

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Énergies Renouvelables en Mécanique

Par Taouli Kheireddine

Par Zeghoudi Mohamed

Sujet

**Performances d'une pompe à chaleur résidentielle à absorption
entraînée par un capteur plan dans les conditions de Tlemcen**

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M. M. Benramdane
M. A. Aliane
M. B. Abdesselam
Mme. H. Sari Hassoun

MCA
MCB
Doctorant
MAA

Univ. Tlemcen
Univ. Tlemcen
Univ. Tlemcen
Univ. Tlemcen

Président
Directeur de mémoire
Co-Directeur de mémoire
Examinatrice

Dédicace

Je dédie ce mémoire à deux familles chères à mon cœur :

À ma famille Taouli, pour votre amour inconditionnel, votre soutien constant et vos encouragements à chaque étape de mon parcours. Votre confiance en moi a été ma plus grande force.

À la famille Zeghoudi, pour votre présence bienveillante, vos mots réconfortants et votre générosité sans faille. Vous avez toujours été à mes côtés avec chaleur et bienveillance.

Merci à vous tous d'avoir cru en moi et de m'avoir accompagné dans cette belle aventure universitaire.

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier Dieu le tout puissant, qui nous a donné le courage, la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Je tiens à remercier vivement à mon encadrant M. B. ABDESSELAM pour son soutien et ses conseils tout au long de ce travail, sa rigueur scientifique et ses remarques ont été utiles pour la qualité de ce travail.

Je remercie également tous les enseignants du département de génie mécanique pour leur patience et leur enseignement, ce qui m'a permis de mener à bien ce travail.

Enfin, un très grand merci à mes parents pour leur amour, leur soutien continu et leurs encouragements, je leur adresse toute ma gratitude du fond du cœur.

J'en serais éternellement reconnaissant.

الملخص:

وتوفر أنظمة التبريد بالامتصاص الشمسي حلاً واعداً للتبريد المستدام، ولكنها تطرح أيضاً عدداً من التحديات. فكفاءتها أقل عمومًا من كفاءة أنظمة التبريد بالضغط الميكانيكي التقليدية، لا سيما خلال فترات انخفاض الإشعاع الشمسي. تقدم هذه الدراسة تحليلاً للطاقة لنظام تبريد بالامتصاص أحادي التأثير بمساعدة الطاقة الشمسية يعمل بزواج من ماء بروميد الليثيوم - الماء (LiBr-H₂O). يشتمل النظام على مجمعات شمسية مسطحة الألواح الشمسية ويتم تقييمه في ظل الظروف المناخية في تلمسان بالجزائر. يركز التحليل على تقييم أداء النظام كدالة للطاقة المستهلكة والمنتجة، مع إيلاء اهتمام خاص للسلوك الحراري للمكونات الرئيسية مثل المولد والممتص والمكثف والمبخر. توفر النتائج معلومات قيمة عن جدوى تقنيات التبريد بالامتصاص الشمسي وتشغيلها.

لكلمات المفتاحية: التبريد الشمسي، الطاقة المتجددة، الامتصاص، الكفاءة الحرارية.

Summary:

Solar absorption cooling systems offer a promising solution for sustainable cooling, but they also present a number of challenges. Their efficiency is generally lower than that of conventional mechanical compression cooling systems, particularly during periods of low solar radiation. This study presents an energy analysis of a solar-assisted single-effect absorption refrigeration system, operating with a lithium bromide-water couple (LiBr-H₂O). The system integrates flat-plate solar collectors and is evaluated under the climatic conditions of Tlemcen, Algeria. The analysis focuses on evaluating system performance as a function of energy consumed and produced, paying particular attention to the thermal behavior of key components such as the generator, absorber, condenser and evaporator. The results provide valuable information on the feasibility and operation of solar absorption cooling technologies.

Keywords : solar refrigeration, renewable energy, absorption system, thermal efficiency

Résumé :

Les systèmes de refroidissement par absorption solaire offrent une solution prometteuse pour un refroidissement durable, mais ils présentent également plusieurs défis. Leur efficacité est généralement inférieure à celle des systèmes de refroidissement à compression mécanique conventionnels, notamment en période de faible rayonnement solaire. Cette étude présente une analyse énergétique d'un système de réfrigération par absorption à simple effet assisté par énergie solaire, fonctionnant avec un couple bromure de lithium-eau (LiBr-H₂O). Le système intègre des capteurs solaires plans et est évalué dans les conditions climatiques de Tlemcen, en Algérie. L'analyse se concentre sur l'évaluation des performances du système en fonction de l'énergie consommée et produite, en accordant une attention particulière au comportement thermique des composants clés tels que le générateur, l'absorbeur, le condenseur et l'évaporateur. Les résultats fournissent des informations précieuses sur la faisabilité et le fonctionnement des technologies de refroidissement par absorption solaire.

Mots-clés : réfrigération solaire, énergie renouvelable, absorption, efficacité thermique.

Table des matières

Introduction générale :	5
I.1.Introduction :	9
I.2. L'énergie solaire :	9
a. L'énergie solaire thermique :	9
b. L'énergie solaire thermodynamique :	10
I.3. Le rayonnement solaire :	11
I.3.1. Le rayonnement solaire direct :	11
I.3.2. Le rayonnement solaire diffus :	11
I.3.3. Le rayonnement solaire réfléchi :	11
I.3.4. Le rayonnement solaire global :	11
I.4. Les capteurs solaires :	12
I.4.1. Définition d'un capteur solaire :	12
I.4.2. Différents types de capteurs solaires :	12
I.4.3. Composants principaux d'un capteur plan :	13
I.4.3.1. L'absorbeur :	13
I.4.3.2. La couverture transparente :	14
I.4.3.3. L'isolant :	15
I.4.3.4. Le fluide caloporteur :	18
I.4.4. Classification des capteurs solaires plans :	19
I.4.5. Principes de fonctionnement :	21
I.4.6. Avantages et inconvénients d'un capteur solaire plan :	22
II.1. Introduction :	24
II.2. Machines de réfrigération :	24
II.2.1. Concept général de la réfrigérateur :	24
II.2.1.1. Définition et principes :	24
II.2.1.2. Comparaison entre le système de réfrigération traditionnel et la réfrigération par absorption :	24
II.2.2 : Types de machines de réfrigération :	25
II.2.2.1. Machine frigorifique à compression mécanique :	25
a.Machine à changement de phase :	25
b.....Machine frigorifique à gaz :	26
II.2.2.2. Machine frigorifique à absorption :	28
II.2.2.3. Machine frigorifique à adsorption :	31
II .3. Machines réfrigération à absorption solaire :	33
II.3.1.Principe de fonctionnement :	34
II.3.2.Fluides de travail :	35
II.4. Types de machines à absorption :	36

II.4.1. Machines à absorption à simple effet :	36
II.4.2. Machines à absorption à double effet :	37
II.4.3. Machines à absorption à triple effet :	38
II.5: Description des composantes du système à absorption solaire :	39
II.5.1:Générateur :	39
II.5.2:Condenseur :	39
II.5.3: Evaporateur :	40
II.5.4 : Absorbeur :	40
II.5.5 : Echangeur de chaleur :	41
II.5.6 : Détendeur :	41
II.5.7. La pompe :	42
II.6.Aspects économiques et environnementaux en Algérie :	42
II.6.1.Analyse économique :	42
II.6.2.Impact environnemental :	43
II.7.Conclusion :	46
III.1. Introduction :	48
III.2. Description du système étudié :	48
III.3. Étude des performances thermiques d'un capteur solaire plan :	49
a.Évaluation des pertes :	49
b.Équation de base du bilan énergétique du capteur :	49
III.4. Rendement thermique instantané du capteur (η_{CS}) :	51
III.5. Analyse énergétique de système réfrigération par absorption simple effet :	52
III.5.1. Pompe :	52
aÉquation de bilan de masse :	52
III.5.2. Échangeur de chaleur à récupération de chaleur :	53
III.5.3. Générateur :	53
a.Les équations de bilan de masse du générateur :	53
b.L'équation de bilan énergétique :	54
III.5.4. Condenseur :	54
a.L'équation de bilan de masse pour le condenseur :	54
b.L'équation de bilan énergétique :	54
III.5.5. Évaporateur :	54
III.5.6. Absorbeur :	55
b.L'équation de bilan d'énergie :	55
III.5.7. Valve d'expansion (pour la solution faible) :	56
a.L'équation de bilan de masse pour la valve d'expansion de la solution faible :	56
b.L'équation de bilan d'énergie :	56
III.5.8. Valve d'expansion (pour le réfrigérant) :	56
a.L'équation de bilan de masse pour la valve d'expansion du réfrigérant :	56

b.L'équation de bilan d'énergie :.....	56
III.5.9. Les coefficients de performance énergétique :.....	57
III.6. Conclusion :.....	57
IV.1.Introduction :.....	59
IV.2.Description du logiciel EES :.....	59
IV.3.Description du système de réfrigération par absorption à simple effet :.....	59
IV.4.Conditions de fonctionnement pour le cycle simple effet :.....	60
IV.5.Influence de l'apport de chaleur :	61
Conclusion générale :	72

Listes des figures

figure I. 1:énergie solaire thermique	10
figure I. 2:Présentation de centrale solaire thermodynamique à concentration.....	10
figure I. 3:REPRESENTATION DES 3 COMPOSANTS DU RAYONNEMENTS GLOBAL SUR PLAN INCLINE.....	12
figure I. 4:capteur solaire.....	12
figure I. 5:Les composants principaux d'un capteur plan	13
figure I. 6:La transparence du verre	15
figure I. 7:Schéma des différentes pertes	18
figure I. 8:Principe de fonctionnement du capteur solaire plan.....	22
figure II. 1:Schéma d'une machine frigorifique à compression	26
figure II. 2:Cycle d'une machine à compression de vapeur sur le diagramme (T,S)	26
figure II. 3:Schéma d'une machine frigorifique à gaz	27
figure II. 4:Cycle d'une machine à gaz sur le diagramme (T, S).....	27
figure II. 5:Cycle de fonctionnement dans le diagramme de Oldham	29
figure II. 6:Schéma d'une machine frigorifique à absorption humide	30
figure II. 7:Machine frigorifique à adsorption.....	31
figure II. 8:Exemple d'isostère dans le diagramme de Clapeyron.....	33
figure II. 9:Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique de base dans un diagramme de Clapeyron	33
figure II. 10:Structure d'une machine frigorifique à absorption.....	34
figure II. 11:Schéma de cycle frigorifique à absorption simple effet	36
figure II. 12: Schéma de cycle frigorifique à absorption double effet	37
figure II. 13:Principe de fonctionnement d'un condenseur	39
figure II. 14:Principe de travail de l'évaporateur	40
figure II. 15:L'absorbeur.	41
figure II. 16:Détendeur thermostatique.	42
figure II. 17:Évolution des émissions de CO2 dans le scénario évolution énergétique.....	45
figure II. 18:Émissions mondiales de CO2 énergétique.	45
figure II. 19:Objectifs Kyoto de réduction des émissions	46
figure III. 1:le système de réfrigération à absorption simple effet	48
figure III. 2:Mécanisme des pertes de chaleur.....	49
figure III. 3:Le bilan énergétique du capteur.....	49
figure III. 4:Graphique schématique montrant les performances comparées des différents types de capteurs solaires thermiques.....	51
figure III. 5:Schéma de la pompe	52
figure III. 6:schéma de Echangeur.....	53
figure III. 7:Schéma de générateur	53
figure III. 8:Schéma de condenseur.....	54
figure III. 9:Schéma de Evaporateur	55
figure III. 10:Schéma de l'absorbeur.....	55
figure III. 11: Schéma Valve d'expansion	56
figure III. 12:Schéma de Valve d'expansion	56
figure IV. 1:Schéma du système de refroidissement par absorption solaire.....	60
figure IV. 2:Variation quotidienne du gain de chaleur utile et de la température de sortie du capteur à Tlemcen	62
figure IV. 3:les changements de coefficient de performance en fonction de la température de générateur	63

figure IV. 4: les changements de COP en fonction de la température du générateur pour différentes températures de condensation	64
figure IV. 5: les changements du cop en fonction du débit massique pour différentes températures de condensation.....	65
figure IV. 6: les changements de la puissance frigorifique en fonction de la température du générateur	66
figure IV. 7: l'effet de la température du générateur T11 sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser	67
figure IV. 8: l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ($\eta_{ex,ch}$) sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser	67
figure IV. 9 : l'effet du débit massique à travers la pompe $\dot{m}_1$ sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser.....	68
Figure IV. 10 : illustre l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur le coefficient de performance (COP) pour différentes températures d'absorber.....	69
Figure IV. 11 : l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur la puissance frigorifique pour différentes températures d'absorber.....	70

Liste des tableaux

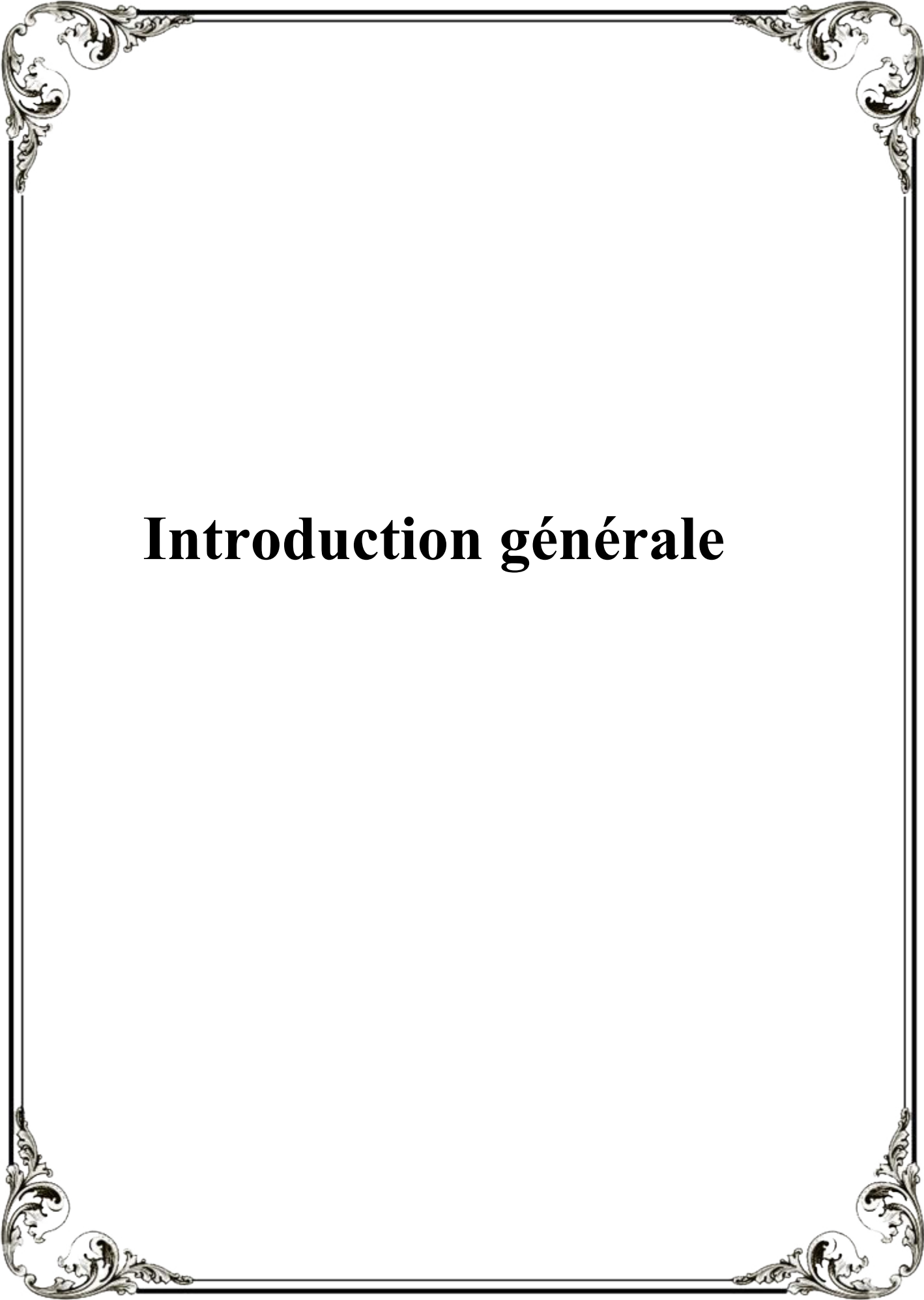
Tableau I. 1: Transmissivité de différents types de couvertures dans le visible et l'infrarouge .	15
Tableau I. 2: Conductivité thermique de quelque matériau	17
Tableau II. 1: Couple utilisés pour le système à absorption	28
Tableau II. 2: Résumé de quelques travaux de recherche portant sur les fluides de travail.	35
Tableau II. 3: Performance des cycles d'absorption	38
Tableau II. 4: Les principaux gaz (GES) influant sur le climat	44
Tableau III. 1: Caractéristiques des deux types de capteurs plans utilisés en réfrigération . ..	51
Tableau IV. 1: conditions de fonctionnement pour le cycle réfrigération par absorption simple effet	60
Tableau IV. 2: Résumé des état thermodynamique pour la simulation	61

Liste des symboles

Symbole	Description	Unité
COP	Coefficient de performance	Sans unité (dimensionnel)
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
w	Puissance spécifique	kJ/kg ou W/kg
v	Volume spécifique	m ³ /kg
P	Pression	Pa (Pascal) ou bar
η	Rendement	Sans unité (ou %)
$\dot{w}$	Puissance totale consommée	W (Watt)
h	Enthalpie spécifique	kJ/kg
T	Température	K (Kelvin) ou °C
s	Entropie spécifique	kJ/kg·K
x	Concentration de la solution	Sans unité (souvent %)
$\dot{Q}$	Débit de chaleur (chaleur transférée)	W (Watt)
G	Irradiance solaire totale	W/m ²
IG	Flux solaire incident	W/m ²
ACS	Surface de captation	m ²
α	Absorptivité de l'absorbeur	Sans unité (entre 0 et 1)
τ	Transmissivité de la vitre	Sans unité (entre 0 et 1)

Indices :

a	absorbeur
c	condenseur
e	évaporateur
g	générateur
p	pompe
Evw	vanne d'expansion (pour la solution faible)
Evr	vanne d'expansion (pour le réfrigérant)
Hx	Echangeur de chaleur
En	énergétique



Introduction générale

Introduction générale :

Ces dernières années, la demande et l'utilisation d'énergie électrique ont connu une augment, surtout dans la zone saharienne de l'Algérie. Cela est particulièrement vrai pour les besoins en froid, comme la réfrigération à domicile et l'air conditionné. Près de 40 à 50% de l'électricité générée dans les zones sahariennes d'Algérie durant la saison estivale est utilisée par diverses sortes de systèmes de réfrigération [1]. À l'heure actuelle, la grande majorité des besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits par les vastes réserves pétrolières. On connaît bien les complications découlant de l'exploitation des énergies fossiles : contamination de l'air, émissions de CO₂ qui participent à l'effet de serre et production d'aérosols. Ces enjeux environnementaux ont suscité un nouvel intérêt pour d'autres formes d'énergies qualifiées de renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne et géothermique, jugées soit plus rentables, soit plus aisées à mettre en pratique. L'essor initial des énergies renouvelables a été impulsé par les crises pétrolières de 1973 et 1978. Toutefois, après la chute du prix du pétrole en 1986, ce secteur a connu une phase de recul. Il a ensuite bénéficié d'un regain d'énergie en 1998 suite à la ratification du protocole de Kyoto, qui visait une réduction de 5,2 % des émissions de gaz à effet de serre [2].

L'accord a particulièrement touché l'industrie de la réfrigération et du conditionnement d'air. Outre l'interdiction de l'emploi des HFC, les directives majeures portent sur l'optimisation des performances des équipements pour diminuer la consommation, ainsi que sur une conception durable et bénéfique dans le domaine résidentiel. En plus de ces défis, il y a une croissance de la consommation énergétique liée à la réfrigération suite à l'accroissement de la demande. Selon l'estimation du projet EECCAC [2003], la demande en froid pourrait connaître une hausse de 40% entre 1990 et 2025. L'emplacement de l'Algérie favorise le progrès et l'épanouissement de l'exploitation de l'énergie solaire. Effectivement, étant donné la quantité considérable de rayonnement reçu et la durée d'exposition au soleil qui excède dix heures quotidiennement pendant plusieurs mois, notre pays a la capacité de satisfaire une part de ses besoins énergétiques grâce à l'énergie solaire. Ces bénéfices pourraient s'avérer être de précieux atouts dans les zones les plus isolées, en particulier pour des usages comme la climatisation où la demande énergétique est très élevée.

Notre nation a pris des engagements pour d'importants projets de développement immobilier. Il est donc évident que la demande de confort thermique augmentera par conséquent et représentera un fardeau additionnel sur le réseau énergétique actuel déjà éprouvé, particulièrement durant les périodes de canicule. En tenant compte des particularités de notre climat et en incorporant les technologies solaires dans les projets, nous serons en mesure de minimiser les coûts liés au confort thermique.

L'utilisation de la réfrigération solaire permet assurément d'épargner une part significative de l'énergie primaire consommée. Ceci diminue l'émission de dioxyde de carbone et les pics de demande électrique durant l'été, ce qui constitue un atout majeur pour l'environnement et l'économie du pays. Cependant, la situation est tout autre en ce qui concerne le profit financier. Cependant, l'avancement de la technologie solaire et les méthodes d'intégration dans le réseau traditionnel sont encourageants.

La chaîne du froid désigne un système combinant le transport à température contrôlée et une logistique appropriée pour garantir la qualité et la conservation des

produits sensibles. Elle joue un rôle crucial dans la préservation des fruits de mer, des médicaments, des produits agricoles frais, etc. Les chaînes du froid offrent plusieurs avantages, notamment la prévention des surcapacités, le maintien de la qualité des produits, l'allongement de leur durée de commercialisation et la réduction des problèmes de transport en période de pointe.

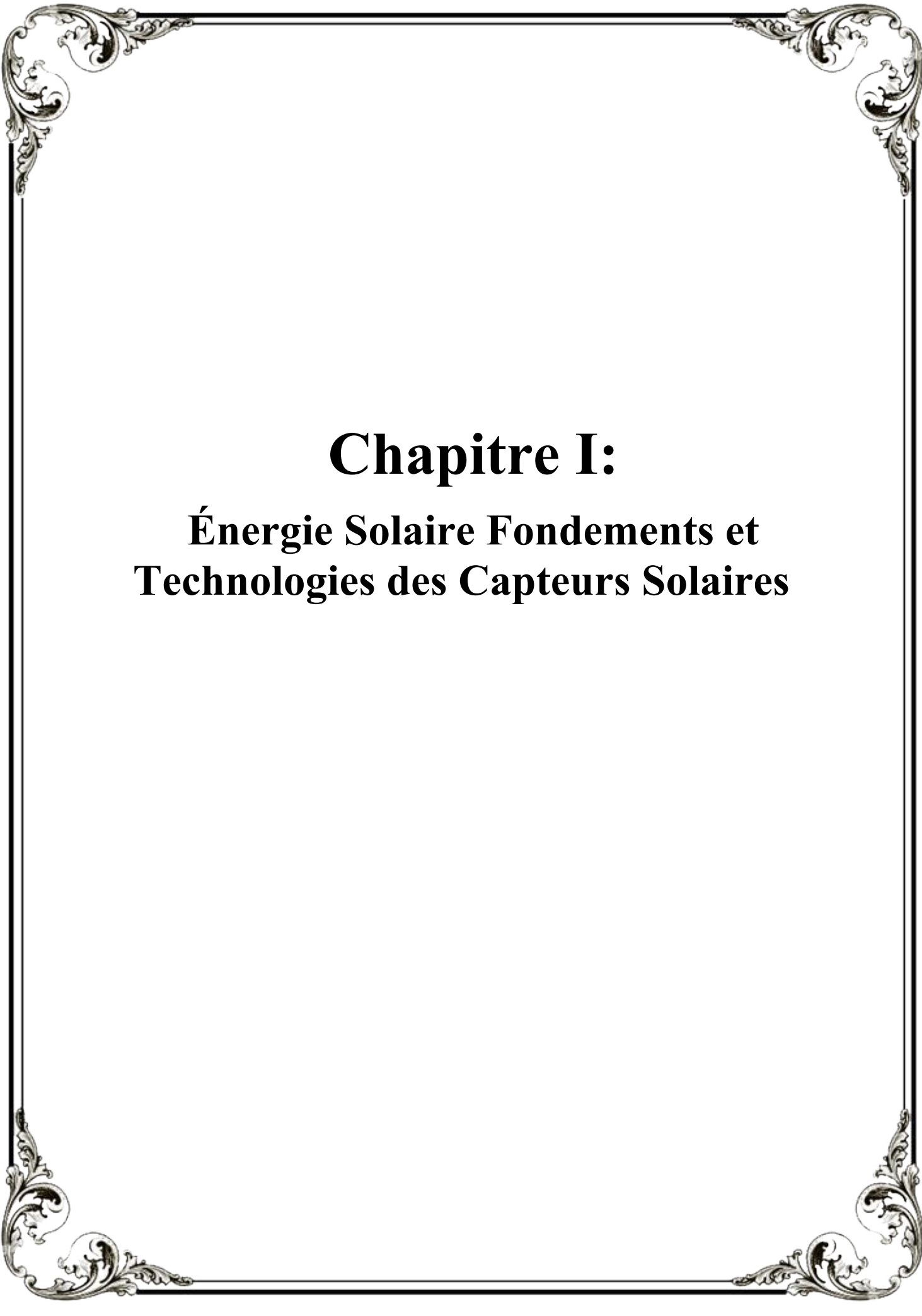
La réfrigération joue un rôle essentiel en ralentissant la prolifération des bactéries, qui sont présentes partout dans la nature : dans le sol, l'air, l'eau et les aliments que nous consommons.

Notre travail est d'examiner la capacité technique des dispositifs et pour ce faire, cette étude explore les différentes techniques de production de froid et comprend un aperçu historique retraçant les progrès des méthodes de refroidissement, de leurs origines naturelles et rudimentaires à la conception et fabrication d'équipements frigorifiques hautement performants, comme les machines à simple effet ce dont nous parlerons, aussi les machines à double et triple.

Le but de ce travail de ce travail est de réaliser une étude thermodynamique d'une réfrigération à absorption en fonction des paramètres affectant fonctionnement, notamment la température de générateur, le débit massique de la pompe, même aussi l'efficacité de l'échangeur de chaleur.

Initialement, nous allons voir un bref historique sur les réfrigérateurs à absorption et ses étapes de développement au fil du temps. Dans le premier chapitre présente l'énergie solaire à travers ses diverses manifestations, accompagné d'une description des capteurs solaires, en soulignant leurs catégories, bénéfices et désavantages. Le deuxième chapitre, nous avons détaillé les éléments essentiels et complémentaires requis pour l'installation d'un système thermo-solaire et d'un appareil de refroidissement à absorption, le troisième chapitre présente les outils mathématiques et discute la thermodynamique de chaque composant. Le dernier chapitre concerne à l'étude de thermo-énergétique d'une réfrigération à absorption.

Enfin, notre travail se termine par une conclusion générale.



Chapitre I:

Énergie Solaire Fondements et Technologies des Capteurs Solaires

I.1.Introduction:

Les « énergies renouvelables », comme leur nom l'indique, désignent un ensemble de méthodes permettant de produire de l'électricité à partir de sources ou de ressources théoriquement limitées.

L'expression « énergie verte » est un autre nom pour l'énergie provenant de sources renouvelables, ou « énergie propre ».

« Énergie propre ». Leur impact minimal sur l'environnement lors de l'exploitation est un élément clé des stratégies d'ESR utilisées par les entreprises pour parvenir à un développement durable.

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque a l'opportunité de se développer efficacement et suffisamment rapidement pour être considérée comme un contributeur au temps de l'humanité.

C'est pourquoi des études universitaires sont actuellement en cours dans le but d'optimiser, d'améliorer et de généraliser l'utilisation des systèmes solaires. L'optimisation des systèmes solaires repose sur la mesure et l'optimisation de la puissance consommée afin d'obtenir un bon rendement.

L'énergie consommée afin d'obtenir un bon rendement.

Depuis la nuit des temps, l'humanité a suivi le soleil et la lune. Plusieurs cultures les ont défiés. Sur la base des premières sociétés humaines.

Structurées, il existe des méthodes liées aux sources d'énergie naturelles, dont le soleil est le principal moteur. Il est donc crucial d'envisager la conception de systèmes qui utilisent cette ressource disponible gratuitement et sans restriction. L'autoconsommation est une approche utile.

I.2. L'énergie solaire :

a. L'énergie solaire thermique :

L'approche la plus simple est la conversion photo thermique. Il s'agit essentiellement d'une conversion du rayonnement solaire en chaleur, qui peut être utilisée pour : Utiliser directement la chaleur : La cuisinière, le chauffage solaire, le chauffage solaire, et les séchoirs solaires sont utilisés de manière indirecte, la chaleur étant utilisée pour la cuisson des aliments. Les sécheurs solaires sont utilisés indirectement, la chaleur étant transférée vers d'autres utilisations, telles que les centres solaires à régulation thermique ou le froid solaire [3].



Figure I. 1:énergie solaire thermique

b. L'énergie solaire thermodynamique :

L'énergie solaire thermodynamique est une méthode qui permet de produire de l'électricité et de stocker l'énergie thermique nécessaire à cette production dans des centres solaires concentrés pendant plusieurs heures après l'exposition au rayonnement solaire. L'idée est de concentrer la chaleur. La lumière du soleil à partir de miroirs pour chauffer un fluide de plusieurs centaines de degrés afin de produire de la vapeur par échange thermique, puis d'utiliser une turbine pour produire de l'électricité. Pendant les premières heures de la journée, lorsque la consommation est la plus élevée, il est possible de produire de l'électricité car le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil.



Figure I. 2:Présentation de centrale solaire thermodynamique à concentration

I.3. Le rayonnement solaire :

Les ondes électromagnétiques, dont une partie se produit constamment à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre, constituent le rayonnement émis par le soleil. En raison de la température de surface du soleil d'environ 5800 K°, ce rayonnement électromagnétique se situe dans le domaine des longueurs d'onde de la lumière visible, de 0,4 à 0,5.

Situé dans la gamme de longueurs d'onde de la lumière visible, de 0,4 à 0,75 μm , et dans le spectre infrarouge (au-delà de 0,75 μm et jusqu'à environ 4 μm). [4]. Voici la composition du rayonnement solaire sur une surface terrestre, qui est atténué par divers phénomènes atmosphériques :

I.3.1. Le rayonnement solaire direct :

Il s'agit d'une question trigonométrique pour convertir le rayonnement direct. Sur un plan horizontal, la différence entre le rayonnement diffus et le rayonnement global est appelée rayonnement direct.

I.3.2. Le rayonnement solaire diffus :

Elle résulte de l'absorption et de la diffusion par l'atmosphère d'une partie du rayonnement solaire global, ainsi que de sa réflexion par les nuages et les aérosols.

La lumière réfléchie ou l'absorption du soleil : Il s'agit de la réflexion de la lumière par la terre.

La lumière réfléchie est réfléchie par le sol, soit dans des conditions où le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc.).

I.3.3. Le rayonnement solaire réfléchi :

Le terme « rayonnement solaire réfléchi » fait référence au rayonnement solaire réfléchi par la terre ou les objets à sa surface.

Lorsque la surface est extrêmement réfléchissante (comme à proximité d'une source d'eau ou d'une surface enneigée), ce dernier peut être important et est influencé par l'albédo du soleil.

I.3.4. Le rayonnement solaire global :

• Sur surface horizontale

Ce terme désigne l'ensemble du rayonnement solaire qui atteint une surface horizontale sur la Terre.

Il comprend donc à la fois la composante verticale de l'énergie solaire directe et le rayonnement solaire diffus.

• Sur surface inclinée

Une surface inclinée aura une réflexion globale, qui est la somme des réflexions directe, diffuse et réfléchie.

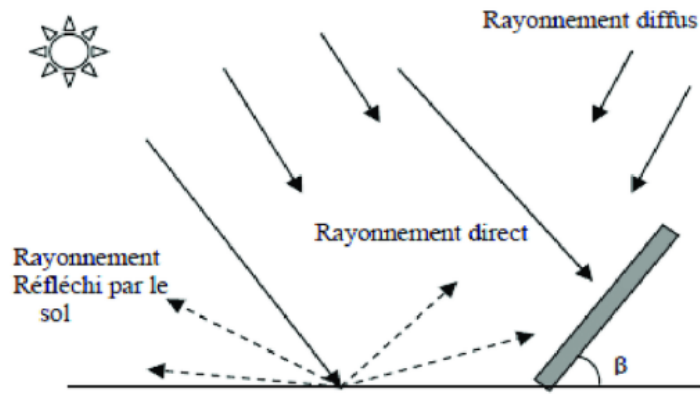


Figure I. 3:REPRESENTATION DES 3 COMPOSANTS DU RAYONNEMENTS GLOBAL SUR PLAN INCLINE.

I.4. Les capteurs solaires :

I.4.1. Définition d'un capteur solaire :

Un appareil appelé panneau solaire ou capteur solaire est conçu pour capter une partie du rayonnement solaire et la transformer en énergie électrique ou thermique utilisable par l'homme.

Les panneaux solaires thermiques, également appelés capteurs solaires thermiques, transforment la lumière en énergie qui est récupérée et utilisée comme eau chaude [5].



Figure I. 4:capteur solaire

I.4.2. Différents types de capteurs solaires :

Outre les nombreuses méthodes d'approvisionnement en énergie solaire, il existe également diverses techniques de collecte de l'énergie solaire à partir d'un rayonnement incident. La liste suivante comprend les types de capteurs solaires les plus courants [6] :

- Plans pour capteurs vitrifiés
- Plans sans capteurs vitrifiés
- Plans pour plaques perforées sans capteurs vitrifiés
- Capteurs solaires retournés

- Capteurs de concentration
- Capteurs solaires aéroportés
- Capteurs solaires intégrés
- Capteurs solaires à circulation de liquide
- Systèmes de réflecteurs cycloïdaux-paraboliques
- Systèmes à tour centrale
- Capteurs solaires fixes à concentration
- Capteurs sous vide

I.4.3. Composants principaux d'un capteur plan :

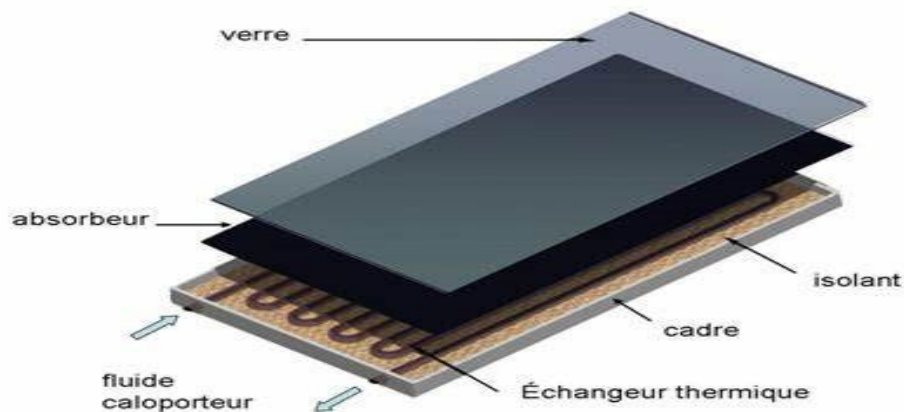


Figure I. 5: Les composants principaux d'un capteur plan

I.4.3.1. L'absorbeur :

L'absorbeur a deux fonctions incompatibles [7] :

Absorber le maximum de rayonnement solaire possible

Transférer la chaleur générée avec le moins de perte possible au fluide du calorimètre.

En outre, il doit être aussi léger que possible pour minimiser l'usure et être construit avec des matériaux conducteurs de haute qualité.

Dans la plupart des cas, les absorbeurs sont fabriqués à partir de feuilles de métal hachées, qui présentent une bonne conductivité et une bonne stabilité mécanique. C'est la raison pour laquelle les absorbeurs sont souvent fabriqués à partir d'un support en cuivre de 0,2 mm et récupérés à l'aide d'un traitement de surface.

Typiquement, l'absorbeur est constitué de 25 mm à 30 mm de d isolant.

Le rôle de l'absorbeur est de capter au maximum le rayonnement et de réémettre le moins possible.

Ces surfaces ont été surnommées « sélectives » parce qu'elles absorbent le plus d'informations et en renvoient le moins.

La sélectivité de l'absorbeur est cruciale et elle est renforcée par

Les traitements de surface qui renforcent les caractéristiques telles qu'une absorption très efficace du rayonnement solaire et une émission limitée du rayonnement infrarouge (causé par le chauffage).

Les caractéristiques de ces absorbeurs sont déterminées par deux coefficients :

- coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1)
- coefficient d'émission (0 à 1, 0 à l'optimum)

Ce type de traitement de surface peut être réalisé par des procédés électrochimiques ou électro physiques. De nombreuses avancées ont été réalisées dans ce domaine ; les plus significatives, classées par ordre d'apparition, seront présentées et mises en contraste avec la peinture noire.

I.4.3.2. La couverture transparente :

Outre la protection de l'absorbeur, la couverture contribue également de manière significative à l'équilibre thermique en minimisant les pertes de chaleur. Il est courant d'utiliser du verre comme couverture transparente [8].

Un tel dispositif constitue donc un véritable obstacle au rayonnement solaire, qui peut être surmonté en dotant la caméra d'une double couverture.

On peut distinguer les couvertures transparentes suivantes utilisées dans la conception des plans de capteurs solaires :

Le verre :

L'une des caractéristiques physiques intéressantes des verres est qu'ils laissent passer la lumière du soleil tout en bloquant le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que

L'absorbeur. La serre a donc pour effet de bloquer la chaleur entre l'absorbeur et la couverture.

La couverture doit pouvoir résister à des températures élevées ainsi qu'à des changements brusques de température.

Il existe un terme « verre solaire » qui fait référence à un ensemble d'exigences spécifiques :

- *le verre doit être trempé pour résister en toute sécurité aux charges thermiques et mécaniques.*
- *Il doit présenter un degré élevé de transmission solaire avec une faible teneur en fer.*
- *Il doit être recouvert d'une surface structurelle permettant de réduire les réflexions directes.*

La qualité du verre est déterminée par sa performance optique, ou taux de transmission μ , qui dépend de l'épaisseur et de la nature du verre, ainsi que de l'angle d'incidence et du type de rayonnement (direct ou diffus) (valeur typique de $\mu = 0,91$).

Actuellement, certains capteurs ont créé un nouveau verre dit « antireflet ». Avec un taux de transmission de 96%, ce verre est particulièrement intéressant pour le positionnement vertical des capteurs.

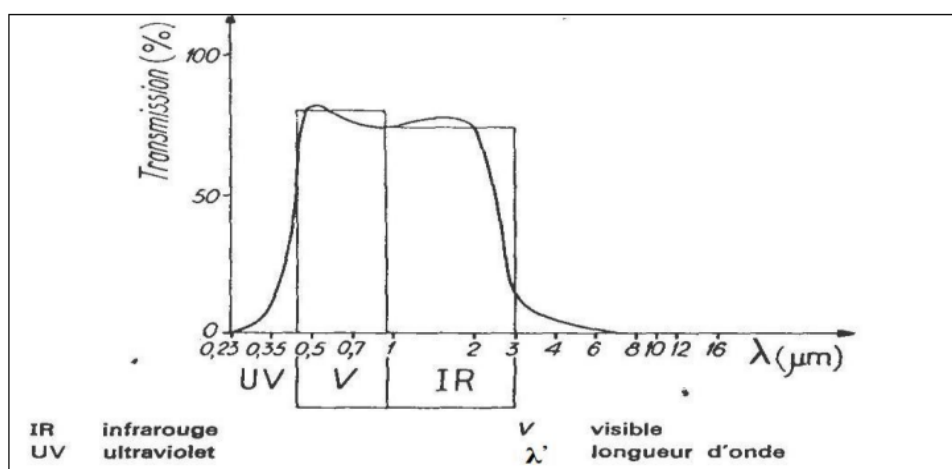


Figure I. 6:La transparence du verre [9].

Les polycarbonates :

Sont fabriqués à partir de matériaux plastiques très fins à double ou triple flamme, reliés par de nombreuses parois pour générer des cavités alvéolaires ; ces dernières réduisent la perte de chaleur par convection vers l'avant en raison du mouvement de l'air emprisonné.

Réduisent la perte de chaleur par convection vers l'avant grâce au mouvement de l'air emprisonné. C'est ce type de couverture que nous utilisons dans notre laboratoire. Avec une incidence typique à l'état neuf, leur coefficient de transmission au rayonnement solaire est d'environ 83%, qui diminue progressivement avec le temps (79% à environ cinq ans). Il est à noter que l'effet de serre est sensiblement renforcé par les couvertures en verre transparent, en particulier par les plaques alvéolaires à double parois.

Matériaux	Transmissivité à incidence normale	
Le verre	$\lambda' = 0,4-2,5 \mu\text{m}$	$\lambda' = 2,5-0,4 \mu\text{m}$
	0.83-0.91	0.00-0.03
Les plastiques en feuilles	0.76-0.92	0.02-0.06
Les plastiques en films	0.85-0.87	0.2-0.26

Tableau I. 1:Transmissivité de différents types de couvertures dans le visible etl'infrarouge [10].

I.4.3.3. L'isolant :

La réduction des pertes de transmission vers l'extérieur est essentielle pour maximiser les performances du capteur [11].

Les produits isolants qui peuvent être utilisés pour isoler les capteurs sont remarquables.

Mais il est important de veiller au contrôle de la température car une coupure de caloporteur fluide peut augmenter la température interne du capteur jusqu'à plus de 150°C.

La laine de verre et les mousses de polyuréthane sont les isolants les plus utilisés.

Leur épaisseur varie de 4 à 8 cm.

Les qualités suivantes sont nécessaires pour un bon isolant :

- Une conductivité thermique insuffisante.
- Une faible densité (due à une faible inertie thermique).
- Une faible température de masse est nécessaire.
- Il existe une résistance thermique entre les températures de service.

On distingue trois types de désinfectants :

Minéraux isolants :

- ✓ Des fibres de verre très fines constituent la laine de verre, qui est vendue sous diverses formes telles que plaques, rouleaux et plâtre. Sa conductibilité est variable. Elle varie de $0,034 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ à 0°C à $0,053 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ à 200°C.
- ✓ La vermiculite, souvent appelée mica, a une conductivité allant de 0,12 à $0,60 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ et se présente sous forme de granulés très légers.

Isolants d'origine végétale :

- ✓ Le bois bien scellé a une conductivité de 0,13 à $0,4 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ et des propriétés isolantes. Il peut être amélioré ; il est utilisé sous forme de fibres agglomérées ($\lambda = 0,05 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$ à $0,10 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$).
- ✓ Par exemple, la température du bois ($\lambda = 0,11 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$), qui présente deux inconvénients : son inflammabilité et sa tendance à augmenter avec la chaleur, le rend impropre à la calorifugation.

Isolants organiques :

- ✓ La mauvaise conductivité thermique est un problème pour les matériaux plastiques. En ajoutant du gaz pendant le processus de solidification, ce qui leur donne la consistance d'une mousse, leurs propriétés isolées peuvent être améliorées, comme dans les mousses phénoliques ($\lambda = 0,44 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$). La mousse de polyvinyle chlorure ($\lambda = 0,033 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$) .
- ✓ Il existe deux types de mousse de polyuréthane :

* une haute densité ($d = 0,6$) qui est à la fois suffisamment rigide pour être utilisée dans la construction de caissons capteurs et un bon isolant ($\lambda = 0,08 \text{ Wm}^{-1}\text{k}^{-1}$).

* La faible densité ($d = 0,03$) est meilleure pour l'isolation ($\lambda = 0,025 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$), mais plus fragile. Dans le cas où la température s'élève au-dessus de 90°C , il convient de découvrir ce type de matériau comme résistant à la chaleur.

- ✓ *Le polystyrène est généralement utilisé pour l'emballage car il est léger, délicat et de couleur blanche. Ses qualités isolantes sont légèrement inférieures à celles du polyuréthane ; sa conductivité thermique est de l'ordre de $0,04 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, mais il est beaucoup moins cher et se sublime à 90°C .*

Tableau I. 2: Conductivité thermique de quelque matériau [8].

Désignation	λ (w/m °K)	ρ (Kg/m ³)	Température maxi d'utilisation	Observation
Laine de verre	0.034 à 0.053	70	150	Sensible à l'humidité
Mousse de Verre	0.057	123	150	Sensible à l'humidité
bois	0.13 à 0.4	123	150	
Liège exposé	0.045	100	150	
Polystyrène	0.042	15	85	Moulé comprimé
Polyuréthane	0.035	35	85	Moulé comprimé

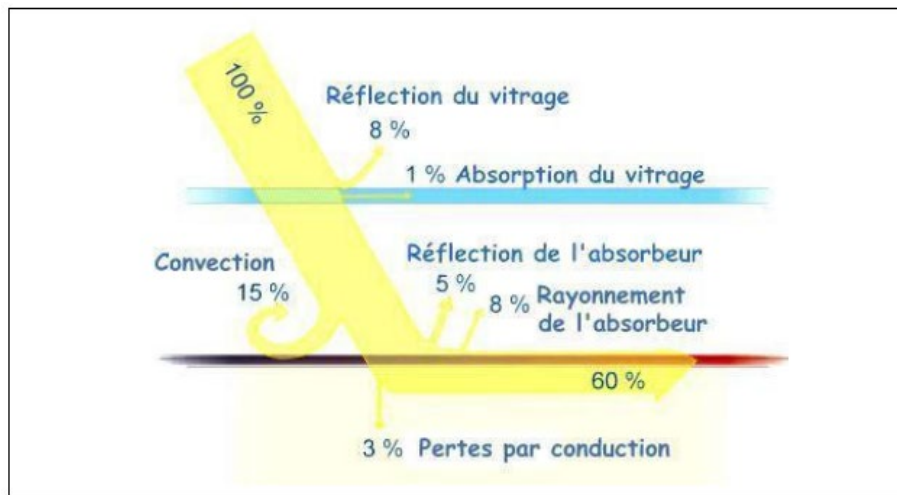


Figure I. 7:Schéma des différentes pertes [12].

Les différentes pertes causées par les composants du capteur du plan solaire sont montrées schématiquement dans l'image. Sur une base de 100% de la surface du vitrage du capteur, on observe facilement que
 Seulement 60% du rayonnement tombe directement sur l'absorbeur.
 En utilisant l'effet de serre, 40% des restants joueront un rôle même s'ils ne sont pas entièrement perdus.

1.4.3.4. Le fluide caloporteur :

Le circuit primaire du capteur solaire utilise le fluide caloporteur pour transférer la chaleur générée par l'absorbeur ; d'autres fluides peuvent être utilisés, mais ils doivent répondre à des exigences spécifiques [8] :

1. Excellente capacité calorifique.
2. Viscosité réalisable.
3. Un coefficient élevé de transmission thermique.
- 4 - Le point le plus élevé d'ébullition est le point le plus bas de congélation.
5. Faible niveau d'agressivité envers les matériaux qui composent le capteur.

Les fluides calorimétriques les plus souvent utilisés sont :

l'air

L'un des principaux avantages de l'air en tant qu'agent transporteur de calories est son abondance et sa facilité d'utilisation. Sa caractéristique principale est l'absence de corrosion et de gel, ce qui permet au capteur d'avoir une durée de vie plus longue avec moins de travaux d'entretien.

Cependant, pour transmettre une quantité raisonnable d'énergie, il faut utiliser des volumes d'air très importants.

L'air offre les avantages suivants :

- ❖ *Pas de problème de gel en hiver ni d'ébullition en été.*
- ❖ *Pas de problème de rouille (l'air sec).*
- ❖ *Toute défaillance est sans répercussion.*
- ❖ *L'utilisation d'un échangeur de chaleur n'est pas nécessaire pour le chauffage des propriétés.*
- ❖ *La mise en œuvre du système est plus facile et plus réalisable.*

Cependant, il présente plusieurs inconvénients, comme :

- ❖ *le fait que L'air ne peut pas être utilisé pour le séchage solaire ou pour le chauffage des locaux.*
- ❖ *On observe un faible produit calorifique masse-capacité ($p.C_p=1225 \text{ J/m}^3.K$) pour l'air et $4.2.106 \text{ J/m}^3.K$ pour l'eau.*
- ❖ *Pour permettre un débit suffisant, les conduits doivent avoir une forte portion.*

L'eau

Ce fluide est un excellent agent de transfert de chaleur, mais il présente des risques de gélification pendant les nuits froides et d'ébullition à des températures élevées.

La quantité de chaleur échangée dans les canaux est réduite en raison de la formation de couches de tartre au fil du temps.

Les gilothermes

Les liquides organiques à base de poly phénols hydrolysés ou d'hydrocarbures linéaires sont traités pour ne pas être aussi pressurisés que l'eau ; leur chaleur massique est de $0,5 \text{ Kcal/Kg.K}$.

En présence de traces d'eau ou d'air, ainsi que de produits inflammables à haute température, ces hydrocarbures se décomposent.

Utilisés dans les applications de l'énergie solaire.

I.4.4. Classification des capteurs solaires plans :

Les capteurs peuvent être classés comme suit [13] :

a. Le fluide deCapteurs solaires aéroportés

On peut trouver :

• Des capteurs solaires à air

Ces capteurs s'adaptent aux dispositifs de chauffage de l'air pour le séchage des produits agricoles et alimentaires et le chauffage des locaux.

• Des capteurs solaires à eau

Ils s'adaptent aux dispositifs de chauffage des liquides, y compris ceux dans lesquels le liquide ébullit en chauffant (création d'eau chaude stérilisante).

Les capteurs d'eau peuvent être classés comme capteurs à :

- ❖ *Le chauffage des piscines est un exemple de pression de circulation possible.*
- ❖ *Une pression de circulation élevée se produit lorsque le circuit d'eau est souvent constitué de tubes de cuivre et de plaques métalliques qui augmentent la surface d'absorption.*

Bien qu'il existe d'autres fluides, tels que les hydrocarbures, qui sont utilisés pour la réfrigération et la production d'électricité, l'eau et l'air sont les principaux fluides de travail des capteurs d'énergie solaire.

b. Les types des composants

Les composants de chaque collecteur étant uniques, les collecteurs peuvent être classés comme suit :

La couverture :

Elle peut exister ou non, auquel cas on peut la trouver :

❖ Les capteurs solaires plans non vitrés :

Ils sont constitués d'un réseau de tubes en plastique noir peint et résistant aux rayons UV, sans aucun revêtement transparent. Ils servent principalement à chauffer l'eau des piscines extérieures et garantissent des températures relativement basses, comprises entre 30 et 35°C.

❖ Les capteurs solaires plans vitrés :

En créant un effet dentelé, le vitrage augmente le rendement en permettant des températures comprises entre 70°C et 90°C. Le capteur solaire peut comporter une ou plusieurs ouvertures transparentes.

L'absorbeur :

En fonction de sa forme, l'absorbeur peut être classé en plusieurs catégories. Il y a :

- ❖ *Les capteurs à cavité.*
- ❖ *Les plans des capteurs.*

L'orientation des capteurs :

Voici quelques exemples de capteurs solaires :

Des capteurs fixes :

Dans le cas des chauffages solaires domestiques, ces capteurs ne fleurissent pas pendant la journée. Ils présentent les caractéristiques suivantes :

- ❖ *La fiabilité et la simplicité.*

- ❖ *Un faible niveau de maintenance.*
- ❖ *Ils peuvent faire partie intégrante d'un bâtiment.*
- ❖ *L'angle sous lequel les rayons du soleil frappent l'absorbeur n'est pas très long chaque jour à son niveau le plus efficace.*

🌈 **Des capteurs à poursuite :**

Le capteur solaire peut être équipé d'un système de guidage automatique pour localiser la source du flux lumineux, ce qui augmente les performances du capteur.

I.4.5. Principes de fonctionnement :

Pour l'essentiel, un capteur solaire destiné au chauffage domestique ou à la production d'eau chaude est constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire qui échange avec un fluide caloporteur les calories générées par l'absorption du rayonnement incident, et finit par chauffer un rayonnement thermique de plus grande longueur ondulatoire (Loi de Stefan-Boltzman).

Les pertes par convection peuvent être importantes, mais les pertes par convection ne sont pas négligeables.

Les pertes par convection peuvent être importantes en plus des pertes par rayonnement si cet absorbeur est en contact direct avec l'air ambiant. Il s'établit alors un équilibre thermique entre l'absorbeur et le milieu environnant. De cette manière, peu d'énergie est captée.

Pour réduire les pertes causées par le dos du capteur, l'absorbeur est placé à l'intérieur d'une boîte dont les parois internes sont récupérées à l'aide d'un isolant thermique (comme la laine de verre ou la mousse synthétique).

Un matériau opaque au rayonnement thermique mais transparent au rayonnement solaire est placé entre l'absorbeur et l'air pour assurer l'isolation thermique de la face avant. Les verres et certains matériaux synthétiques sont transparents pour le rayonnement solaire et opaques pour le rayonnement infrarouge plus lointain. Ils sont donc utilisés comme ouvertures transparentes pour les capteurs solaires [6].

Le rayonnement thermique émis par l'absorbeur est absorbé par la couverture transparente dans un capteur à deux faces. La couverture transparente s'échauffe et émet de la lumière dans les deux directions. Une certaine quantité de ce rayonnement se propage dans le milieu environnant.

L'autre partie est renvoyée vers l'absorbeur, ce qui provoque l'effet de serre.

Un boîtier qui contient tout, visant à minimiser les pertes à l'arrière-plan et sur les côtés. Généralement, ces capteurs sont vendus par blocs de 1 m² ou 2 m², et de nombreux capteurs sont assemblés pour obtenir les surfaces requises [6].

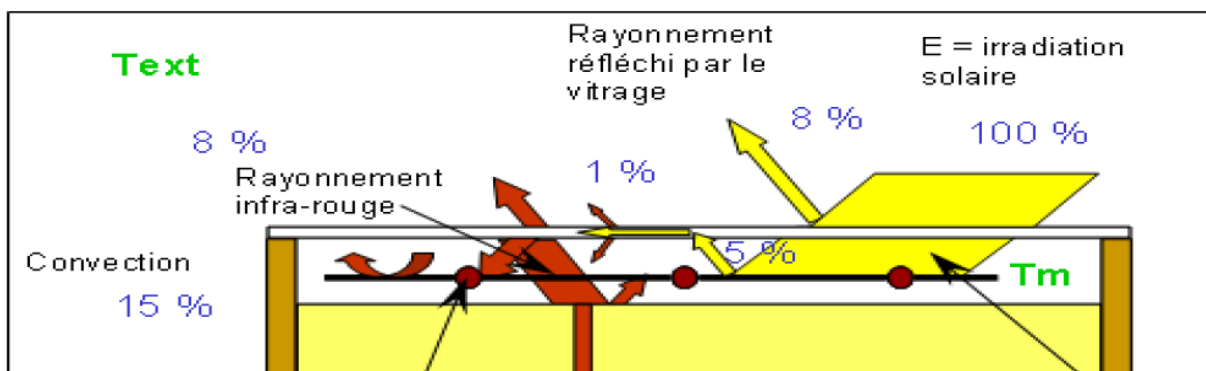


figure I. 8: Principe de fonctionnement du capteur solaire plan [6].

I.4.6. Avantages et inconvénients d'un capteur solaire plan :

Les avantages :

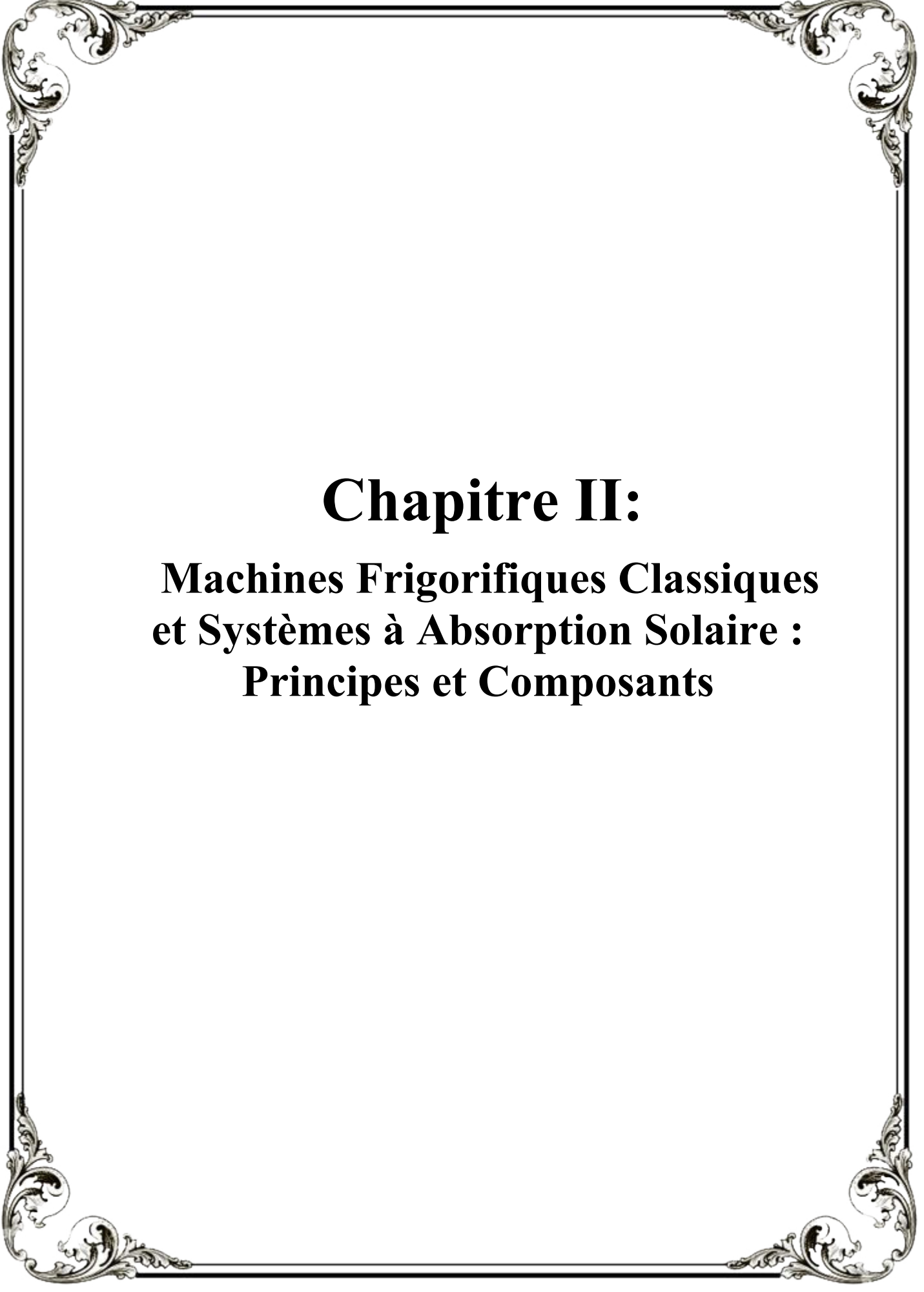
- Prix économique
- Fiabilité
- Longue durée de vie
- L'efficacité énergétique
- L'intégration aux jouets

Inconvénients :

- Il est incompatible avec les températures élevées.
- La température interne peut atteindre des niveaux extrêmement élevés lorsqu'il n'y a pas de circulation de liquide.

Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les fondements de l'énergie solaire et son importance dans la transition énergétique. Les différentes formes de rayonnement solaire (direct, diffus, réfléchi et global) ont été expliquées afin de comprendre leur impact sur la conversion énergétique. Nous avons ensuite introduit les capteurs solaires, en détaillant leur définition, leurs types et leurs composants principaux. Le principe de fonctionnement des capteurs plans ainsi que leurs avantages et inconvénients ont également été mis en évidence.



Chapitre II:

Machines Frigorifiques Classiques et Systèmes à Absorption Solaire : Principes et Composants

II.1. Introduction : Machines Frigorifiques Classiques et Systèmes à Absorption Solaire : Principes et Composants

Il est désormais essentiel de concevoir des solutions alternatives mettant en avant les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire thermique. Bien que l'idée de produire du froid à partir de l'énergie solaire, qui réchauffe la Terre, puisse sembler paradoxale, elle est pourtant parfaitement réalisable. En effet, la production de froid repose sur un principe fondamental : l'absorption de chaleur. Ce processus consiste à extraire la chaleur d'un milieu à refroidir, appelé source froide, pour la transférer vers un milieu extérieur qui se réchauffe, appelé source chaude.

Dans ce chapitre nous parlerons sur les machines frigorifiques avec tous leurs types et composants, ainsi que de leur fonctionnement

II.2. Machines de réfrigération :

II.2.1. Concept général du réfrigérateur:

II.2.1.1. Définition et principes :

Un réfrigérateur est un appareil électroménager utilisé à maintenir les aliments et les boissons à une température basse, afin de freiner la multiplication des micro-organismes et les réactions chimiques qui contribuent à leur détérioration. Il opère sur le principe de la réfrigération, en tirant la chaleur de l'intérieur du compartiment pour la libérer à l'extérieur. Le réfrigérateur emploie un dispositif de refroidissement (généralement par compression de vapeur) pour conserver une température inférieure à l'intérieur comparativement à l'extérieur. Ce processus s'appuie sur plusieurs composants cruciaux : Compression, Condensation, Détente, Évaporation.

II.2.1.2. Comparaison entre le système de réfrigération traditionnel et la réfrigération par absorption :

Le réfrigérateur traditionnel, également désigné comme réfrigérateur à compression, opère grâce à un compresseur qui fonctionne avec l'électricité. Ce compresseur facilite le passage d'un fluide frigorigène à travers un cycle thermodynamique (compression, condensation, détente, évaporation), garantissant un rafraîchissement rapide et performant. Ce modèle de réfrigérateur est largement présent dans les résidences et les commerces, compte tenu de son efficacité énergétique, de son rapide temps de refroidissement et de son prix plutôt raisonnable. Cependant, ce dernier produit un certain degré de bruit en raison du fonctionnement du compresseur et requiert une maintenance régulière, notamment pour prévenir l'obstruction du condenseur.

Au contraire, le réfrigérateur à absorption se base sur un concept complètement distinct : il n'y a pas d'utilisation de compresseur, mais il fonctionne à l'aide d'une source de chaleur (gaz, électricité ou énergie solaire). L'absorbant et le générateur dans un circuit fermé entraînent des modifications de phase du fluide frigorigène sous l'effet de la chaleur. Cet appareil est entièrement muet, du fait de l'absence de composants mécaniques en action, ce qui le rend parfaitement adapté aux contextes où le bruit doit être minimisé. Sa capacité à fonctionner sans électricité le rend particulièrement utile dans les régions éloignées ou pour le camping-caravaning. Toutefois, son efficacité énergétique est inférieure et le temps de refroidissement plus

prolongé par rapport au système de compression. Il est également généralement plus coûteux à l'achat.

En somme, le réfrigérateur à compression est plus adapté à un usage domestique classique, tandis que le réfrigérateur par absorption est privilégié dans les situations où l'autonomie énergétique et le silence sont des critères essentiels.

II.2.2 : Types de machines de réfrigération :

II.2.2.1. Machine frigorifique à compression mécanique :

Un appareil congélateur à compression mécanique emploie du travail pour déplacer la chaleur entre deux sources thermiques. On distingue parmi ces machines, celles qui opèrent par modification de cycle et celles qui utilisent un gaz.

a. Machine à changement de phase :

Ce genre d'appareil est fréquemment employé tant dans le secteur industriel que dans les utilisations domestiques. Son mode de fonctionnement est illustré à travers un schéma et un diagramme thermodynamique (T, S) selon Stodola. Le cycle se déroule selon les phases suivantes :

❖ *Compression (1-2) :*

Le compresseur prélève la vapeur de gaz réfrigérant qui provient de l'évaporateur. Pendant le processus de compression, la température et la pression du fluide montent jusqu'à atteindre la zone de surchauffe (point 2). Actuellement, la pression correspond à la tension de vapeur saturée à la température ambiante. La vapeur comprimée est par la suite dirigée vers le condenseur.

❖ *Condensation (2-3) :*

Dans le condenseur, le flux tempéré transfère sa humidité à l'environnement, entraînant ainsi sa transformation en liquide.

❖ *Détente (3-4) :*

Le fluide réfrigérant passe par une vanne de détente ou un capillaire, ce qui provoque une chute soudaine de la pression et de la température. Ainsi, une combinaison de liquide et de vapeur est réalisée.

❖ *Évaporation (4-1) :*

Ce combinaison est orienté vers l'évaporateur, où il capte la chaleur de la source froide. Ce processus d'absorption de chaleur permet au liquide de se vaporiser complètement, garantissant ainsi l'effet réfrigérant désiré. Le cycle se poursuit ensuite avec l'aspiration du fluide par le compresseur. Cette procédure autorise l'extraction de chaleur d'un environnement froid pour la transférer vers un environnement plus chaud, garantissant ainsi le refroidissement ou la climatisation.

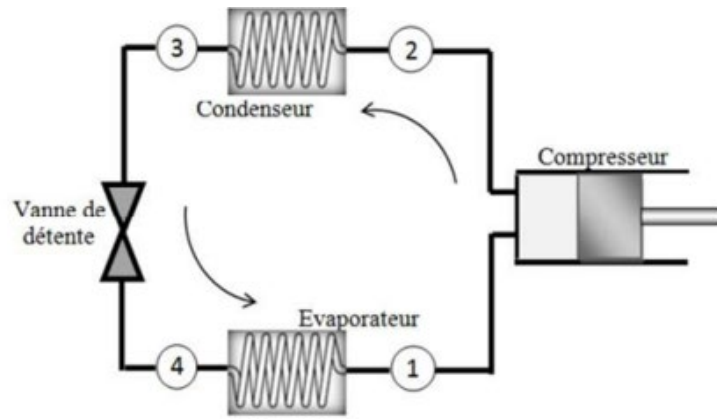


Figure II. 1:Schéma d'une machine frigorifique à compression

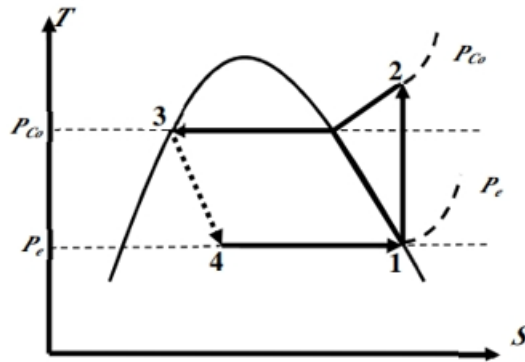


Figure II. 2:Cycle d'une machine à compression de vapeur sur le diagramme (T, S)

b. Machine frigorifique à gaz :

Les dispositifs à froid au gaz génèrent du froid en utilisant la chaleur sensible du gaz frigorigène, sans transition de phase. Elles opèrent en suivant un cycle thermodynamique inversé, généralement fondé sur les cycles de Joule, Stirling ou Ericsson [14].

❖ Machine à cycle de Joule :

Cette machine est constituée d'un compresseur entraîné par un moteur et d'une turbine, qui capte une portion de l'énergie dérivant de la détente du fluide. Cette énergie récupérée est par la suite employée pour soutenir l'entraînement du compresseur, diminuant de ce fait la consommation d'énergie extérieure. Les Figures I.3 et I.4 illustrent respectivement le mécanisme de cette machine et son cycle thermodynamique. Ces machines ont un rendement inférieur en comparaison avec les machines à compression de vapeur. Leur défaut majeur est que l'effet frigorifique est produit à température fluctuante [14], ce qui restreint leur efficacité et les rend moins concurrentielles par rapport aux machines à changement de phase, qui proposent un refroidissement plus constant et performant.

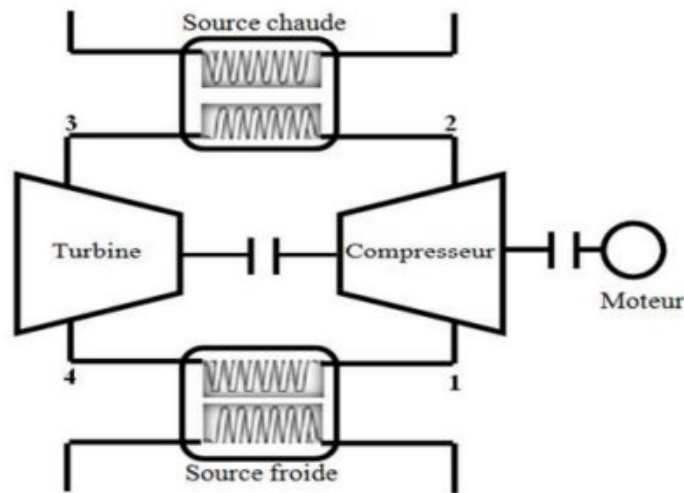


Figure II. 3:Schéma d'une machine frigorifique à gaz [14].

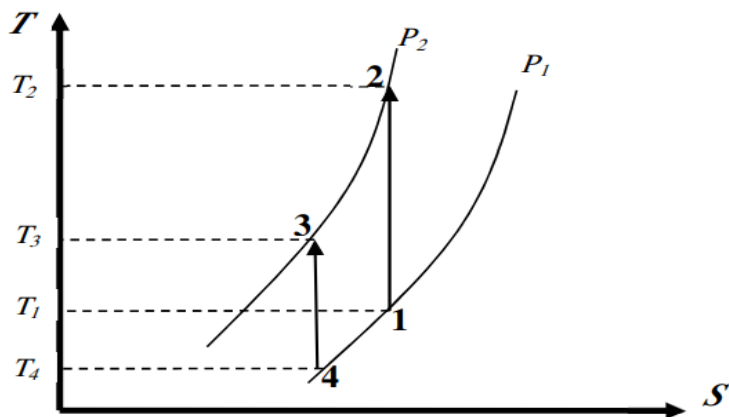


Figure II. 4:Cycle d'une machine à gaz sur le diagramme (T, S)

❖ *Machine de Stirling :*

Les moteurs Stirling se caractérisent par leur efficacité remarquable et leur aptitude à atteindre des températures extrêmement basses, jusqu'à 200 °C avec une seule étape, facilitant ainsi la liquéfaction de l'air. Cependant, leur inconvénient S tient à leur dimension considérable et leur complexité mécanique, ce qui restreint leur emploi à des applications particulières [14]. Il existe diverses alternatives sur le marché, notamment les appareils PHILIPS, couramment employés dans la fabrication d'azote et d'air liquéfiés. Avenir et progrès des technologies de réfrigération Actuellement, la majorité des systèmes de réfrigération utilisent couramment les compresseurs mécaniques. Toutefois, à l'inverse des systèmes de sorption, elles requièrent une énergie motrice de haute qualité, ce qui représente un désavantage significatif.

En outre, les dispositifs à compression de vapeur utilisent fréquemment le CFC (chlorofluorocarbures) comme réfrigérants, ce qui contribue à la dégradation de la couche d'ozone [15]. Ces limitations, qu'elles soient liées à l'énergie ou à l'environnement, ont récemment ravivé l'intérêt pour les machines à sorption, sujet que nous traiterons dans la prochaine section.

II.2.2.2. Machine frigorifique à absorption :

Le processus d'absorption se réfère à la dissolution d'un gaz dans un liquide lorsqu'il existe une affinité marquée entre ces deux substances fluides [16]. Dans un système de réfrigération à absorption liquide-gaz, la génération de froid s'effectue par un mécanisme qui sépare spatialement les différentes phases du dipôle, contrairement aux cycles traditionnels où ces phases se suivent dans le temps. Il est donc nécessaire d'utiliser deux dipôles qui fonctionnent en même temps avec ce système [17]. Les machines à absorption réfrigérantes tirent parti des interactions entre un absorbant et un absorbât, qui est un fluide frigorigène.

Ce type de mécanisme est l'un des plus anciennes méthodes de congélation. Historique et développement des systèmes à absorption 1700 : Les premières observations concernant le phénomène d'absorption, en particulier la création de glace par l'évaporation de l'eau sous vide en présence d'acide sulfurique (H_2SO_4), ont été réalisées. 1859 : L'ingénieur de France Ferdinand Carré met au point un système de réfrigération qui repose sur l'association eau-ammoniac (H_2O/NH_3). 1950 : Mise en place d'un système innovant exploitant le duo eau/bromure de lithium ($H_2O/LiBr$) à des fins commerciales [18]. Élargissement et variété des binômes de travail. Au cours des années, une multitude de couples de travail ont été examinés et mis en pratique à l'échelle mondiale. Selon Marc riss et al. [19], plus de 200 absorbants liés à plus de 40 types de fluides frigorigènes ont été répertoriés. Le Tableau II.1 présente quelques exemples de ces combinaisons. Parmi elles, le couple eau-ammoniac (H_2O/NH_3) reste le plus largement utilisé [20].

Frigorigènes	Absorbant
Eau (H_2O)	LiBr (Bromure de Lithium)
Méthanol (CH_3OH)	LiBr
Méthylamine (CH_3NH_2)	Eau (H_2O)
R22 (CH_2ClF)	Diméthyléther du tétraéthylène glycol
Ammoniac (NH_3)	Eau (H_2O)

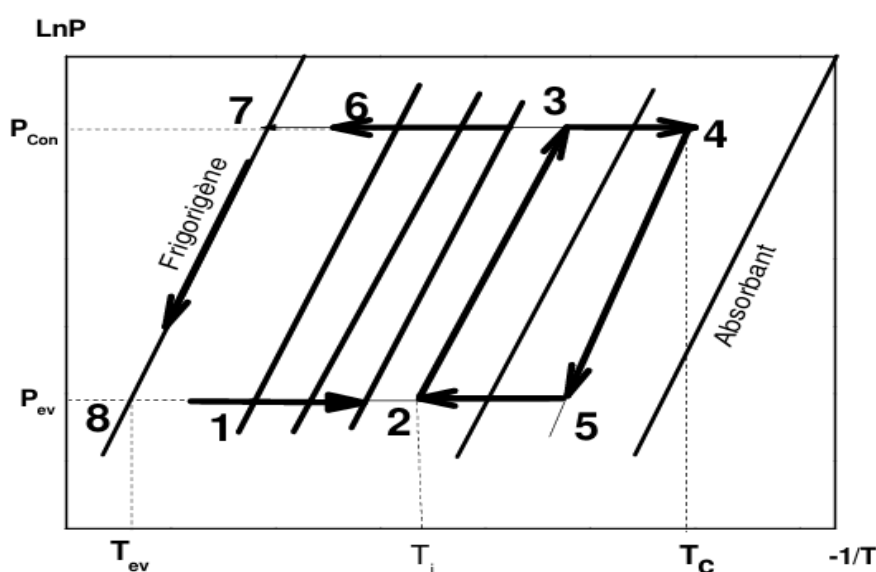
Tableau II. 1:Couple utilisés pour le système à absorption [21,22]

Le système de réfrigération par absorption est composé d'un générateur, d'une pompe et d'un absorbeur qui, ensemble, ont la capacité de condenser la vapeur du fluide frigorigène.

L'absorbeur attire le réfrigérant sous forme de vapeur via l'évaporateur par absorption. La vapeur de réfrigérant est séparée de la solution riche grâce à l'énergie thermique

supplémentaire. Le condenseur transforme le réfrigérant en rejetant la chaleur, puis l'évaporateur permet à ce réfrigérant liquide refroidi de se dilater, complétant ainsi le cycle. Le fonctionnement de la partie réfrigérante du système d'absorption s'appuie principalement sur le même principe que celui du système de compression de vapeur (voir section II.3.1).

a. Système utilisant l'absorption humide :



Dans un système de machine à absorption en boucle fermée (Figure.II.6), l'absorbeur et le bouilleur sont distincts (dans un système intermittent, les deux rôles sont assurés par une seule unité) et la solution s'écoule sans interruption sous forme liquide de l'absorbeur vers le bouilleur. Dans une partie du circuit, entre le condenseur et l'évaporateur (points 6-7-8-1), circule le frigorigène à l'état pur, alors que dans l'autre partie du circuit circulent deux solutions de compositions différentes, une riche en frigorigène, entre l'absorbeur et le bouilleur (points 2-3) et une pauvre en frigorigène, entre le bouilleur et l'absorbeur (points 4-5). Le système comprend donc un côté haute pression (bouilleur-condenseur), un côté basse pression (évaporateur-absorbeur) et une pompe de circulation pour déplacer la solution de l'absorbeur (basse pression) au bouilleur (haute pression).

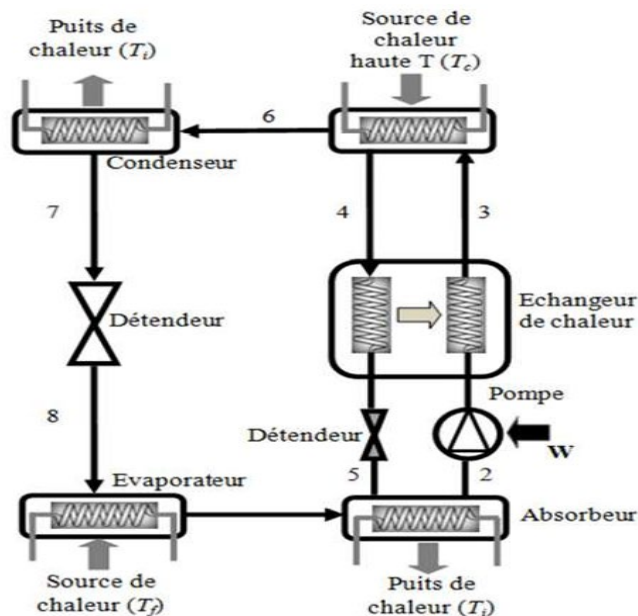


Figure II. 6:Schéma d'une machine frigorifique à absorption humide [24]

Durant le cycle (Figure I.6), les vapeurs de basse pression provenant de l'évaporateur (1) sont absorbées par une solution à faible concentration en frigorigène dans l'absorbeur (5). La dissolution des vapeurs dans la solution est favorisée par la compatibilité entre les deux substances.

La solution saturée contenue dans l'absorbeur (2) est acheminée vers le bouilleur (3) à haute pression grâce à la pompe ; le frigorigène se détache de la phase liquide suite à une montée en température. Étant donné que seul le frigorigène est censé circuler dans le circuit frigorifique, une correction est nécessaire dès que la pression de vapeur de l'adsorbant devient significative par rapport à celle du frigorigène.

Une fois rectifiées (6), ces vapeurs se condensent sous haute pression et transmettent leur chaleur. Le condensat (7) se déploie via une valve de réduction jusqu'à atteindre la basse pression (8) qui prévaut dans l'évaporateur [12].

Dans l'évaporateur, le fluide frigorigène à basse température capte la chaleur de l'environnement que l'on souhaite rafraîchir. Par la suite, il se transforme en vapeur et génère du froid.

b. Système à absorption sèche :

Les systèmes à absorption sèche partagent une structure très proche de celle des systèmes à absorption humide. Dans ce cas, l'absorbant est un solide consolidé ou non, mais la réaction de sorption reste toujours de nature chimique.

Les couples absorbant/absorbât les plus couramment employés en matière d'absorption à sec sont le $H_2O/LiBr$ et le $H_2O/LiCl$ [13]. De ce fait, les systèmes à absorption sèche trouvent certaines applications en réfrigération, notamment dans le domaine de la climatisation. Leur principal inconvénient découle d'une restriction de la température de la source utile (température d'évaporation). Effectivement, lorsque les températures d'évaporation sont inférieures à $0^\circ C$, il existe un risque que les circuits de la machine se bloquent en raison de la cristallisation du sorbat [25].

II.2.2.3. Machine frigorifique à adsorption :

Les substances solides en poudre ou poreuses ont la capacité de capturer à leur surface les molécules des phases gazeuse ou liquide avec lesquelles elles sont en contact ; ce processus physico-chimique est connu sous le nom d'adsorption. On qualifie de matière adsorbant le solide, et de gaz ou de liquide adsorbat [23].

En approfondissant cette notion, l'adsorption est une réaction d'affinité physique qui n'engage que des forces de VAN DER WAALS. Les molécules de frigorigène s'accumulent ensuite en une ou plusieurs strates sur la surface d'un solide microporeux. La nature physique des phénomènes impliqués permet une meilleure réversibilité des réactions, et les énergies engagées sont habituellement moins importantes que pour l'absorption [14].

En 1848, Faraday a mis au point la première méthode d'adsorption de vapeur, en employant un adsorbant solide. L'utilisation des cycles d'adsorption dans la réfrigération et les pompes à chaleur a débuté au début des années 1990 [26].

Dans une machine à adsorption, le compresseur traditionnel est substitué par un compresseur thermique (réacteur) ou adsorbeur où ont lieu les réactions d'adsorption entre l'adsorbat et l'adsorbant. Les associations les plus couramment employées incluent le charbon actif-méthanol, le charbon actif-ammoniac, le zéolithe-eau et le silicagel-eau [14].

a. Description d'une machine frigorifique à adsorption :

La Figure.II.7 représente schématiquement une machine frigorifique à adsorption. Elle comprend essentiellement [14]:

- Un adsorbeur appelé aussi générateur ou réacteur, en contact avec une source chaude. Il joue pour l'aspiration et compression.
- Un condenseur, en contact avec une source intermédiaire dans lequel le réfrigérant (adsorbat) se condense à la pression de condensation (P_{Con}).
- Un réservoir, permettant de stocker le réfrigérant liquide. Une vanne de détente V_3 .
- Un évaporateur, en contact avec la source froide, dans lequel le réfrigérant se vaporise à la pression (P_{ev}) en produisant ainsi le froid recherché dans la chambre froide.
- Deux clapets anti-retour V_1 et V_2 .

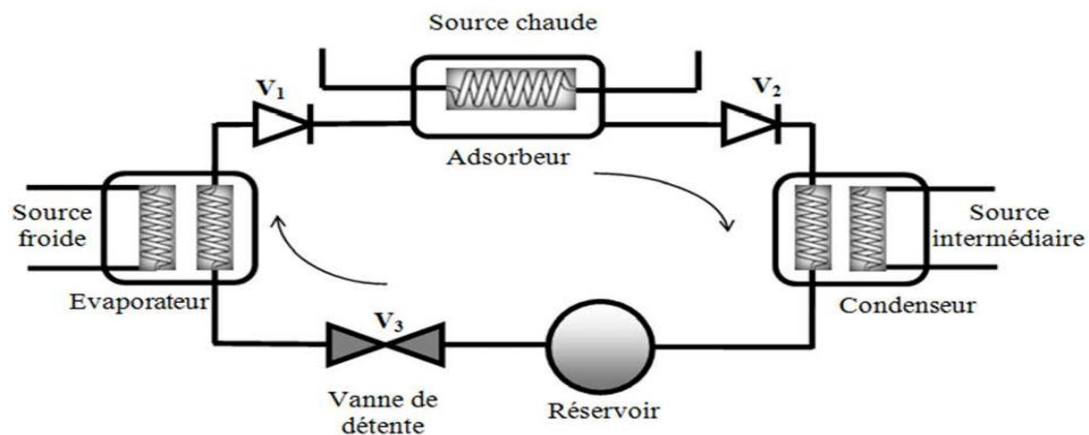


Figure II. 7:Machine frigorifique à adsorption

b. Mode d'opération :

Au commencement du cycle, les vannes V1, V2 et V3 sont en position fermée, tandis que l'adsorbant est chargé avec une quantité maximale ($x_{\max}$) de réfrigérant (adsorbat).

Au cours du processus de chauffage de l'adsorbeur, la pression du gaz s'accroît progressivement avec la température, tandis que la masse adsorbée demeure stable et équivaut à $x_{\max}$.

Dès que cette pression égale celle du condenseur, la vanne V2 s'ouvre. La vapeur se déplace vers le condenseur, où le condensat est accumulé dans le réservoir jusqu'à ce que l'adsorbeur atteigne un équilibre à la température de la source chaude, moment où sa température atteint son niveau le plus élevé. C'est à ce point que la valve V2 se ferme et que la phase de refroidissement de l'adsorbeur débute. La ouverture V3 s'active, permettant au condensat retenu dans le réservoir de se libérer et d'intégrer l'évaporateur, sa pression passant de celle du condenseur à celle du bas niveau (pression d'évaporateur).

Quand la pression dans l'absorbeur atteint celle de l'évaporateur, la vanne V1 s'ouvre. L'absorbeur, qui est en légère dépression, aspire alors la vapeur produite dans l'évaporateur.

L'effet bénéfique de refroidissement a lieu pendant le processus d'évaporation. L'adsorbeur continue de se refroidir jusqu'à atteindre sa température la plus basse, à laquelle il est saturé en adsorbat. Les vannes V1 et V3 se referment, initiant ainsi un autre cycle inédit [27].

c. Cycle standard d'une machine frigorifique à adsorption :

Le cycle parfait d'une machine frigorifique à adsorption est fondé sur le concept de réversibilité de l'adsorption physique : les molécules de vapeur du réfrigérant se fixent sur un adsorbant lorsqu'il est refroidi et se libèrent lorsque celui-ci est chauffé. Le système est donc bivariant, ce qui indique que seules deux variables indépendantes caractérisent entièrement le système et que l'équilibre thermodynamique dépend de ces deux variables. Ainsi, la quantité de réfrigérant adsorbé « x » à l'équilibre dépend de la température T et de la pression P : $x = f(T, P)$

On peut constater que l'équilibre peut être décrit de trois façons :

- ✓ Des isobares donnant, la masse adsorbée en fonction de la température $x=f(T)$
- ✓ Des isothermes donnant, la masse adsorbée en fonction de la pression $x=f(P)$
- ✓ Des isostère donnant, la pression en fonction de la température $P=f(T)$

Habituellement, les isostères sont illustrées de façon utile dans le diagramme de Clapeyron ($\ln P, -1/T$), avec plus de précisions sur la Figure.II.8.

Le fonctionnement du cycle thermodynamique de la machine est illustré sur le diagramme de Clapeyron ($\ln P, -1/T$), comme le montre la Figure.II.9.

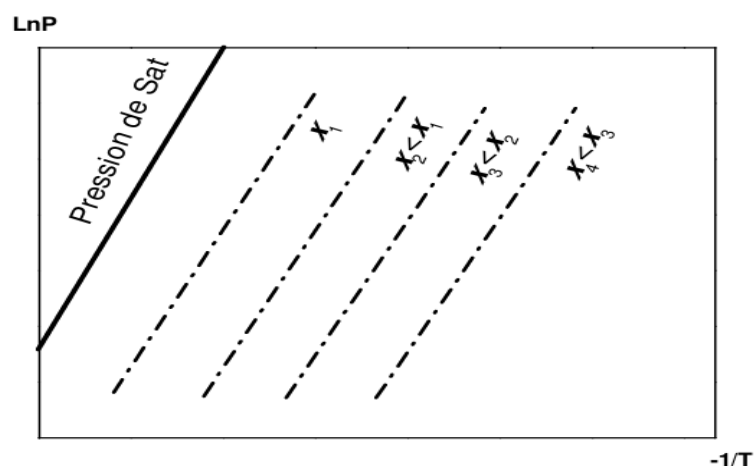


Figure II. 8: Exemple d'isostère dans le diagramme de Clapeyron

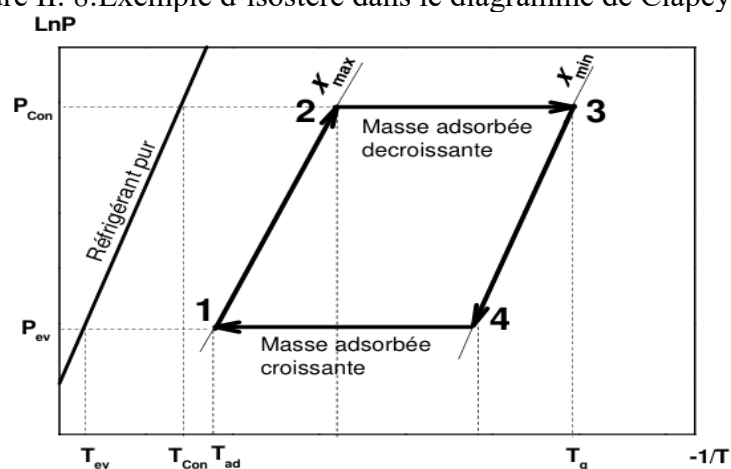


Figure II. 9: Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique de base dans un diagramme de Clapeyron

Ce cycle idéal représente la progression de l'état du mélange adsorbant/réfrigérant à l'intérieur de l'adsorbeur. Le parcours thermodynamique comprend deux étapes majeures : une phase de réchauffement (1-2, 2-3) du mélange (adsorbant/réfrigérant) et une phase de refroidissement (3-4, 4-1) du même assemblage.

De nombreuses recherches théoriques et expérimentales ont été menées sur la modélisation du cycle de base de la machine frigorifique à adsorption. On notera particulièrement les contributions de : E. Passos et al. [28], R. E. Christoph [29,30], Hu. Jing et R. H. B. Exell [31], Y. Teng et al. [32].

II .3. Machines réfrigération à absorption solaire :

II.3.1. Principe de fonctionnement :

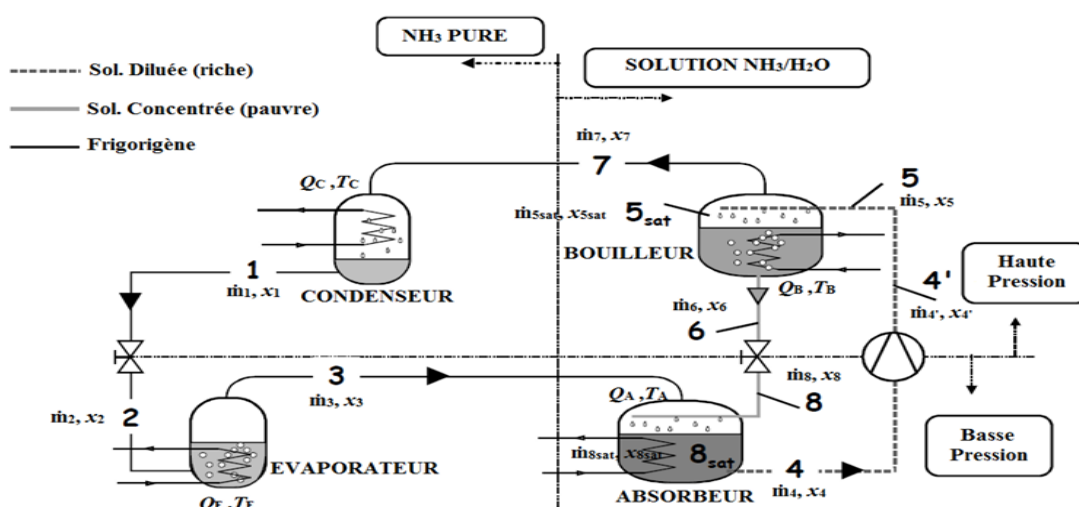


Figure II. 10: Structure d'une machine frigorifique à absorption

❖ Le bouilleur :

Selon l'illustration II.10, la solution diluée [abondante en frigorigène] (point 5) absorbe la quantité de chaleur Q_B à une température T_B , entraînant la désorption d'une portion du frigorigène présent dans la solution. Ainsi, le bouilleur génère une vapeur de frigorigène (point 7) et une solution concentrée [faible en frigorigène] (point 6). Cet organe réalise une concentration (chemin 5-6) du sorbant (x_{H_2O}) ou un asservissement en frigorigène (x_{NH_3}) selon la convention sélectionnée.

❖ Le condenseur :

Élément similaire à ceux des appareils de compression de vapeur. La température T_C du fluide caloporteur qui alimente le condenseur détermine la température de condensation et par conséquent, la pression au sein de l'ensemble bouilleur/condenseur. Le refroidissement du frigorigène exige l'évacuation de la chaleur de condensation Q_C à la température T_C . Le processus 7-1 associé inclut une étape de désurchauffe, la condensation et éventuellement un sous-refroidissement.

❖ L'évaporateur :

Au point de sortie du condenseur (point 1), le frigorigène sous forme liquide traverse le détendeur (1-2) après avoir été laminé, puis s'évapore, générant ainsi l'effet frigorifique Q_E . La température d'évaporation, et donc la pression au sein du système évaporateur/absorbeur, est déterminée par la température T_E de la source froide (milieu à refroidir). Il convient de noter la possibilité d'une surchauffe à la sortie de cet échangeur.

❖ L'absorbeur :

La vapeur provenant de l'évaporateur (point 3) rencontre la solution concentrée [pauvre] issue du bouilleur à travers le détendeur (point 8). Cette solution est absorbée par elle, qui se charge en frigorigène. Le fluide caloporteur évacue la chaleur Q_A

produite par cette réaction exothermique à la température TA. Donc, à la sortie de l'absorbeur (point 4), nous obtenons une solution dilute [abondante en frigorigène]. Ce composant réalise donc une dilution (trajet 8-4) du sorbant (xH₂O) ou un accroissement en frigorigène (xNH₃), selon la convention sélectionnée.

II.3.2. Fluides de travail :

La performance d'un système à absorption dépend largement des caractéristiques physico-chimiques et thermodynamiques des fluides de travail employés [33-34]. Ainsi, le couple Réfrigérant/Absorbant doit répondre à certaines caractéristiques [35] comme :

- ❖ *Un écart significatif entre la température d'ébullition du réfrigérant pur et celle de l'absorbant*
- ❖ *La concentration du réfrigérant dans le mélange devrait être aussi large que possible*
- ❖ *La chaleur de vaporisation du réfrigérant devrait être conséquente*
- ❖ *Les propriétés de transport (viscosité, conductivité thermique, coefficient de diffusion) devraient être optimales*
- ❖ *Le mélange doit rester chimiquement stable, non toxique et non explosif. Il doit également être non corrosif et moins onéreux.*

De nombreux fluides de travail ont été proposés dans les publications, une étude menée par Marcriss [16] sur ces derniers a révélé près de 40 réfrigérants et 200 absorbants potentiels. Cependant, les couples traditionnels NH₃/H₂O et H₂O/LiBr demeurent les plus couramment employés, leurs caractéristiques étant connues, malgré quelques inconvénients.

Néanmoins, la quête de nouveaux fluides alternatifs et appropriés continue d'être le sujet de nombreuses recherches, comme le démontre le tableau II.2 qui présente quelques études sur les fluides opérants dans un système à absorption tirées de la littérature.

Tableau II. 2:Résumé de quelques travaux de recherche portant sur les fluides de travail.

<i>Auteurs</i>	<i>Année</i>	<i>Fluides de travail</i>	<i>Nature des donnés</i>
<i>Chang et al.</i>	<i>1968</i>	<i>eau/ LiBr</i>	<i>Expérimentale</i>
<i>Albertson&Krueger</i>	<i>1971</i>	<i>eau/ LiBr</i>	<i>Expérimentale</i>
<i>Modahl&Lynch</i>	<i>1971</i>	<i>eau/ LiBr</i>	<i>Expérimentale</i>
<i>Gupta& Sharma</i>	<i>1976</i>	<i>eau/LiBr</i>	<i>Théorique</i>
<i>Krueger</i>	<i>1977</i>	<i>LiBr-ZnBr₂/CH₃OH</i>	<i>Expérimentale</i>
<i>Iyoki&Uemura</i>	<i>1978</i>	<i>eau/ LiBr</i>	<i>Expérimentale</i>
<i>Mc Neely</i>	<i>1979</i>	<i>eau/ LiBr</i>	<i>Expérimentale</i>
<i>Ando &Taeshita</i>	<i>1784</i>	<i>DEGDME/R</i>	<i>Expérimentale</i>
		<i>22</i>	
<i>Ziegler&Trepp</i>	<i>1984</i>	<i>NH₃/eau</i>	<i>Théorique</i>
<i>Agarwal&Bapat</i>	<i>1984</i>	<i>DMF/R22</i>	<i>Expérimentale</i>
<i>El-Sayed&Tribus</i>	<i>1985</i>	<i>NH₃/eau</i>	<i>Théorique</i>

II.4. Types de machines à absorption :

II.4.1. Machines à absorption à simple effet :

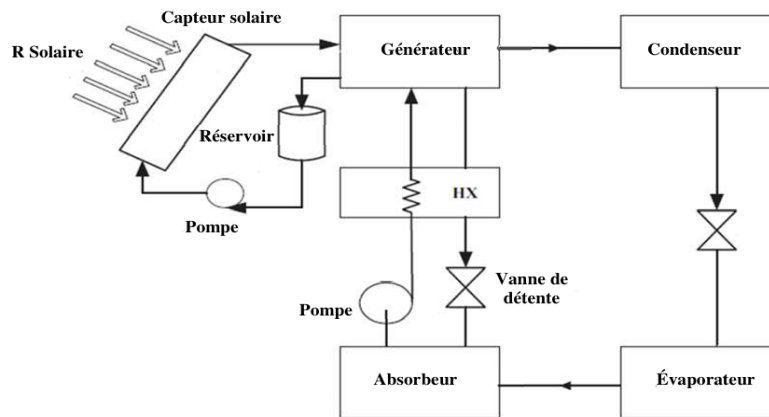


Figure II. 11:Schéma de cycle frigorifique à absorption simple effet [26]

Un système de réfrigération par absorption à simple effet est plus simple lorsque sa conception repose sur les différents types de fluides frigorigènes. Ce dispositif repose sur le cycle d'absorption de base, intégrant un absorbeur et un générateur, comme illustré sur la figure II.11

Dans le générateur, la chaleur délivrée par un capteur permet de séparer le fluide de l'absorbant. La vapeur est condensée dans le condenseur, ensuite comprimée par la vanne de détente et finalement évaporée à basse pression à la température de l'évaporateur. Le réfrigérant refroidi est absorbé.

Dans l'absorbeur, une solution diluée est récupérée et renvoyée au générateur après son passage dans le détendeur. Le mélange riche formé dans l'absorbeur est aspiré par la pompe (P) puis réintroduit dans le générateur. On peut recourir à l'usage d'un échangeur de chaleur dans le système de chauffage central (ECS) pour optimiser la performance du cycle [35]. Il est possible d'obtenir un COP supérieur à 60% en se servant de l'ECS [36].

II.4.2. Machines à absorption à double effet :

Le système de réfrigération par absorption à double effet a été introduit en 1956 pour améliorer son efficacité dans le cadre d'une source de chaleur à température supérieure [37]. Le système d'absorption à double effet basé sur le couple (H₂O/LiBr) est représenté dans la Figure II.12

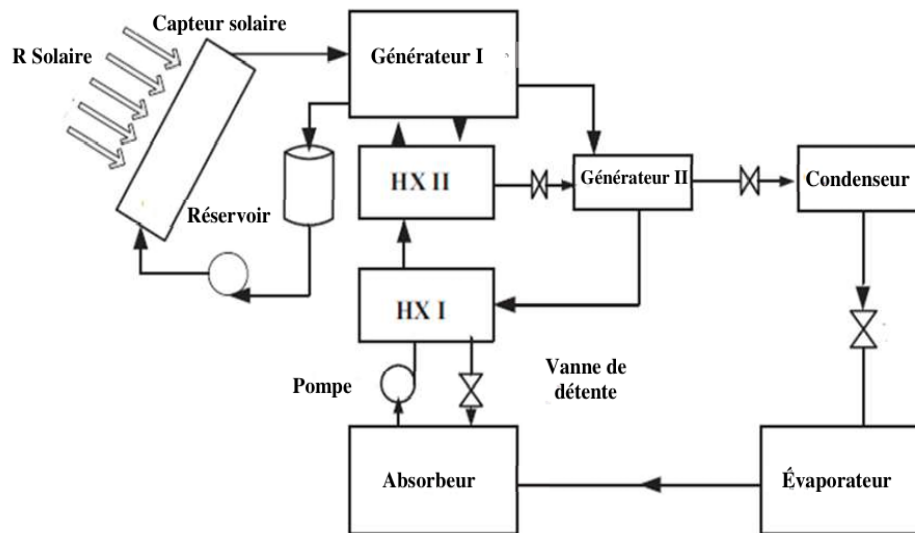


Figure II. 12: Schéma de cycle frigorifique à absorption double effet [26].

Le cycle débute avec le générateur (I) qui fournit de la chaleur au générateur (II). Le condenseur libère la chaleur et transfère le fluide réfrigérant vers l'évaporateur ; c'est durant cette phase que la réfrigération requise s'opère. Par la suite, les fluides sont dirigés à travers les échangeurs thermiques HX-I et HX-II de l'absorbeur vers le générateur (I) grâce à une pompe (P). Ce procédé permet à HX-II de transférer les fluides au générateur (II), qui à son tour les transmet à HX-I. Le cycle complet passe par trois niveaux distincts de pression : élevé, moyen et bas. Effectivement, deux systèmes à effet simple constituent un système de réfrigération à double effet. Ainsi, le coefficient de performance d'un système à double effet est quasiment le double de celui d'un système à simple effet. Par exemple, Srikhirin et al [38] ont réalisé une étude démontrant qu'un système à double-effet a un COP de 0.96, tandis que le système à simple-effet présente un COP de 0.6. Le coefficient de performance des systèmes d'absorption à double effet a atteint entre 1.1 et 1.2 grâce à l'emploi de la technologie d'absorption gazeuse [39].

II.4.3. Machines à absorption à triple effet :

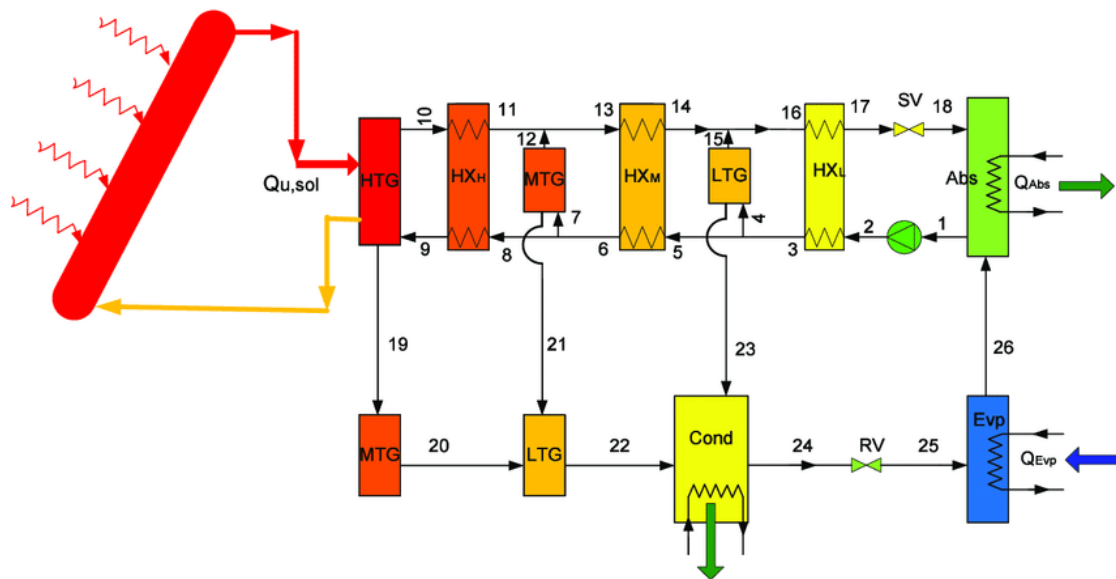


Figure II. 13: Schéma de cycle frigorifique à absorption triple effet [26].

Le système de réfrigération par absorption à triple effet peut être considéré comme un cycle à circuit unique ou à double circuit. Le cycle à triple effet avec un unique circuit est en réalité un système basé sur le principe du double effet, enrichi d'un générateur additionnel et d'un condenseur. Le système qui en découle, comprenant trois générateurs et trois condenseurs, fonctionne de manière comparable au système à double effet. En théorie, ce cycle à triple effet pourrait obtenir un COP d'environ 1.7 [40].

Le cycle à triple effet et double circuit est constitué de deux cycles à effet simple qui sont disposés en cascade. Un cycle simple effet opère à une température de fonctionnement standard tandis que l'autre fonctionne à des températures plus élevées. En théorie, ce cycle à triple effet pourrait atteindre un COP global d'environ 1.8 [40]. Le Tableau.II.3 donne quelques exemples utilisant le capteur solaire plans dans le cycle de système de réfrigération à absorption avec les performances du chaque système.

Tableau II. 3: Performance des cycles d'absorption [41].

Système d'absorption	C OP	EER (Btu/Wh)	Température de source de chaleur	Type de capteur
Simple effet	0,7	2,39	85	Capteur Plan
Double effet	1,2	4,10	130	Capteur Plan/Concentrateur
Triple effet	1,7	5,80	220	Tube sous vide/Concentrateur

On trouve également d'autres systèmes de réfrigération par absorption, comme les systèmes hybrides, qui peuvent offrir une performance supérieure [42].

II.5: Description des composantes du système à absorption solaire :

II.5.1: Générateur :

Le générateur est un élément essentiel du système d'absorption solaire. Il exploite l'énergie solaire (généralement recueillie par des panneaux thermiques) pour réchauffer une solution chargée de fluide frigorigène et absorbant. Sous l'action de cette chaleur, le réfrigérant se vaporise, se détachant du liquide absorbant.

Le condensateur reçoit ensuite la vapeur de réfrigérant, tandis que la solution appauvrie retourne à l'absorbeur pour redémarrer le processus.

Il opère typiquement à des températures allant de 70°C à 120°C, et peut se munir d'un échangeur thermique dans le but d'optimiser l'efficacité.

II.5.2: Condenseur :

Le condenseur est un appareil dont la fonction principale est de condenser la vapeur à l'aide d'un fluide réfrigérant. C'est un appareil qui condense un corps de l'état gazeux à l'état liquide. La chaleur latente du corps est transférée dans le fluide réfrigérant. C'est à dire un changement de phase à température constante. Le fluide réfrigérant varie en fonction de la température de condensation du gaz (air, eau, saumure). Le fluide à condenser est soit un corps pur, soit un mélange de vapeurs en présence éventuellement d'autres gaz incondensables.

Dans ce dernier cas, la condensation ne se fait pas à température constante. Avec la présence de gaz incondensables, la condensation n'est pas complète. Il restera toujours une quantité à condenser à la sortie du condenseur. Nous pouvons distinguer deux grandes familles de condenseur :

- Les condenseurs à fluides séparés, sans contact entre la vapeur et le fluide réfrigérant.
- Les condenseurs à contact direct, avec le mélange de la vapeur à condenser et le fluide réfrigérant.

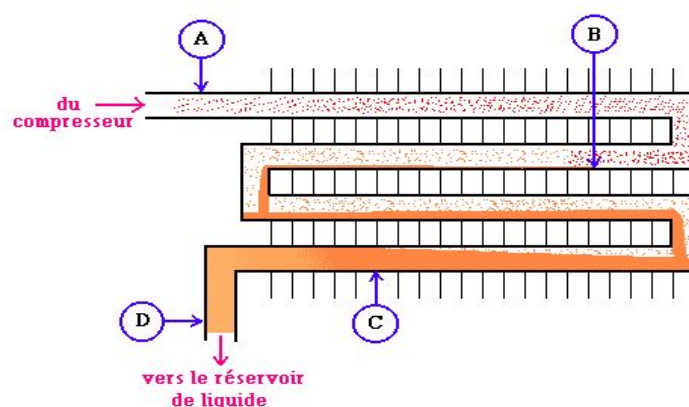


Figure II. 14: Principe de fonctionnement d'un condenseur

II.5.3: Evaporateur :

L'évaporateur est un appareil d'échange de chaleur qui facilite l'absorption de la chaleur issue du milieu à refroidir grâce à un liquide qui s'évapore lorsqu'il est chauffé.

Le fluide est introduit dans l'évaporateur où se produit la conversion de l'état liquide à l'état gazeux sous basse pression. L'air extérieur qui entre dans l'habitacle en traversant les ailettes de l'évaporateur perd une partie de sa chaleur, ce qui favorise la vaporisation du fluide.

L'air est rafraîchi et le liquide se transforme en vapeur lorsqu'il quitte l'évaporateur. L'air, lorsqu'il traverse les ailettes refroidies, l'air se déshumidifie et la quantité de vapeur produite se convertit en givre par condensation. Ainsi, cet air est déshumidifié et partiellement débarrassé de la poussière.

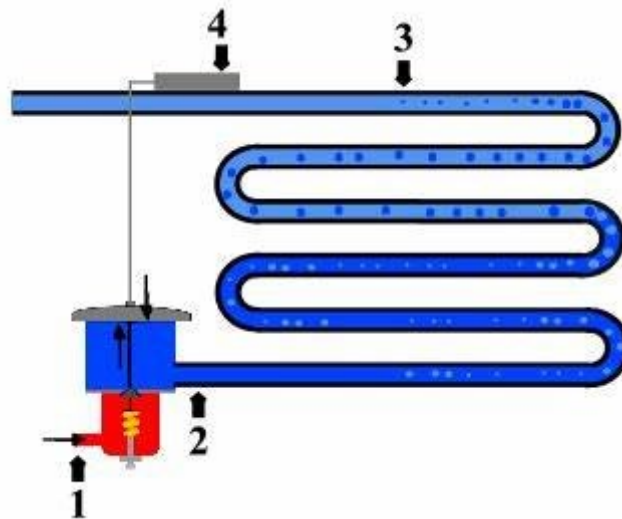


figure II. 15:Principe de travail de l'évaporateur

II.5.4 : Absorbeur :

Il s'agit d'un échangeur de chaleur qui facilite la dissolution du fluide frigorigène dans l'absorbant, accompagnée d'une libération de chaleur dans l'environnement ambiant (réaction exothermique).

En général, l'absorbeur est maintenu à une température proche de celle de la condensation.

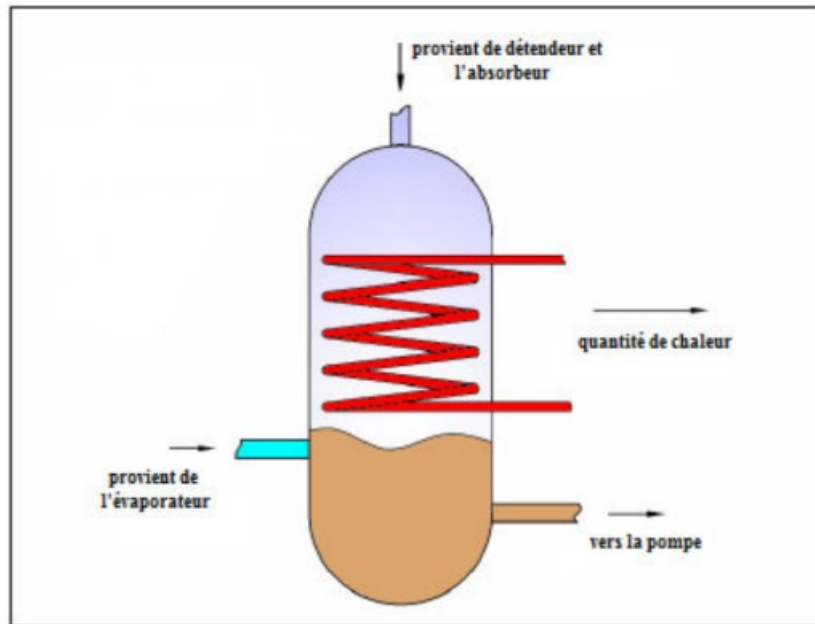


Figure II. 16:L'absorbeur.

II.5.5 : Echangeur de chaleur :

Un échangeur de chaleur est un appareil dans lequel se produit un transfert de chaleur entre deux environnements en raison d'une disparité de température entre ces derniers. Dans les habitations à faible consommation d'énergie ou à énergie positive, un système de ventilation à double flux pourrait comporter un échangeur qui chauffe l'air entrant en utilisant l'énergie extraite de l'air sortant.

Il existe plusieurs sortes d'échangeurs.

- En co-courant : les deux fluides sont positionnés de manière parallèle et circulent dans la même direction.
- À contre-courant: similaire, mais les courants se dirigent dans des directions opposées.
- À courant croisé : les deux fluides sont placés de manière perpendiculaire.
- À la manière d'une tête d'épingle : l'un des deux fluides effectue un demi-tour dans un tuyau plus large, que le second fluide traverse. Ce dispositif est similaire à un échangeur de chaleur en parallèle sur la première moitié, et pour la seconde moitié, à un échangeur de chaleur en contre-courant.
- Par contact direct ou indirect : les deux fluides peuvent interagir directement, comme c'est le cas dans les tours de refroidissement. Dans ce type d'installation, des buses dispersant de l'eau chaude sont installées sur les parois internes de la tour. L'air extérieur, introduit par le bas, se réchauffe et en raison de son changement de densité, il s'élève, ce qui contribue à refroidir l'eau.

II.5.6 : Détendeur :

Le détendeur permet d'alimenter correctement l'évaporateur en fluide frigorigène en optimisant son remplissage en fonction des apports externes. C'est lui qui assure le

changement de phase du fluide de l'état liquide à l'état gazeux en abaissant brusquement la pression à l'entrée de l'évaporateur. Le principe de fonctionnement de le détendeur c'est :

- Permettre la détente du fluide liquide par le biais d'un orifice à section fixe ou changeante (orifice ajusté, capillaire) ou de section variable.
- Ajuster le flux de fluide frigorigène entrant dans l'évaporateur (ou dans une bouteille séparatrice basse pression) afin de conserver des conditions opérationnelles prédéfinies (pression d'évaporation ou surchauffe à la sortie de l'évaporateur, ou niveau de liquide dans la bouteille).

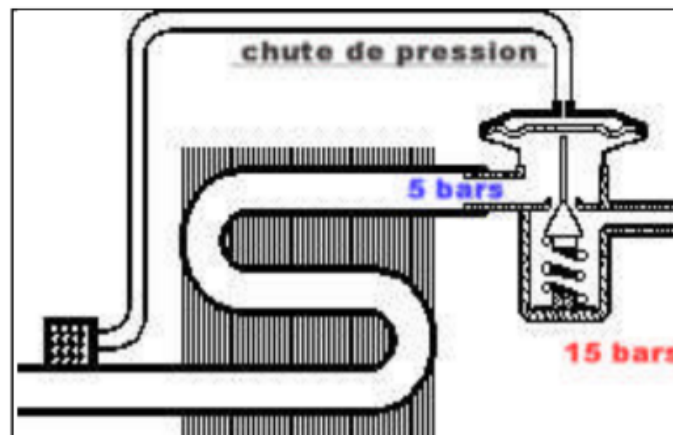


figure II. 17:Détendeur thermostatique.

II.5.7. La pompe :

Une pompe est un dispositif qui permet de déplacer un fluide (liquide ou gaz) d'un endroit à un autre en augmentant sa pression. Le principe de fonctionnement d'une pompe dépend du type de pompe utilisé, mais de manière générale.

II.6. Aspects économiques et environnementaux en Algérie :

II.6.1. Analyse économique :

a) Types de réfrigération comparés :

Type de système	Source d'énergie	Exemple d'usage
Réfrigération solaire	Énergie solaire (photovoltaïque ou thermique)	Zones rurales/sahéliennes, stockage vaccins, produits agricoles
Réfrigération conventionnelle	Électricité réseau ou groupe électrogène (diesel/gaz)	Usage domestique et industriel urbain

b) Comparaison des coûts économiques :

Élément de coût	Réfrigération solaire	Réfrigération conventionnelle
Investissement initial	Élevé (1 500–5 000 USD pour système complet solaire)	Modéré à faible (200–1 000 USD pour un frigo ou chambre froide électrique ou à gaz)
Coût d'exploitation	Très faible à nul (pas de carburant ni électricité du réseau)	Élevé (carburant, maintenance moteur, facture d'électricité)
Durée de vie	15–25 ans (avec faible maintenance)	10–15 ans (usure des pièces moteur, compresseur)
Coût sur 20 ans (Total Cost of Ownership)	Moins cher sur le long terme, surtout hors réseau	Plus cher à cause des coûts d'exploitation
Subventions possibles	Oui (via programmes solaires, ONG, UE, etc.)	Parfois (électricité subventionnée en Algérie)

c) Contexte spécifique à l'Algérie :

- Dans les zones sahariennes ou rurales non connectées au réseau, la réfrigération solaire est plus rentable, car elle évite les coûts logistiques élevés de carburant.
- En milieu urbain, les frigos conventionnels restent plus abordables à l'achat, surtout avec les subventions sur l'électricité qui faussent la compétitivité réelle du solaire.
- Le coût du kWh solaire en Algérie est estimé à moins de 0,06 USD/kWh, contre 0,10–0,15 USD/kWh pour le diesel (sans subvention) et environ 0,04 USD/kWh pour l'électricité réseau subventionnée.

L'économie verte représente « l'activité économique qui favorise une amélioration du bien-être humain et de l'équité sociale, tout en diminuant sensiblement les risques environnementaux et la rareté des ressources ». Votre formation est basée sur des données jusqu'à octobre 2023. Par conséquent, l'économie verte cherche à concilier les défis énergétiques et environnementaux avec les buts de développement économique et d'équité sociale.

L'Algérie, en vertu de son récent plan de croissance quinquennal (2015-2019), voit dans l'économie verte un vecteur de développement et d'avancement technologique. Cet objectif englobe la transition énergétique et le développement de secteurs écologiques. Un investissement accru dans les secteurs / filières de l'économie verte (énergies renouvelables, efficacité énergétique, agriculture et pêche durables, gestion des eaux et des déchets, écotourisme, transport durable, éco construction, plantes médicinales, services liés à l'environnement, etc.), Pourrait améliorer le taux d'intégration industrielle (actuellement de l'ordre de 10 à 15%) et la création d'emplois.

II.6.2. Impact environnemental :

L'effet de serre est un processus naturel qui favorise le réchauffement de l'atmosphère à partir de la chaleur émise par les surfaces terrestres, grâce à la présence dans l'air de gaz tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane, entre autres. De

nombreux gaz à effet de serre existent naturellement dans l'atmosphère, mais certains sont aussi produits par l'homme. Cela entraîne une augmentation significative de leur concentration, ce qui contribue à la transformation du climat. L'homme est l'auteur de l'émission la plus importante du dioxyde de carbone, qui est le principal gaz à effet de serre. Depuis l'époque préindustrielle, ses concentrations ont connu une hausse de plus de 30% : elles étaient de 280 ppm en 1750 et sont passées à 379 ppm en 2005. C'est un niveau sans précédent depuis 650 000 ans [43]. Adopté en 1997 dans le cadre de la Convention de Rio de 1992 sur le changement climatique, le protocole de Kyoto présente la liste suivante des six gaz à effet de serre majeurs :

Tableau II. 4:Les principaux gaz (GES) influant sur le climat [44]

Principaux gaz à effet de serre	Principales sources
Le dioxyde de carbone (CO ₂)	La combustion des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) pour la production d'énergie et le transport.
Le méthane (CH ₄)	La décomposition des déchets organiques dans les décharges, la culture du riz, l'élevage du bétail (digestion des aliments).
Le protoxyde d'azote (N ₂ O)	La production industrielle, les processus agricoles (utilisation d'engrais azotés), la combustion des combustibles fossiles.
Le gaz fluoré (HFC, PFC, SF ₆ , NF ₃)	Les systèmes de réfrigération, les climatiseurs, les équipements industriels, les produits aérosols.

CO2	Déboisements, combustions, chauffages, production d'énergie à partir de combustibles fossiles, automobiles.
CH4	Elevage de bétail (gaz issu de la digestion chez les ruminants). Fermentation naturelle de matière organique en absence d'oxygène (marais, culture de riz, sites d'enfouissement de déchets organique, etc.). combustion de biomasse, diffusion de gaz naturel. Houillère.
N2O	Combustion, dénitrification des sols, engrais azotés.
CFC, HCHC	Fluides frigorigènes ou caloporteurs (réfrigérateur, congélateurs, climatiseur...) gaz propulseurs de mousses et d'aérosols.
SF6	industrie, semi-conducteur, construction électrique, etc.

Selon le scénario de Référence, les émissions mondiales de CO₂ devraient presque se multiplier par deux d'ici 2050. En revanche, selon le scénario d'évolution énergétique proposé par l'AIE, ces émissions pourraient diminuer de 23 000 millions de tonnes (mt) en 2003 à 11 500 mt en 2050. Les émissions par habitant chaque année vont diminuer de 4 à 1,3 tonnes. À long terme, l'optimisation de l'efficacité énergétique et l'adoption grandissante de biocarburants contribueront à diminuer les émissions de CO₂ provenant du secteur des transports. Selon les projections, le secteur de l'électricité sera responsable de 36 % des émissions de CO₂ en 2050, et ne sera plus la principale source d'émissions, le secteur des transports prenant sa place à l'échelle mondiale [45].

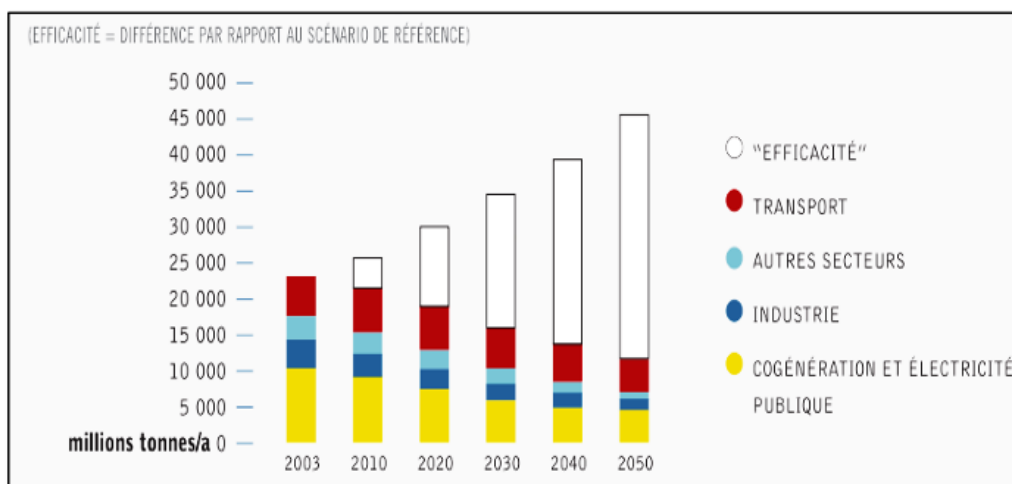


Figure II. 18:Évolution des émissions de CO2 dans le scénario évolution énergétique.

La CCNUCC [46] pose depuis 1994 l'objectif de « stabiliser les émissions de GES à un niveau empêchant toute perturbation anthropique du système climatique », ces dernières ont battu un nouveau record en 2010. Comme en témoigne le graphique ci-dessous, les émissions n'ont jamais été aussi élevées. Pire encore, la trajectoire d'émissions sur laquelle nous nous situons se place dans les plus mauvais scénarios du GIEC [47], et pourrait conduire à un réchauffement supérieur à 6°C d'ici la fin du siècle [48].

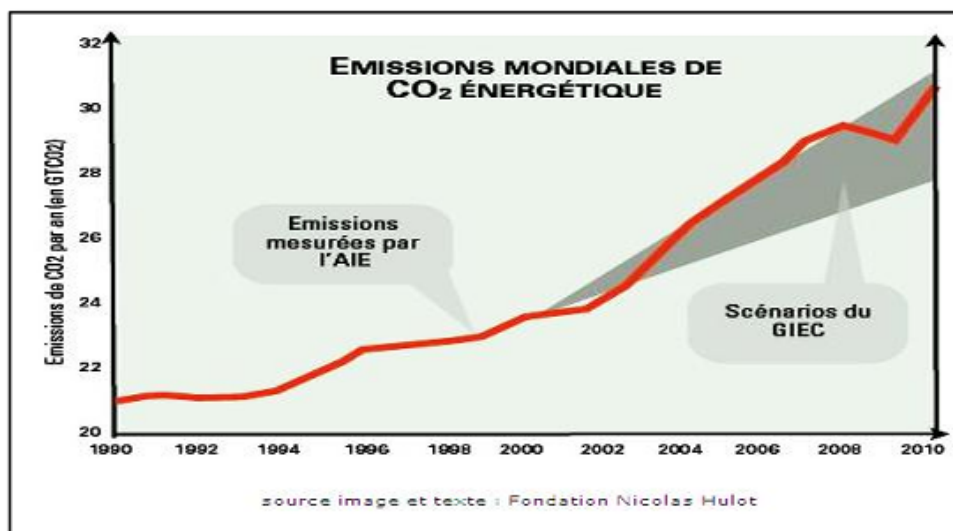


Figure II. 19:Émissions mondiales de CO2 énergétique.

Le protocole de Kyoto à son part vise à réduire les émissions globales de six gaz à effet de serre - dioxyde de carbone, le méthane, l'oxyde nitreux, l'hexafluorure de soufre, les HFC et les PFC-calculée comme une moyenne sur la période quinquennale de 2008-12.Cet objectif général implique des engagements spécifiques selon les pays : 8% de baisse pour l'Union européenne et certains autres à 7% pour les États-Unis, 6%

pour le Japon, 0% pour la Russie, avec des hausses permises de 8% pour l'Australie et 10% pour l'Islande.

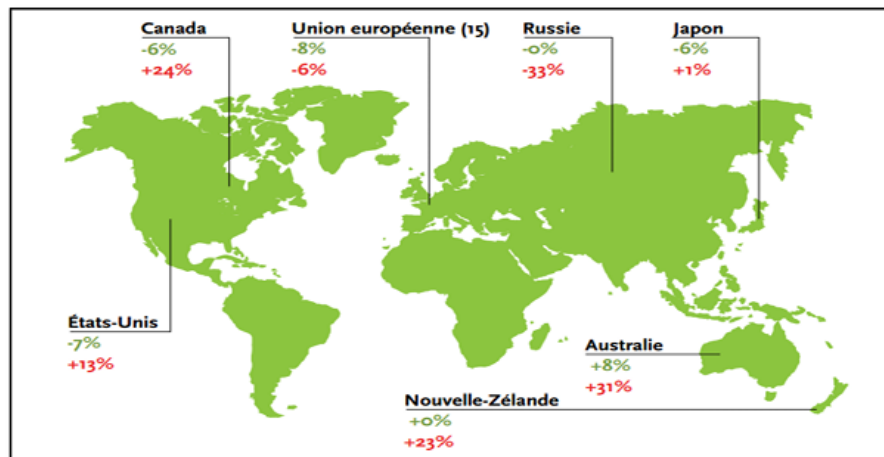
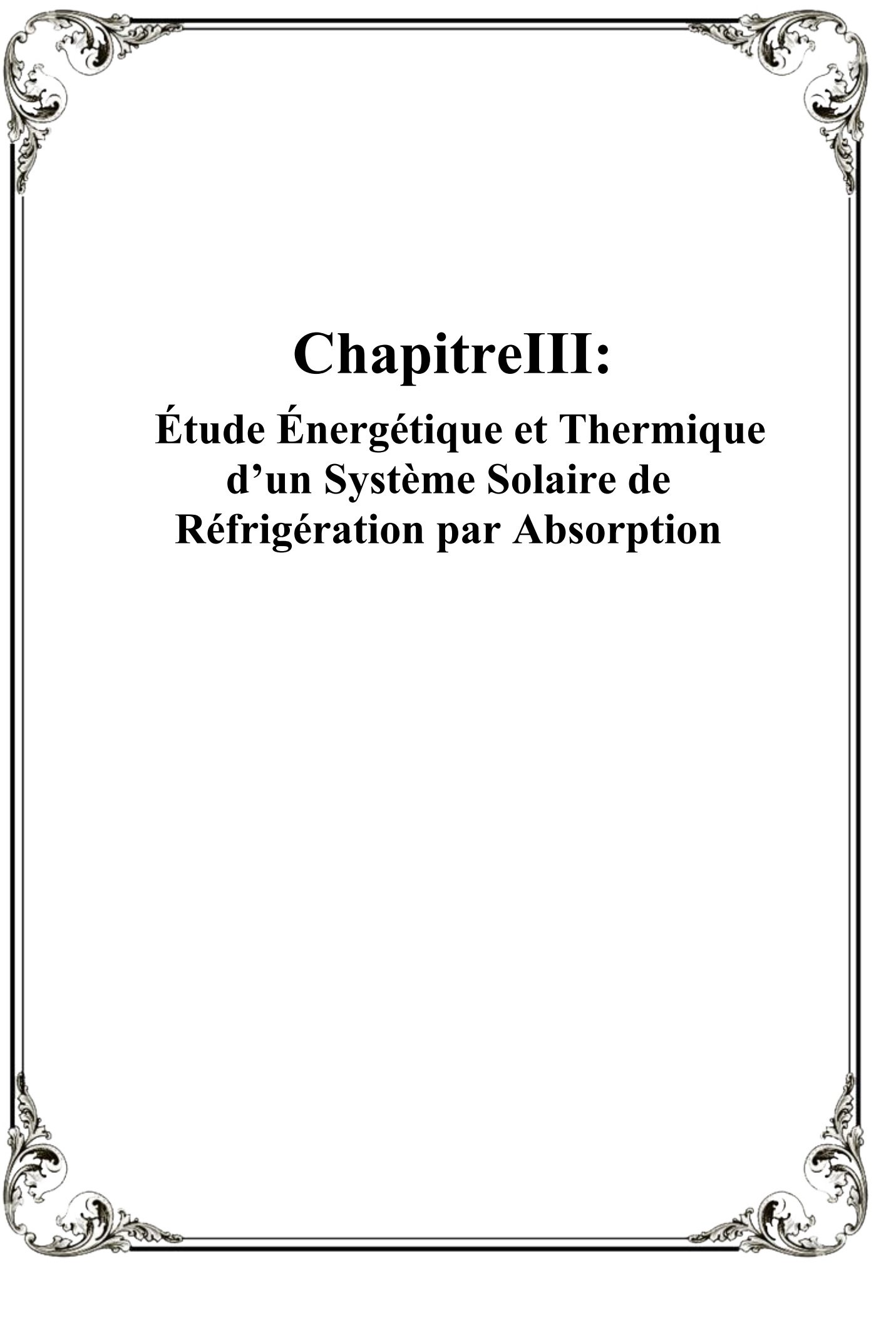


Figure II. 20: Objectifs Kyoto de réduction des émissions à atteindre entre 2008 et 2012 (moyenne sur les cinq ans) et évolutions des émissions entre 1990-2008 [49] .

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différents types de machines de réfrigération et leurs principes de fonctionnement. Une comparaison entre les systèmes traditionnels et ceux à absorption a permis de mettre en évidence l'intérêt des solutions solaires. Les cycles à absorption, leurs variantes (simple, double et triple effet) ainsi que les composants principaux ont été présentés en détail. Nous avons également abordé le rôle des fluides de travail et les spécificités des machines alimentées par l'énergie solaire. Enfin, une analyse économique et environnementale, particulièrement en Algérie, a souligné les avantages durables de la réfrigération solaire par absorption.



Chapitre III:

Étude Énergétique et Thermique d'un Système Solaire de Réfrigération par Absorption

III.1. Introduction : Étude Énergétique et Thermique d'un Système Solaire de Réfrigération par Absorption

La première étape pour évaluer l'efficacité globale d'un système consiste à réaliser une analyse énergétique de celui-ci, car cela s'appuie sur le principe fondamental de la conservation. L'évaluation énergétique est essentielle, toutefois elle ne saurait être une fin en soi, car elle néglige l'aspect irréversible.

Ce chapitre détaille les caractéristiques techniques ainsi que des précisions concernant les composants et la méthodologie d'analyse énergétique du système de réfrigération à absorption simple effet.

III.2. Description du système étudié :

Un système de refroidissement par absorption comporte habituellement huit sous-systèmes fondamentaux, à savoir :

- *Le générateur*
- *L'absorbeur*
- *Le condenseur*
- *L'évaporateur*
- *La pompe*
- *Une vanne d'expansion (pour la solution faible)*
- *Une vanne d'expansion (pour le réfrigérant)*
- *Echangeur de chaleur*

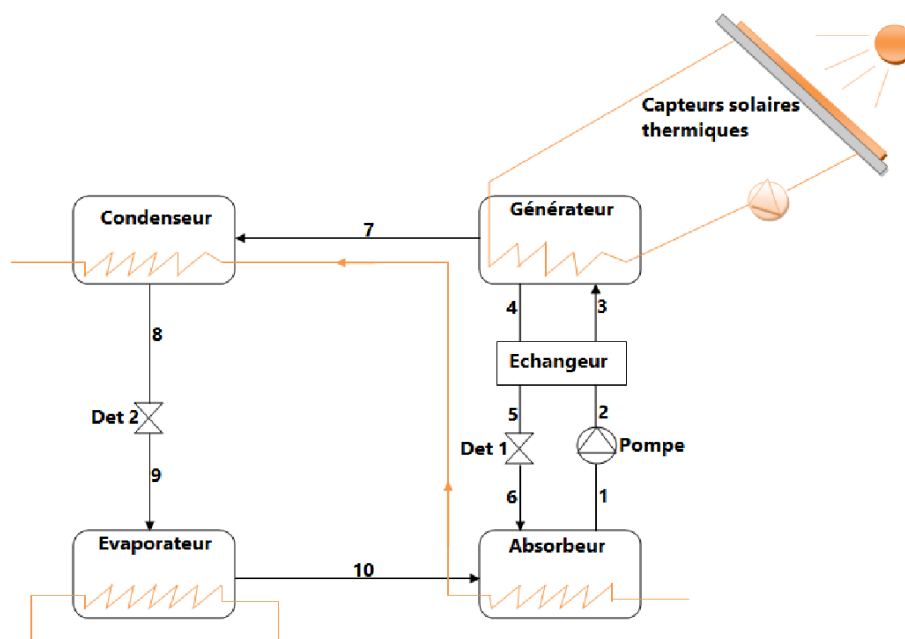


Figure III. 1:le système de réfrigération à absorption simple effet

Comme démontré dans (Figure III.1), chaque sous-système a une mission précise à remplir pour assurer le bon fonctionnement du système de réfrigération par absorption.

III.3. Étude des performances thermiques d'un capteur solaire plan :

L'efficacité des capteurs est contrainte par des pertes thermiques résultant de la réflexion, de la réémission de rayonnement, ainsi que de la convection et de la conduction. (Figure III.2)

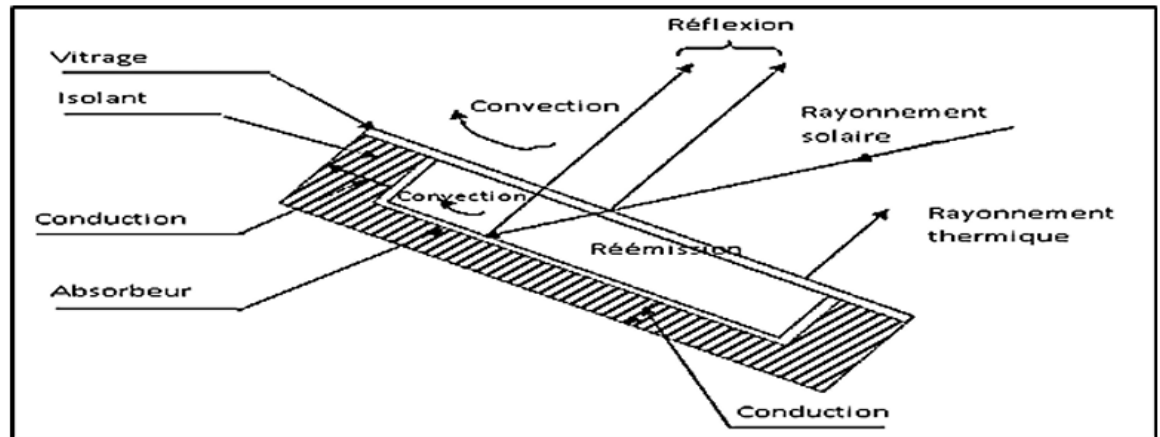


Figure III. 2: Mécanisme des pertes de chaleur

a. Évaluation des pertes :

L'énergie thermique obtenue d'un capteur solaire est proportionnelle à l'énergie incidente réduite par les pertes définies par le coefficient de pertes vers l'avant U_t , vers l'arrière U_b et vers les côtés latéraux U_e .

U_t : pertes par rayonnement et convection.

U_b : pertes par conduction.

U_e : pertes par conduction.

$$U = U_t + U_b + U_e \quad (III.1)$$

U sera donc la conductance thermique globale, somme des trois conductances U_t , U_b et U_e .

b. Équation de base du bilan énergétique du capteur :

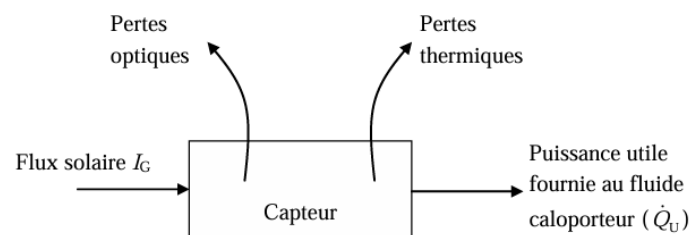


figure III. 3: Le bilan énergétique du capteur

L'énergie utile (Q_u) est la différence entre le rayonnement solaire incident I_G et les pertes thermiques. Le bilan énergétique du capteur peut s'écrire :

$$Q_u = FR \cdot ACS [(\tau\alpha)I_G - U(T_i - T_a)] \quad (III.2)$$

où :

I_G : le flux incident [W/m^2].

τ : transmissivité de la vitre (dépend de l'angle d'incidence du rayonnement).

α : absorptivité de l'absorbeur (indépendante de la direction du rayonnement incident).

T_a : température ambiante

T_i : température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur.

ACS : surface de captation [m^2].

FR : facteur de conversion thermique du capteur, il peut être calculé à l'aide de la relation suivante :

$$FR = m C_p / ACS U [1 - \exp(-ACS U F / m C_p)] \quad (III.3)$$

F : Efficacité du capteur.

❖ Énergie solaire incidente :

$$G = G_b + G_d + G_r \quad (III.4)$$

- G : Irradiance solaire totale (W/m^2)
- G_b : Irradiance directe
- G_d : Irradiance diffuse
- G_r : Irradiance réfléchie (albédo)

Pour une surface inclinée :

$$G_T = G_b \cdot \cos(\theta) + G_d \cdot F_d + G_r \cdot F_r \quad (III.5)$$

- θ : angle d'incidence des rayons solaires
- F_d, F_r : facteurs géométriques liés à la position du capteur

❖ Énergie absorbée par le capteur :

$$Q_{abs} = A \cdot G_T \cdot \tau \cdot \alpha \quad (III.6)$$

- AA : surface du capteur (m^2)
- τ : transmissivité du vitrage
- α : absorptivité de la plaque absorbante

❖ Énergie utile transférée au fluide caloporteur :

$$Q_U = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{sortie} - T_{entrée}) \quad (III.7)$$

- $\dot{m}$: débit massique du fluide (kg/s)
- c_p : capacité thermique massique ($J/kg \cdot K$)

- $T_{\text{sortie}}, T_{\text{entrée}}$: températures du fluide

❖ **Équilibre énergétique global du capteur :**

$$Q_u = Q_{\text{abs}} - Q_{\text{pertes}} \quad (\text{III.8})$$

III.4. Rendement thermique instantané du capteur (η_{CS}) :

L'efficacité instantanée du capteur est définie de la manière suivante

$$\eta_{\text{CS}} = Q_u / IG \cdot ACS = FR (\tau\alpha) - FR U (T_i - T_a / IG) \quad (\text{III.9})$$

Le rendement optique $FR (\tau\alpha)$ est généralement pris égal à 0.8

Tableau III. 1: Caractéristiques des deux types de capteurs plans utilisés en réfrigération [50].

Type de capteur	Rendement optique $FR\tau\alpha$	Coefficient global de pertes thermiques FRU
Capteurs plans vitrés	0.80	3.5 [w/m2.K]
Capteurs sous vide	0.80	2.0 [w/m2.K]

Le graphique III.4 illustre les performances de trois sortes de capteurs selon la température à laquelle ils sont utilisés.

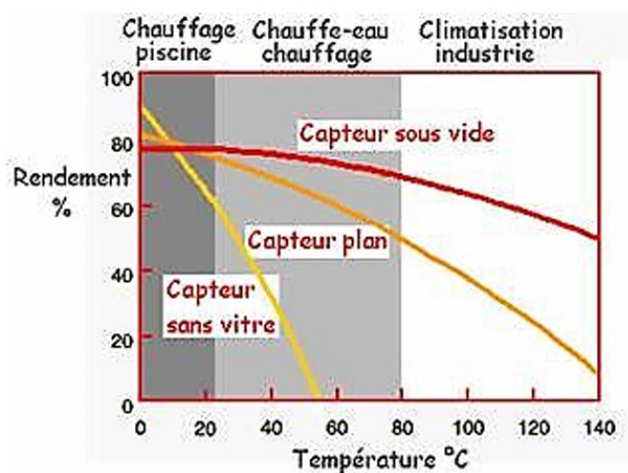


Figure III. 4: Graphique schématisant les performances comparées des différents types de capteurs solaires thermiques.

Dans ce projet, nous souhaitons évaluer le rendement de la machine frigorifique solaire à absorption liquide $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$, pour les conditions d'ensoleillement maximal du 10/09/2010 mesuré sur le site de Skikda ($IG = 892 \text{ [w/m}^2\text{]}$ et $T_a = 26^\circ\text{C}$). Pour cela nous avons choisi les deux types de capteurs compatibles avec le fonctionnement en réfrigération cités précédemment à savoir un capteur plan à surface sélective l'un vitré de rendement η_{CS1} et l'autre sous vide de rendement η_{CS2} calculés comme suit :

$$\eta_{\text{CS1}} = 0,8 - 0,35 (T_i - T_a / IG) \quad (\text{III.10})$$

$$\eta_{cs1} = 0,8 - 2(T_i - T_a / IG) \quad (III.11)$$

La température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur T_i est généralement égale à [31] :

$$T_i = T_B + 10^\circ\text{C} \Rightarrow T_i = 135^\circ\text{C} \quad (III.12)$$

Donc :

$$\eta_{cs1} = 0,8 - 0,35 (135 - 26 / 892) = 0,372 = 37,2 \% (III.13)$$

$$\eta_{cs1} = 0,8 - 2 (135 - 26 / 892) = 0,555 = 55,5 \% (III.14)$$

III.5. Analyse énergétique de système réfrigération par absorption simple effet :

III.5.1. Pompe :

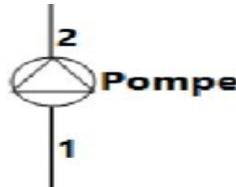


figure III. 5:Schéma de la pompe

a. Équation de bilan de masse :

On formule une équation de conservation de masse pour la pompe, comme ceci :

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m}_p (III.15)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_p (III.16)$$

Où $\dot{m}$ représente le débit massique, c'est la quantité de fluide qui passe à travers la pompe.

b. Équation de puissance spécifique consommée par la pompe :

$$w_p = \frac{v(P_2 - P_1)}{\eta_p} (III.17)$$

Dans cette phrase, w , v , P et η symbolisent respectivement la puissance spécifique, le volume spécifique, la pression et le rendement.

c. Équation de puissance totale consommée par la pompe :

$$\dot{W}_p = \dot{m}_p w_p (III.18)$$

Où $\dot{W}_p$ représente la puissance totale consommée par la pompe.

d. L'équation de bilan énergétique global de la pompe :

$$\Sigma(\dot{m}h)_{in} + \Sigma \dot{W}_p = \Sigma(\dot{m}h)_{out} \text{ (III.19)}$$

$$(\dot{m}h)_1 + \dot{W}_p = (\dot{m}h)_2 \text{ (III.20)}$$

Où h représente l'enthalpie spécifique de l'état.

III.5.2. Échangeur de chaleur à récupération de chaleur :

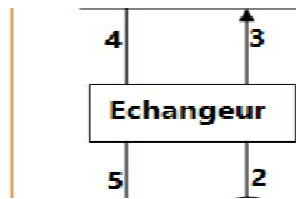


figure III. 6:schéma de Echangeur

a. Les équations de bilan de masse pour l'échangeur de chaleur à récupération de chaleur :

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_3 \text{ (III.21)}$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 \text{ (III.22)}$$

b. L'équation de bilan énergétique :

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \text{ (III.23)}$$

III.5.3. Générateur :

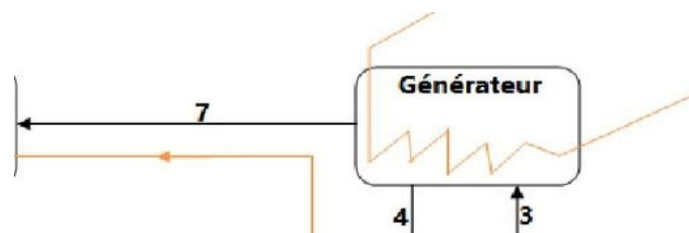


Figure III. 7:Schéma de générateur

a. Les équations de bilan de masse du générateur :

$$\Sigma \dot{m}_{in} = \Sigma \dot{m}_{out} \text{ (III.24)}$$

$$\dot{m}_3 = \dot{m}_4 + \dot{m}_7 \text{ (III.25)}$$

Et

$$\Sigma(\dot{m}x)_{in} = \Sigma(\dot{m}x)_{out} \quad \text{ (III.24)}$$

$$\dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_4 x_4 + \dot{m}_7 x_7 \text{ (III.26)}$$

Où x représente la concentration de la solution.

b. L'équation de bilan énergétique :

$$\sum(\dot{m}h)_{in} + \sum \dot{Q}_g = \sum(\dot{m}h)_{out} \quad \text{(III.27)}$$

$$\dot{m}_3 h_3 + \dot{Q}_g = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 \text{ (III.28)}$$

Où $\dot{Q}_g$ représente le taux de chaleur requis par le générateur.

III.5.4. Condenseur :

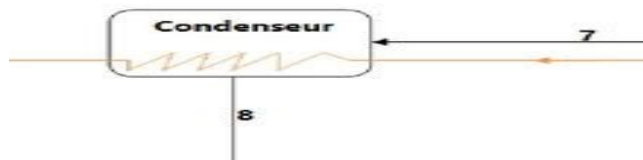


Figure III. 8:Schéma de condenseur

a. L'équation de bilan de masse pour le condenseur :

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \text{ (III.29)}$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 \quad \text{(III.30)}$$

b. L'équation de bilan énergétique :

$$\sum(\dot{m}h)_{in} = \sum(\dot{m}h)_{out} + \sum \dot{Q}_c \text{ (III.31)}$$

$$\dot{m}_7 h_7 = \dot{m}_8 h_8 + \dot{Q}_c \text{ (III.32)}$$

Où $\dot{Q}_c$ représente le taux de chaleur rejetée par le réfrigérant traversant le condenseur.

III.5.5. Évaporateur :

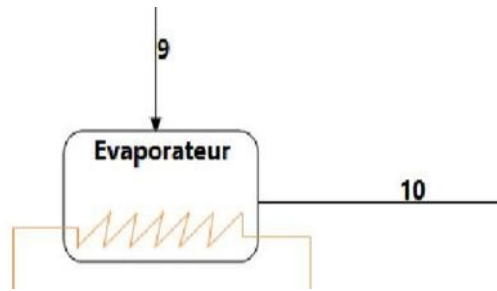


Figure III. 9:Schéma de Evaporateur

a. L'équation de bilan de masse pour l'évaporateur :

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (III.33)$$

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} \quad (III.34)$$

b. L'équation de bilan d'énergie :

$$\sum (\dot{m}h)_{in} + \sum \dot{Q}_e = \sum (\dot{m}h)_{out} \quad (III.35)$$

$$\dot{m}_9 h_9 + \dot{Q}_e = \dot{m}_{10} h_{10} \quad (III.36)$$

Où $\dot{Q}_e$ représente le taux de chaleur gagnée par le réfrigérant circulant à travers l'évaporateur.

III.5.6. Absorbeur :

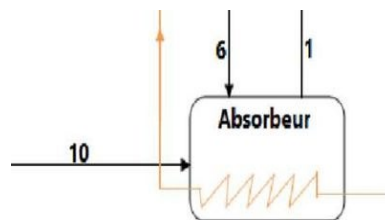


Figure III. 10:Schéma de l'absorbeur

a. L'équation de bilan de masse pour l'absorbeur :

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (III.37)$$

$$\dot{m}_{10} + \dot{m}_6 = \dot{m}_1 \quad (III.38)$$

b. L'équation de bilan d'énergie :

$$\sum (\dot{m}h)_{in} = \sum (\dot{m}h)_{out} + \sum \dot{Q}_a \quad (III.39)$$

$$\dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_6h_6 = \dot{m}_1h_1 + \dot{Q}_a \text{ (III.40)}$$

Où $\dot{Q}_a$ représente le taux de chaleur rejetée par l'absorbeur.

III.5.7. Valve d'expansion (pour la solution faible) :

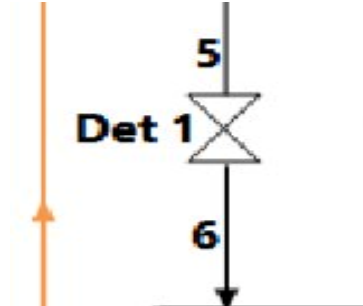


Figure III. 11: Schéma Valve d'expansion (pour la solution faible)

a. L'équation de bilan de masse pour la valve d'expansion de la solution faible :

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \text{ (III.41)}$$

b. L'équation de bilan d'énergie :

$$\dot{m}_5h_5 = \dot{m}_6h_6 \text{ (III.42)}$$

III.5.8. Valve d'expansion (pour le réfrigérant) :

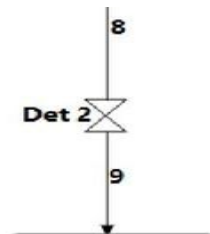


Figure III. 12: Schéma de Valve d'expansion (pour le réfrigérant)

a. L'équation de bilan de masse pour la valve d'expansion du réfrigérant :

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} \text{ (III.43)}$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_9 \text{ (III.44)}$$

b. L'équation de bilan d'énergie :

$$\sum(\dot{m}h)_{in} = \sum(\dot{m}h)_{out} \text{ (III.45)}$$

$$\dot{m}_8h_8 = \dot{m}_9h_9 \text{ (III.46)}$$

III.5.9. Les coefficients de performance énergétique :

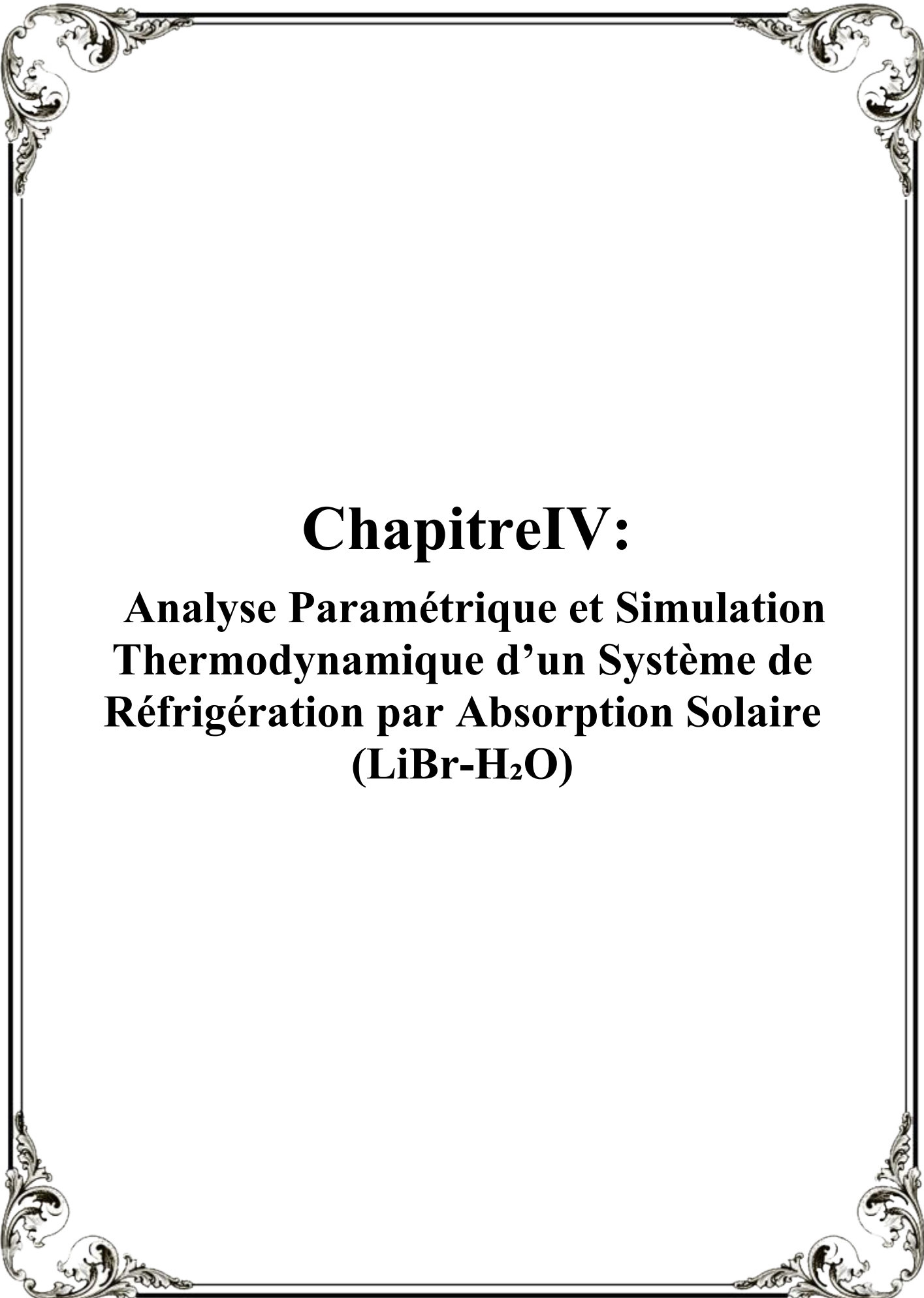
On évalue l'efficacité d'un système de réfrigération à absorption en se basant sur le coefficient de performance. On définit les coefficients de performance énergétique des systèmes de réfrigération par absorption comme étant

$$COP_{en} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + \dot{W}_p} \text{ (III.47)}$$

Où COP_{en} représente respectivement le COP énergétique .

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les éléments du système de réfrigération à absorption, en présentant l'analyse énergétique de chaque composant.



Chapitre IV:

Analyse Paramétrique et Simulation Thermodynamique d'un Système de Réfrigération par Absorption Solaire (LiBr-H₂O)

IV.1. Introduction:Analyse Paramétrique et Simulation Thermodynamique d'un Système de Réfrigération par Absorption Solaire (LiBr-H₂O)

Après une description détaillée du système de réfrigération par absorption à simple effet utilisant le couple LiBr-H₂O ainsi que des capteurs solaires utilisés comme source de chaleur, cette section présente une analyse paramétrique des performances thermodynamiques du système. L'ensemble des équations nécessaires au suivi de l'évolution thermodynamique à travers les différents composants a été établi, permettant ainsi une modélisation rigoureuse du fonctionnement global de l'installation.

L'étude se concentre principalement sur l'influence de la température d'entrée du générateur, de l'efficacité des échangeurs de chaleur et du débit massique de la pompe à solution sur les performances énergétiques du système. De plus, les performances du système sont évaluées sous les conditions climatiques caractéristiques de la ville de Tlemcen, en Algérie, en intégrant un capteur solaire plan comme principale source d'énergie thermique.

La modélisation thermodynamique a été réalisée à l'aide du logiciel Engineering Equation Solver (EES), permettant une simulation précise basée sur les propriétés thermophysiques du couple LiBr-H₂O. Les résultats de cette étude paramétrique ont été représentés graphiquement à l'aide du logiciel OriginPro, facilitant l'analyse et l'interprétation des évolutions de performance en fonction des paramètres opératoires.

Cette étude vise à fournir une évaluation approfondie de l'impact des paramètres clés sur la stabilité et l'efficacité des systèmes de refroidissement par absorption solaire, en vue d'optimiser leur conception pour une application durable dans des régions ensoleillées telles que Tlemcen.

IV.2. Description du logiciel EES :

Les calculs des paramètres thermodynamiques internes du turbopropulseur, ainsi que les études paramétriques ont été menées sous l'environnement du logiciel « EES ». EES (prononcé EASE, littéralement facilité) est l'abréviation de Engineering Equation Solver ou Solveur d'équations pour l'ingénierie. EES est un programme général de résolution d'équations capable de résoudre des centaines d'équations algébriques et différentielles non linéaires. EES a des fonctions intégrées pour les propriétés thermodynamiques et de transport de nombreuses substances et permet d'ajouter facilement des fonctions utilisateur (UDF, User Defined Functions). EES permet à l'utilisateur d'insérer des fonctions suivant plusieurs méthodes.

IV.3. Description du système de réfrigération par absorption à simple effet :

Comme le montre la Fig. 1, Le système de réfrigération par absorption à simple effet (LiBr-H₂O) se compose de quatre composants principaux : le générateur, le condenseur, l'évaporateur et l'absorbeur. Le générateur est alimenté par une source de chaleur renouvelable, permettant l'évaporation de l'eau contenue dans la solution aqueuse. La vapeur d'eau est ensuite condensée, détendue puis évaporée à nouveau dans l'évaporateur pour produire du froid. La vapeur est finalement absorbée par la solution concentrée de LiBr dans l'absorbeur, complétant ainsi le cycle. Ce système utilise un échangeur de chaleur pour améliorer son efficacité énergétique global.

L'intérêt principal du cycle à simple effet réside dans sa simplicité de conception, sa fiabilité et sa compatibilité avec des sources de chaleur à température modérée, telles que les capteurs solaires plans (FPC) Ce type de système est particulièrement adapté aux régions à forte irradiation solaire, comme c'est le cas à Tlemcen, en Algérie.

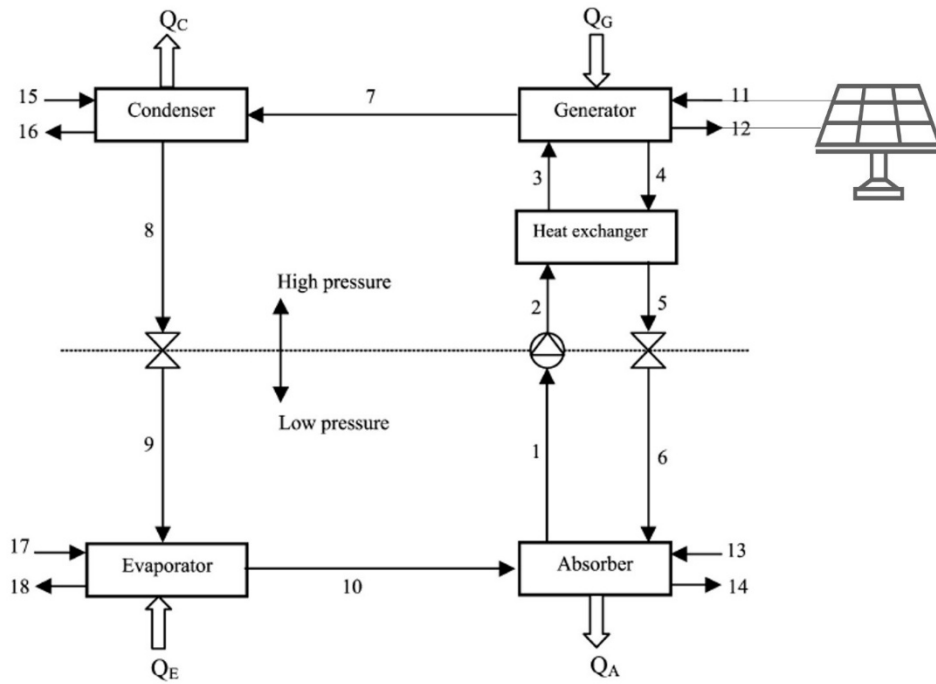


Figure IV. 1:Schéma du système de refroidissement par absorption solaire

IV.4. Conditions de fonctionnement pour le cycle simple effet :

Tableau IV. 1:conditions de fonctionnement pour le cycle réfrigération par absorption simple effet.

Nom de l'entrée	valeur	Nom de l'entrée	valeur
Eff_{hx}	0.6	T[13]	25 C°
m_1	0.07 kg/s	m_{13}	0.25 kg/s
UAa	1.55 kW/K	T[15]	35 C°
UAc	1.31 kW/K	m_{15}	0.25 kg/s
UAg	1 kW/K	T[11]	100 C°
UAe	2.225 kW/K	m_{11}	0.8 kg/s
Q[8]	0	T[17]	30 C°
Q[10]	1	m_{17}	0.32 kg/s

Le modèle simplifié du cycle à absorption à simple effet présume l'existence de deux niveaux de pression principaux dans le système, en négligeant les pertes de pression dans les tuyaux de raccordement. Cette simplification signifie que le désorbeur et le condenseur, de même que l'évaporateur et l'absorbeur, opèrent à des pressions équivalentes. La pression maximale est définie par la pression du liquide saturé à la fin du condenseur, alors que la pression minimale est fixée par la température du réfrigérant à la fin de l'évaporateur.

Dans le cas d'une machine à absorption simple utilisant le duo H₂O-LiBr, la pression élevée est généralement sous les 10 kPa en valeur absolue, ce qui indique que l'ensemble du dispositif fonctionne sous la pression atmosphérique. Cette caractéristique requiert une conception hermétique pour empêcher les pertes d'air. Les pressions faibles imposent aussi des restrictions lors de la conception des éléments, car il est nécessaire de réduire au minimum les pertes de charge visqueuses.

Tableau IV. 2:Résumé des état thermodynamique pour la simulation

Indiquer	état	Remarques
1	<i>Solution liquide saturée.</i>	Qualité de la vapeur réglée à 0 comme hypothèse.
2	<i>Solution liquide sous refroidie.</i>	Etat calculé à partir du modèle de pompe isentropique.
3	<i>Solution liquide sous refroidie.</i>	Etat calculé à partir du modèle d'échangeur de chaleur en solution.
4	<i>Solution liquide saturée.</i>	Qualité de la vapeur réglée à 0 comme hypothèse.
5	<i>Solution liquide sous refroidie.</i>	Etat calculé à partir du modèle d'échangeur de chaleur en solution.
6	Etat de la solution vapeur-liquide.	La vapeur clignote lorsque le liquide passe à travers le détendeur.
7	Vapeur d'eau surchauffée	Supposé avoir teneur nulle en sel.
8	Eau liquide saturée	Qualité de la vapeur réglée à 0 comme hypothèse.
9	<i>Etat de l'eau vapeur- liquide</i>	La vapeur clignote lorsque le liquide passe à travers le détendeur
10	Vapeur d'eau saturée.	Qualité de la vapeur fixée à 1 comme hypothèse.

IV.5. Influence de l'apport de chaleur :

Dans le fonctionnement d'une machine à absorption, toute modification d'une variable d'entrée engendre des ajustements dans toutes les autres variables dépendantes. Chaque fois qu'une entrée est modifiée, l'ensemble du cycle réagit afin d'atteindre un nouvel état d'équilibre opérationnel.

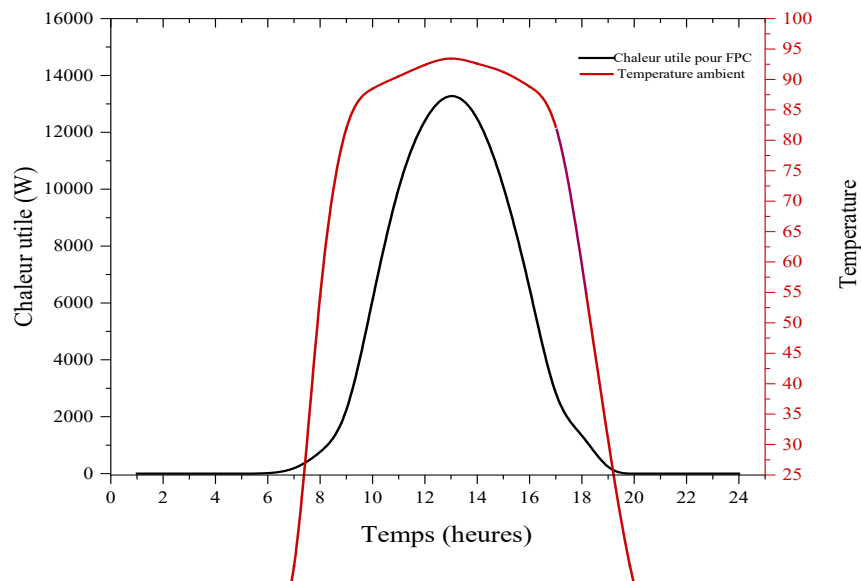


Figure IV. 2: Variation quotidienne du gain de chaleur utile et de la température de sortie du capteur à Tlemcen (10 juin 2022)

La figure 02 qui représente les changements de la chaleur utile et de la température ambiante en fonction du temps à Tlemcen, nous permet d'observer qu'il existe une relation directe entre la température ambiante et la chaleur utile, car plus la température est élevée pendant la journée, plus la quantité de chaleur pouvant être extraite est importante. Nous observons que la température ambiante part d'un minimum d'environ 20 °C en début de matinée (avant 6h), puis augmente progressivement jusqu'à un maximum d'environ 95 °C entre 12h et 14h, et diminue progressivement jusqu'à revenir à 0 °C dans la soirée après 18h. Quant à la chaleur utile, elle part de presque 0 W au petit matin pour commencer à augmenter après environ 6 heures, atteindre un pic d'environ 13 000 W entre 13 et 14 heures, puis diminuer progressivement jusqu'à revenir à 0 W après 18 heures. Le système dépend donc de la chaleur solaire ou de la chaleur environnementale, ce qui explique que son efficacité augmente pendant la journée et diminue la nuit.

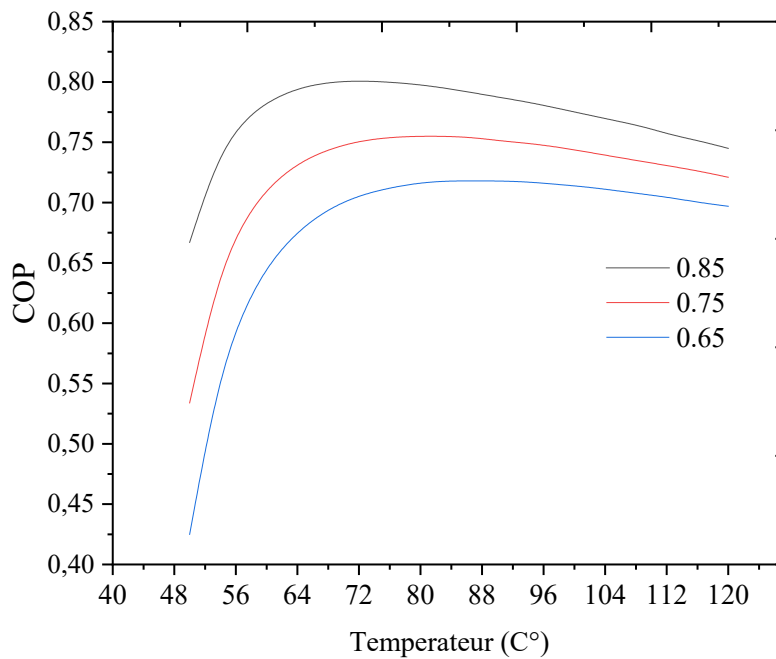


Figure IV. 3: les changements de coefficient de performance en fonction de la température de générateur

La figure 3 illustre l'effet de la température du générateur sur le coefficient de performance (COP) pour différentes efficacités de l'échangeur de chaleur (0,65 – 0,75 – 0,85). On remarque que le COP augmente avec l'élévation de la température du générateur jusqu'à atteindre une valeur maximale, au-delà de laquelle il commence à diminuer légèrement. Par ailleurs, on observe que le COP est plus élevé lorsque l'efficacité de l'échangeur de chaleur augmente. Une meilleure efficacité améliore la récupération de chaleur entre la solution riche et pauvre, ce qui réduit les besoins en énergie thermique au niveau du générateur, et donc améliore la performance globale du système.

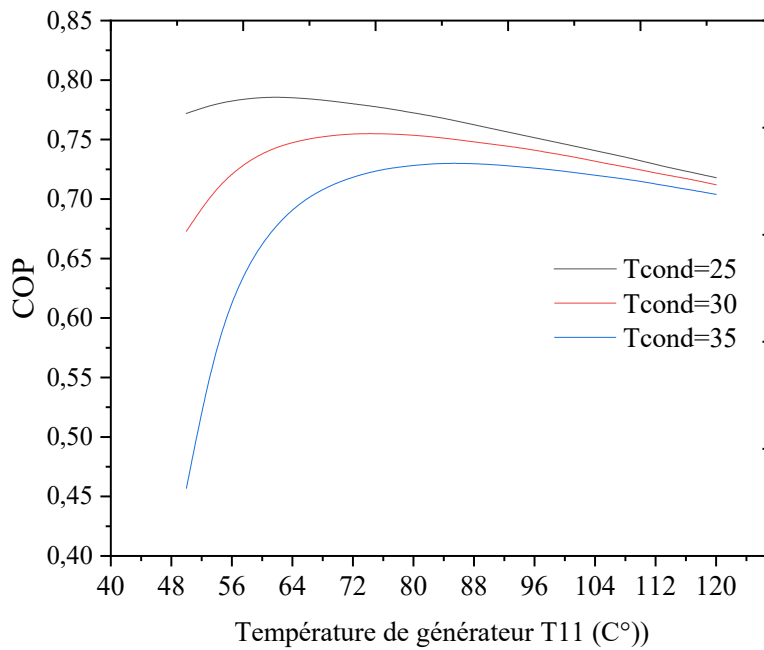


Figure IV. 4 : les changements de COP en fonction de la température du générateur pour différentes températures de condensation.

La figure 4 illustre l'effet de la température du générateur sur le COP pour différentes températures de condensation (25°C, 30°C, 35°C). On remarque que le COP augmente avec la température du générateur jusqu'à un maximum, puis diminue légèrement. De plus, une température de condensation plus faible permet d'obtenir un COP plus élevé, car elle facilite le rejet de chaleur et améliore le rendement global du système.

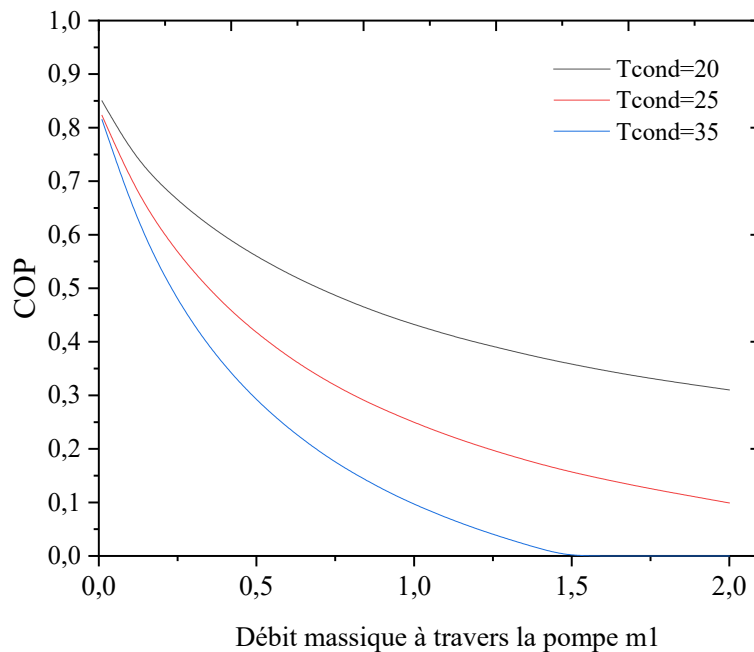


Figure IV. 5 : les changements de COP en fonction du débit massique pour différentes températures de condensation

La figure 5 illustre l'effet du débit massique à travers la pompe sur le coefficient de performance (COP) pour différentes températures de condensation (, et). On remarque que le COP diminue lorsque le débit massique augmente, et ce pour toutes les températures considérées. Par ailleurs, on observe que le COP est plus élevé pour une température de condensation plus faible. En effet, une réduite diminue la charge thermique au niveau du condenseur, ce qui améliore la performance globale du système. À l'inverse, une plus élevée entraîne une baisse notable du COP

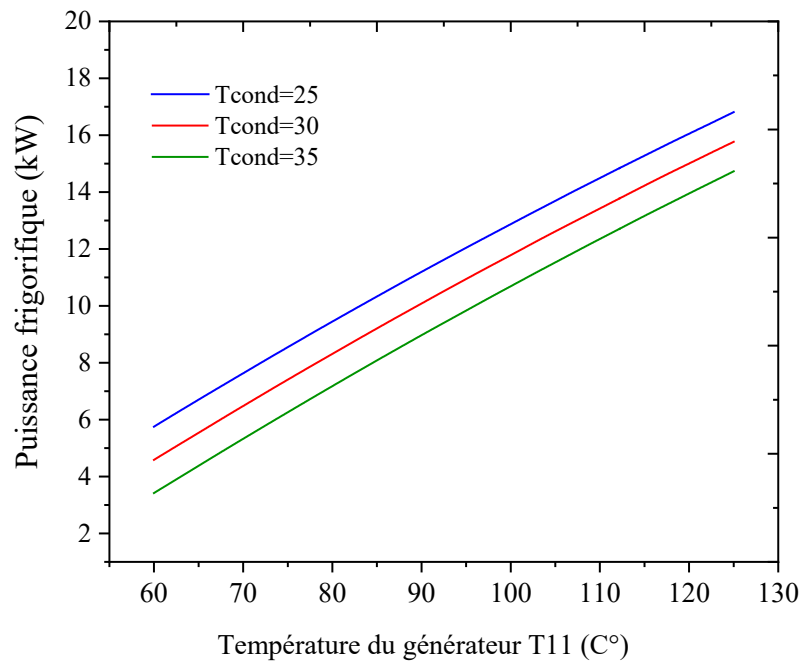


Figure IV. 6 : les changements de la puissance frigorifique en fonction de la température du générateur T11

La figure 6 illustre l'effet de la température du générateur T11 sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condensation (25°C – 30°C – 35°C). On remarque que la puissance frigorifique augmente de manière quasi linéaire avec l'élévation de la température du générateur. Par ailleurs, on observe que la puissance est plus élevée lorsque la température de condensation est faible (Tcond = 25°C), et diminue progressivement lorsque cette température augmente (Tcond = 30°C puis 35°C). En effet, une température de condensation plus basse réduit l'effort de rejet de chaleur au condenseur, ce qui améliore la capacité de production de froid du système.

La figure IV. 7 illustre l'effet de la température du générateur T11 sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser (25°C , 30°C , 35°C). On remarque que la puissance frigorifique augmente de manière quasi linéaire avec l'élévation de la température du générateur. Par ailleurs, on observe que la puissance est plus élevée lorsque la température de condensation est faible (Tcond = 25°C), et diminue progressivement lorsque cette température augmente (Tcond = 30°C puis 35°C). En effet, une température de condensation plus basse réduit l'effort de rejet de chaleur au condenseur, ce qui améliore la capacité de production de froid du système.

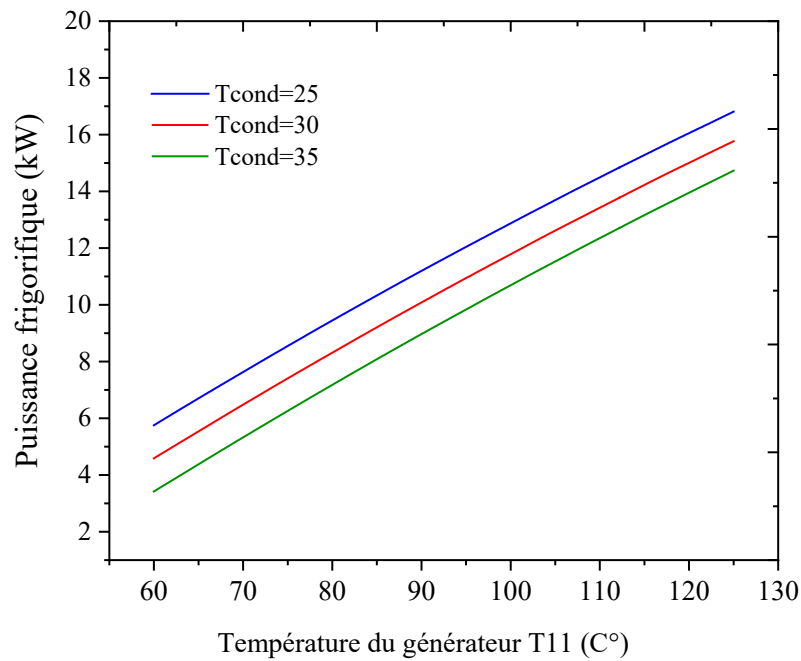


Figure IV. 7 : l'effet de la température du générateur T11 sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser

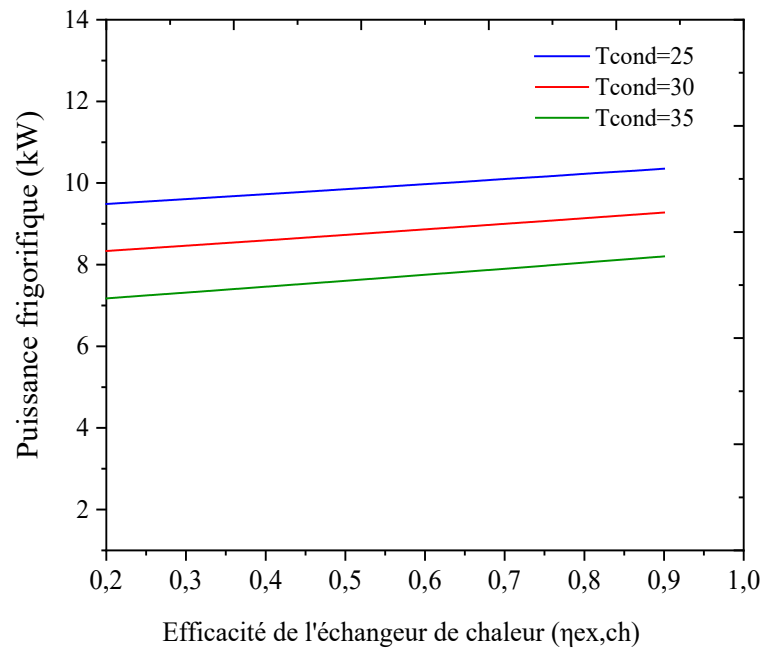


Figure IV. 8 : l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ($\eta_{ex,ch}$) sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser

La figureIV. 8 illustre l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur ($\eta_{ex,ch}$) sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser (25°C , 30°C ,35°C). On remarque que la puissance frigorifique augmente légèrement avec l'amélioration de l'efficacité de l'échangeur. Par ailleurs, on observe qu'elle diminue lorsque la température de condensation s'élève. Une meilleure efficacité combinée à une faible température de condensation permet donc d'obtenir les meilleures performances frigorifiques du système.

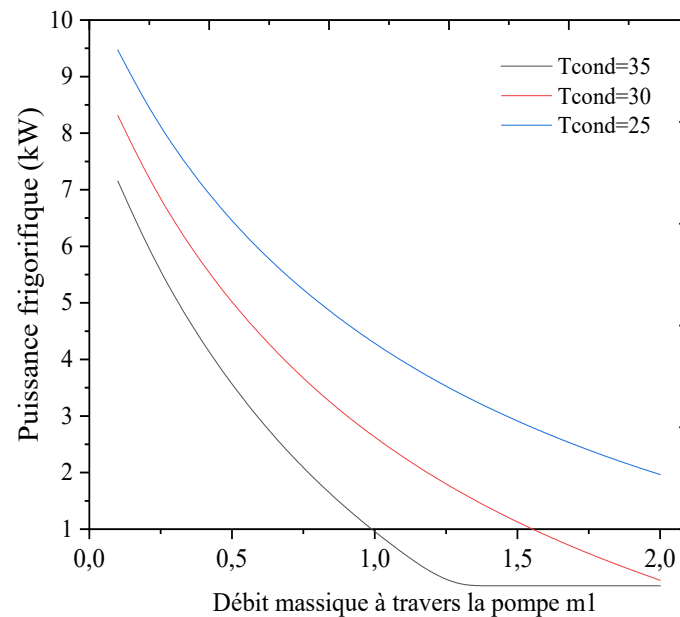


Figure IV. 9 : l'effet du débit massique à travers la pompe $\dot{m}_1$ sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser

La figureIV. 9 montre l'effet du débit massique à travers la pompe $\dot{m}_1$ sur la puissance frigorifique pour différentes températures de condenser. On observe que la puissance diminue avec l'augmentation du débit, et qu'elle est plus élevée pour une température de condensation plus faible (25 °C). Ainsi, une puissance frigorifique optimale est obtenue avec un faible débit et une basse température de condensation.

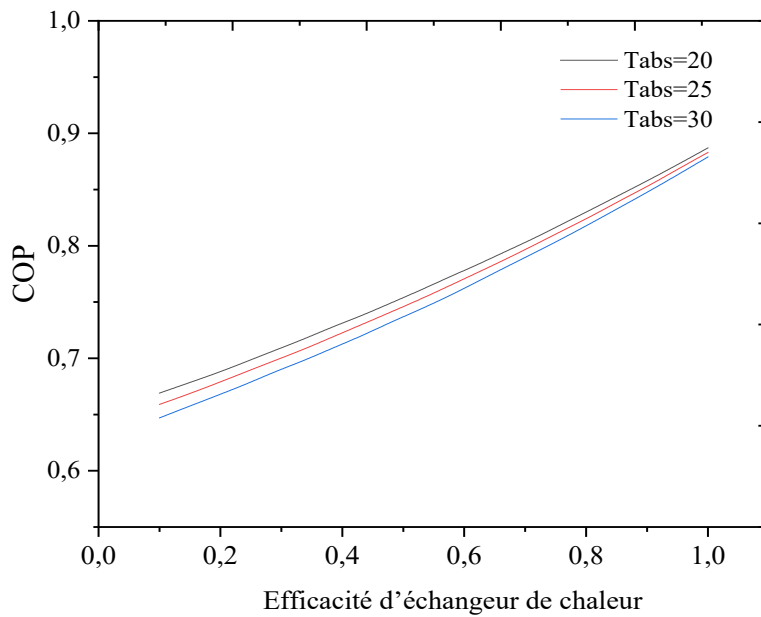


Figure IV. 10 : illustre l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur le coefficient de performance (COP) pour différentes températures d'absorber

La figure IV. 10 : illustre l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur le coefficient de performance (COP) pour différentes températures d'absorber ($T_{bs} = 20, 25$ et 30 °C). On remarque que le COP croît progressivement avec l'augmentation de l'efficacité de l'échangeur, ce qui traduit une meilleure récupération de chaleur entre la solution riche et la solution pauvre. Par ailleurs, on observe que le COP est légèrement plus élevé pour des températures de bulbe sec plus faibles, indiquant une influence modérée des conditions extérieures sur la performance du système. Globalement, une amélioration de l'efficacité de l'échangeur permet donc d'optimiser le rendement du cycle.

La figure IV. 11 illustre l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur la puissance frigorifique pour différentes températures d'absorber ($T_{bs} = 20, 25$ et 30 °C). On constate que la puissance frigorifique augmente avec l'amélioration de l'efficacité de l'échangeur, traduisant une meilleure récupération de chaleur et donc une capacité accrue du système à produire du froid. Par ailleurs, on observe que la puissance frigorifique est plus élevée pour des températures de bulbe sec plus faibles, ce qui met en évidence l'influence défavorable de la hausse de la température extérieure sur la performance de la machine frigorifique.

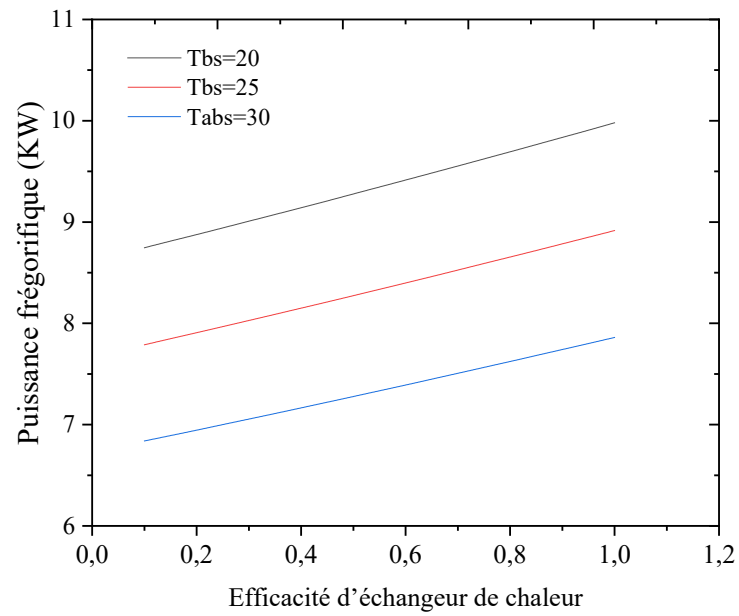
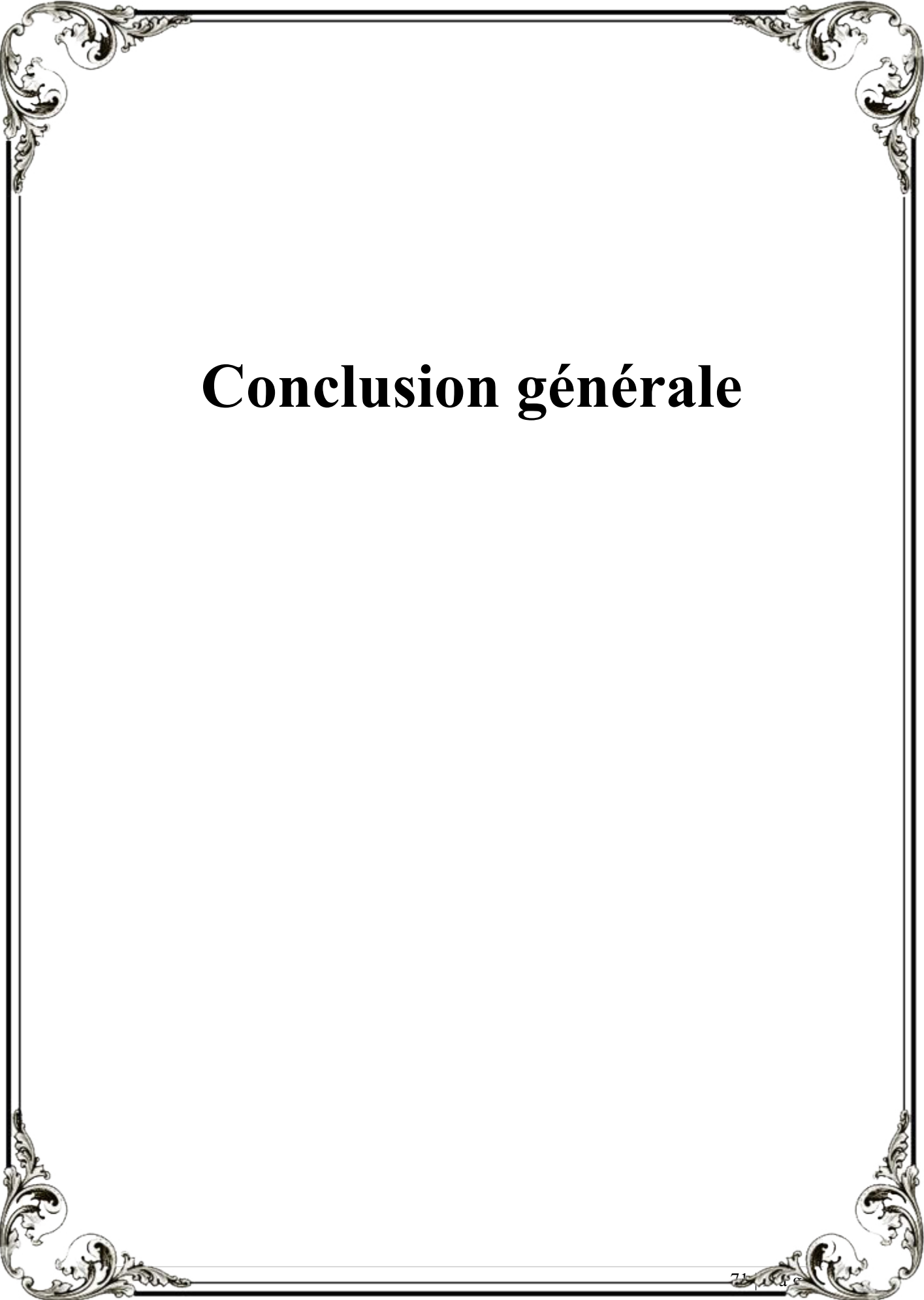


Figure IV. 11 :l'effet de l'efficacité de l'échangeur de chaleur sur la puissance frigorifique pour différentes températures d'absorber



Conclusion générale

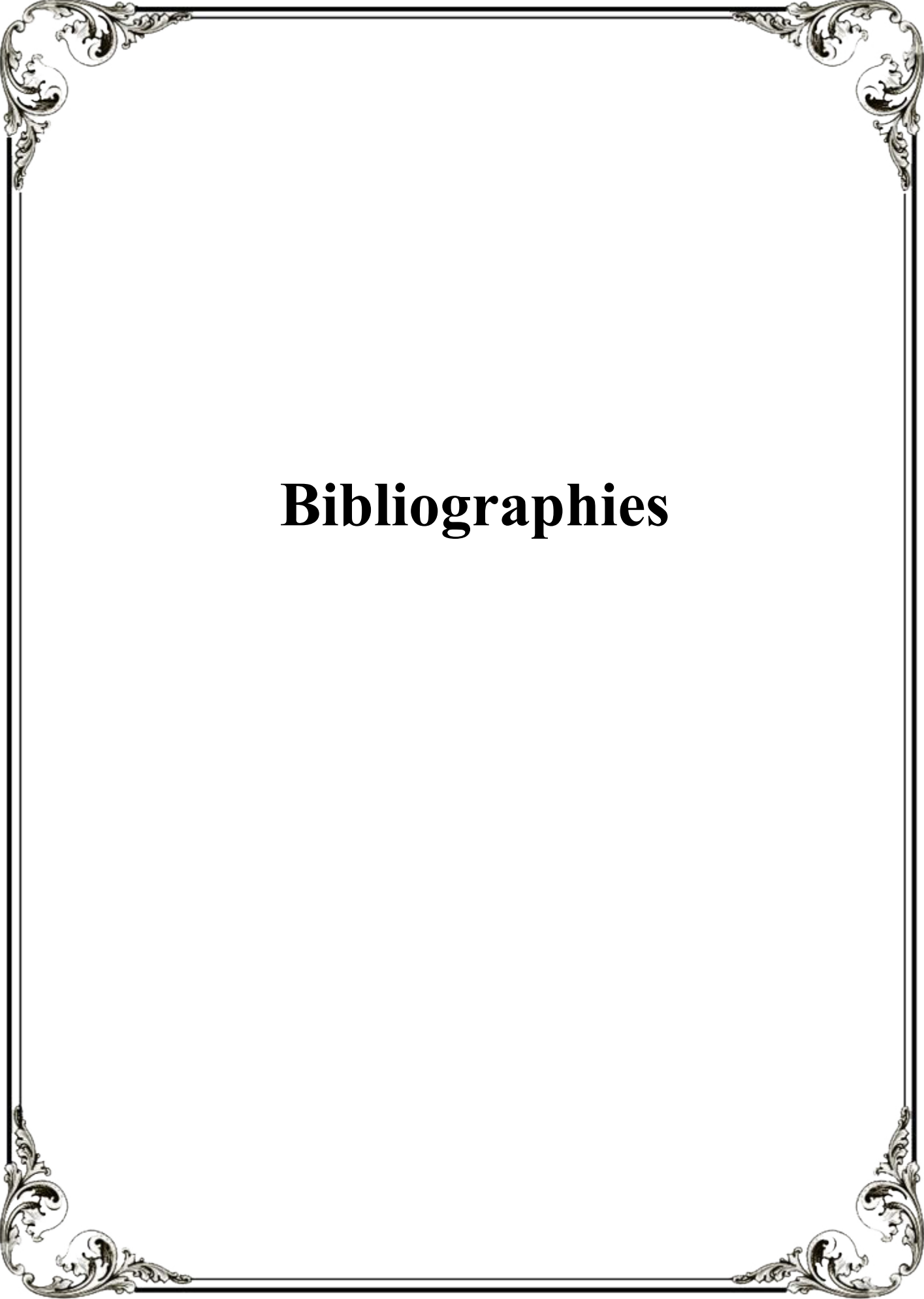
Conclusion générale :

Ce travail a porté sur l'étude des performances d'un système de réfrigération à absorption à simple effet utilisant le couple eau-bromure de lithium ($\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$), alimenté par des capteurs solaires plans, dans les conditions climatiques de Tlemcen. L'analyse a permis de mettre en évidence la faisabilité et l'efficacité d'une telle solution, capable de répondre aux besoins en froid tout en valorisant une ressource énergétique locale, abondante et renouvelable.

Dans un premier temps, nous avons étudié les fondements de l'énergie solaire, ses différentes formes (thermique et thermodynamique), ainsi que les capteurs solaires et leurs composants. Ensuite, nous avons présenté les types de systèmes frigorifiques, en mettant l'accent sur le fonctionnement des cycles à absorption (simple, double et triple effet), comparés aux systèmes à compression et adsorption. Le troisième chapitre s'est appuyé sur l'analyse thermodynamique des différents composants du cycle d'absorption, avec élaboration des équations de bilan d'énergie et de masse. Enfin, une étude numérique appliquée aux conditions climatiques de Tlemcen a été menée grâce aux logiciels EES et OriginPro, permettant de simuler les performances du système et d'analyser graphiquement l'influence de plusieurs paramètres.

Les résultats obtenus confirment que le système à absorption est techniquement viable et particulièrement bien adapté aux régions fortement ensoleillées. Le coefficient de performance (COP) augmente avec la température du générateur jusqu'à un optimum situé autour de 75 °C, avant de décliner. Par ailleurs, l'augmentation du débit massique entraîne une baisse du COP, ce qui suggère une meilleure efficacité à faible débit. L'efficacité des échangeurs de chaleur améliore directement les performances, et les résultats ont également montré que la performance globale dépend étroitement de l'ensoleillement quotidien. Enfin, il a été constaté que la réduction de la température de refroidissement au niveau du condenseur et de l'absorbeur améliore significativement le rendement du système,

Ainsi, cette étude a mis en évidence l'importance de l'ajustement des paramètres de fonctionnement à travers la simulation numérique, comme outil essentiel pour l'optimisation du système. Pour l'avenir, il serait pertinent d'étendre les recherches vers des systèmes hybrides (solaire/biomasse ou solaire/géothermie) et d'explorer de nouveaux couples frigorigènes/absorbants plus performants et respectueux de l'environnement, afin d'augmenter l'efficacité et la durabilité des systèmes de réfrigération solaire.



Bibliographies

Bibliographies

- [1] M.A. Hadj Ammar, B. Benhaoua, F. Bouras, Thermodynamic analysis and performance of an adsorption refrigeration system driven by solar collector. *Applied Thermal Engineering* 112 (2017) 1289-1296
- [2] HADJ AMMAR Mohammed Ali, MENECEUR Nouredine, Rendement d'un capteur solaire a simple vitrage et a double vitrage "étude et comparaison". *Journal of Scientific Research* N° 0 vol. 1 (2010).
- [3] R, Bernard G, menguy M, Schwartz " Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications " , Technique et Documentation. (1979).
- [4] ABBASEEN Lyes, 'Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque,' Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, Algérie, 2013
- [5] Amraoui Mohammed Amine, "Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité", mémoire de magister en génie mécanique, p 48,49,53,56,(2011-1012)
- [6] Akermi Mustapha, "Contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de Tiaret et Adrar", mémoire de Magister en Physique, p65
- [7] Abdelaoui Med Khimmusti et Guricha Foud, "Etude expérimentale d'un bassin d'eau Utilisé comme capteur solaire plan", d'ingénieur d'état universite d'Ouargla.
- [8] J, Bernard," Energie solaire calculs et optimisation", Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [9] A, H, Khedim, "Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et Photovoltaïque", Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [10] J, Bonal; P, Rossetti, " Les énergies alternatives", Omniscience. (2007).
- [11] S, El Mokretar; R, Miri; M, Belhamel, " Etude du bilan d'énergie et de masse d'un Séchoir de type serre", applications au séchage des produits agro-alimentaires, *Revue des Énergies renouvelables*, Vol 7, p 109,123. (2004).
- [12] A, Sfeir ; G, Guarracino,"Ingénierie des systèmes solaires", Technique et documentation, Paris. (1981).
- [13] Saadi Souad, " effet des paramètres opérationnels sur les performances d' un capteur Solaire plan" , Mémoire de Magistère en physique, p 25, (2010).
- [14] EL Almers. A, 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, thèse de Doctorat, Tetouan, 2002.
- [15] Meunier F, La sorption solide: une alternative au CFCs I.I.F-IJ.R, commission BI, Paris (1992) 56-64.
- [16] Sarbu I, Sebarchievici. C, Review of solar refrigeration and cooling systems. *Energy Building* 67 (2013) 286-97.
- [17] Li Z. F, Sumathy K, Simulation of a solar absorption air conditioning system, *Energy Conversion and Management* 42 (2001) 313-327
- [18] Srihirin P, S. Aphornratana, S. Chungpaibulpatana, A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5 (2001) 343-3.

- [19] Marcriss R, Gutraj J, Zawacki T, Absorption fluid datasurvey: final report on worldwide data, ORLN/sub/8447989/3.Inst.GasTech1988.
- [20] Ayou. D. S, Bruno. J. C, Saravanan. R, Coronas. A, An overview of combined absorption power and cooling cycles. Renewable and Sustainable Energy Reviews 21 (2013) 728-48.
- [21] Le goff P, *Energétique industrielle, Technique et documentation*, 1, Paris 1979.
- [22] Kang Y. T, Akisawa A, Kashiwagi T, Experimental correlation of combined heat and mass transfer for NH₃-H₂O falling film absorption, *Int. Journal of Refrigeration*, 22 (1999) 250-262.
- [23] Mouad D, *Étude du fonctionnement d'une machine frigorifique a adsorption modelisation des transferts de chaleur et de masse et optimisation du fonctionnement de la machine*, thèse de doctorat, Université henri poincaré, Nancy (1) 1996.
- [24] Castro J, Oleit C, Schweiger H, Oliva A, Application of two-dimensional model for the study of water vapour absorption in falling films of LiBr aqueous solutions with the action of a surfactant, *ECCOMAS 98*, Published by John Wiley & Sons, Ltd, 1998.
- [25] Mimet A, *Étude théorique et expérimentale d'une machine frigorifique à adsorption d'ammoniac sur charbon actif*, thèse de doctorat. FPMS Mons, Belgique 1991.
- [26] Ullah K. R, Saidur R, Ping H. W, Akikur R. K, N. H. Shuvo, A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews 24 (2013) 499-513.
- [27] Chekirou. W, *Étude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption*, thèse de doctorat, Constantine, 2008.
- [28] Passos E, Meunier F, Gianola J. C, Thermodynamic performance improvement of an intermittent solar-powered refrigeration cycle using adsorption of methanol on activated carbon, *heat recov System*, 6 (1986) 259-264.
- [29] R. E. Critoph, Performance limitations of adsorption cycles for solar cooling, *Solar energy*, 41 (1988) 21-31.
- [30] R. E. Critoph, Activated carbon adsorption cycles for refrigeration and heat pumping. *Carbon*, 27 (1989) 63-70.
- [31] Hu. Jing et R. H. B. Exell, Adsorptive properties of activated charcoal/methanol combination. *Renewable Energy*, 3 (1993) 567-575.
- [32] Blanco P. Absorption heatpump performance for different types of solution, *int J. of Refrig*, 1984 vol.7, N°2, PP115-122.
- [33] Eisa, M.A.R et al. A study of the optimum interaction between the working fluid and absorbent in absorption heat pumpsystems.Heat Recovery system&CHP, 1987 vol.7, N°2, pp.107-117.
- [34] Holmberg, Petal. Alternative working fluids in heat transformers.ASHRAETrans, 1990 vol.96, pp.1582-1589.
- [35] Hassan H, Mohamad A. A, A review on solar cold production through absorption technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 5331-5348.
- [36] Aphornratana S, *Theoretical and Experimental Investigation of a Combined Ejector Absorption Refrigerator* Department of Mechanical and Process Engineering, University of Sheffield, 1994.
- [37] M. Lawson, R. Lithgow, G. Vliet, Water-lithium bromide double-effect absorption cooling cycle analysis, *ASHRAE Transaction* 88 (1982) 811-823.
- [38] Srihirin P, Aphornratana S, Chungpaibulpatana S, A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5 (2001) 343-72.
- [39] *Handbook . ASHRAE, HVAC Systems and equipment*, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2012.
- [40] Sarbu I, Sebarchievici. C, Review of solar refrigeration and cooling systems. *Energy Building* 67 (2013) 286-97
- [41] Zohar A, Jelinek M, Levy A, Borde I, The influence of diffusion absorption refrigeration cycle configuration on the performance. *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 2213-9.
- [42] JANNOT Yves : *Thermique solaire*.2003

- [43] CHABBI ABDE ALLAH. Evaluation des performances du cycle d'une machine frigorifique solaire aejecto-compression fonctionnent au R141b. Mémoire de Master : Université badji Mokhtar – Annaba, 2012.
- [44] http://www.lemonde.fr/planete/article/2011/11/09/les-emissions-de-co2-pourraient-augmenter-de-20-d-ici-a-2035_1601285_3244.html
- [45] G.A. Florides, , S. (2002). Design and construction of a LiBr–water absorption machine . Wrobel
- [46] KOVATS, R.S., AND HAINES, A., “global climate change and health: recent findings and future steps” cmaj [journal de l'association médicale canadienne], 15 FÉVRIER 2005; 172 (4).
- [49] la convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique.
- [50] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ...
- [51] <https://solargis.com>