffère du cycle du refroidisseur à compression de vapeur par les points suivants [10] :

1. Les systèmes à absorption utilisent l'énergie thermique sous forme de vapeur, de combustible direct ou de chaleur résiduelle pour obtenir l'effet réfrigérant.
2. Le cycle d'absorption fait appel à une pompe à liquide au lieu d'un compresseur pour créer une augmentation de pression entre l'évaporateur et le condenseur. L'utilisation d'une pompe pour déplacer un liquide est plus simple et moins coûteuse que la compression d'un gaz, ce qui réduit la quantité de travail nécessaire au système. Par conséquent, le système demande moins d'efforts. Cependant, le générateur produit une quantité importante de chaleur. Ainsi, le système remplace essentiellement l'apport de travail d'un cycle de compression de vapeur par un apport de chaleur.
3. Le cycle d'absorption utilise différents réfrigérants qui ne présentent pas de risques pour l'environnement, d'appauvrissement de la couche d'ozone ou de potentiel de réchauffement planétaire (par exemple, le système d'absorption au bromure de lithium utilise de l'eau distillée comme réfrigérant). Le cycle de réfrigération à compression de vapeur utilise généralement un halocarbure (tel que HCFC-123, HCFC-22, HFC-134a, etc.) comme réfrigérant.
4. Comparativement aux dispositifs de réfrigération à compression, les systèmes à absorption présentent un nombre réduit de composants en mouvement, génèrent moins de bruit et de vibrations, sont de taille compacte pour des capacités élevées, et exigent un entretien minimal.
5. Par rapport aux refroidisseurs à compression, les performances des systèmes à absorption ne sont pas sensibles aux variations de charge et ne dépendent pas beaucoup de la surchauffe de l'évaporateur.
6. Par rapport aux refroidisseurs mécaniques, les systèmes à absorption ont un faible coefficient de performance ($\text{COP} = \frac{\text{charge du refroidisseur}}{\text{entrée de chaleur}}$). Cependant, les refroidisseurs à absorption peuvent réduire considérablement les coûts d'exploitation parce qu'ils sont alimentés par de la chaleur résiduelle de faible qualité.

2.4. Différentes machines à absorption

2.4.1 Machines à simple effet

Le système à simple effet d'absorption est largement préféré en raison de sa simplicité. La figure 1.2 illustre le schéma du principe d'une machine utilisant la combinaison $H_2O/LiBr$. Si un absorbant volatil tel que NH_3 est utilisé, dans le cas de la combinaison NH_3/H_2O , l'installation nécessiterait une colonne de rectification pour purifier le réfrigérant avant son introduction dans le condenseur [11].

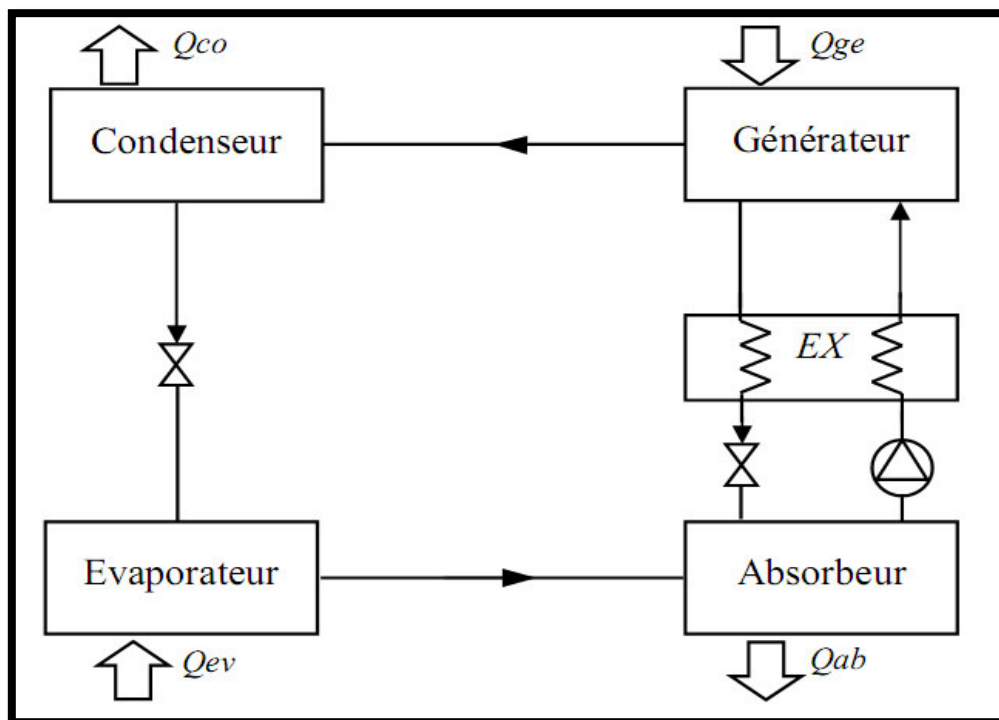


Figure 1-2 : Cycle à simple effet avec échangeur de solution (EX) qui permet de Réduire la chaleur fournie au générateur [10].

En règle générale, un dispositif de transfert thermique est utilisé entre le générateur et l'absorbeur afin de préchauffer la solution riche en utilisant la chaleur libérée par la solution pauvre. C'est ce que l'on appelle communément un "dispositif d'échange de solution". Son utilité réside dans l'augmentation du coefficient de performance (COP). Des études expérimentales ont démontré qu'un tel dispositif devrait être intégré à tout système, car il permet d'accroître le COP d'environ 60%.

2.4.2 Machine à double effet

Le cycle à absorption à double effet a été introduit entre 1956 et 1958, la figure 1.3 montre un tel système fonctionnant avec H₂O/LiBr. Le générateur à haute pression est chauffé par une source de chaleur extérieure, les vapeurs frigorigènes produites sont ensuite utilisées comme source d'énergie à la génératrice basse pression ce qui permet la séparation d'avantage du frigorigène. Ce cycle fonctionne à trois niveaux de pression. La pression dans le 1er générateur peut être très importante ce qui nécessite des températures élevées pour permettre la séparation et, en plus, il y a risque de dépassement de la plage de solubilité du mélange utilisé donc il faut choisir correctement le fluide de travail. Ce problème ne se pose pas dans le cas du bromure de lithium.

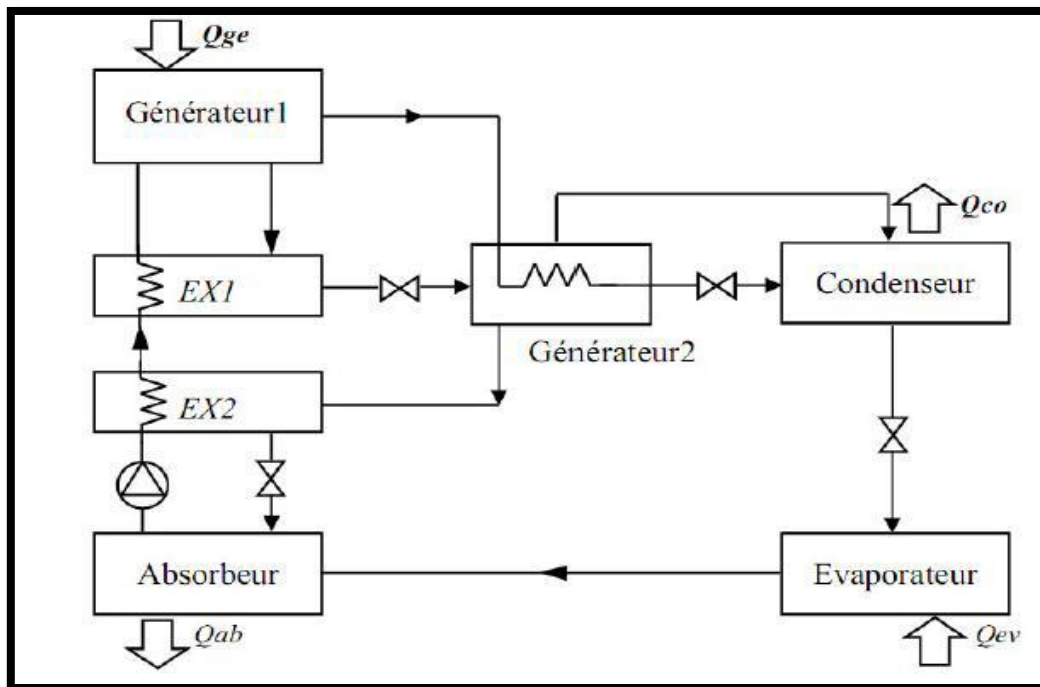


Figure 1-3 : Cycle à absorption à double effet [11].

La coefficient de performance (COP) compris entre 1 et 1,2 avec des températures de génération demandées de l'ordre de 130°C à 160°C, c'est-à-dire nécessitant des capteurs à concentration suivant le rayonnement solaire.

L'utilisation de ces machines double effet avec l'énergie solaire reste une application possible et intéressante en termes d'efficacité mais marginale (2 opérations recensées) en raison des températures de fonctionnement demandées [11].

2.5. Intérêt de la production de froid par absorption

Le coefficient de performance (COP) donne une indication de l'efficacité énergétique d'un système de réfrigération. Pour une machine de réfrigération à absorption à simple effet, le COP se situe généralement entre 0,7 et 1,0. Cependant, contrairement à une machine de réfrigération à compression mécanique, une machine à absorption peut être alimentée en énergie provenant de sources inépuisables, gratuites et renouvelables, telles que l'énergie solaire, par exemple. Cela en fait une option attrayante, d'autant plus qu'elle n'utilise pas de fluides nocifs qui sont progressivement interdits par les réglementations internationales, tels que les chlorofluorocarbures (CFC).

De nos jours, la gamme de puissances disponibles pour ces machines s'élargit, ce qui offre de véritables opportunités dans de nombreux secteurs du bâtiment, tels que les résidences individuelles, les petits immeubles résidentiels et les bâtiments tertiaires [12].

2.6. Les Applications de système réfrigération par absorption

Le principal avantage des refroidisseurs à absorption est leur capacité à utiliser les flux de chaleur résiduelle qui seraient autrement mis au rebut. En termes de performance énergétique, les refroidisseurs à compression de vapeur entraînés par un moteur l'emportent toujours sur les refroidisseurs à absorption. Il existe néanmoins des applications spécifiques pour lesquelles les refroidisseurs à absorption présentent un avantage substantiel par rapport aux refroidisseurs à compression de vapeur à moteur. Voici quelques-unes de ces applications :

- Pour les installations qui utilisent beaucoup d'énergie thermique pour leurs processus, une grande partie de la chaleur est généralement rejetée dans l'environnement comme un déchet.
- Dans le cas des systèmes de cogénération, où la demande simultanée de chaleur et d'électricité est nécessaire, il est possible d'utiliser des dispositifs de refroidissement par absorption qui exploitent l'énergie thermique afin de générer de l'eau réfrigérée.
- Pour les installations nécessitant une grande quantité d'électricité, les refroidisseurs à absorption réduisent ou atténuent les variations soudaines dans le profil de consommation électrique d'un bâtiment, et peuvent être intégrés à une stratégie de gestion des périodes de forte demande.
- Dans les installations où l'alimentation électrique n'est pas robuste, coûteuse, peu fiable ou indisponible, il est plus facile d'obtenir un apport de chaleur avec une

flamme qu'avec de l'électricité. Les refroidisseurs à absorption consomment très peu d'électricité par rapport à un refroidisseur à cycle de compression entraîné par un moteur électrique.

- Pour les établissements qui envisagent d'utiliser un "fluide frigorigène naturel" et qui aspirent à obtenir la certification LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), les systèmes de réfrigération à absorption sont une option recommandée. Les systèmes de réfrigération à absorption n'emploient ni les CFC ni les HCFC, des composés reconnus pour contribuer à la détérioration de la couche d'ozone.
- Pour les installations qui mettent en œuvre le mécanisme de développement propre (MDP) et accumulent des crédits carbone, l'utilisation de l'absorption couplée à la récupération de la chaleur perdue et au système de cogénération permet de réduire les problèmes liés à l'effet de serre dû à l'émission de CO₂.

2.7. Le principe

Le principe de l'absorption est un procédé chimique basé sur la faculté qu'ont certains liquides à absorber et à générer une vapeur.

On utilisera deux composants l'un sera plus volatil étant porté à ébullition ce sera le fluide frigorigène, et l'autre sera appelé l'absorbant [13].

Les couples (mélange binaire) les plus utilisés sont :

- Eau+ bromure de lithium : l'eau étant le fluide frigorigène
- Ammoniac+ eau : l'ammoniac étant le fluide frigorigène

De manière similaire aux machines thermodynamiques à compression, les systèmes d'absorption possèdent les composants fondamentaux d'un circuit frigorifique, à savoir le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. La seule distinction réside dans le fait qu'ils intègrent également un composant supplémentaire appelé bouilleur ou générateur, ainsi qu'un absorbeur, qui sont nécessaires aux réactions chimiques [13].

2.8. Fonctionnement

Le principe de fonctionnement des machines frigorifiques à absorption est le même que celui des machines à compression :

- Vaporisation à basse température.
- Condensation à haute température.

Dans le bouilleur ou le générateur une solution riche en fluide frigorigène (exemple: eau) est portée à ébullition par une source de chaleur extérieure (résistances, brûleur à gaz, etc.) ce qui engendre une vaporisation du fluide. Le fluide frigorigène se sépare de l'absorbant.

Cette vapeur chemine vers le condenseur et cède sa chaleur au circuit de refroidissement (air,eau). Le liquide sous-refroidi se détend par abaissement brusque de la pression à travers le détendeur puis s'évapore dans l'évaporateur.

Les vapeurs provenant de l'évaporateur vont dans l'absorbeur, elles rencontrent l'absorbant (exemple : bromure de lithium) qui par action hygroscopique permet une reconstitution du mélange riche en fluide frigorigène, cette solution est pompée pour que le cycle recommence.

2.9. Composants des systèmes de réfrigération à absorption

Les systèmes de réfrigération à absorption sont des dispositifs de production de froid qui se basent principalement sur l'énergie thermique plutôt que sur l'énergie électrique afin d'atteindre la puissance désirée. Ils utilisent davantage l'énergie thermique que l'énergie électrique pour obtenir l'efficacité souhaitée. Un système de réfrigération comprend généralement six composants de base : le générateur, l'absorbeur, le condenseur, l'évaporateur, la pompe et le détendeur, comme illustré dans la Figure 1.4. Chaque composant a une tâche spécifique à accomplir afin d'assurer le bon fonctionnement du système de réfrigération à absorption [14].

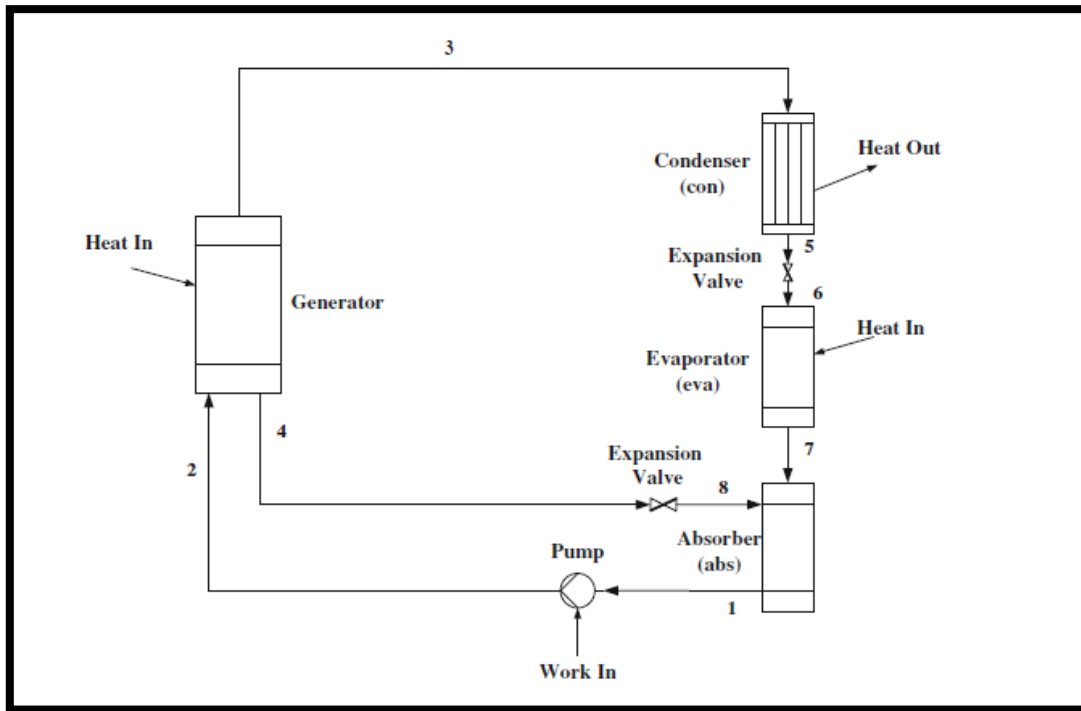


Figure 1-4: schéma de système de machine à absorption

2.9.1 Générateur

Le générateur est un sous-système du système de réfrigération à absorption dont le rôle est de séparer le réfrigérant du mélange de fluides de travail en utilisant la chaleur comme source d'énergie. Un générateur du système de réfrigération à absorption a la structure d'un échangeur de chaleur à faisceau tubulaire avec deux entrées et trois sorties, comme le montre la figure 1.5. Dans le générateur, la solution forte (un mélange de réfrigérant et d'absorbant) provenant de l'absorbeur entre par le bas où elle est chauffée par le fluide à haute température provenant de la source de chaleur. Lorsque la solution forte entre en ébullition, le réfrigérant dont la température d'ébullition est comparativement plus basse que celle de l'absorbant quitte le générateur par le haut sous forme de vapeur surchauffée. Le mélange contenant une plus petite quantité de réfrigérant que la solution forte quitte le générateur sous forme de solution faible pour être recirculé dans l'absorbeur.

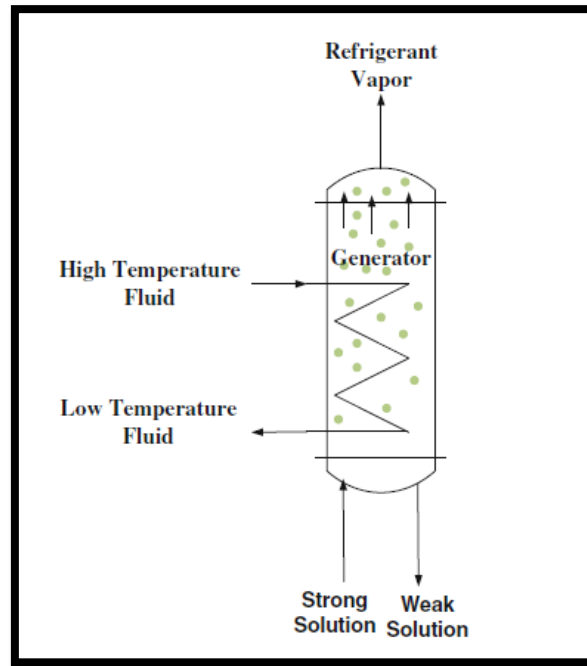


Figure 1-5: Schéma du générateur

2.9.2 Absorbeur

Un absorbeur est un sous-système du système de réfrigération à absorption, Sa fonction consiste à mélanger le réfrigérant provenant de l'évaporateur avec la solution faible issue du générateur. L'absorbeur agit comme une chambre de mélange où ces deux fluides entrent et se combinent pour former un seul fluide, illustré à la figure 1.6. Initialement, le réfrigérant provenant de l'évaporateur absorbe la chaleur de l'espace refroidi, puis pénètre dans l'absorbeur par le haut. De même, la solution faible du générateur passe par un détendeur, réduisant ainsi sa pression jusqu'à celle de l'absorbeur, avant d'entrer dans ce dernier. L'utilisation préalable d'un détendeur est nécessaire pour égaliser la pression des deux fluides avant leur mélange. Au sein de l'absorbeur, le réfrigérant et la solution faible se mélangent et libèrent de la chaleur dans l'eau de refroidissement. Après ce processus de mélange et de dégagement de chaleur, le mélange obtenu sort de l'absorbeur sous forme de solution concentrée pour être acheminé vers le générateur.

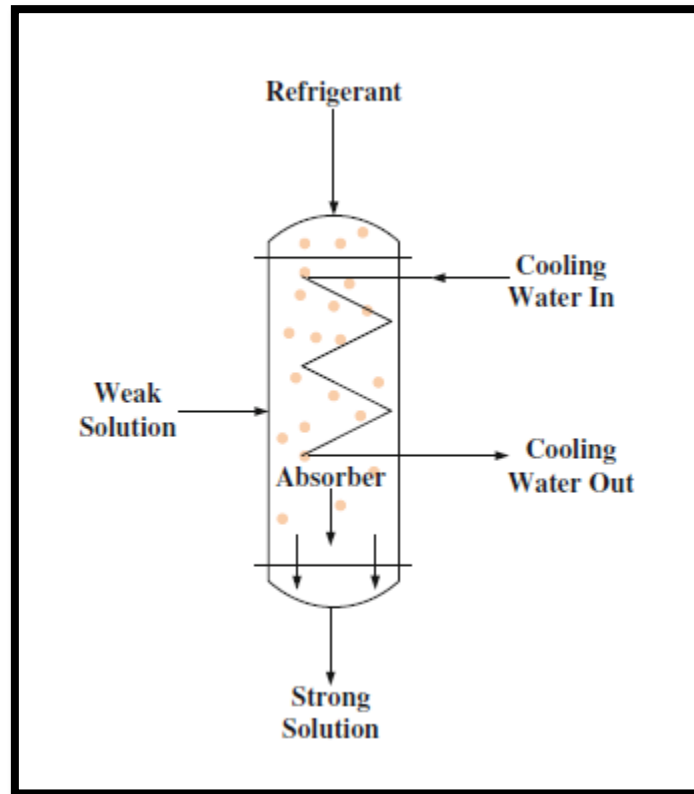


Figure 1-6 : Schéma de l'absorbeur

2.9.3 Condenseur

Le condenseur d'un système de réfrigération à absorption joue le rôle d'un dispositif d'échange thermique qui permet de refroidir le réfrigérant provenant du générateur. Dans cette configuration, le réfrigérant vaporisé est amené à céder de la chaleur à l'eau de refroidissement, comme illustré par la figure 1.7.

Le réfrigérant refroidi qui sort du condenseur passe ensuite par un détendeur avant d'entrer dans l'évaporateur. L'eau de refroidissement, utilisée pour abaisser la température du réfrigérant, quitte le condenseur à une température relativement plus élevée, ce qui permet son utilisation pour le chauffage domestique.

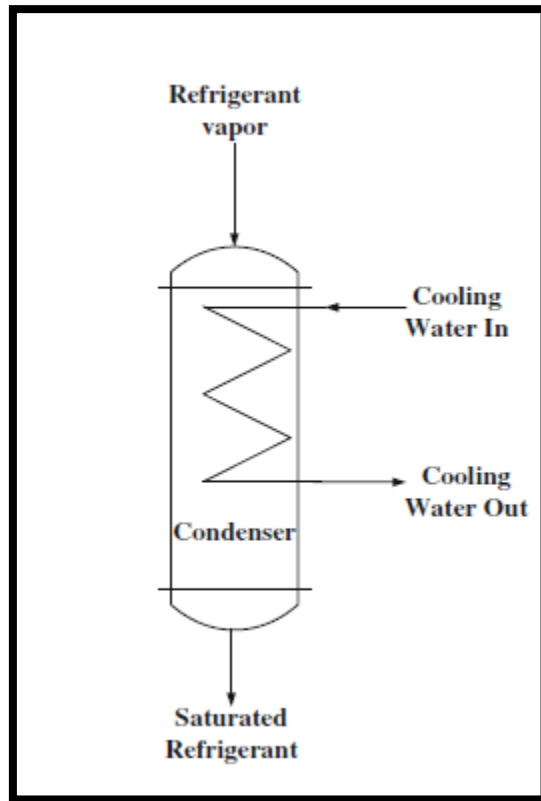


Figure 1-7: Schéma du condenseur

2.9.4 Évaporateur

L'évaporateur d'un système de réfrigération à absorption est un simple échangeur de chaleur, chargé de refroidir l'espace en absorbant la chaleur de l'espace refroidi, comme le montre la figure 1.8. Le réfrigérant qui quitte le condenseur passe par le détendeur avant d'entrer dans l'évaporateur. Dans le détendeur, la pression du réfrigérant chute brusquement, ce qui produit un mélange saturé de réfrigérant à forte teneur en vapeur. Ce réfrigérant à haute teneur en vapeur pénètre ensuite dans l'évaporateur où il absorbe la chaleur de l'espace refroidi et en ressort sous la forme d'un mélange saturé de réfrigérant. Ce mélange saturé de réfrigérant entre ensuite dans l'absorbeur pour être absorbé dans la solution faible.

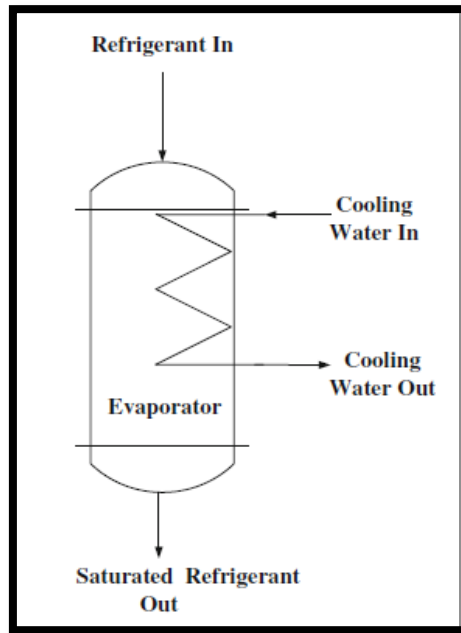


Figure 1-8: Schéma de l'évaporateur

2.9.5 Pompe

La pompe utilisée dans un système de réfrigération à absorption est une pompe à déplacement positif. La pompe est utilisée pour augmenter la pression de la solution forte à fournir au générateur, comme le montre la figure 1.9.

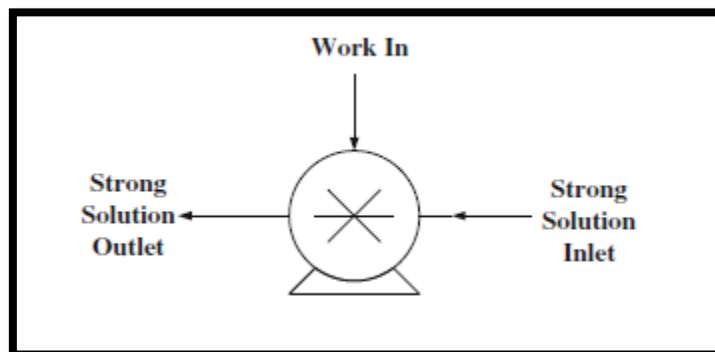


Figure 1-9: Schéma de la pompe

2.9.6 Valve d'expansion

Dans un système de réfrigération à absorption, il est nécessaire d'utiliser au moins deux dispositifs de détente, dont l'un est utilisé pour la solution faible et l'autre pour le

réfrigérant, tel qu'illustré dans la figure 1.10. Le dispositif de détente associé à la solution faible est responsable de la réduction de la pression de la solution afin de l'ajuster à celle de l'absorbeur. Le détendeur utilisé pour le réfrigérant agit comme une vanne d'étranglement dans laquelle la pression du réfrigérant est brusquement abaissée pour augmenter la teneur en vapeur du mélange saturé entrant dans l'évaporateur.

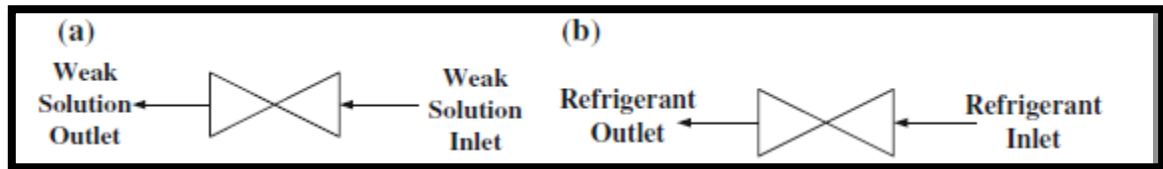


Figure 1-10: (a) Schéma du détendeur pour solution faible, (b) Schéma du détendeur pour le réfrigérant

Un échangeur de chaleur entre l'absorbeur et le générateur de vapeur transfère la chaleur de la solution faible quittant le générateur de vapeur à la solution à forte concentration d'ammoniac entrant dans le générateur de vapeur, ce qui augmente le coefficient de performance du système [15].

2.10. Les fluides frigorigènes

Les machines à absorption sont actuellement disponibles dans le commerce selon deux configurations de base. Pour les applications nécessitant des températures supérieures à 0°C (principalement pour la climatisation), le cycle utilise du bromure de lithium comme agent d'absorption et de l'eau comme agent réfrigérant. En revanche, pour les applications nécessitant des températures inférieures à 0°C, un cycle ammoniac/eau est employé avec de l'ammoniac comme réfrigérant et de l'eau comme agent d'absorption. Les machines à absorption utilisant l'eau et le bromure de lithium sont couramment configurées en tant que refroidisseurs d'eau pour les systèmes de climatisation dans les grands bâtiments [16].

Il existe plusieurs familles de fluides frigorigènes:

fluide frigorigène	Nom en clôture après le système standard international [4]	Formule chimique	fluide frigorigène	Nom en clôture après le système standard international [4]	Formule chimique
Air	R729		Argon	R740	Ar
Eau	R718	H ₂ O	Hexafluorure sulfuré	R846	SF ₆
Dioxyde de carbone	R744	CO ₂	Méthane	R50	CH ₄
Ammoniac	R717	NH ₃	Ethane	R170	C ₂ H ₆
Dioxyde de soufre	R764	SO ₂	Propane	R290	C ₃ H ₈
Hydrogène	R702	H ₂	Butane	R600	C ₄ H ₁₀
Helium	R704	He	Isobutane	R600a	CH(CH ₃) ₃
Neon	R720	Ne	Ethylène	R1150	C ₂ H ₄
Azote	R728	N ₂	Propylène	R1270	C ₃ H ₆
Oxygène	R732	O ₂			

Tableau 1-1: Nom, nom en clôture et formule chimique de réfrigérants naturels.

Nom en clôture des réfrigérants : RXYZ

X: nombre d'atomes de carbone-1 (X=(nC-1), six=0(nC=1)-non indiqué). Y: nombre d'atomes d'hydrogène+1 (Y=(nH+1)).

Z: nombre d'atomes de fluor (Z= (nF)).

Le nombre d'atomes de chlore (nCl)= (2*nC+2)-(nH+nF).

RCXYZ désigne les hydrocarbures cycliques halogénés (les per fluorocarbures).

R1XYZ désigne les alcènes.

❖ **L'eau**

C'est un frigorigène parfaitement sûr pour l'homme. Malheureusement, il ne permet pas de produire de basses températures (point triple de l'eau au environ de 273.16 K). Il est préférable de l'utiliser pour le froid climatique ou pour les pompes à chaleur à haute température (100 à 300°C) à cause de son point critique qui est très élevé. Cependant, la pression de vapeur de ce fluide est très faible et elle nécessite des compresseurs pouvant aspirer des grandes quantités d'eau. L'eau est plus adaptée pour la production de froid par absorption [14].

❖ **L'ammoniac**

L'ammoniac est l'un des premiers fluides frigorigènes utilisés et il a toujours donné satisfaction. Sa toxicité et son inflammabilité impliquent une utilisation en système en dire c'est pour les applications dans les domaines résidentiel et commercial. L'ammoniac ne peut être utilisé que pour des installations frigorifiques de grandes envergures (entrepôts, brasserie etc.). Pour des raisons de sécurité, des fluides de remplacement ont été élaborés au début du 21^{ème} siècle.

❖ **Les hydrocarbures (propane ou isobutane)**

Les hydrocarbures légers sont également de très bons réfrigérants. L'inconvénient majeur est qu'ils sont très inflammables, potentiellement explosifs et donc dangereux. Leurs utilisations sont limitées voir interdites dans les bâtiments publics et immeubles de grandes hauteurs. Leurs emplois se résument comme fluide frigorigène de cycles à compression en pétrochimie [14].

❖ **Le dioxyde de carbone**

Le dioxyde de carbone (CO₂), également connu sous le nom de R744, peut être utilisé comme réfrigérant malgré sa température critique relativement basse. Les niveaux de fonctionnement de cette substance sont proches de son point critique. De plus, le coût associé à son utilisation est très faible. Le R744 a été employé dans des systèmes de réfrigération navale et dans l'industrie en raison de sa propriété d'inflammabilité (il est également utilisé comme agent d'extinction des feux). Les excellentes caractéristiques de transfert thermique du CO₂ constituent un avantage, cependant son utilisation est principalement limitée aux systèmes en cascade à basse pression, ce qui explique le nombre restreint d'applications industrielles [14].

❖ **Les dérivés halogénés**

Ces substances sont dépourvues de toxicité et d'inflammabilité. L'un des atouts de ces liquides

réside dans leur polyvalence, permettant ainsi un large éventail d'applications, et dans leur faible risque de fuite. De plus, ils s'harmonisent parfaitement avec diverses huiles utilisées dans les compresseurs. Nous pouvons identifier les Hydrofluorocarbures (HFC), les Chlorofluorocarbures (CFC) et les Hydrochlorofluorocarbures (HCFC) [14].

3. Etat de l'art

- ✚ **THESE :** En 2013 Bennoui Mohamed Salah a présenté une thèse de doctorat sur l'optimisation des procédés de climatisation solaire pour la compatibilité des procédés de climatisation solaire étudiés avec le climat Algérien. Il a constaté que la solution utilisant le système à absorption est performante dans tous le climat algérien avec une légère supériorité dans le climat sec, cependant pour la solution à dessiccation solaire elle est très performante dans le climat sec, moyennement performante dans le climat modéré, et d'une qualité médiocre dans le climat humide. Une autre observation concerne l'environnement de simulation TRNSYS qui se révèle être un outil très performant, grâce à sa prise en charge des bases de données météorologiques et à ses modèles d'équipements précis et validés [17].
- ✚ **MEMOIRE :** En 2017 guerbouzyounes et zinasoufaine ont présenté une mémoire de master sur l'Etude d'un cycle de réfrigération tritherme à absorption afin de simuler la installation de climatisation solaire à travers dans la bibliothèque du code de calcul TRNSYS, l'étude portait sur une maison de la ville de Ouargla [11].
- ✚ **MEMOIRE :** En 2012, Falah Elias et Jedir Rafik ont présenté une mémoire de master sur l'Etude et conception d'un système de climatisation utilisant l'énergie solaire, dans le but de fournir des climatiseurs alimentés par l'énergie solaire dans les régions ensoleillées, par exemple les régions du sud de l'Algérie, et un projet a été proposé pour adapter d'un tunnel de test du groupe de climatisation des voitures de voyageurs de la SNTF a été présentée (logiciel TRNSYS)[18].
- ✚ **MEMOIRE :** En 2017, osmane ali baba présenté une mémoire de master sur le dimensionnement d'une machine frigorifique à adsorption alimentée par l'énergie solaire, il est présenté cette mémoire pour voir l'effet des dimensions de la machine frigorifique à adsorption sur sa performance et on conclure que la production du froid a été améliorée en augmentant ce paramètre (rayon des tubes) [19].
- ✚ **MEMOIRE :** En 2017, Menni Madjed et Mechou Lamine présenté une mémoire de master sur la simulation d'une machine à absorption sous TRNSYS, pour différents surfaces de capteur solaire et différents volumes de réservoir de l'eau chaude, à la fin

pour un réservoir de l'eau chaude de $V=1 \text{ m}^3$ et une surface de capteur de $S=12\text{m}^2$ est suffisante pour maintenir la température dans une chambre au-dessous de 299 K pendant la saison de refroidissement [20].

✚ **MEMOIRE :** En 2016, Djefalia Mohamed présenté une mémoire de master sur l'étude d'une machine frigorifique à absorption liquide ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$), ils ont fait une étude détaillée de son cycle de fonctionnement et des outils nécessaires à l'évaluation de ses performances énergétiques a été réalisée [21].

✚ **ARTICLE :** En 2010, Tsoutsos, E. Aloumpi, Z. Gkouskos, M. Karagiorgas présenté un papier scientifique sur Conception d'un système de refroidissement par absorption solaire dans un hôpital grec, Ils simulé un système de refroidissement et de chauffage d'un hôpital en Crète à l'aide de TRNSYS, le critère d'optimisation du système étant la fraction solaire. Différents paramètres tels que la surface des capteurs, la taille du réservoir de stockage, l'inclinaison des capteurs, le chauffage d'appoint, la tour de refroidissement et la capacité nominale du refroidisseur à absorption ont été optimisés [22].

✚ **ARTICLE :** En 2004, Yin Hang et Ming Qu, présenté un papier scientifique sur L'impact des accumulateurs de chaleur et de froid sur un système de refroidissement par absorption solaire pour un immeuble de bureaux, Ils étudié l'impact des accumulateurs de chaleur et de froid sur les performances du système de refroidissement par absorption solaire d'un immeuble de bureaux.

Le système est situé à Los Angeles, en Californie. Une surface de 200 m^2 de CTE a été utilisée et la capacité du système était de 120 kW. Il a été conclu que le stockage froid n'avait pas d'effet significatif sur la performance énergétique du système par rapport au stockage chaud. L'analyse de sensibilité a révélé que, sur la base de la fraction solaire, le système est le plus sensible à la surface des capteurs solaires, suivie par la capacité du refroidisseur, le stockage chaud et le stockage froid [23].

✚ **ARTICLE :** En 2004, Fathi R, Gumimi C, OuaskitS. Ont présenté un papier scientifique sur Un modèle thermodynamique irréversible pour réfrigérateur à absorption solaire, Ils ont tenté de modélisé et simulé un système de réfrigération par absorption solaire en considérant différents réservoirs de température et l'effet de l'irréversibilité pour prédire les conditions optimales de fonctionnement [24].

✚ **ARTICLE :** En 2001, Li ZF, Sumathy K. Ont présenté un papier scientifique sur Un Simulation d'un système de climatisation à absorption solaire, Ils ont conclu que l'utilisation d'un réservoir de stockage partitionné permet d'obtenir un effet de

refroidissement plus rapide et un COP plus élevé par rapport à un réservoir stratifié normal [25].

- ✚ **ARTICLE :** En 2006, Mittal V, Kasana KS, Thakur NS. Ont présenté un papier scientifique sur Un Modélisation et simulation d'un système de refroidissement par absorption solaire pour l'Inde, Ils ont étudié l'effet de la température d'entrée du générateur et a montré qu'à une température de référence plus élevée, les performances du réfrigérateur augmentent tout en diminuant la surface des composants du système ; mais une température de référence plus basse améliore la fraction couverte par l'énergie solaire [26].
- ✚ **ARTICLE :** En 2013, Gomri R. Ont présenté un papier scientifique sur Un Étude de simulation sur la performance des refroidisseurs à absorption solaire/gaz naturel, A présenté une étude numérique sur les refroidisseurs à absorption au bromure de lithium à effet unique solaire/gaz naturel. Il a utilisé des brûleurs au gaz naturel comme chauffage auxiliaire pour chauffer l'eau chaude sur le chemin du générateur. Ses résultats ont montré que le COP maximal est de 0,82 et que l'efficacité énergétique maximale est d'environ 30 % [27].
- ✚ **ARTICLE :** En 2005, Assilzadeh F, Kalogirou SA, Ali Y, Sobian K. Ont présenté un papier scientifique sur Un Simulation et optimisation d'un système de refroidissement solaire par absorption au LiBr avec capteurs à tubes sous vide, Ils ont conçu un système d'absorption du bromure de lithium alimenté par l'énergie solaire en utilisant des capteurs à tubes sous vide et ont montré que les performances du système sont en phase avec les variations diurnes du rayonnement solaire [28].
- ✚ **ARTICLE :** En 2007, Ardehali MM, Shahrestani M, Charles CA. Ont présenté un papier scientifique sur Un Simulation énergétique pour un système d'absorption solaire et examen des effets de l'indice de clarté sur le chauffage auxiliaire, Ils ont étudié un système de refroidissement LiBr-H₂O fonctionnant à l'énergie solaire et a étudié l'effet de l'indice de clarté sur la source de chauffage auxiliaire [29].
- ✚ **ARTICLE :** En 2009, Lecuona A, Ventas R, Venegas M, Zacarías A, Salgado R. Ont présenté un papier scientifique sur Un Température optimale de l'eau chaude pour le refroidissement solaire par absorption, Ils ont présenté un modèle permettant de calculer les performances d'un refroidisseur à absorption LiBr-H₂O à effet unique. Ils ont déterminé la température de l'eau chaude qui maximise l'efficacité instantanée globale d'une installation de refroidissement solaire. Leur modèle a fourni une

équation explicite pour la température optimale de génération de vapeur, en termes de températures externes du refroidisseur uniquement [30].

Conclusion

Dans cette étude, nous concluons que les absorbeurs représentent des alternatives solides aux systèmes de réfrigération à compression mécanique en raison de leurs propriétés améliorées. Ils peuvent être alimentés par des sources d'énergie renouvelables inépuisables et constamment renouvelées, telles que des sources d'énergie renouvelables bénéfiques et respectueuses de l'environnement.

Chapitre 2 : Analyse énergétique de la machine frigorifique à absorption et Modélisation de la réfrigération

Introduction

Dans ce chapitre nous allons effectuer une étude thermodynamique des machines à absorption à simple effet dans une salle, en prenant comme exemple le couple ($\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$) comme fluide de fonctionnement.

1. Analyse thermodynamique

1.1. Le cycle de base

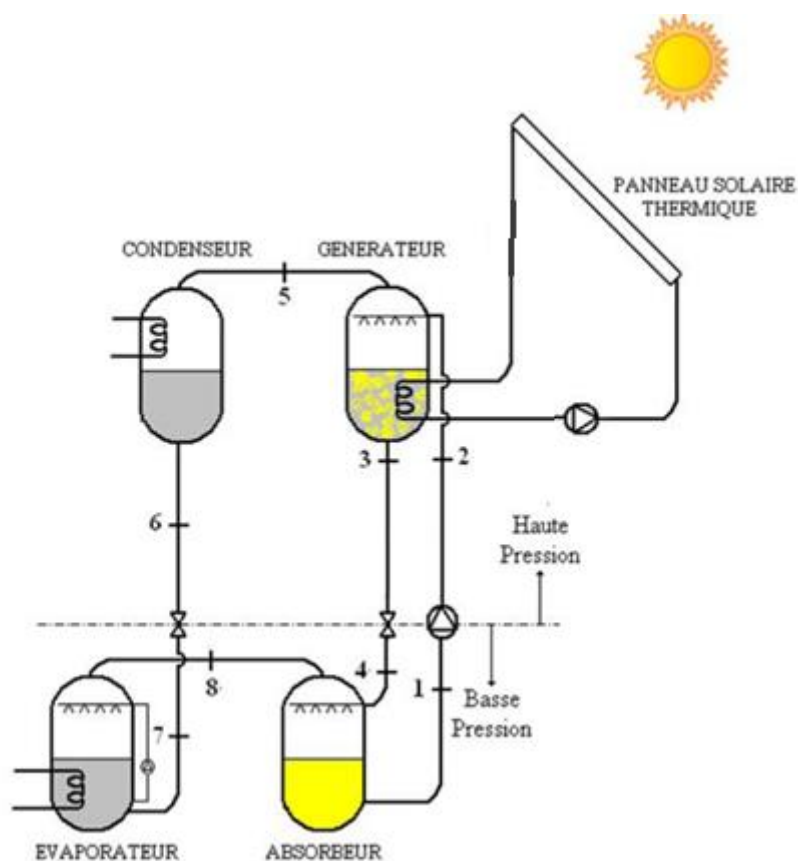


Figure 2-1 : Structure d'une machine frigorifique à absorption ($\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$)

1.2. La production de froide par absorption

Le système de réfrigération solaire à absorption à cycle continu se compose d'un système de collecte d'énergie solaire et d'une unité de réfrigération à absorption. Le modèle utilisé dans cette étude est basé sur le bilan massique et le bilan énergétique de chaque composant du système de climatisation à absorption.

Le COP (Coefficient of performance) dépend de la qualité de l'appareil et de la différence de température, mais il est également sensible à d'autres conditions. Le coefficient de performance de système est défini par:

$$COP = \frac{Q_e}{(Q_g + W)} \quad (1)$$

Afin de déterminer la valeur de COP, on fait le bilan énergétique et massique dans chaque élément

1.2.1 L'évaporateur

le fluide frigorigène liquide subit un laminage à travers le détendeur, puis se vaporise, produisant la puissance frigorifique Q_e . La température de vaporisation, et par suite la pression dans l'ensemble évaporateur/absorbeur est fixée par la température T_b de la source froide (médium à refroidir). [30]

La puissance de l'évaporateur s'exprime :

$$Q_e = \dot{m}_f \cdot (h_8 - h_7) \quad (2)$$

Et le bilan massique est :

$$\dot{m}_f = \dot{m}_8 = \dot{m}_7 \quad (3)$$

1.2.2 L'absorbeur

la vapeur issue de l'évaporateur y rencontre la solution concentrée provenant du générateur. Elle est absorbée par cette solution, qui s'enrichit en fluide frigorigène. La chaleur Q_a dégagée par cette Transformation exothermique est évacuée par un fluide caloporteur à la température T_m . En sortie d'absorbeur, on obtient ainsi une solution diluée.

La puissance de l'absorbeur s'exprime :

$$Q_a = \dot{m}_8 \cdot h_8 + \dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{m}_1 \cdot h_1 \quad (4)$$

Et le bilan massique est :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_8 + \dot{m}_4 \quad (5)$$

1.2.3 Générateur

la solution diluée y reçoit la quantité de chaleur g à une température T_g , ce qui provoque la désorption d'une partie du fluide frigorigène dissous dans la solution. Le générateur produit ainsi une vapeur de frigorigène et une solution concentrée.

Et donc le bilan énergétique dans le générateur est :

$$Q_g = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_5 \cdot h_5 - \dot{m}_2 \cdot h_2 \quad (6)$$

Et le bilan massique est :

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 + \dot{m}_5 \quad (7)$$

1.2.4 Le condenseur

composant analogue à celui des machines à compression de vapeur. C'est la température T_m du fluide caloporteur alimentant le condenseur qui fixe la température de condensation et donc la pression dans l'ensemble générateur /condenseur. La condensation du fluide frigorigène nécessite le rejet de la chaleur de condensation Q_c à la température. Cette transformation comprend une phase de désurchauffe, la condensation ainsi qu'un éventuel sous refroidissement. [30]

La puissance du condenseur s'exprime ainsi :

$$Q_c = \dot{m}_f \cdot (h_5 - h_6) \quad (8)$$

Et :

$$\dot{m}_f = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (9)$$

Un condenseur est un appareil dont la fonction principale est de liquéfier de la vapeur sur une surface froide, ou via un échangeur thermique maintenu froid par la circulation d'un fluide réfrigérant.

1.2.5 Pompe

Elle assure la circulation du mélange riche en réfrigérant du puits de solution vers le générateur, à travers l'échangeur. Elle est dimensionnée de manière à permettre le passage de basse à haute pression, et à s'opposer aux pertes de charge dans le circuit et l'échangeur de solution. La puissance de la pompe égale [31] :

$$W_p = \dot{m}_r \cdot (h_2 - h_1) = \dot{m}_r \cdot \frac{(p_c - p_e)}{\rho_1} \quad (10)$$

2. Modélisation de la réfrigération

2.1. Le Bureau

La salle que nous voulons climatisée représentée à une hauteur de 3,6 m, une largeur de 5,5 m et une longueur de 5,5 m, avec un volume total de 109 m³.

Cette salle se trouve à Bechar, caractérisée par une humidité relative moyenne de 46% [32]. Afin de prévenir une variation importante de la charge de climatisation, La salle étudiée est uniquement utilisée pour climatisation. Trois personnes travaillent à l'intérieur de la salle pendant une période moyenne de 8 heures par jour.

La charge de climatisation du système est la quantité totale de chaleur éliminée par le système de climatisation. Elle est calculée en tenant compte du transfert de chaleur à travers les parois, [33], comme indiqué dans l'équation (11). Les principales sources de chaleur sont :

- La charge de chaleur à travers les parois entourant l'espace climatisé, le plafond et le sol.
- Le taux de transfert de chaleur des infiltrations d'air.
- La charge de chaleur de chaleur des machines (ventilateurs, éclairage, équipement roulant...).
- La charge de chaleur due aux personnes travaillant à l'intérieur de la salle.

$$Q_T = \sum Q_i \quad (11)$$

Chapitre 2 : Analyse énergétique de la machine frigorifique à absorption et Modélisation de la réfrigération

Les gains de chaleur inconnus sont généralement pris en compte et estimés à 10 % de la valeur totale de la charge thermique de climatisation.

2.2. Charges thermiques des murs Q_w

Les charges thermiques dues au transfert de chaleur à travers les parois du bureau sont déterminées selon l'équation suivante [34] :

$$Q_w = K \times S \times \Delta\theta \quad (12)$$

Où :

S : représente la surface du mur (m^2).

$\Delta\theta$: le gradient de température ($^{\circ}K$).

K : est le coefficient global de transfert de chaleur ($W/m^2.K$) calculé de la manière suivante :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_i}} \quad (13)$$

h_e : Le coefficient de transfert thermique par convection externe ($W/m^2.K$).

h_i : Le coefficient de transfert thermique par convection interne ($W/m^2.K$).

e_i : L'épaisseur du mur (m).

λ_i : La conductivité thermique du mur ($W/m.K$).

2.3. Taux de transfert de chaleur des infiltrations d'air Q_a

Un surcroît de chaleur est également pris en compte en raison de l'infiltration d'air lors de l'ouverture de la porte. Cette charge supplémentaire est déterminée par l'équation suivante :

$$Q_a = 0.34 \times D \times (T_{ai} - T_{ei}) \quad (14)$$

Où :

$(T_{ai} - T_{ei})$: C'est la différence entre les températures ambiante et intérieure de la pièce ($^{\circ}\text{K}$).

D : est le débit d'air (m^3/h).

2.4. Taux de transfert de chaleur dû à l'éclairage Q_l

Selon le type de lampes utilisées (incandescentes ou fluorescentes), la charge thermique fournie est déterminée par [35].

- Pour lampes à incandescence :

$$Q_l = 860 \times w \times t \times n \quad (15)$$

- Pour lampes fluorescentes :

$$Q_l = 1.25 \times 860 \times w \times t \times n \quad (16)$$

Où :

t : le nombre d'heures d'éclairage par jour (h).

w : la puissance des lampes en kilowatts (kW).

n : le nombre de lampes.

2.5. Charges thermiques dues aux personnes Q_p

La chaleur dégagée par le travailleur est un paramètre important ; elle est définie comme la quantité de chaleur émise par individu (q) liée au nombre de travailleurs (N) et au temps passé à l'intérieur de la salle (t). Elle est calculée selon l'équation (17).

$$Q_p = q \times N \times t \quad (17)$$

2.6. Charges thermiques engendrées par différentes machines Q_m

Lorsque la salle climatisée est suffisamment grande et nécessite des équipements pour la manipulation des produits tels que des chariots, des fours, des découpeurs, etc., il est nécessaire de prendre en compte la chaleur dégagée par ces machines. Cela dépend du nombre de chariots (i). La puissance consommée par chacun d'eux (P (kW)) pendant la période d'activité (t (h)) peut être définie comme suit [36]:

$$Q_m = P \times i \times t \quad (18)$$

2.7. Charge thermique due aux moteurs de ventilateur Q_{fan}

Les moteurs de ventilateur garantissent la circulation de l'air froid de l'évaporateur vers l'espace de la pièce, libérant ainsi la charge thermique donnée par [37] :

$$Q_{fan} = \frac{30 \times A \times 24}{1000} \quad (19)$$

Où :

A: représente la surface interne (m²).

De plus, la charge thermique due à l'emballage et aux palettes représente environ 10% de la charge thermique du produit préservé. De même, les pertes à travers les jonctions des parois sont estimées à environ 12% de la charge thermique totale des parois [38].

2.8. La fraction solaire

Le choix du champ solaire le plus avantageux peut être réalisé en comparant la fraction solaire du système et l'efficacité du champ solaire en tant que contraintes. Selon l'équation (20), la fraction solaire représente la part de l'énergie thermique obtenue à partir du champ solaire par rapport à la demande totale, où elle augmente à mesure que la surface de collecte augmente. Néanmoins, l'efficacité du champ solaire diminue lorsque la surface des collecteurs augmente.

Cependant, l'augmentation de la taille du stockage thermique pourrait favoriser l'extraction d'énergie utile à partir du champ solaire [39].

$$S.F = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_s + \dot{Q}_{AUX}} \quad (20)$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_s}{G \times A_c} \quad (21)$$

Chapitre 2 : Analyse énergétique de la machine frigorifique à absorption et Modélisation de la réfrigération

Où:

S.F: la fraction solaire.

Q_s : La puissance thermique utile du champ solaire (W).

Q_{aux} : La puissance thermique du système auxiliaire (W)

G: le rayonnement solaire (W/m²)

A_c : Surface des collecteurs (m²)

η : Performance thermique du collecteur.

Selon les informations précédentes, les fonctions sélectionnées pour l'optimisation sont les valeurs de la fraction solaire et de l'efficacité.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement des systèmes de climatisation (NH₃/H₂O), Le modèle adapté dans cette étude est basé sur le bilan massique et énergétique de chaque composant, et la Modélisation de la climatisation dans la salle avec ses performances.

Chapitre 3 : Résultats De Simulation Et Discussion

1. Aperçu sur TRNSYS

1.1. Description du logiciel

Les logiciels de simulation informatique sont devenus des outils précieux pour les chercheurs dans de nombreux domaines, y compris la prédiction du comportement des systèmes. Dans le cas des systèmes de refroidissement solaire, où il n'existe pas de modèle standard et où les données précises sont souvent limitées, la fiabilité de la simulation est d'une importance capitale.

TRNSYS (Transient System Simulation Tool) est en effet l'un des programmes de modélisation et de simulation les plus fiables utilisés par les chercheurs dans le domaine des applications solaires. TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique des systèmes énergétiques qui permet de modéliser et de simuler différents systèmes de refroidissement solaire, ainsi que d'autres applications énergétiques. Il offre une large gamme de composants et de modèles prédéfinis, ce qui permet aux utilisateurs de construire des modèles personnalisés pour représenter précisément le système étudié.

TRNSYS est apprécié pour sa flexibilité et sa capacité à représenter des systèmes complexes. Il est utilisé pour évaluer les performances énergétiques, prédire les comportements des systèmes solaires et optimiser leur conception. Les chercheurs peuvent ajuster les paramètres des modèles pour représenter les caractéristiques spécifiques des composants et des systèmes solaires étudiés [40].

En utilisant TRNSYS, les chercheurs peuvent réaliser des simulations détaillées, tenir compte des conditions climatiques, des caractéristiques du système, de l'orientation et de la configuration des composants, ainsi que des variables opérationnelles. Cela leur permet d'évaluer les performances attendues, d'optimiser la conception du système et d'identifier les problèmes potentiels avant de passer à la phase de construction ou d'installation.

Il convient de noter que, bien que TRNSYS soit un outil puissant, la fiabilité des résultats de simulation dépend également de la précision des données d'entrée fournies par l'utilisateur. Il est donc important de collecter des données précises sur les composants et les conditions d'exploitation pour obtenir des résultats fiables [41].

1.2. TRNSYS Simulation Studio

Simulation Studio est l'interface principale de TRNSYS, qui facilite le développement d'applications de simulation. Un projet de simulation implique la sélection d'un ensemble de modules et la description de leurs interactions. Chaque module représente un sous-programme et fonctionne comme une entité autonome (mais qui peut être modifiée). Les paramètres, les variables d'entrée et de sortie sont définis pour chaque sous-programme [42].

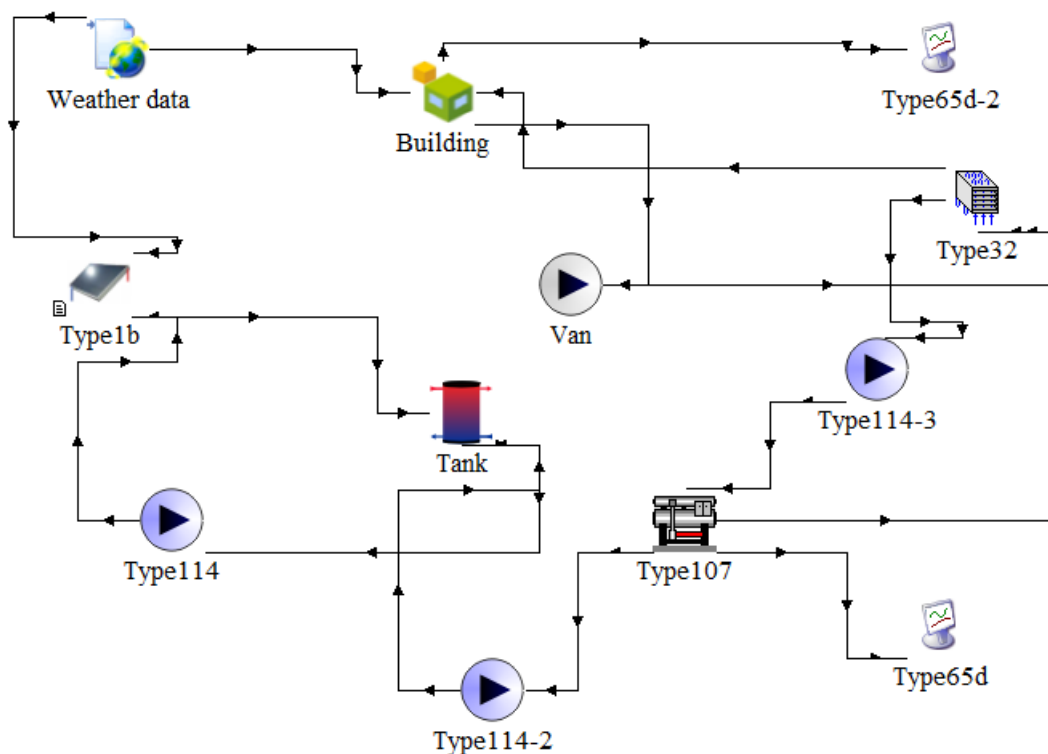


Figure 3-1:TRNSYS simulation studio

1.3. TRNBuild

TRNBUILD (anciennement PREBID) a été développé pour fournir un outil facile à utiliser pour la création du fichier BUI. En commençant par certaines données de base du projet, Enfin, les sorties souhaitées sont sélectionnées. Toutes les données saisies sont enregistrées dans le fichier de construction (*. BUI), un fichier texte ASCII lisible. Le fichier BUI est très pratique pour vérifier les données entré dans TRNBuild [43].

TRNBuild est un outil qui permet d'incorporer les spécifications d'un bâtiment à plusieurs zones, nécessaires pour simuler sa performance thermique. Ses attributs sont intégrés dans le "TRNSYS simulation studio" à l'aide du module "type 56". Ainsi, l'utilisateur décrit chaque zone thermique individuellement, y compris les matériaux utilisés pour la construction des murs [42].

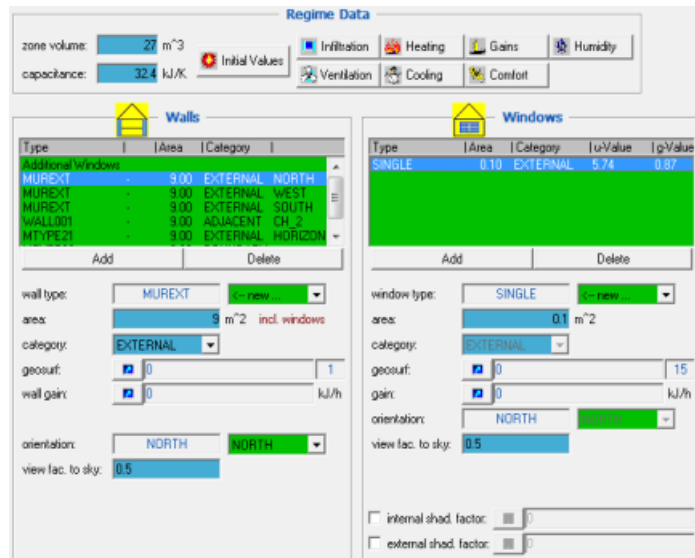


Figure 3-2: Interface du logiciel TRNBuild

1.4. Avantages du logiciel TRNSYS

- Il est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité.
- L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la bibliothèque d'origine.
- Documentation vaste de sous-programmes y compris explication, usages usuels et équations de base.
- Définition très souple de la période de simulation : choix de pas de temps, du début et de la fin de la simulation [42].

1.5. Inconvénients du logiciel TRNSYS

- TRNSYS ne dispose pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder des données définissant le bâtiment et le système [40].

2. Présentation du modèle de l'installation à étudié

Dans la construction de notre installation sur la plate-forme de TRNSYS on utiliser des délégués organes et ce sont les plus utilisés dans la simulation du bâtiment sont :

TYPE 15-6 : Données climatique

TYPE 73 : Panneau solaire plan

TYPE 56a: Dimension du local multi zone à chauffer faite à l'aide de TRNBUILD

TYPE 65d : Affichage des résultats

2.1. Simulation de météo :

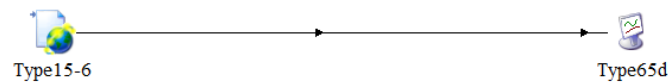


Figure 3-3: Boucle de simulation de météo sur le logiciel TRNSYS

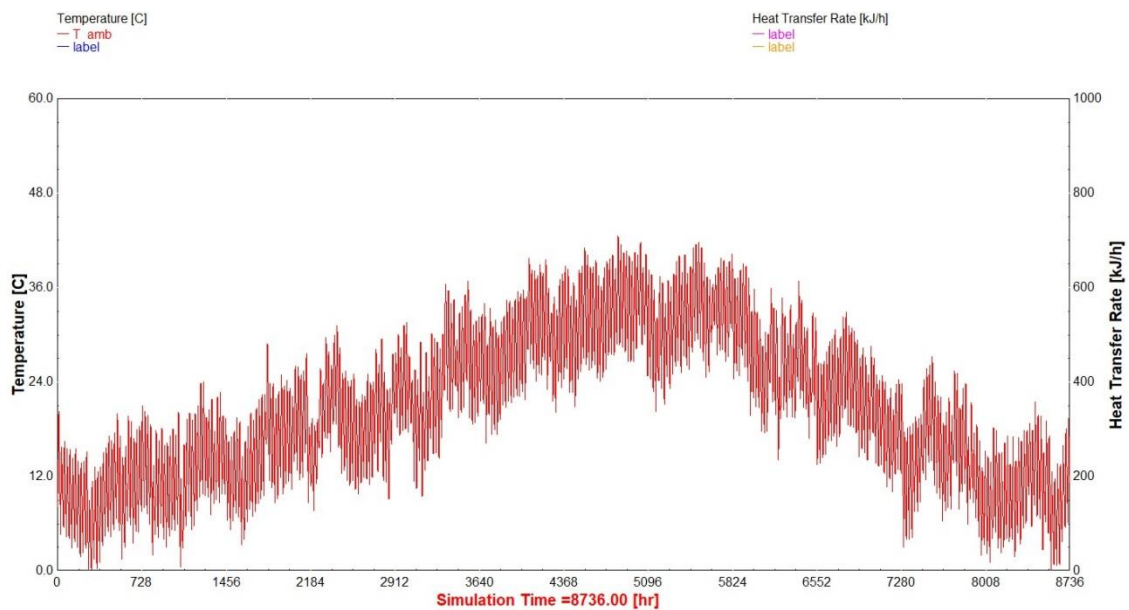


Figure 3-4: Variation de la température ambiante à Bechar

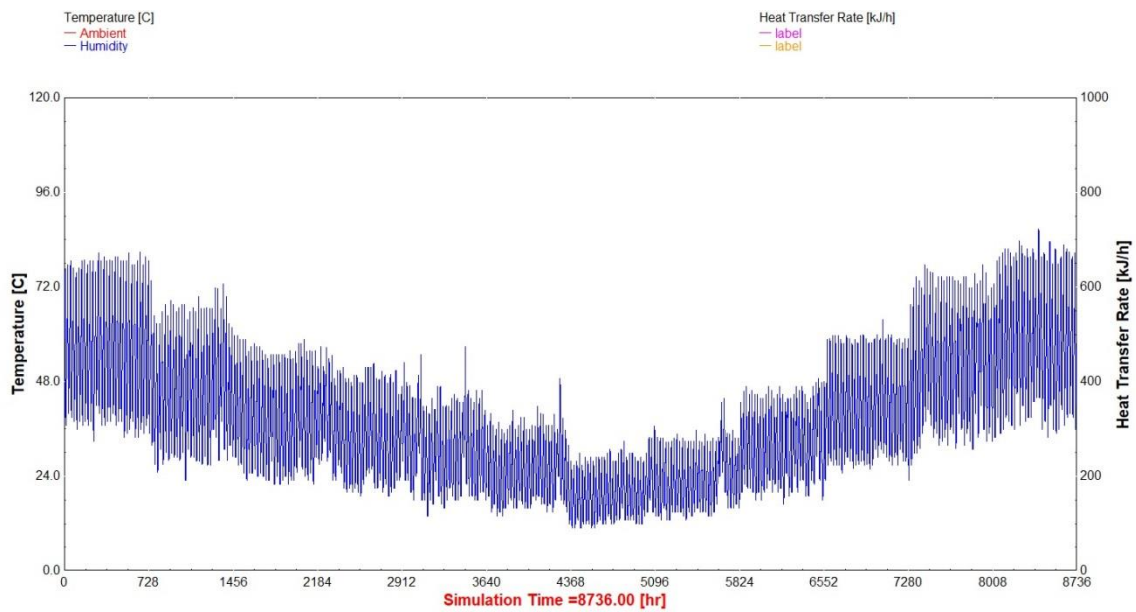


Figure 3-5: Variation de l'humidité relative à Bechar

La première Figure Figure (3.3) explique la forme générale de la boucle dans TRANSYS pour l'étude du climat de la région.

Les autres figures explique le résultat de simulation, nous avons constaté que la température $T_{\max}=42.73$ °C et $T_{\min}=-1$ °C. Et pour l'humidité relative $H_{\max}=85\%$ et $H_{\min}=11.23\%$

2.2. Simulation de panneau solaire

2.2.1 Panneau à plan type 1b

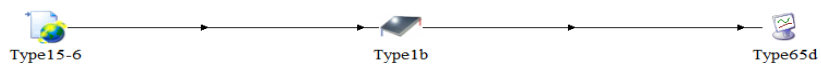


Figure 3-6: Boucle de simulation de panneau solaire plan sur le logiciel TRNSYS

Chapitre 3 : Résultats De Simulation Et Discussion

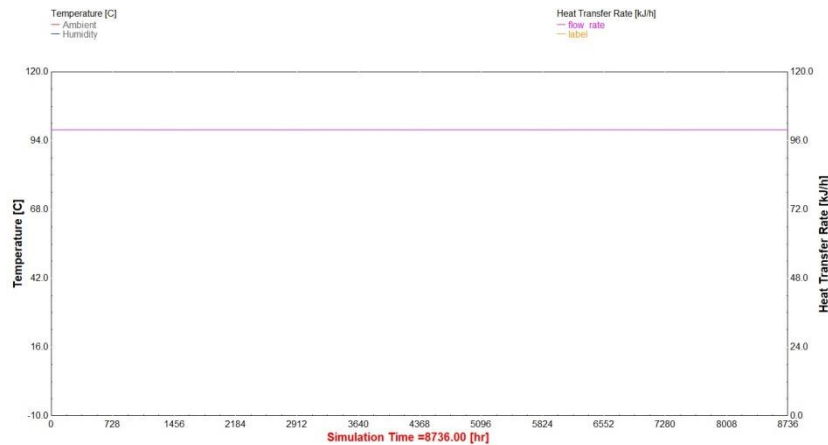


Figure 3-7: Débit de sortie du capteur solaire plan

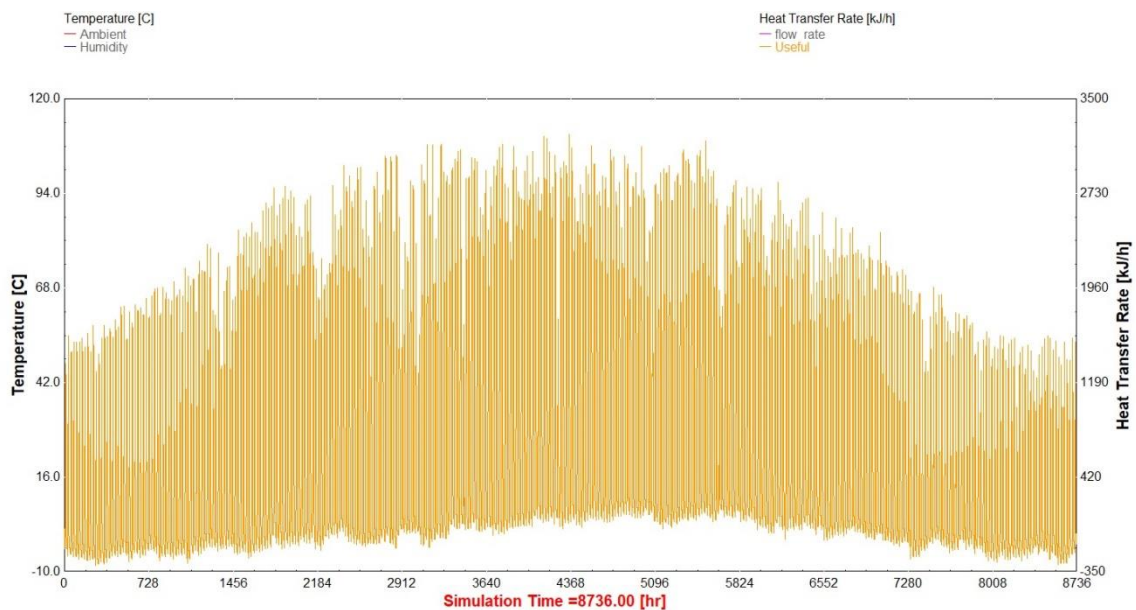


Figure 3-8: Gain d'énergie utile d'un capteur solaire plan

La première figure 3.6 explique la boucle dans TRNSYS. Afin de simuler le fonctionnement du panneau solaire plan dans la région.

Les trois figures précédentes expliquent le résultat de simulation des paramètres thermo physiques et climatiques de la région d'étude, la figure 3.7 montrent la variation de la température du capteur solaire, et la figure 3.8 montre le gain d'énergie utile était 3082 kJ correspond au 2 July (4386h).

3. Meteonorm

Avant de procéder à une simulation du cycle frigorifique à absorption, il est préférable de mener une étude sur les variations de température et de rayonnement solaire dans la région d'Bechar. Cette étude permettra d'obtenir un aperçu des conditions dans lesquelles ce cycle frigorifique thermique fonctionne, et de les comparer à celles d'une autre ville algérienne, Alger.

3.1. La variation de température ambiante extérieure pendant l'année

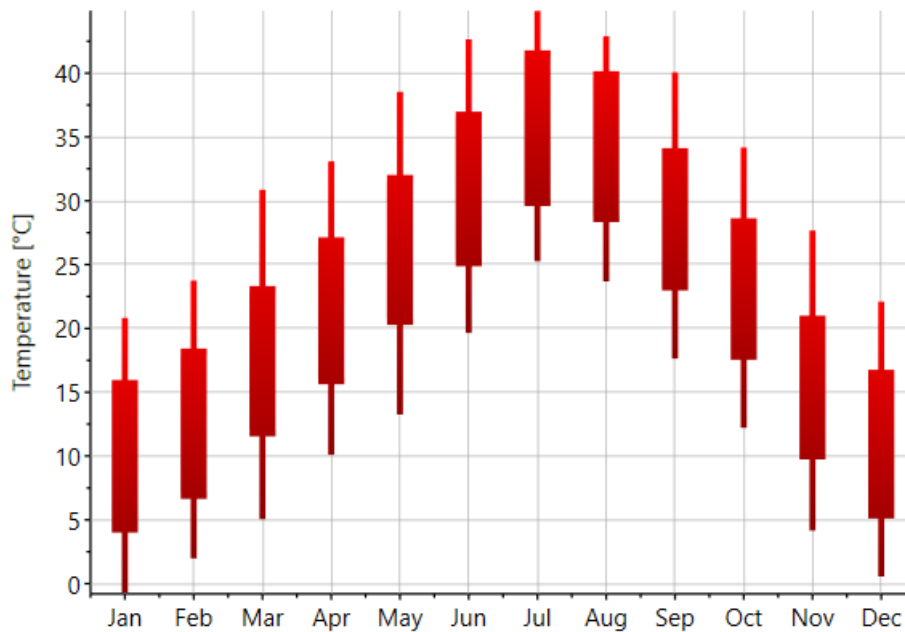


Figure 3-9. La variation de température durant une année a Bechar

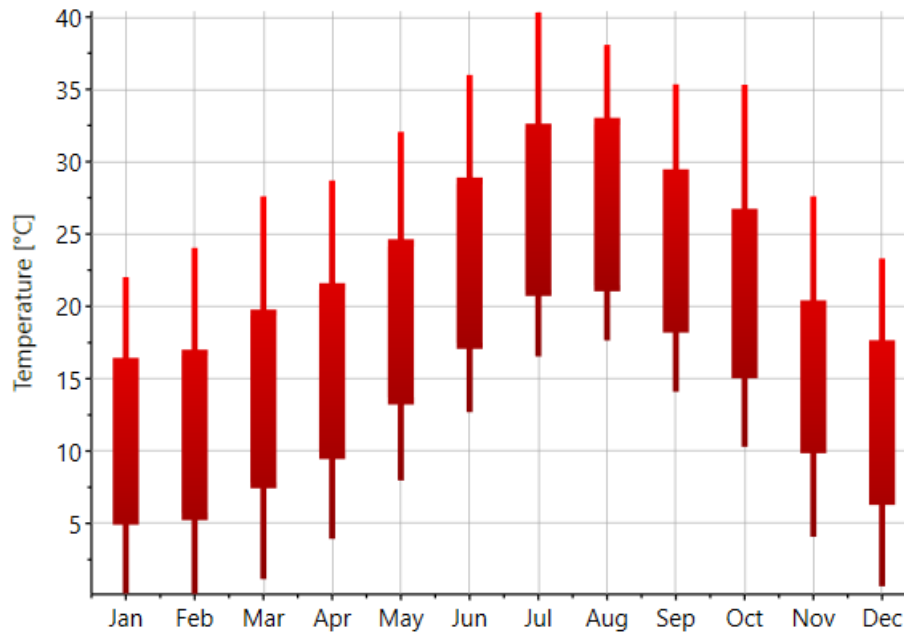


Figure 3-10: La variation de température durant une année à Alger

À Béchar, la température moyenne dépasse les 25 °C de mai à octobre, ce qui rend la climatisation des bâtiments nécessaire pendant près de 7 mois. Cela est dû à la mauvaise isolation de la plupart des constructions en Algérie. En revanche, à Alger, la température dépasse les 25 °C de juin à mi-septembre, soit environ la moitié de la période de climatisation par rapport à Béchar. Cette comparaison souligne l'importance d'avoir un système de climatisation efficace et économe adapté à un climat chaud et à des maisons mal isolées.

3.2. La variation de la durée de l'ensoleillement pendant l'année

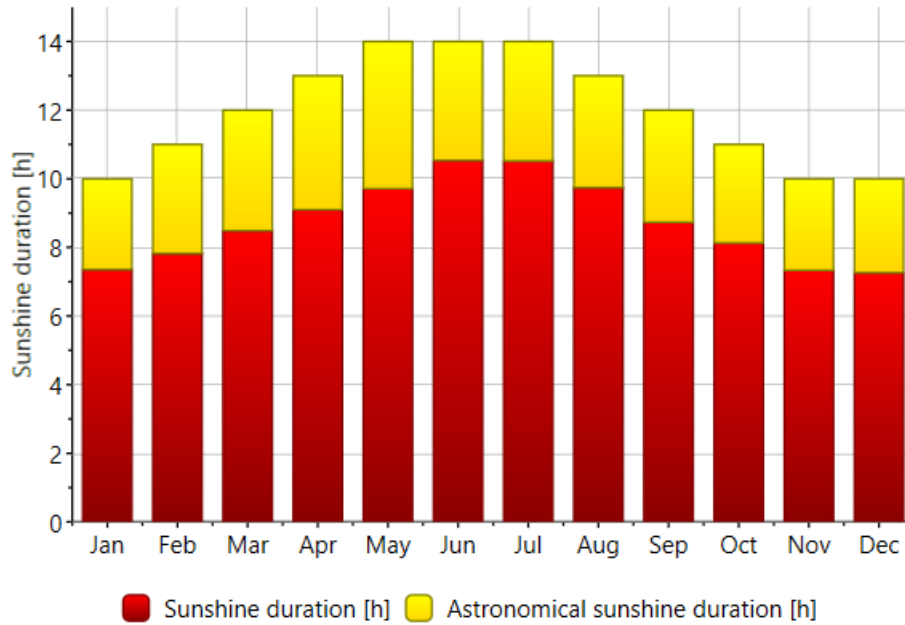


Figure 3-11: La variation de durée de l'ensoleillement et durée astronomique de jour durant une année à Bechar

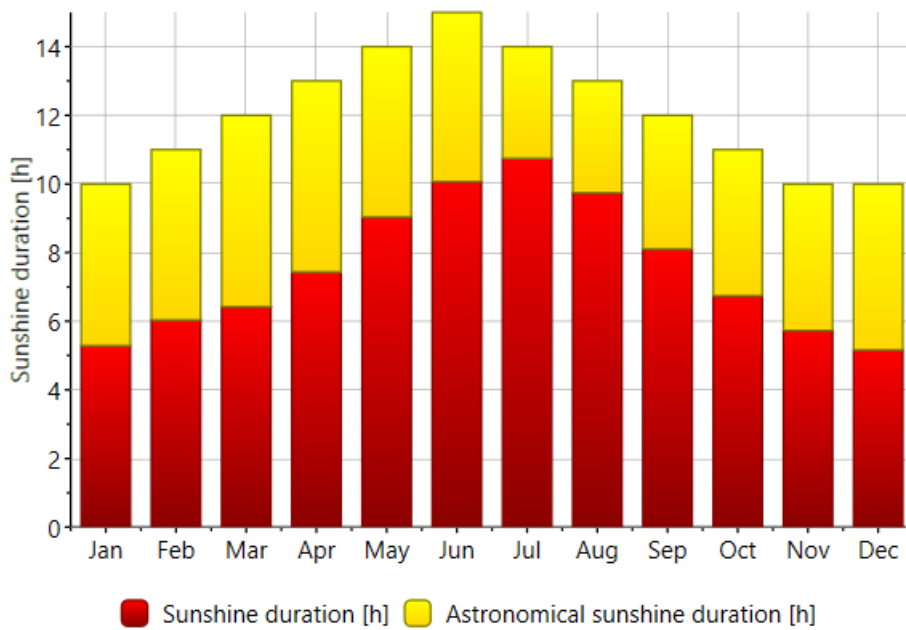


Figure 3-12: La variation de durée de l'ensoleillement et durée astronomique de jour durant une année à Alger

Les graphiques ci-dessus révèlent une tendance à l'augmentation de la durée d'ensoleillement (en heures) à partir du mois de janvier, atteignant son maximum en été. Cette durée maximale d'ensoleillement est presque similaire entre la ville d'Bechar et Alger. Cependant, cette durée maximale d'ensoleillement se maintient pendant trois mois (mai, juin et août) à Bechar, tandis qu'elle ne dure qu'un mois à Alger. En général, la durée d'ensoleillement dépasse dix heures tout au long de l'année, que ce soit à Bechar ou à Alger. Cela encourage l'utilisation de l'énergie solaire comme source d'énergie pour les systèmes de climatisation, en particulier dans les zones chaudes.

3.3. La variation du rayonnement diffus et du rayonnement global pendant l'année

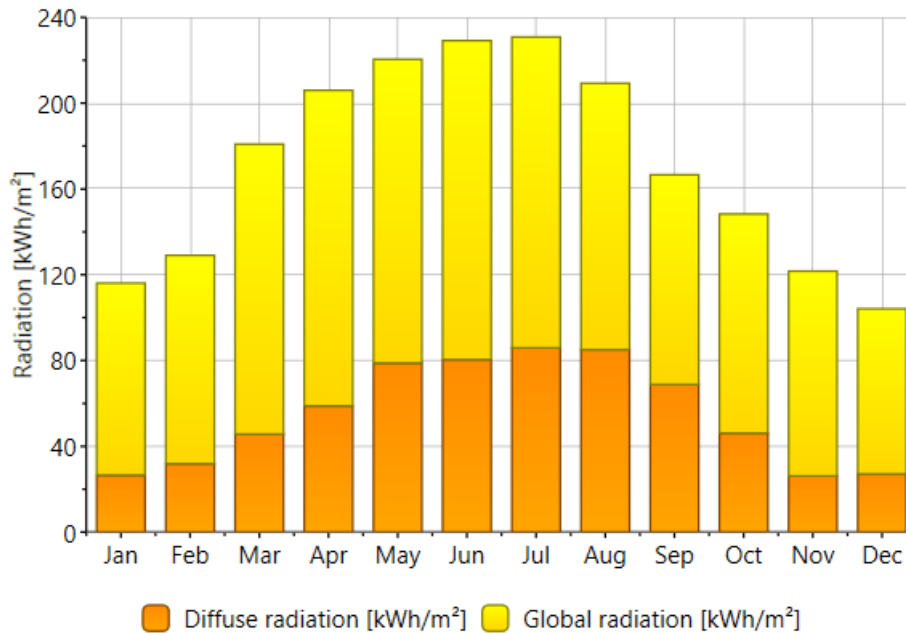


Figure 3-13: La variation de rayonnement diffus et rayonnement global durant une année a Bechar

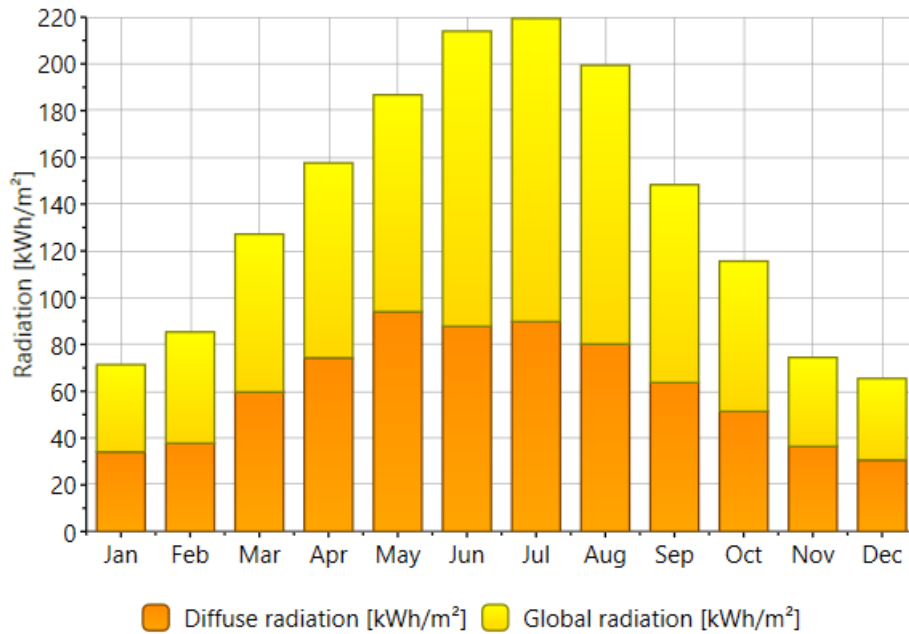


Figure 3-14: La variation de rayonnement diffus et rayonnement global durant une année à Alger

Les diagrammes ci-dessus illustrent que les niveaux maximaux de rayonnement global (en kWh/m²) sont identiques pour les deux villes (Bechar et Alger). Toutefois, le rayonnement à Bechar est plus constant, avec des valeurs élevées tout au long de l'année par rapport à la ville d'Alger. Ces valeurs de rayonnement global demeurent parmi les plus élevées au monde.

3.4. La variation de rayonnement global pendant l'année



Figure 3-15: La variation de rayonnement global durant une année à Bechar

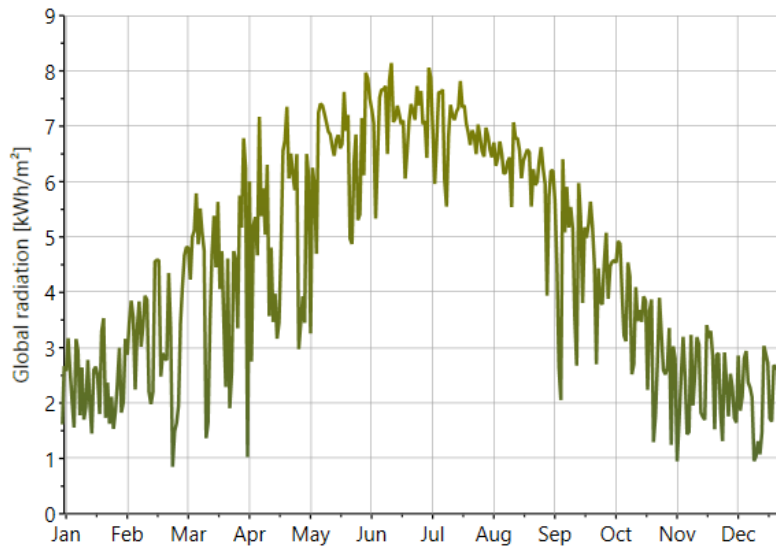


Figure 3-16: La variation de rayonnement global durant une année à Alger

Le rayonnement solaire global à Béchar présente des variations, tant à la hausse qu'à la baisse, mais les niveaux de rayonnement solaire restent supérieurs à 3200 kWh/m² la plupart des jours de l'année. En revanche, à Alger, le rayonnement solaire connaît une augmentation soudaine, bien que les valeurs maximales pendant l'été soient presque similaires à celles de Béchar. Ainsi, l'utilisation de l'énergie solaire pour la climatisation est justifiée en raison des niveaux très élevés de rayonnement solaire.

4. Simulation TRNSYS

Dans cette partie, on va simuler l'installation de climatisation solaire à l'aide du logiciel TRNSYS :

4.1. La climatisation solaire thermique

La figure (3.17) présente l'installation de la climatisation solaire thermique dans le logiciel TRNSYS simulation studio. Cette figure montre le principe de fonctionnement du système thermique qui consiste à collecter l'énergie solaire grâce à des capteurs thermiques plan. Cette énergie est ensuite stockée dans un tank et puis pompée à l'aide d'une pompe vers la machine à absorption. Finalement, la machine à absorption produit l'eau glacée nécessaire pour la climatisation de la chambre.

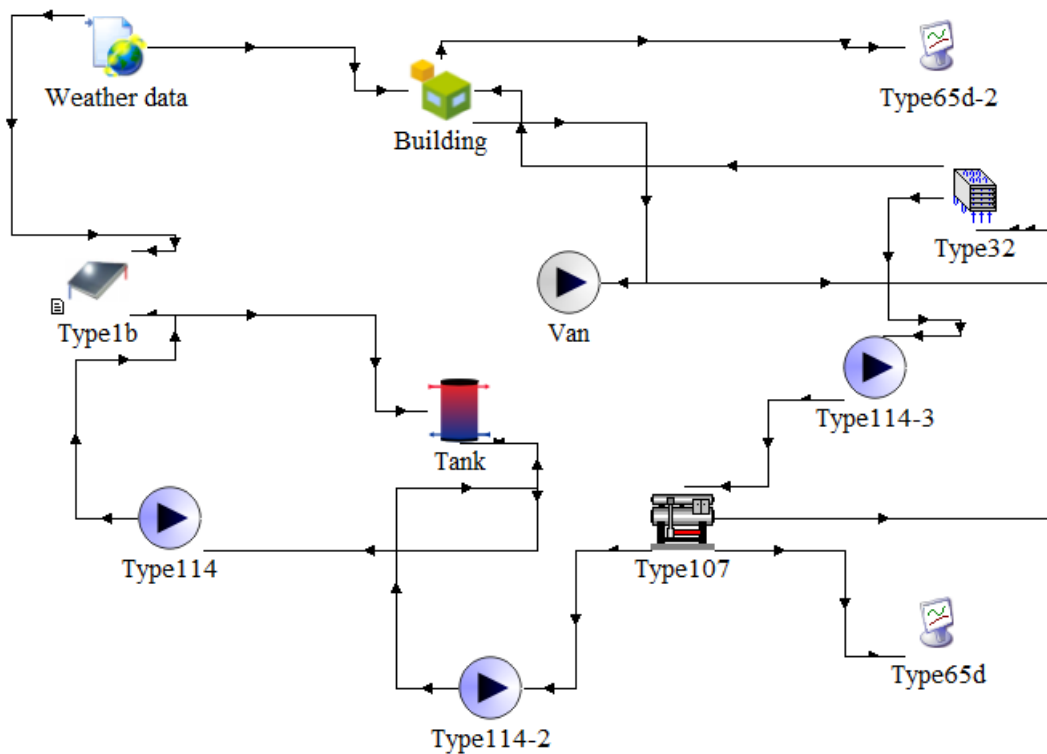


Figure 3-17: Les composants de l'installation thermique

4.2. Description du rôle des composants de l'installation

4.2.1 Conditions météorologiques

Afin de conditionner le rayonnement solaire incident en analogie avec notre climat de la ville d'Bechar, on utilise le « TYPE 109-TMY2 » représenté dans la figure (3.17), ceci est utilisé pour calculer le rayonnement solaire sur le plan des capteurs solaires.

4.2.2 Système solaire

Trois composants sont déjà ajoutés dans le système solaire : capteur solaire plan, la pompe, tank. Les composants sélectionnés sont les suivants :

4.2.2.1 Capteur solaire

Ce composant de « TYPE 1b » est un capteur solaire thermique plan qui consiste à collecter l'énergie du soleil et la transformée en énergie thermique à l'aide du fluide caloporteur (transportant l'énergie).

Informations sur le capteur sous-vide utilisé dans notre simulation :

Surfaces du champ [m ²]	2
Efficacité du capteur	0.80
Inclinaison du capteur [°]	30
Nombre en série	1

Tableau 3-1: Paramètres du capteur solaire plan

4.2.2.2 Tank

Ce composant définit par le « TYPE 4b », il permet de stocker le fluide caloporteur à haute température.

4.2.2.3 Pompe

Ce composant définit par le « TYPE 114 », elle permet de pomper l'eau froide vers le capteur solaire sous-vide.

4.2.3 Machine à absorption :

Ce composant définit par le TYPE « 107 » permet de produire l'eau glacée pour les besoins de la climatisation.

4.2.4 Construction de la maison :

Ce composant définit par le « TYPE56 ».

4.3. Les types TRNSYS

Le tableau ci-dessous nous présente le nom de chaque composant des types TRNSYS du système thermique :

Types	Nom de composant
Type 109	Conditions météorologiques
Type 1b	Capteur solaire plan
Type 107	Machine à absorption à simple effet
Type 4b	Tank
Type 114	Pompe
Type 112a	Fan avec effets de l'humidité
Type 32	Humidificateur
Type 56b	Bâtiment multizones et TRNBUILD

Tableau 3-2: Les types TRNSYS

La température de l'air reste l'indicateur principal de l'état du confort thermique dans un espace habitable.

Chapitre 3 : Résultats De Simulation Et Discussion

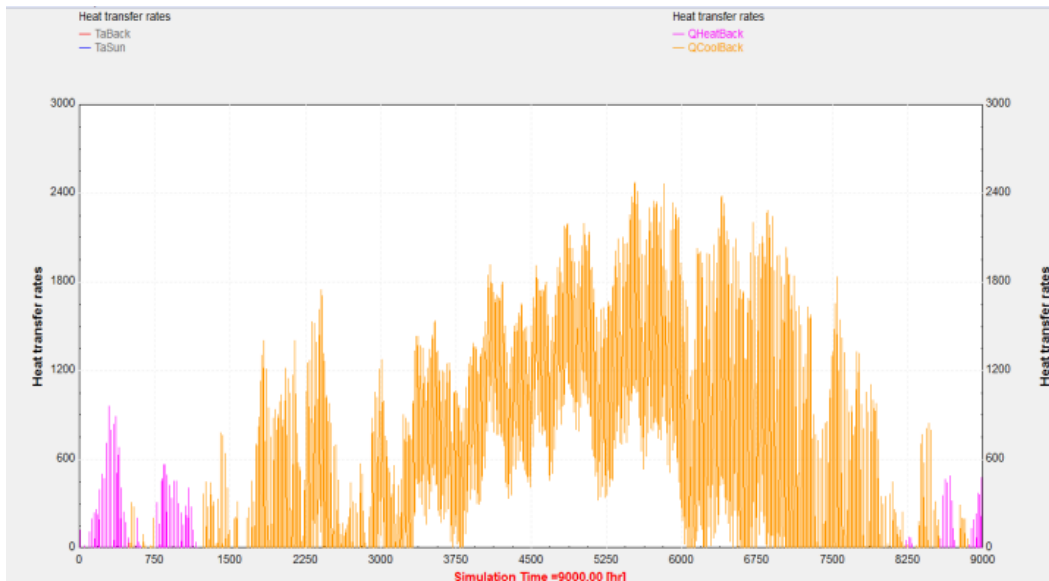


Figure 3-18: Besoins de chauffage et climatisation

Les besoins énergétiques du bâtiment se lient à la variation des températures pendant l'année. À Bechar à partir du mois d'avril la température dépasse le 35°C, et elle demeure élevée jusqu'à le mois d'octobre, donc les besoins de la climatisation sont très importants que les besoins de chauffage que nous obligeons de chercher un système de climatisation efficace et ne consomme pas beaucoup d'énergie pour couvrir les besoins en climatisation à moindre coût.

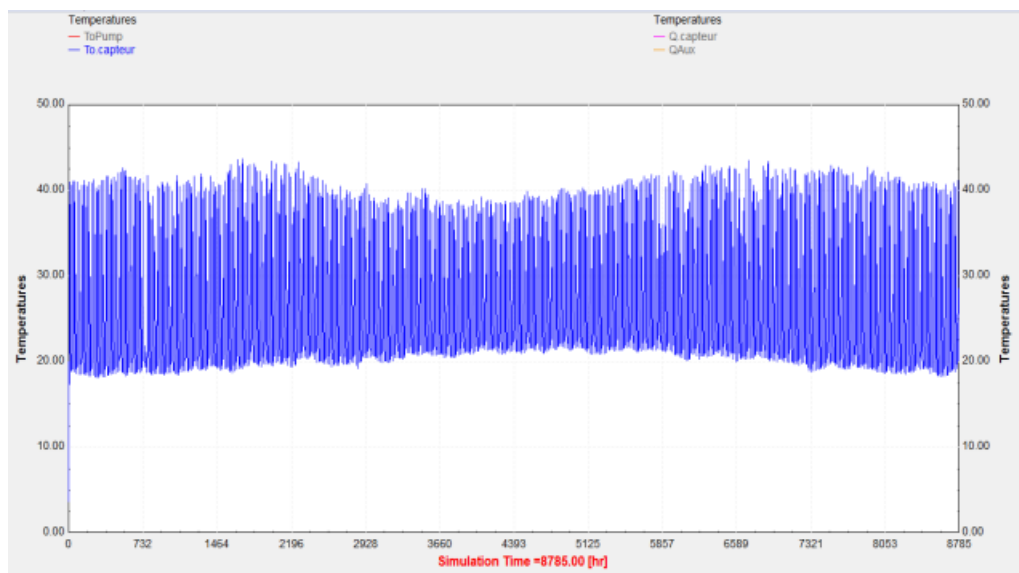


Figure 3-19: variation de température de capteur

Chapitre 3 : Résultats De Simulation Et Discussion

Dans la figure au ci-dessus on remarque que la variation de température de capteur est toujours plus de 20 °C et augmentent jusqu'à la valeur de 45 °C, cela est dû à la situation géographique de la ville de Bechar et les températures ambiantes extérieures qui sont élevées la plupart des jours de l'année.

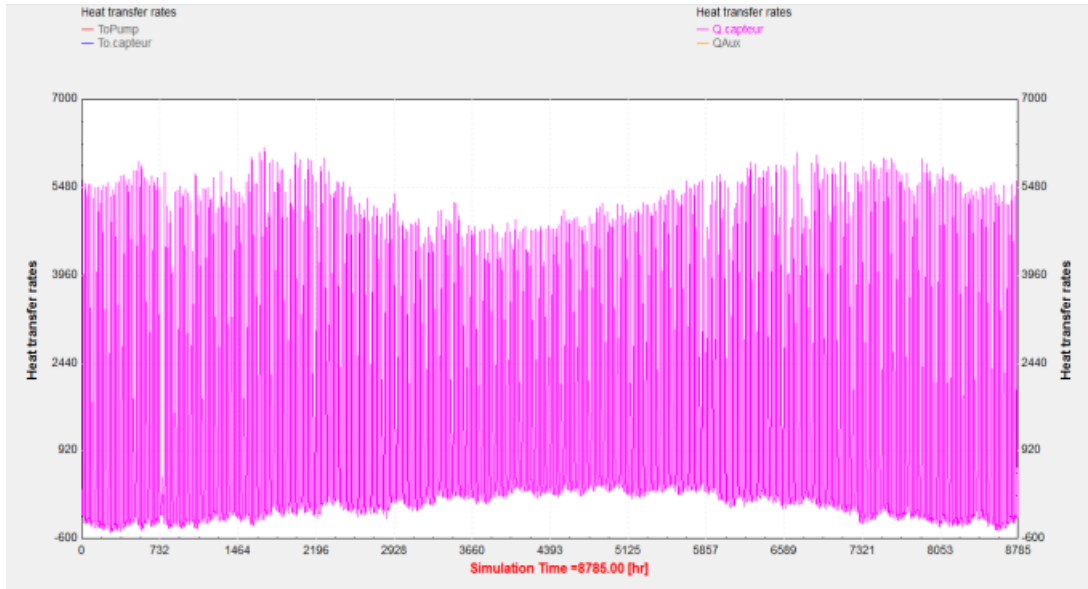


Figure 3-20: variation d'énergie utile produit par le capteur

La figure 3.20 montre la variation annuelle de l'énergie utile fournie par le capteur solaire nous regardons que l'énergie produite est très grand presque à tous l'année et ça revient aux les valeurs du rayonnement solaire qui sont très élevé et la durée de l'ensoleillement.

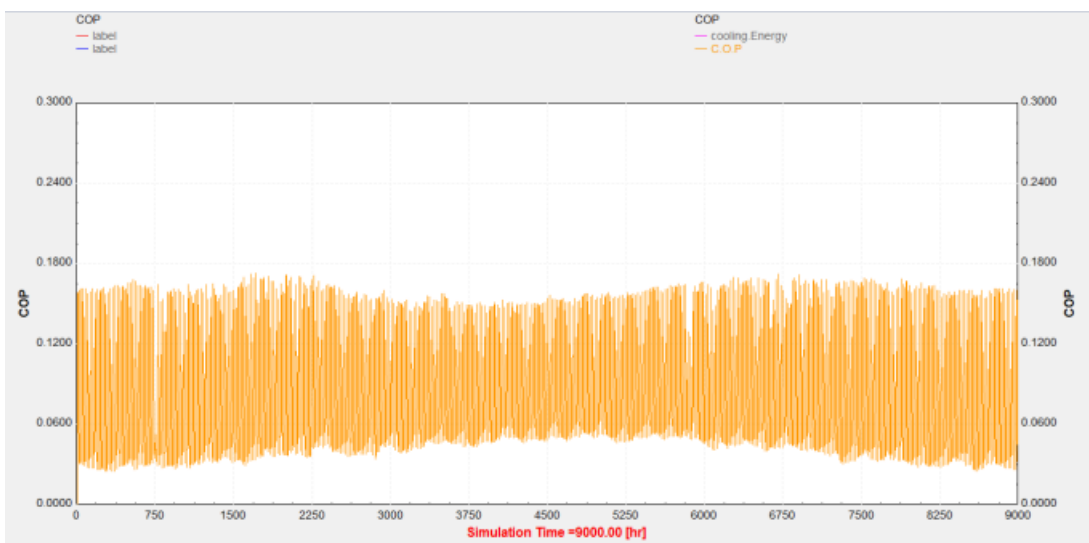


Figure 3-21: variation de COP d'une machine a absorption (capteur plan)



Figure 3-22: variation de COP d'une machine a absorption (Performance Map Collector)

Dans la figure (3.21) ci-dessus, on peut observer que les valeurs du coefficient de performance (COP) pour la machine à absorption sont faibles. Cela est dû à l'efficacité des différents composants de la machine à absorption tels que l'absorbeur, le générateur, le condenseur et l'évaporateur. Cependant, il n'est pas possible d'intervenir au niveau de la machine à absorption, car celle-ci est la seule proposée par le logiciel TRNSYS.

En revanche, le choix du fluide frigorigène utilisé et du type de capteur intégré dans le cycle peut avoir un impact significatif sur les performances. Par exemple, l'utilisation du type "Performance Map Collector" a permis d'augmenter les performances du cycle total d'environ 26% (Figure 3.22). Il est également important de prendre en compte la température d'entrée (20 °C) ainsi que le nombre de capteurs utilisés (un seul capteur dans notre cas).

5. Rendement du cycle total (cycle frigorifique+ capteur)

Le rendement du cycle totale est égale le produit du COP de cycle frigorifique et le rendement de capteur solaire :

$$\eta_{TOT} = COP_{Fri} \times \eta_{cap} \quad (22)$$

$$\eta_{TOT} = 0.17 \times 0.8 = 0.136$$

Pour améliorer le rendement de cycle total on ajoute d'autres capteurs solaires en série afin qu'augmenter la température de sortie de capteur, ou bien remplacer le capteur complètement par un autre ayant un rendement plus élevé ou avais une surface de captage plus grande.

Conclusion générale

La simulation du refroidissement par absorption avec le logiciel TRNSYS est une étape importante dans le développement et l'optimisation de systèmes de refroidissement efficaces et durables. Dans cette thèse, divers aspects de cette simulation ont été étudiés et les résultats obtenus ont été analysés en profondeur.

L'objectif principal de cette étude était de modéliser et de simuler un refroidisseur à absorption pour comprendre son fonctionnement, analyser ses performances et améliorer son efficacité énergétique. Grâce à l'utilisation du logiciel TRNSYS, des modèles mathématiques précis ont été développés qui simulent le comportement de chaque partie de la machine de réfrigération, en particulier l'évaporateur, le condenseur, l'absorbeur et le générateur.

Les résultats de la simulation ont montré la validité et la fiabilité du modèle développé. Les performances du réfrigérateur ont été évaluées en termes de coefficient de performance (COP), de consommation d'énergie et de transfert de chaleur. Ces paramètres ont été analysés dans différentes conditions de fonctionnement telles que les fluctuations de température, la charge thermique et le débit de liquide de refroidissement.

En conclusion, la simulation de refroidisseurs à absorption avec le logiciel TRNSYS est un moyen efficace pour comprendre, évaluer et optimiser l'efficacité énergétique de ces systèmes. Dans cette mémoire, les résultats obtenus ont été analysés en détail et des opportunités d'amélioration ont été identifiées. Les travaux futurs pourraient se concentrer sur la validation expérimentale du modèle et la mise en œuvre pratique des propositions proposées pour promouvoir le développement de la technologie des machines de réfrigération à absorption et la transition vers une société plus durable et économe en énergie.

Bibliographie

- [1] Wakim, M. (2017). Etude des machines à absorption pour la valorisation de la chaleur fatale basse température (Doctoral dissertation, Paris Sciences et Lettres (ComUE)).
- [2] Duminil M. (2000). Une brève histoire du froid.
- [3] Delaire, E. (2012). Le froid dans la conservation des produits de la mer.
- [4] SARRA, B. (2016). Evaluation Des Performances D'une Machine Frigorifique Hybride A absorption/éjection (Doctoral dissertation, thèse de master, Université Badji Mokhtar Annaba).
- [5] Ullah, K. R., Saidur, R., Ping, H. W., Akikur, R. K., & Shuvo, N. H. (2013). A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 499-513.
- [6] Almers, A. E. L. (2002). Étude du transfert de chaleur et de masse dans un lit fixe de charbon actif réagissant par adsorption avec l'ammoniac—application à la modélisation d'une machine frigorifique solaire (Doctoral dissertation, Tetouan).
- [7] Narváez-Romo, B., Chhay, M., Zavaleta-Aguilar, E. W., & Simões-Moreira, J. R. (2017). A critical review of heat and mass transfer correlations for LiBr-H₂O and NH₃-H₂O absorption refrigeration machines using falling liquid film technology. *Applied thermal engineering*, 123, 1079-1095.
- [8] Elvas, M. C., Peres, I. M., & Carvalho, S. (2012). Making science cooler: Carré's apparatus. In *The Circulation of Science and Technology: Proceedings of the 4th International Conference of the European Society for the History of Science*. Barcelona, 18-20 November 2010 (pp. 441-449). Societat Catalana d'Història de la Ciència i de la Tècnica.
- [9] Meniai, A. H. (2017). Modélisation d'une machine frigorifique à absorption.
- [10] Bhatia, A. (2011). Overview of vapor absorption cooling systems. Stony Point: Continuing Education and Development.
- [11] Guerbouz, Y., & Zine, S. Etude d'un cycle de refrigeration tritherme à absorption (Doctoral dissertation).

- [12] Menni, M., & Mechou, L. (2017). Simulation d'une machine à absorption sous TRNSYS (Doctoral dissertation, université de bouira).
- [13]. ABC de la climatisation (et du froid). Machine frigorifique à absorption, le principe. 2023. Forme disponible.
- [14] Dincer, I., & Ratlamwala, T. A. H. (2016). Integrated absorption refrigeration systems: comparative energy and exergy analyses. Springer.
- [15] Manzela, A. A., Hanriot, S. M., Cabezas-Gómez, L., & Sodr , J. R. (2010). Using engine exhaust gas as energy source for an absorption refrigeration system. *Applied energy*, 87(4), 1141-1148.
- [16] Herold, K. E., Radermacher, R., & Klein, S. A. (2016). Absorption chillers and heat pumps. CRC press.
- [17] Coquelet, C. (2003).  tude des fluides frigorigènes: mesures et modélisations (Doctoral dissertation,  cole Nationale Supérieure des Mines de Paris).
- [18] FELLAH, I., & DJAIDER, R. (2012). Etude et conception d'un système de climatisation utilisant l'énergie solaire (Doctoral dissertation).
- [19] OSMANE, A. B. Dimensionnement d'une machine frigorifique à adsorption alimentée par énergie solaire (Doctoral dissertation).
- [20] Menni, M., & Mechou, L. (2017). Simulation d'une machine à absorption sous TRNSYS (Doctoral dissertation, université de bouira).
- [21] Djefaffia, M. (2016).  tude d'une machine frigorifique   absorption liquide (NH₃/H₂O) (mémoire de master, Universit  Annaba)
- [22] Tsoutsos, T., Aloumpi, E., Gkouskos, Z., & Karagiorgas, M. (2010). Design of a solar absorption cooling system in a Greek hospital. *Energy and Buildings*, 42(2), 265-272.
- [23] Hang, Y., & Qu, M. (2010). The impact of hot and cold storages on a solar absorption cooling system for an office building.
- [24] Fathi, R., Guemimi, C., & Ouaskit, S. (2004). An irreversible thermodynamic model for solar absorption refrigerator. *Renewable Energy*, 29(8), 1349-1365.

- [25] Li, Z. F., & Sumathy, K. (2001). Simulation of a solar absorption air conditioning system. *Energy Conversion and management*, 42(3), 313-327.
- [26] Mittal, V., Kasana, K. S., & Thakur, N. S. (2006). Modelling and simulation of a solar absorption cooling system for India. *Journal of Energy in Southern Africa*, 17(3), 65-70.
- [27] Gomri, R. (2013). Simulation study on the performance of solar/natural gas absorption cooling chillers. *Energy Conversion and Management*, 65, 675-681.
- [28] Assilzadeh, F., Kalogirou, S. A., Ali, Y., & Sopian, K. (2005). Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors. *Renewable energy*, 30(8), 1143-1159.
- [29] Ardehali, M. M., Shahrestani, M., & Adams, C. C. (2007). Energy simulation of solar assisted absorption system and examination of clearness index effects on auxiliary heating. *Energy conversion and management*, 48(3), 864-870.
- [30] Lecuona, A., Ventas, R., Venegas, M., Zacarías, A., & Salgado, R. (2009). Optimum hot water temperature for absorption solar cooling. *SolarEnergy*, 83(10), 1806-1814.
- [30] Jean CASTAING-LASVIGNOTTES 2001 "Aspects thermodynamiques et technico-économiques " 2001
- [31] Etude d'une installation de climatisation solaire [texte imprimé] / METTIOUI Sabéha Kawtar, Auteur ; SAIFI Nour El Imane, Auteur ; GUENDOOUZ Bouhelal, Auteur . - 2015/2016
- [32] WEATHER & CLIMATE [<https://www.weather-atlas.com/en/algeria/bechar-climate>]
- [33] Carneiro, R., Gaspar, P. D., & Silva, P. D. D. (2017). 3D and transient numerical modelling of door opening and closing processes and its influence on thermal performance of cold rooms. *Applied thermal engineering*, 113, 585-600.
- [34] Harrington, L., Aye, L., & Fuller, B. (2018). Impact of room temperature on energy consumption of household refrigerators: Lessons from analysis of field and laboratory data. *Applied energy*, 211, 346-357.

- [35] O'Neill, Z., & Narayanan, S. (2014). Model-based estimation of cold room temperatures in a supermarket refrigeration system. *Applied thermal engineering*, 73(1), 819-830.
- [36] Duret, S., Hoang, H. M., Flick, D., & Laguerre, O. (2014). Experimental characterization of airflow, heat and mass transfer in a cold room filled with food products. *International journal of refrigeration*, 46, 17-25.
- [37] Thompson, A. K., Prange, R. K., Bancroft, R., & Puttongsiri, T. (2018). *Controlled atmosphere storage of fruit and vegetables*. CABI.
- [38] Hmida, A., Chekir, N., Laafer, A., Slimani, M. E. A., & Brahim, A. B. (2019). Modeling of cold room driven by an absorption refrigerator in the south of Tunisia: A detailed energy and thermodynamic analysis. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1239-1249.
- [39] BenAbeid, M. (2018). Investigation of a solar thermal driven Refrigerated warehouse in Tripoli-Libya using TRNSYS. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, 7(1), 38-49.
- [40] BELKESSAM, H. (2014). Contribution à la valorisation de l'utilisation de l'énergie solaire pour des besoins de climatisation et de conditionnement d'air (Doctoral dissertation, Master Thesis University of Abou Baker Belkaid Tlemcem (Algeria)).
- [41] Bouhelal, G. (2011). L'utilisation de l'énergie solaire pour les besoins de la climatisation'. Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en Génie Mécanique Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM-Année universitaire, 2012.
- [42] Benahmed, L., & Ben-Mostefa, F. Z. (2013). Intégration d'un système de rafraîchissement solaire au bâtiment. Faisabilité technico-économique (Doctoral dissertation, Master Thesis University of Abou Baker Belkaid Tlemcem (Algeria)).
- [43] DJEBBAS, M., & BEN CHAA, Abdelhakim. Etude du conditionnement d'air solaire d'un bâtiment à usage éducatif (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDIMERBAH OUARGLA).