

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID - TLEMCEM –

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Pour l'obtention de diplôme

MASTER

Spécialité

GENIE ENERGETIQUE

Présenté par :

Hadj Abdelkader Meryem

Ben Zenine Fadéla

Thème :

Modélisation des composants d'un système de rafraîchissement solaire à absorption

SAIM.R	Président	MCA	Université de Tlemcen
SELADJIC	Examineur	MCA	Université de Tlemcen
BENRAMDANE.M	Examineur	MAA	Université de Tlemcen
ALLIANE.A	Encadreur	MAA	Université de Tlemcen
GUENDOUZ.B	Co- Encadreur	Doctorant	Université de Tlemcen

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2012-2013

Remerciements

Le présent travail a été élaboré au sein de l'université d'Abou Bakr Belkaid de Tlemcen, faculté de technologie département de génie Mécanique.

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier nos encadreur Mr: Alliane Abd-nour et Mr:Guendouz bouhellal, pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port. Que ces derniers trouvent dans ce travail un hommage vivant à leurs hautes personnalités.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

H. Meryem.....

B. Fadéla....

Dédicaces

*A cœur vaillant rien d'impossible
A conscience tranquille tout est accessible
Quand il y a la soif d'apprendre
Tout vient à point à qui sait attendre
Quand il y a le souci de réaliser un dessein
Tout devient facile pour arriver à nos fins
Malgré les obstacles qui s'opposent
En dépit des difficultés qui s'interposent
Les études sont avant tout
Notre unique et seul atout
Ils représentent la lumière de notre existence
L'étoile brillante de notre réjouissance
Espérant des lendemains épiques
Un avenir glorieux et magique
Souhaitant que le fruit de nos efforts fournis
Jour et nuit, nous mènera vers le bonheur fleuri*

Aujourd'hui, ici rassemblés auprès des jurys,

Nous prions dieu que cette soutenance

Fera signe de persévérance

Et que nous serions enchantés

Par notre travail honoré .

Nous dédions cette thèse à ...

***** Nos chers parents*****

Affables, honorables, aimables : vous représentez pour nous le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'ont pas cessé de nous encourager et de prier pour nous.

vos prières et vos bénédictions nous ont été d'un grand secours pour mener à bien nos études.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de nous donner depuis notre naissance, durant notre enfance et même à l'âge adulte.

Nous vous dédions ce travail en témoignage de notre profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, vous réserver et vous accorder santé, longue vie et bonheur.

*****nos chers collègues*****

En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, nous vous dédions ce travail et nous vous souhaitons une vie pleine de santé et de bonheur.

Résumé – Abstract - ملخص

Résumé :

Avec le développement de la technologie et de la croissance rapide de la population mondiale, la demande de l'énergie ne cesse d'augmenter. L'Énergie conventionnelle ne sera pas suffisante pour répondre aux besoins croissants de l'énergie à l'avenir. Dans ce cas, les sources d'énergie renouvelables deviendront importantes. L'énergie solaire est une source d'énergie très importante en raison de ses avantages. Au lieu d'un système à compression, qui utilise de l'électricité pour son fonctionnement, un système de refroidissement par absorption, utilisant l'énergie renouvelable et autres types d'énergie thermique, peut être utilisé pour le refroidissement. Dans cette étude, une modélisation des composants d'un système de rafraîchissement solaire, à absorption, simple effet, utilisant une solution d'eau et de bromure de lithium, est faite. L'objectif de cette étude est de présenter une méthode pour évaluer les caractéristiques et les performances d'une machine à absorption simple effet, fonctionnant avec le mélange binaire bromure de lithium (absorbant) / eau (fluide frigorigène). La chaleur nécessaire et des équations de transfert de masse et des équations appropriées décrivant les propriétés des fluides actifs sont spécifiées. Ces équations sont utilisées dans un programme informatique, d'où une analyse de sensibilité est effectuée. La différence entre le rapport en pourcentage de LiBr à l'entrée et la sortie de l'absorbeur, le coefficient de performance (COP) de l'unité par rapport à la température du générateur, L'efficacité de l'unité par rapport à la surface d'échangeur de chaleur et l'efficacité de la concentration de la solution par rapport à la température de sortie de la solution dans l'absorbeur sont examinées.

Mots-clés: *énergie solaire, refroidissement ; Absorption; modélisation.*

Abstract:

With developing technology and the rapid increase in world population, the demand for energy is ever increasing. Conventional energy will not be enough to meet the continuously increasing need for energy in the future. In this case, renewable energy sources will become important. Solar energy is a very important energy source because of its advantages. Instead of a compressor system, which uses electricity, an absorption cooling system, using renewable energy and kinds of waste heat energy, may be used for cooling. In this study, a modeling of components of solar-powered single stage absorption cooling system, using a water–lithium bromide solution, is done. The objective of this study is to present a method to evaluate the characteristics and performance of a single stage lithium bromide (LiBr)–water absorption machine. The necessary heat and mass transfer equations and appropriate equations describing the properties of the working fluids are specified. These equations are employed in a computer program, and a sensitivity analysis is performed. The difference between the absorber LiBr inlet and outlet percentage ratio, the coefficient of performance (COP) of the unit in relation to the generator temperature, the efficiency of the unit in relation to the solution heat exchanger area and the solution strength effectiveness in relation to the absorber solution outlet temperature are examined.

Keywords: *Solar energy; Cooling; Absorption; modeling.*

ملخص:

مع أخذ تطور التكنولوجيا و النمو السريع لسكان العالم، فإن طلب الطاقة في الازدياد. الطاقة التقليدية لن تكون كافية لتلبية الاحتياجات المتزايدة للطاقة في المستقبل. في هذا الحالة، مصادر الطاقة المتجددة سوف تصبح مهمة. الطاقة الشمسية هي مصدر مهم للطاقة لها فوائد كثيرة. بدلا من نظام الضاغط الذي يستخدم الكهرباء لتشغيل، نظام التبريد عن طريق الامتصاص، وذلك باستخدام الطاقة المتجددة وأنواع أخرى من الطاقة الحرارية يمكن استخدامها للتبريد.

الشمسية عن طريق الامتصاص احادي التأثير لتبريد انتظاما لمكون نمذجة إجراء تم الدراسة، هذه في، وذلك باستخدام محلول الماء و بروميد الليثيوم. الهدف من هذا الدراسة هو تقديم طريقة لتقييم خصائص أداء آلة امتصاص احادي التأثير. الهدف من هذا الدراسة هو تقديم طريقة لتقييم خصائص أداء آلة امتصاص احادي التأثير التي تعمل بواسطة خليط ثنائي بروميد الليثيوم (ماص) / الماء (مبرد). يتم تحديد الحرارة اللازمة ومعادلات انتقال الكتلة و المعادلات المناسبة التي تصف خصائص السوائل لعمل. وتستخدم هذا المعادلات لتغيير نماذجها سوبي، حيث يتم إجراء تحليل تأثير مختلف المتغيرات، كلمات البحث: الطاقة الشمسية، التبريد، الامتصاص، النمذجة.

Sommaire

Resumé :	4
Introduction générale :	4

CHAPITRE I : La climatisation solaire dans le tissu énergétique mondiale.

Introduction :	4
I.1 Enjeux économique et environnemental :	5
I.2 Effets environnementaux : Changement climatique :	6
I.2.1 Les réserves énergétiques mondiales:	6
I.2.2 La consommation énergétique mondiale :	7
I.2.3 La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment :	9
I.3 La prise en compte des contraintes environnementales :	11
I.3.1 Le développement durable :	11
I.3.2 Le scénario d'évolution énergétique :	16
I.3.3 Le recours aux énergies renouvelables :	17
I.4 Le gisement solaire :	18
I.4.1 L'exploitation de l'énergie solaire :	18
I.4.2 Aspects géométriques:	20
I.4.3 Aspects énergétiques :	24
I.5 Contexte national :	27
I.5.1 Situation géographique :	27
I.5.2 Le potentiel national en énergies renouvelables :	28
Conclusion :	30
Bibliographie :	31

CHAPITRE II : Analyse des différents systèmes de rafraichissement solaire

Introduction:	33
I.1 Rafraichissement solaire :	33
I.1.1 L'état de l'art de la climatisation solaire:	34
I.1.2 Principes généraux de climatisation:	35

I.1.3	Avantages et inconvénients de la climatisation solaire :.....	36
I.2	Techniques de Production de froid solaire :	37
I.2.1	Rafrachissement par le solaire photovoltaïque :.....	38
I.2.2	L'état de l'art des systèmes de rafraichissement thermique :	44
I.2.2.1	Rafrachissement solaire thermomécanique :.....	45
I.2.2.2	Rafrachissement par sorption :.....	47
I.2.2.2.1	Absorption :	50
I.2.2.2.2	Adsorption :	51
I.2.2.2.3	Dessicantcooling :.....	53
I.2.3	Avantages et inconvénients de chaque technique :.....	57
I.2.4	Les aspects économiques des systèmes de climatisation solaire :	57
I.2.5	Les capteurs solaires thermiques utilisés pour les systèmes de climatisation solaire :.....	59
I.2.6	Nouvelles technologies de refroidissement :	62
I.2.7	Revue des installations de climatisation solaire dans le monde :	63
I.3	Les modèles dynamiques :	64
Conclusion :	65
Bibliographie :	66

CHAPITRE III : Modélisation des composants d'un système de rafraichissement par absorption.

Introduction :	71
III.1	Rafrachissement par absorption :.....	71
III.2	Absorption par LiBr-H ₂ O :	73
III.2.1	Présentation du modèle :	74
III.2.2	Hypothèses :	74
III.2.3	Analyses des composants :.....	76
III.2.3.1	Évaporateur :.....	76
III.2.3.2	Absorbeur :.....	77
III.2.3.3	Générateur (désorbeur) :	79
III.2.3.4	Condenseur :	80
III.2.3.5	Coefficient de performance :	80

III.2.4	Programmation MATLAB :	82
III.2.5	Analyse paramétrique :	84
III.2.5.1	Effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur :	84
III.2.5.2	Effet de la température du générateur :	86
III.2.5.3	Effet de la température de l'échangeur thermique :	87
III.2.5.4	Effet de la concentration de la solution :	89
III.3	Cristallisation :	91
Conclusion :	93
Bibliographie.....	96
Conclusion générale :

Liste des figures & tableaux

Listes des figures :

Chapitre I

Figure I. 1: <i>procédé thermodynamique de la production du froid solaire.</i>	5
Figure I. 2: <i>Réserves énergétiques mondiales de combustibles fossiles.</i>	7
Figure I. 3 : <i>Évolution de la consommation d'énergie primaire</i>	8
Figure I. 4 : <i>Évolution de la production électrique renouvelable scénario évolution énergétique, par source.</i>	9
Figure I. 5 : <i>Prospective de l'évolution de la demande en énergie finale du secteur des bâtiments dans le monde.</i>	10
Figure I. 6 : <i>Les mesures et des technologies de pointe existantes pour placer le monde sur une trajectoire de réchauffement de 2°C</i>	13
Figure I. 7 : <i>Demande mondiale d'énergie finale prévue par secteur dans référence et de évolution énergétique.</i>	17
Figure I. 8 : <i>Part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique mondiale finale en 2010</i> ^[12]	18
Figure I. 9 : <i>Schéma représentant la part de la consommation énergétique globale devant le gisement solaire.</i>	19
Figure I. 10 : <i>Rayonnement solaire dans le monde</i>	20
Figure I. 11 : <i>Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.</i>	21
Figure I. 12 : <i>Coordonnées terrestres.</i>	22
Figure I. 13 : <i>Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L.</i>	23
Figure I. 14 : <i>Coordonnées solaire selon le repère horizontal.</i>	24
Figure I. 15 : <i>La répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.</i>	25
Figure I. 16: <i>Puissance ratonnée quotidiennement par le soleil sur une année.</i>	26
Figure I. 17 : <i>Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur l'énergie rayonnée.</i>	27
Figure I. 18 : <i>La situation géographique de l'Algérie.</i>	27
Figure I. 19 : <i>Programme des énergies renouvelables Pénétration des ENR dans la production nationale</i>	28

Chapitre II

Figure II.1: <i>Adéquation entre la présence de soleil et besoin en climatisation.</i>	34
Figure II. 2: <i>Comparaison entre les systèmes de la climatisation solaire et la climatisation conventionnelle</i>	37
Figure II.3 : <i>Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque.</i>	39
Figure II.4: <i>Schéma d'un climatiseur à compression électrique à base solaire.</i>	40
Figure II.5: <i>Schéma représente l'usage direct de l'énergie solaire thermique.</i>	45
Figure II.6: <i>Système de rafraîchissement solaire thermomécanique.</i>	45
Figure II.7: <i>Système de climatisation solaire par sorption.</i>	48
Figure II.8 : <i>Les différentes technologies de production de froid solaire [Henning, 07].</i>	49
Figure II. 10 : <i>Schéma de principe de fonctionnement d'une machine à absorption à base solaire.</i>	51
Figure II. 11: <i>Schéma de principe d'une machine à adsorption.</i>	52
Figure II. 12: <i>Schéma de principe de fonctionnement d'une machine à adsorption à base solaire.</i>	53
Figure II. 13: <i>Système de climatisation à dessicant cooling.</i>	54
Figure II. 14 : <i>Cycle standard de réfrigération à dessiccation avec l'énergie solaire</i>	55
Figure II. 15: <i>Exemple d'une unité de traitement d'air à dessiccation avec une roue déshydratante</i>	56
Figure II.16: <i>Plage des coûts spécifiques pour les différents types de refroidisseurs en fonction de la puissance de refroidissement</i>	58
Figure II. 17 : <i>Efficacité des différents capteurs solaires et applications aux différentes technologies de climatisation solaire. (INES)</i>	61

Chapitre III

Figure III. 1 : <i>Cycle d'absorption Eau /LiBr à simple effet</i>	73
Figure III. 2 : <i>Schéma d'une installation à absorption de H₂O/LiBr sur le diagramme</i>	74
Figure III. 3 : <i>L'effet du pourcentage de LiBr à l'entrée de l'absorbeur.</i>	85
Figure III. 4 : <i>Effet de la température de générateur.</i>	87
Figure III. 5 : <i>Effet des températures de l'échangeur de chaleur</i>	88
Figure III. 6 : <i>Effet du concentration de la solution.</i>	90

Liste des tableaux:

Chapitre I

Tableau I. 1: <i>Les principaux gaz (GES) influant sur le climat.</i>	14
---	----

Chapitre II

Tableau II.1: <i>Les applications de la climatisation dans secteur résidentiel et tertiaire.</i>	36
Tableau II. 2: <i>L'ensemble des techniques de rafraîchissement solaire.</i>	38
Tableau II. 3: <i>Panorama des technologies de rafraîchissement solaire</i>	43
Tableau II. 4 : <i>Systèmes de rafraîchissement solaire thermique.</i>	44
Tableau II. 5 : <i>Avantages et Inconvénients des technologies de climatisation solaire</i>	57
Tableau II. 6 : <i>Les différents capteurs utilisés pour les différentes technologies</i>	60
Tableau II. 7: <i>Récapitulatif sur quelques technologies de climatisation solaire.</i>	63

Chapitre III

Tableau III. 1 : <i>Les paramètres de conception pour un refroidisseur d'absorption Eau-LiBr à simple effet</i>	75
Tableau III. 2 : <i>Les données pour le système de refroidissement Eau-LiBr à simple effet</i>	77
Tableau III. 3 : <i>Les flux énergétique aux différents composants du système</i>	81
Tableau III. 4 : <i>Résultats de l'effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur</i>	84
Tableau III. 5 : <i>Résultats sur l'effet de la température du générateur.</i>	86
Tableau III. 6 : <i>Résultats sur l'effet de la température de l'échangeur thermique</i>	88
Tableau III. 7 : <i>Résultat sur Effet de la concentration de la solution</i>	89

Nomenclature

Nomenclature :

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	<i>unité</i>
θ	<i>L'angle zénithal</i>	En degrés
φ	<i>La longitude</i>	En degrés
δ	<i>La déclinaison du soleil</i>	En degrés
ω	<i>L'angle horaire</i>	En degrés
ψ	<i>L'azimut du soleil</i>	En degrés
γ	<i>L'angle de la hauteur solaire</i>	En degrés
L	<i>La latitude de lieu</i>	En degrés
j	<i>Quantième jour de l'année entre $1 \leq j \leq 365$</i>	Jours
T_{SV}	<i>Le temps solaire vrai</i>	En degrés
z	<i>La distance zénithale</i>	En degrés
A_s	<i>La surface de la cellule</i>	m^2
COP	<i>Coefficient de Performance</i>	-
I_p	<i>L'irradiation directe du faisceau solaire</i>	kW/m^2
\dot{Q}	<i>La puissance</i>	kW
T_H	<i>Temperature of high – temperature heat source</i>	k
T_L	<i>Temperature of low – temperature heat source</i>	k
T_M	<i>Temperature of low – temperature heat sink</i>	k
\dot{W}	<i>La puissance mécanique</i>	kW
μ	<i>Efficacité</i>	-
COP	<i>Coefficient de performance</i>	-
h	<i>Enthalpie</i>	Kj/Kg
\dot{m}	<i>Débit massique</i>	Kg/s
P	<i>Pression</i>	Kpa
\dot{Q}_e	<i>Capacité de l'évaporateur</i>	KW
\dot{Q}_a	<i>Chaleur rejetée par l'absorbeur</i>	KW
\dot{Q}_c	<i>Chaleur rejetée par le condenseur</i>	KW
\dot{Q}_g	<i>Chaleur injecté dans le générateur</i>	KW

T	<i>Température</i>	°C
v	<i>Volume spécifique</i>	m ³ /kg
w	<i>La puissance de la pompe</i>	W
X	<i>Rapport de LiBr dans la solution</i>	%
ρ_x	<i>Densité</i>	kg/m ³

Indice

a	<i>absorbeur</i>
c	<i>condenseur</i>
e	<i>évaporateur</i>
g	<i>générateur</i>
s	<i>radiation solaire</i>

Introduction Générale

Introduction générale :

Dans un contexte de raréfaction du pétrole, de renchérissement du nucléaire et de dérèglement climatique, les efforts de réduction de consommation d'énergie primaire dans le bâtiment vont être intensifiés par le développement des bâtiments à basse consommation ou à énergie positive. Les besoins en climatisation représentent 24 % du total de l'énergie primaire contre seulement 8 % pour le chauffage. Pour la climatisation solaire, il existe deux grandes filières : une filière thermique et une autre électrique (via le photovoltaïque). Dans le long terme, il n'est pas certain que ces deux filières survivent mais, aujourd'hui, il n'est pas possible de parier sur l'une plutôt que sur l'autre. C'est la raison pour laquelle ces deux filières sont abordées même si les spécificités de la climatisation solaire thermique exigent de plus longs développements que la climatisation photovoltaïque, qui n'a pas encore été développée significativement à l'échelle commerciale. Cependant, L'énergie solaire est une source à la fois renouvelable, non-polluante, et gratuite, elle est devenue une solution potentiellement très convenable pour le rafraîchissement des bâtiments. La technologie de production de froid par absorption est environ 70% moins efficace que la solution par compression mécanique, mais elle reste néanmoins intéressante quand la source d'énergie est gratuite, comme dans le cas de la source solaire.

Avant de rentrer plus dans la climatisation solaire, il faut d'abord se poser la question : la climatisation est-elle indispensable ? La climatisation passive n'est-elle pas suffisante ? De fait, dans un passé pas si lointain, on se passait de climatisation en ayant recours à des techniques, dites passives, de ventilation, protection contre le soleil, arrosage, etc.

L'objectif de ce travail est de présenter une simulation d'une installation de rafraîchissement solaire à absorption dans le but de montrer l'influence des paramètres extérieurs sur ses performances.

Nous avons articulé notre travail autour de trois chapitres :

Le premier chapitre comprend une présentation sur la consommation énergétique mondiale excessive qui a des retombées indésirables sur notre environnement : comme le cas du réchauffement climatique ,dégagement des gaz à effet de serre, l'épuisement des

ressources énergétiques mondiales, etc. Aussi, ce chapitre comprend une présentation du contexte national et la solution alternative représentée par l'énergie solaire et son abondance en Algérie.

Le deuxième chapitre a pour objectif de faire une recherche bibliographique sur les installations frigorifiques à base solaire et de donner le stade actuel dans le monde, puis le principe de fonctionnement de ces machines afin de faciliter l'étude des performances et de mieux comprendre les spécificités de l'installation envisagée.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation des composants d'une machine à absorption à simple effet, fonctionnant avec le mélange binaire bromure de lithium (absorbant) / eau (fluide frigorigène); Suite à la mise en place de cette modélisation, une analyse de sensibilité est faite afin d'évaluer l'influence des différents paramètres sur les performances de la production de froid solaire par cette machine.

Préambule

Préambule

L'époque du pétrole et du gaz bon marché touche à sa fin. L'uranium, le combustible utilisé par la filière nucléaire, est également une ressource en quantité limitée. Au contraire, les réserves d'énergie renouvelable techniquement accessibles dans le monde sont suffisamment importantes pour fournir environ six fois plus d'énergie que ce que le monde consomme actuellement [Source AIE].

Les technologies énergétiques renouvelables varient beaucoup dans leur maturité technique et économique, mais les sources sont nombreuses et offrent de plus en plus d'options intéressantes. Ces sources comprennent l'énergie éolienne, la biomasse, l'énergie solaire photovoltaïque et thermique, la géothermie, l'énergie marémotrice et l'hydroélectricité. Elles ont pour point commun de ne produire que peu ou pas de gaz à effet de serre, et d'utiliser comme "matière première" des ressources naturelles quasiment inépuisables. Certaines de ces technologies sont déjà compétitives. Leur viabilité économique va s'améliorer encore à mesure qu'elles s'amélioreront techniquement, que les prix des combustibles fossiles continueront de grimper et que les émissions de dioxyde de carbone qu'elles permettront d'éviter se verront attribuer une valeur monétaire.

Chapitre I :

La climatisation solaire dans le tissu énergétique mondial

Chapitre II :

Analyse des différents systèmes de rafraichissement solaire

Chapitre III :

Modélisation des composants d'une installation à absorption solaire

CHAPITRE I :

La climatisation solaire dans le tissu énergétique mondiale.

Introduction :	4
I.1 Enjeux économique et environnemental :	5
I.2 Effets environnementaux : Changement climatique :	6
I.2.1 Les réserves énergétiques mondiales:.....	6
I.2.2 La consommation énergétique mondiale :.....	7
I.2.3 La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment :	9
I.3 La prise en compte des contraintes environnementales :	11
I.3.1 Le développement durable :	11
I.3.2 Le scénario d'évolution énergétique :	16
I.3.3 Le recours aux énergies renouvelables :.....	17
I.4 Le gisement solaire :	18
I.4.1 L'exploitation de l'énergie solaire :.....	18
I.4.2 Aspects géométriques:.....	20
I.4.3 Aspects énergétiques :.....	24
I.5 Contexte national :	27
I.5.1 Situation géographique :.....	27
I.5.2 Le potentiel national en énergies renouvelables :.....	28
Conclusion :	30
Bibliographie :	31

TABLE DES FIGURES

Figure I. 1: <i>procédé thermodynamique de la production du froid solaire.</i>	5
Figure I. 2: <i>Réserves énergétiques mondiales de combustibles fossiles (31/12/2000), en milliard de tep.</i>	7
Figure I. 3 : <i>Évolution de la consommation d'énergie primaire selon AIE.</i>	8
Figure I. 4 : <i>Évolution de la production électrique renouvelable scénario évolution énergétique, par source.</i>	9
Figure I. 5 : <i>Prospective de l'évolution de la demande en énergie finale du secteur des bâtiments dans le monde.</i>	10
Figure I. 6 : <i>Les mesures et des technologies de pointe existantes pour placer le monde sur une trajectoire de réchauffement de 2°C ^[5].</i>	13
Figure I. 7 : <i>Demande mondiale d'énergie finale prévue par secteur dans référence et de évolution énergétique.</i>	17
Figure I. 8 : <i>Part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique mondiale finale en 2010 ^[12].</i>	18
Figure I. 9 : <i>Schéma représentant la part de la consommation énergétique globale devant le gisement solaire.</i>	19
Figure I. 10 : <i>Rayonnement solaire dans le monde en KWh/m²/An.</i>	20
Figure I. 11 : <i>Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.</i>	21
Figure I. 12 : <i>Coordonnées terrestres.</i>	22
Figure I. 13 : <i>Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L.</i>	22
Figure I. 14 : <i>Coordonnées solaire selon le repère horizontal.</i>	24
Figure I. 15 : <i>La répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.</i>	25
Figure I. 16: <i>Puissance ratonnée quotidiennement par le soleil sur une année.</i>	26
Figure I. 17 : <i>Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur l'énergie rayonnée.</i>	27
Figure I. 18 : <i>La situation géographique de l'Algérie.</i>	27
Figure I. 19 : <i>Programme des énergies renouvelables Pénétration des ENR dans la production nationale ^[18].</i>	28

TABLEAUX

Tableau I. 1: *Les principaux gaz (GES) influant sur le climat* ^[7] 14

Nomenclature :

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	<i>unité</i>
θ	<i>L'angle zénithal</i>	En degrés
φ	<i>La longitude</i>	En degrés
δ	<i>La déclinaison du soleil</i>	En degrés
ω	<i>L'angle horaire</i>	En degrés
ψ	<i>L'azimut du soleil</i>	En degrés
γ	<i>L'angle de la hauteur solaire</i>	En degrés
L	<i>La latitude de lieu</i>	En degrés
j	<i>Quantième jour de l'année entre $1 \leq j \leq 365$</i>	Jours
TSV	<i>Le temps solaire vrai</i>	En degrés
z	<i>La distance zénithale</i>	En degrés

Introduction :

À nos jours, Il apparaît de plus en plus évident que l'avenir énergétique du monde doit impérativement s'inscrire en rupture nette avec les orientations et les modes de production et de consommation énergétiques du passé. Cet impératif découle autant de la nécessité de parvenir à une forme de sécurité énergétique que de l'urgence qu'il y a à maîtriser les pollutions locales dues à l'utilisation de divers combustibles mais aussi, bien entendu, le problème grandissant des changements climatiques, qui exigent que l'on réduise les émissions de gaz à effet de serre (GES) et tout particulièrement de dioxyde de carbone .

Aujourd'hui, Il est universellement admis que l'adoption de nouvelles technologies utilisant les énergies renouvelable c'est un recours bien plus important à des techniques conventionnelles, ces technologies offrent des perspectives très prometteuses en matière de réduction de ces émissions.

La climatisation solaire est une technologie purement écologique, dont le principe et d'utiliser l'énergie solaire afin de rafraichir un local de manière totalement naturelle. Les systèmes de climatisation utilisant les énergies renouvelables notamment l'énergie solaire ont connu un développement important. Cette croissance est due, en grande partie, à la succession des périodes de canicule ainsi qu'à la forte demande de rafraichissement en été notamment dans les lieux de travail et de plus en plus dans les secteurs résidentiels et tertiaires.

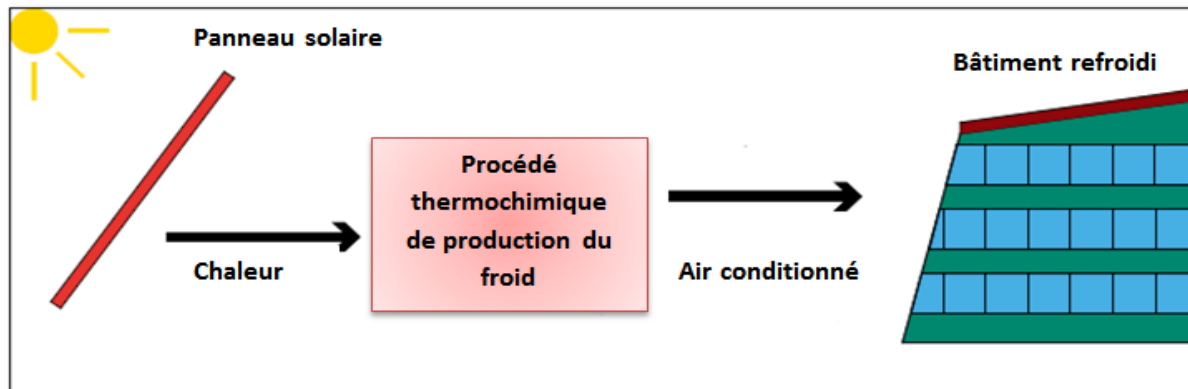


Figure I. 1: *procédé thermodynamique de la production du froid solaire.*

L'Algérie, vue sa situation géographique favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet, vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications de la climatisation où la consommation de l'énergie électrique est très importante.

I.1 Enjeux économique et environnemental :

Après maintes hésitations dans les décennies passées, les sources d'énergies renouvelables s'imposent progressivement comme une des alternatives les plus sûres, à long terme, aux sources traditionnelles que sont les combustibles fossiles et fissiles, notamment pour la production d'électricité.

C'est probablement la prise de conscience, que nous vivons sur une petite planète aux ressources limitées et à l'équilibre fragile, qui a conduit les citoyens du monde à progressivement placer en priorité le souci environnemental. Le défi actuel consiste à offrir un réel développement durable à l'humanité, ce qui nécessite d'assurer à tous les humains une qualité de vie suffisante où l'accès à l'eau, à la nourriture et à l'énergie en constituent les fondements ^[1]. Dans ce contexte, leur sécurité d'approvisionnement énergétique, associée à une réduction des pressions sur l'écosystème, la réduction de la compétition entre ressources alimentaires, en eau et en énergie, ainsi que les coûts constituent des enjeux sans doute plus importants que les intérêts économiques de quelques grands lobbies.

I.2 Effets environnementaux : Changement climatique :

La montée en puissance des préoccupations et des risques environnementaux ainsi que la forte mobilisation de l'opinion en faveur de la protection de la nature, de la préservation de la planète et, globalement, de l'amélioration du cadre et de la qualité de vie constituent un second enjeu majeur pour la filière énergétique.

L'alerte donnée par la communauté scientifique mondiale sur le risque d'un changement climatique se confirme. La température du globe a augmenté de plus de 0,6 °C au cours du XX^e siècle. Les précipitations s'accroissent, particulièrement aux latitudes moyenne et élevées, la superficie et l'épaisseur des glaces des pôles diminuent, les glaciers alpins et continentaux régressent. Les scientifiques estiment également que le changement de climat se traduira par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des aléas climatiques. L'analyse des données météorologiques est en passe de devenir un critère de décision déterminant de l'évaluation des coûts et des risques dans la quasi-totalité des secteurs de l'économie, notamment en matière d'assurances.

Le principe de précaution devient la règle adoptée par les décideurs et conduit à agir pour réduire le risque et à anticiper les conséquences des aléas climatiques. Le protocole de Kyoto instaure des mécanismes de marchés traduisant financièrement les réponses possibles au problème posé.

Au niveau mondial, le problème du changement climatique devient au moins aussi important que le risque d'épuisement des ressources fossiles. En effet, du fait des constantes de temps de réaction, qui sont très longues, les mesures de réduction des émissions mises en œuvre dès aujourd'hui n'auront un impact significatif qu'à très long terme, au mieux dans une centaine d'années, au pire après l'horizon d'un demi-millénaire.

I.2.1 Les réserves énergétiques mondiales:

Les estimations des différents experts convergent pour évaluer les réserves prouvées de pétrole restantes à environ 140 Mtep (Milliards de tonnes équivalent pétrole), alors que la consommation de brut depuis le début de l'ère pétrolière s'est élevée à environ 120 Mtep.

Les réserves prouvées de gaz peuvent être estimées à récent de l'industrie du gaz naturel. Les réserves mondiales de charbon sont estimées à 510 Mtep.

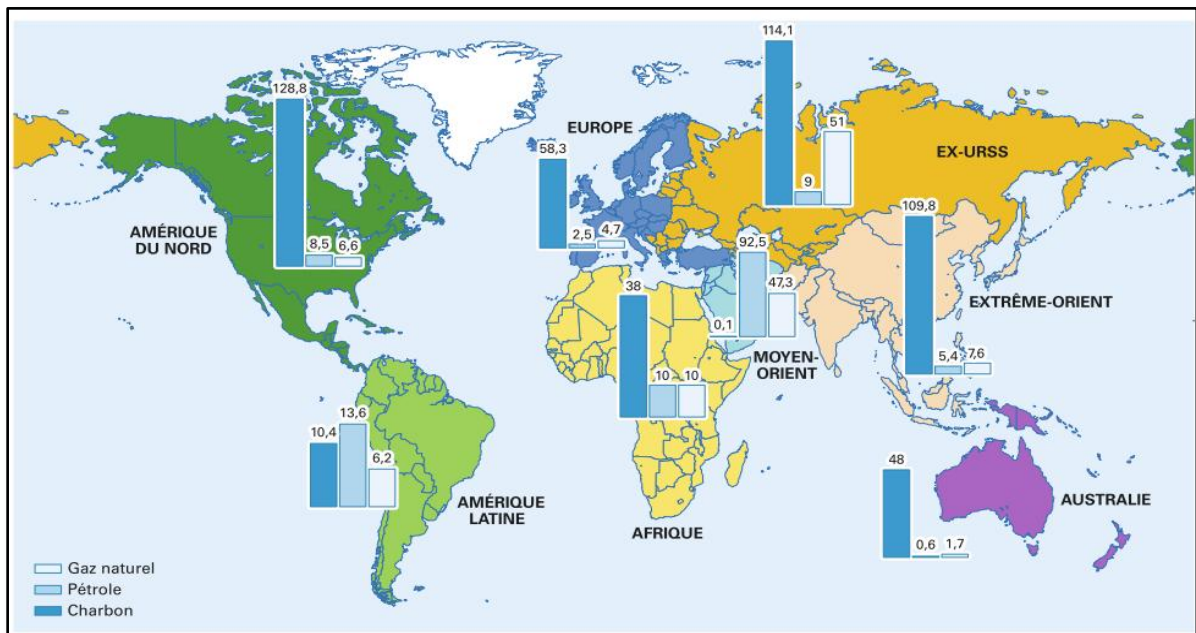


Figure I. 2: Réserves énergétiques mondiales de combustibles fossiles (31/12/2000), en milliard de tep.

Une notion couramment utilisée pour évaluer les réserves est le ratio entre celles-ci et la consommation d'une année donnée. Sur cette base, les réserves sont de :

- environ 50 ans pour le pétrole.
- environ 65 ans pour le gaz.
- et environ 260 ans pour le charbon.

I.2.2 La consommation énergétique mondiale :

L'énergie est devenue un enjeu primordial. Ainsi, le développement durable est aujourd'hui la démarche sur laquelle s'appuient plusieurs des études visant à la gestion globale des ressources énergétiques mondiales.

La consommation énergétique mondiale a connu une croissance rapide dans le passé, satisfaite essentiellement par le recours aux énergies fossiles. La croissance des besoins énergétiques soulève la question de la sécurité d'approvisionnement, le changement climatique celle de la durabilité du système énergétique, l'ensemble devant être appréhendé

en tenant compte des enjeux économiques et notamment de compétitivité que les choix énergétiques impactent directement.

Historiquement, la demande énergétique mondiale a connu une croissance soutenue sur les 40 dernières années, passant de près de 5000 Mtep en 1970 à 12 000 Mtep en 2010. Elle a été multipliée par plus de 2,4 en 40 ans, ce qui correspond à un rythme de croissance annuelle moyen de l'ordre de 2,24 %. Cette tendance, si elle devait se prolonger sur les 40 prochaines années, conduirait à plus que doubler la demande énergétique mondiale à l'horizon 2050 par rapport au niveau de 2010 [source : AIE].

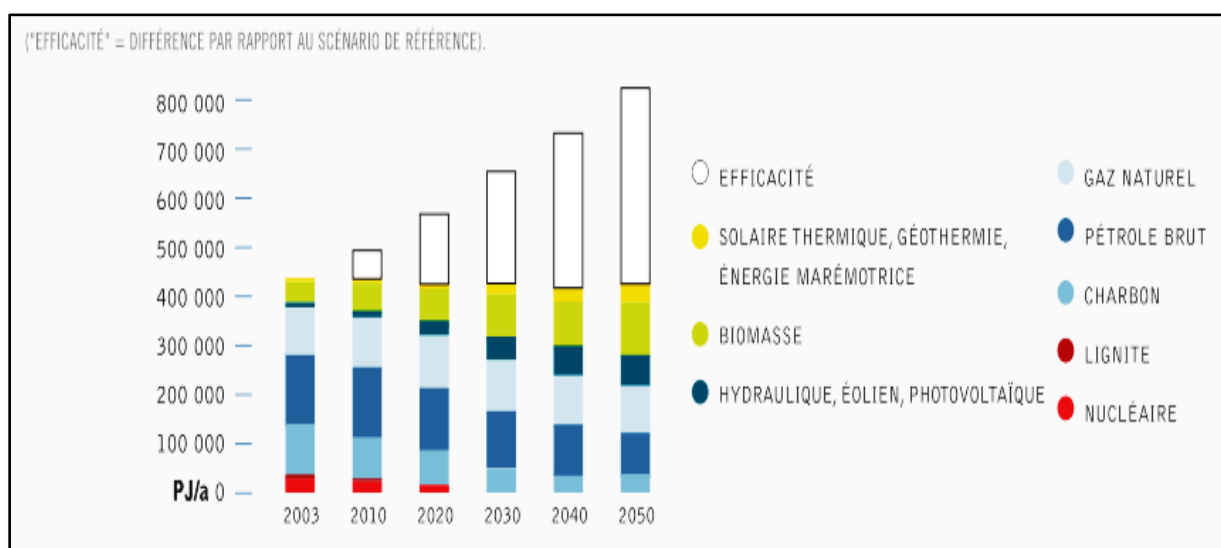


Figure I. 3 : Évolution de la consommation d'énergie primaire selon AIE.

(Efficacité = différence par rapport au scénario de référence).

La demande d'énergie primaire mondiale était satisfaite en 2010 à plus de 80 % par les énergies fossiles. Le pétrole est la première source d'énergie, assurant 33 % des besoins mondiaux, suivi par le charbon (27 %) et le gaz (21 %). Les énergies renouvelables satisfont quant à elles (13 %) de la demande, dont (10 %) pour l'hydraulique. La part du nucléaire dans la consommation d'énergie primaire s'établit à (6 %).

Pour parvenir à une croissance économiquement attractive des sources d'énergie renouvelables, une mobilisation bien réfléchie et coordonnée de toutes les technologies est très importante. Cette mobilisation dépend des possibilités techniques, du potentiel de réduction des coûts et de la maturité des technologies. La (Figure I.4) compare l'évolution des différentes technologies renouvelables au fil du temps. Jusqu'en 2020, l'hydraulique

et l'éolien vont rester les principaux contributeurs de la croissance de la part des renouvelables sur le marché. Après 2020, la part toujours croissante de l'éolien sera complétée par l'électricité générée à partir de la biomasse et du solaire photovoltaïque et thermique.

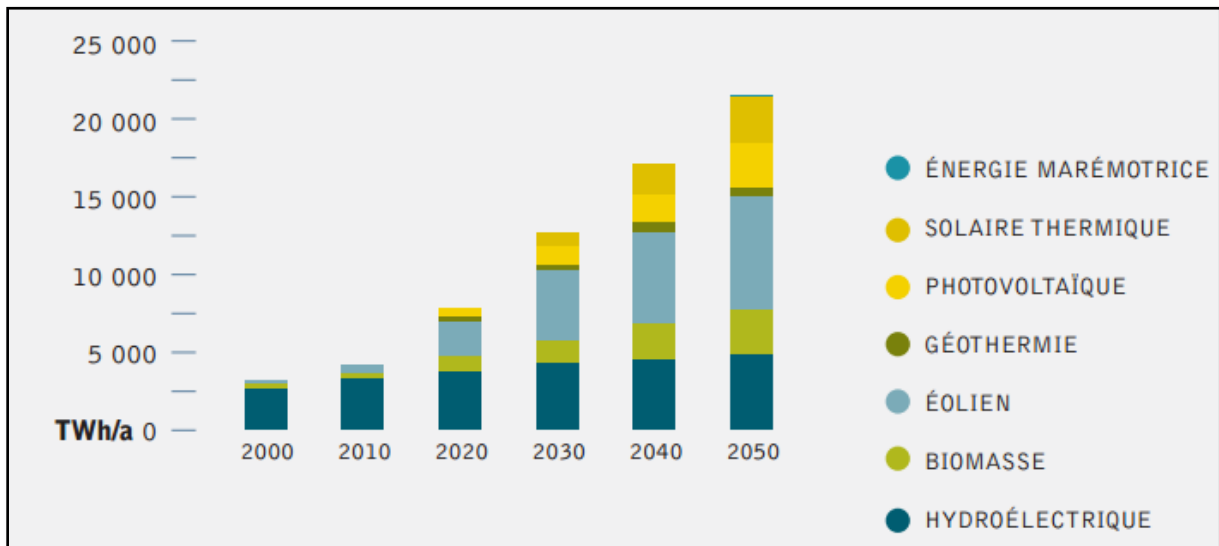


Figure I. 4 : *Évolution de la production électrique renouvelable scénario évolution énergétique, par source.*

I.2.3 La consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment :

En Algérie, le secteur du bâtiment est le secteur le plus énergivore ^[2]. La consommation énergétique des bâtiments en Algérie est estimée à 40 %, et c'est dans ce contexte, que le gouvernement algérien entend réaliser 3000 logements écologiques et la rénovation thermique de 4000 autres logements existants, ainsi que 20 % pour le tertiaire (audit énergétique) dans le cadre du programme quinquennal 2010/2014. Avec son potentiel solaire évalué à plus de 3000 heures d'ensoleillement par an, l'Algérie est l'un des pays les plus aptes à promouvoir l'énergie solaire.

Cependant, la politique nationale de mise en valeur des technologies des énergies renouvelables doit s'articuler autour d'une stratégie financière en mesure de financer des ressources adéquates à ce secteur d'activité d'avenir. Pour rappel, la mise en application de la loi relative à la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment, s'est concrétisée par la promulgation le 24 avril 2000 d'un décret exécutif n° 2000-90 portant réglementations thermiques dans les bâtiments neufs ^[3].

Selon le scénario de référence de l'Agence Internationale de l'Énergie, la consommation d'énergie finale des bâtiments dans le monde pourrait atteindre environ 3 800 millions de tonnes équivalent pétrole en 2030, dont environ la moitié (1800 Mtep) proviendrait des pays en développement (La mise en place de la réglementation thermique et énergétique en Tunisie).

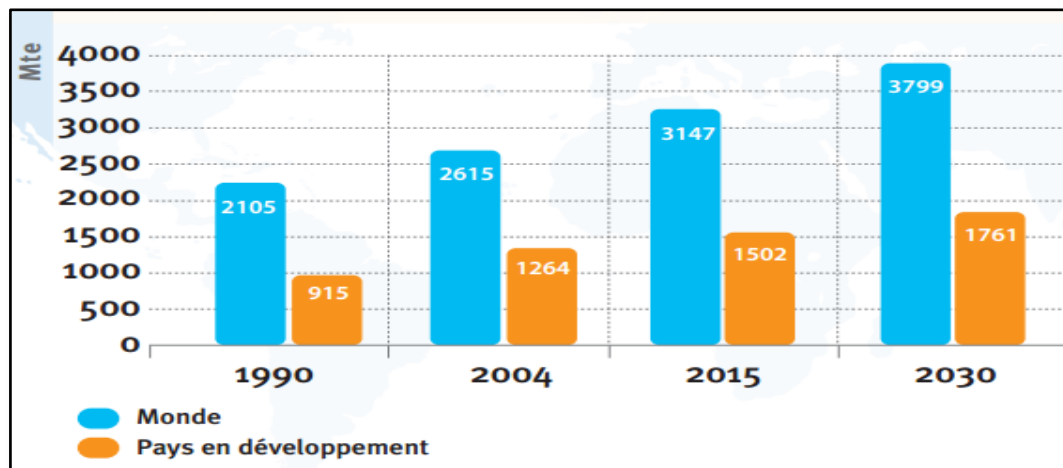


Figure I. 5 : *Prospective de l'évolution de la demande en énergie finale du secteur des bâtiments dans le monde.*

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) représentant environ 20% des émissions dues à la consommation d'énergie finale (hors électricité), le secteur du bâtiment contribue fortement au changement climatique. Ces émissions pourraient s'élever à près de 4 300 millions de tonnes équivalent CO₂ à l'horizon 2030, dont plus de la moitié seraient générées par les pays en développement.

La climatisation d'été représenté dans le monde entier un marché croissant pour les bâtiments commerciaux et résidentiels. Dans les années 80, de nombreuses études visant au développement des systèmes basés sur l'énergie ont été effectuées, en particulier aux Etats-Unis et au Japon. Des étapes importantes ont été réalisées dans le développement des composants et des systèmes, mais finalement abandonnés pour des raisons économiques.

Récemment, plusieurs projets de recherche et de démonstration ont été exécutés dans beaucoup de pays. Des projets coopératifs internationaux par exemple dans le cadre de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) ont également été réalisés. L'objectif est de

définir les critères de performances d'une installation de *rafraîchissement solaire* et d'optimiser les différents composants.

Pour parvenir à une croissance économiquement attractive des énergies renouvelables, une mobilisation raisonnée et coordonnée de toutes Les technologies renouvelables est très importante. Cela dépend des possibilités techniques, des coûts réels, du potentiel de réduction Des coûts et de la maturité des technologies” (Scenari d'évolution énergétique).

I.3 La prise en compte des contraintes environnementales :

I.3.1 Le développement durable :

Le développement énergétique durable peut être défini comme l'art de concilier deux exigences :

- la satisfaction des besoins énergétiques actuels, liés au confort et au développement économique.
- le respect de l'environnement et la préservation des ressources et de la capacité au « bien-être énergétique » pour les générations futures.

Il conviendra donc d'être attentif à la préservation de l'environnement en évitant les pollutions chimiques ou radioactives irréversibles, en économisant les ressources fossiles non renouvelables, et en maîtrisant les émissions de gaz à effet de serre due à la façon de consommation d'énergie.

Un développement énergétique durable implique donc trois priorités :

- Mener une politique active d'économies d'énergie.
- Développer l'utilisation des énergies renouvelables non productrices de dioxyde de carbone (CO₂).
- Rechercher de nouvelles sources d'énergie permettant une plus grande efficacité et une indépendance optimale du pays tout en permettant une sécurité d'utilisation et des impacts sur l'environnement acceptables.

I.3.1.1 Menaces et solutions climatiques :

Les changements climatiques planétaires, provoqués par l'accumulation constante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère de la Terre, ont déjà commencé à perturber les écosystèmes et causent déjà environ 150 000 décès supplémentaires par an. Une élévation moyenne de la température planétaire de 2°C fait peser sur des millions de personnes une menace accrue de famines, d'épidémies de paludisme..Etc. Pour maintenir la hausse des températures dans des limites tolérables, les émissions de gaz à effet de serre doivent considérablement réduites. C'est raisonnable aussi bien d'un point de vue environnemental qu'économique. Le principal gaz à effet de serre est le dioxyde de carbone (CO₂) produit par l'utilisation de combustibles fossiles pour les transports et la production d'énergie.

Dans le même temps, il est possible de réduire énormément la consommation d'énergie, tout en bénéficiant de la même qualité de "services" énergétiques qu'aujourd'hui. Cette étude présente une série de mesures d'efficacité énergétique qui, combinées, peuvent réduire de façon importante la consommation des industries, des ménages, des entreprises et du tertiaire.

« La solution à nos besoins énergétiques futurs repose sur un plus large recours aux énergies renouvelables aussi bien pour la production de chaleur que d'électricité. L'énergie nucléaire qui expose les populations et l'environnement à de multiples menaces n'est pas une solution. Cela comprend les risques et dommages environnementaux - depuis l'extraction de l'uranium, sa transformation en passant par son transport, les risques de prolifération des armes nucléaires, le problème non résolu des déchets nucléaires et les conséquences d'un éventuel accident grave. La présente analyse écarte donc l'option nucléaire » ^[4].

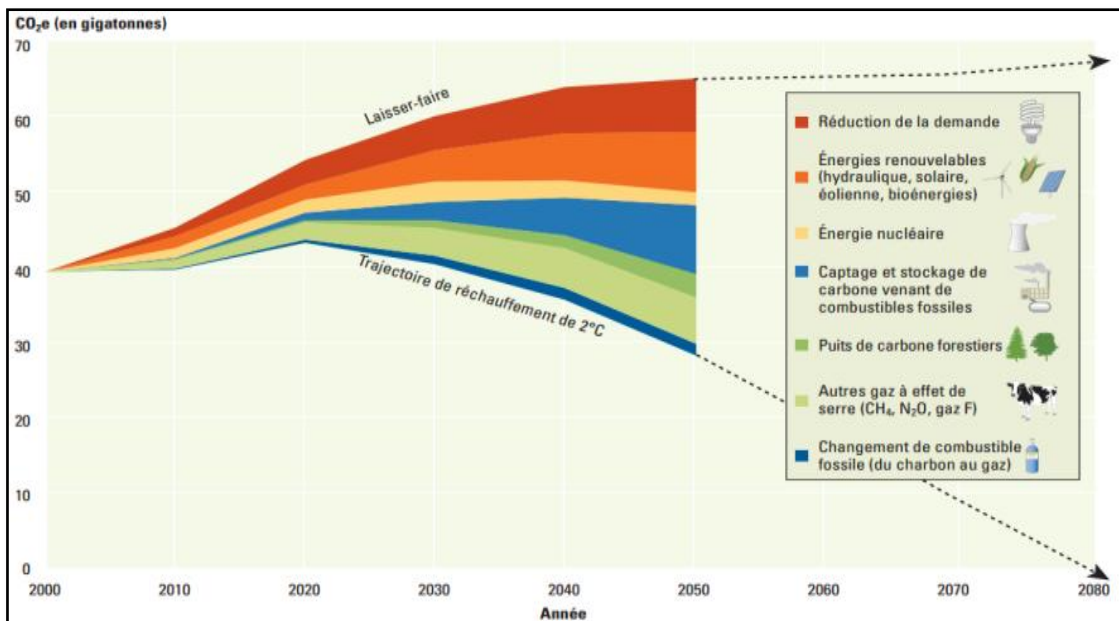


Figure I. 6 : Les mesures et des technologies de pointe existantes pour placer le monde sur une trajectoire de réchauffement de 2°C^[5].

I.3.1.2 Les gaz à effet de serre :

L'effet de serre est un phénomène naturel qui permet à l'atmosphère de se réchauffer à partir de la chaleur rayonnée par les surfaces terrestres grâce à la présence dans l'air de gaz tels que la vapeur d'eau, le gaz carbonique, le méthane, etc. Beaucoup de ces gaz à effet de serre sont présents à l'état naturel dans l'atmosphère, mais certains sont également émis par l'homme de sorte que leur concentration augmente de manière importante, ce qui va contribuer à modifier le climat. Le gaz carbonique est le principal gaz à effet de serre émis par l'homme. Ses concentrations ont augmenté de plus de 30% depuis l'ère préindustrielle: 379 ppm en 2005 contre 280 ppm (Partie par million) en 1750. Il s'agit d'un niveau inégalé depuis 650 000 ans^[6]. Le protocole de Kyoto adopté en 1997 en application de la convention de Rio de 1992 sur le changement climatique, donne la liste suivante pour les 6 principaux gaz à effet de serre :

Tableau I. 1: Les principaux gaz (GES) influant sur le climat ^[7].

Principaux gaz à effet de serre	Principales sources
CO ₂	Déboisements, combustions, chauffages, production d'énergie à partir de combustibles fossiles, automobiles.
CH ₄	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.
N ₂ O	Combustion, dénitrification des sols, engrais azotés.
CFC, HCHC	Fluides frigorigènes ou caloporteurs (réfrigérateur, congélateurs, climatiseur...) gaz propulseurs de mousses et d'aérosols.
SF ₆	Industrie, semi-conducteur, construction électrique, etc.

I.3.1.3 Évolution des émissions de CO₂ :

Les émissions mondiales de CO₂ vont presque doubler d'ici 2050 dans le scénario de Référence, dans le scénario d'évolution énergétique (Fondée par l'AIE) les émissions vont descendre de 23 000 millions de tonnes (mt) en 2003 à 11 500 mt en 2050. Les émissions annuelles par habitants vont baisser de 4 à 1,3 t. Sur le long terme, l'amélioration de l'efficacité énergétique et l'utilisation croissante de biocarburants va même réduire les émissions de CO₂ du secteur des transports. Représentant 36 % de l'ensemble des émissions de CO₂ en 2050, le secteur de l'électricité va céder la place de première source d'émissions au secteur des transports, à l'échelle mondiale ^[4].

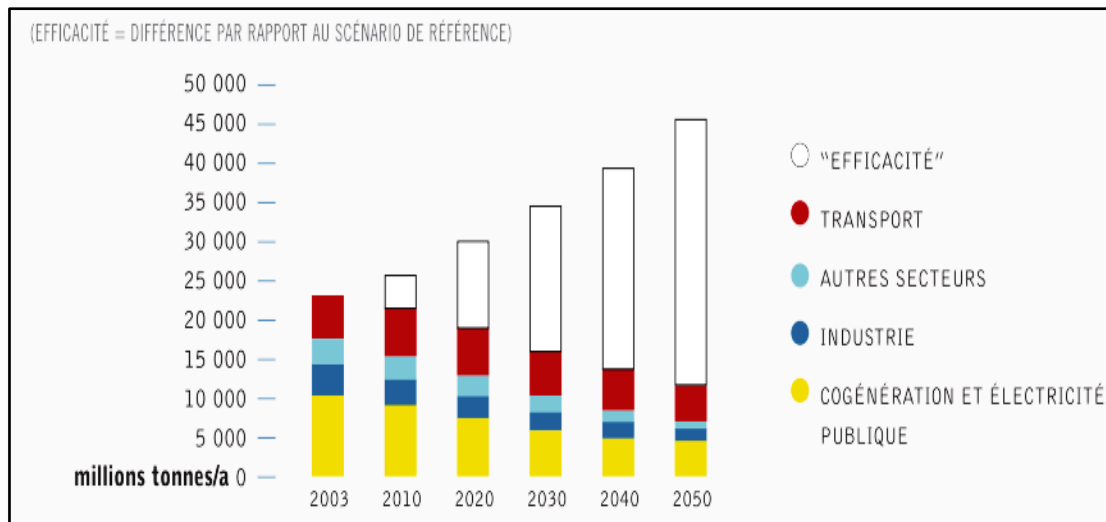


Figure I. 7 : *Évolution des émissions de CO₂ dans le scénario évolution énergétique.*

La CCNUCC ^[8] 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 ^[9], et pourrait conduire à un réchauffement supérieur à 6°C d'ici la fin du siècle ^[10].

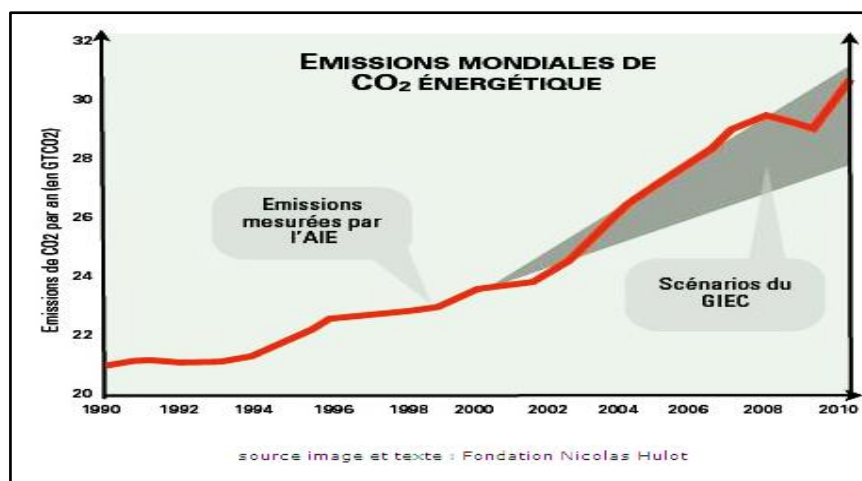


Figure I. 8 : *Émissions mondiales de CO₂ énergétique.*

Le protocole de Kyoto à son tour 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 global se traduit par des engagements quantifiés modulés selon les pays : 8% de réduction pour l'Union européenne et quelques autres à 7% pour les États-Unis, 6% pour le Japon, 0% pour la Russie, et les augmentations autorisées de 8% pour l'Australie et 10% pour l'Islande.

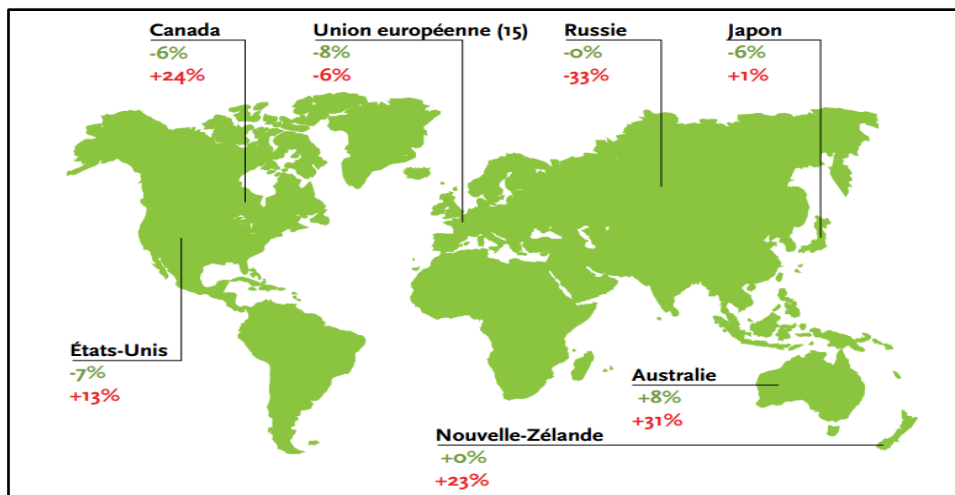


Figure I. 9 : Objectifs Kyoto de réduction des émissions à atteindre entre 2008 et 2012 (moyenne sur les cinq ans) et évolutions des émissions entre 1990-2008 ^[11].

I.3.2 Le scénario d'évolution énergétique :

Par rapport aux prévisions de 2004 de l'AIE, les nouvelles perspectives énergétiques mondiales 2006 prévoient un taux de croissance annuel moyen du PIB (Produit intérieur brut) mondial légèrement plus fort : de 3,4 % au lieu de 3,2 % sur la période 2004-2030. Les Perspectives 2006 anticipent une consommation d'énergie finale en 2030 de 4 % plus élevée que celle retenue dans les Perspectives énergétiques mondiales 2004. Une étude d'impact de la croissance économique sur la demande énergétique dans le cadre du scénario d'évolution énergétique fondé par l'AIE indique qu'une augmentation du PIB mondial moyen de 0,1 % (sur la période 2003-2050) entraînera une augmentation de la demande d'énergie finale d'environ 0,2 %.

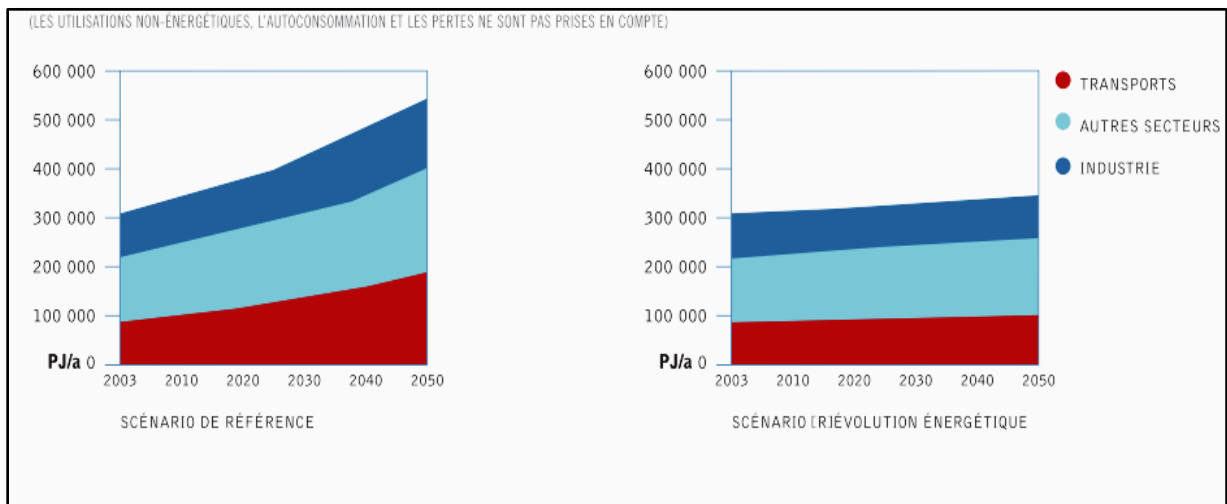


Figure I. 7 : Demande mondiale d'énergie finale prévue par secteur dans référence et de évolution énergétique.

Ce scénario énergétique vise une réduction des émissions mondiales de 50 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2050, avec des émissions de dioxyde de carbone par habitant réduites à moins de 1,3 tonne par an, afin que la hausse des températures planétaires reste en dessous de 2°C. Son second objectif est de démontrer que cela est possible, même en sortant du nucléaire à l'échelle mondiale. Pour parvenir à cela, le scénario se caractérise par des efforts importants en vue d'une exploitation complète de l'immense potentiel d'efficacité énergétique. Parallèlement, toutes les sources d'énergie renouvelables rentables seront utilisées pour la génération de chaleur et d'électricité ainsi que pour la production de biocarburants.

Aujourd'hui, les sources d'énergie renouvelables satisfont 13% de la demande mondiale d'énergie primaire. La biomasse, qui est principalement utilisée pour le chauffage, est la plus importante des sources renouvelables. La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité est de 18 %, alors que leur contribution à la production thermique est d'environ 26 %. Environ 80 % de la production d'énergie primaire sont encore fournis par des combustibles fossiles tandis que les 7 % restants le sont par l'énergie nucléaire.

I.3.3 Le recours aux énergies renouvelables :

La nature met à notre disposition diverses ressources librement accessibles pour produire de l'énergie. La question consiste surtout à savoir comment convertir la lumière du soleil, le

vent, la biomasse ou l'eau qui coule en électricité, chaleur ou autre énergie de façon aussi efficace, durable et rentable que possible.

En moyenne, au niveau planétaire, l'énergie fournie par les rayonnements solaires atteignant la Terre s'élève à environ un kilowatt par mètre carré. Selon l'Association de recherche sur l'énergie solaire, l'énergie issue des sources d'énergie renouvelables à un rythme 3 078 fois supérieur à nos besoins actuels au niveau mondial. En une journée, la lumière du soleil qui atteint la Terre produit suffisamment d'énergie pour satisfaire les besoins énergétiques mondiaux actuels pendant huit ans. Même si seule une petite partie de ce potentiel est techniquement exploitable, c'est encore suffisant pour fournir près de six fois plus d'énergie que ce dont le monde a actuellement besoin.

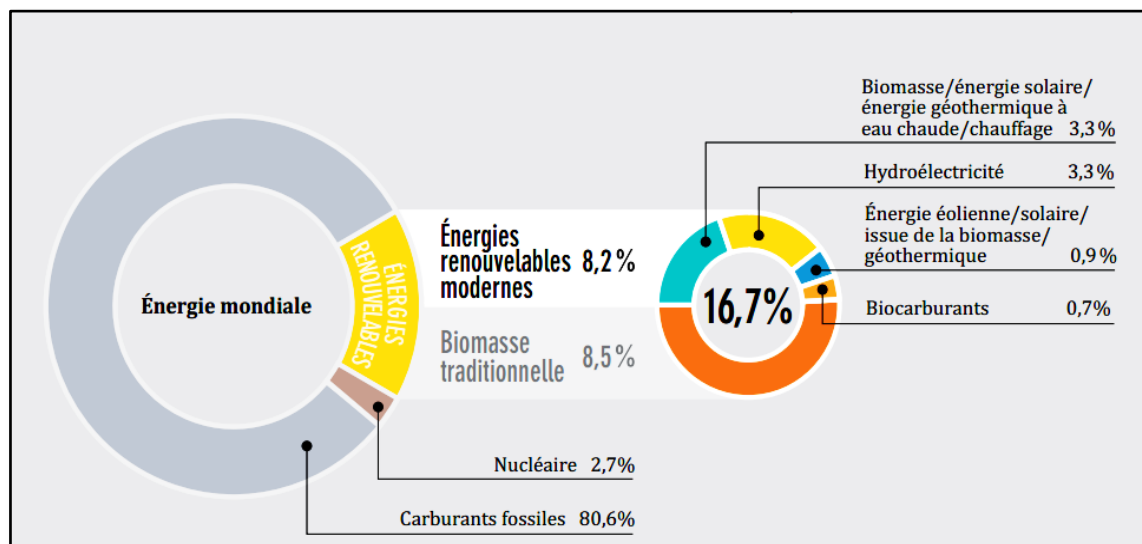


Figure I. 8 : Part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique mondiale finale en 2010 ^[12].

I.4 Le gisement solaire :

I.4.1 L'exploitation de l'énergie solaire :

Grâce au soleil, d'énormes quantités d'énergies atteignent la surface de la Terre après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres. Avec une puissance moyenne d'environ 1.000 W/m², cette énergie solaire est 10.000 fois supérieure à la demande énergétique globale de la population et ce pour les 5 milliards d'années à venir.

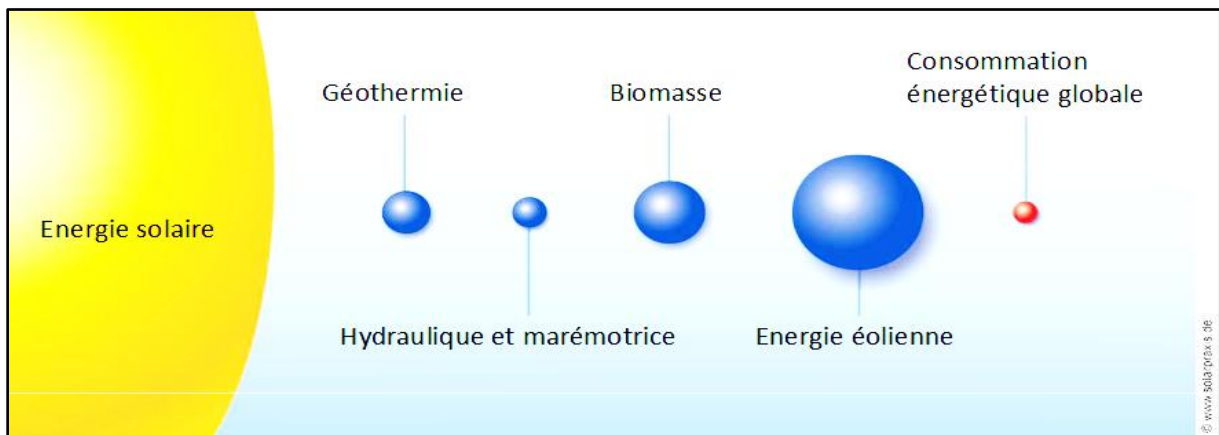


Figure I. 9 : Schéma représentant la part de la consommation énergétique globale devant le gisement solaire.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrées sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et pouvant atteindre même les 3900 heures sur les hauts plateaux et le Sahara.

Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement est de 5 KW/m^2 [13], soit près de 700 KW/m^2 par an au nord et de 2263 KW/m^2 au sud, ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans différents domaines tel que la production de l'électricité, le séchage agroalimentaire, la climatisation etc. La connaissance de ce gisement est d'un intérêt majeur pour concevoir et dimensionner les systèmes énergétiques solaires. Ainsi, un bon dimensionnement n'est possible que si les mesures sont disponibles d'une manière continue dans l'espace et dans le temps.

Au regard de ce potentiel, l'énergie solaire fait l'objet de toutes les attentions dans un contexte de hausse du coût des énergies fossiles et de lutte contre le changement climatique. Outre son abondance et sa gratuité, l'énergie solaire présente de nombreux avantages. Contrairement aux autres énergies de sources renouvelables, le solaire est exploitable sur l'ensemble de la surface du globe mais l'équipement de production doit être installé à proximité du lieu de consommation afin de minimiser les pertes. En plus il est totalement modulable puisque la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.

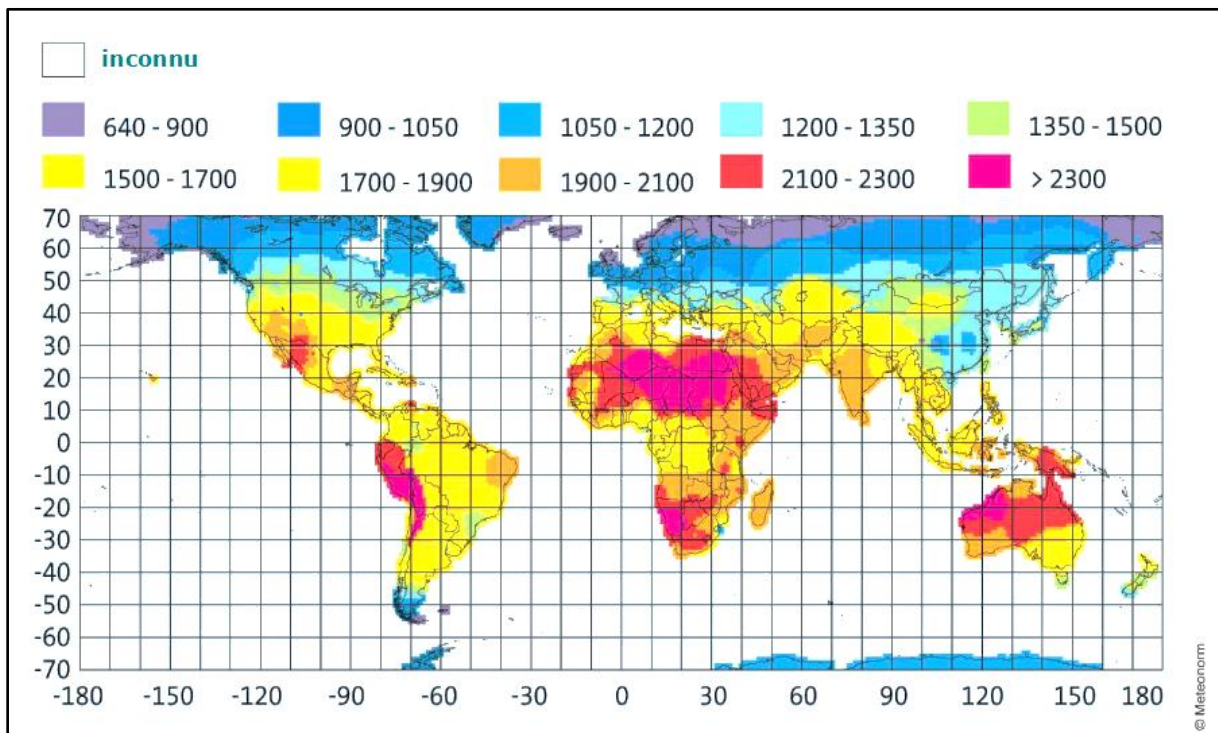


Figure I. 10 : Rayonnement solaire dans le monde en $KWh/m^2/An$.

La valeur du flux est élevée et sa valeur minimale est relativement importante en zone tropicale ce qui permet d'envisager des systèmes solaires autonomes sans stockage d'énergie sur une longue période. En dehors de la zone tropicale, les écarts de la valeur de l'irradiation entre le mois le plus ensoleillé et le mois le moins ensoleillé sont importants et il faudra prévoir soit un stockage d'énergie soit une énergie d'appoint pour couvrir un besoin énergétique donné (séchage de produits, production d'eau chaude sanitaire, pompage d'eau, Climatisation...).

I.4.2 Aspects géométriques:

I.4.2.1 Mouvements de la Terre :

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675.106 km. La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et

l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison et qui vaut $23^{\circ}27'$. Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la (**Figure I.11**).

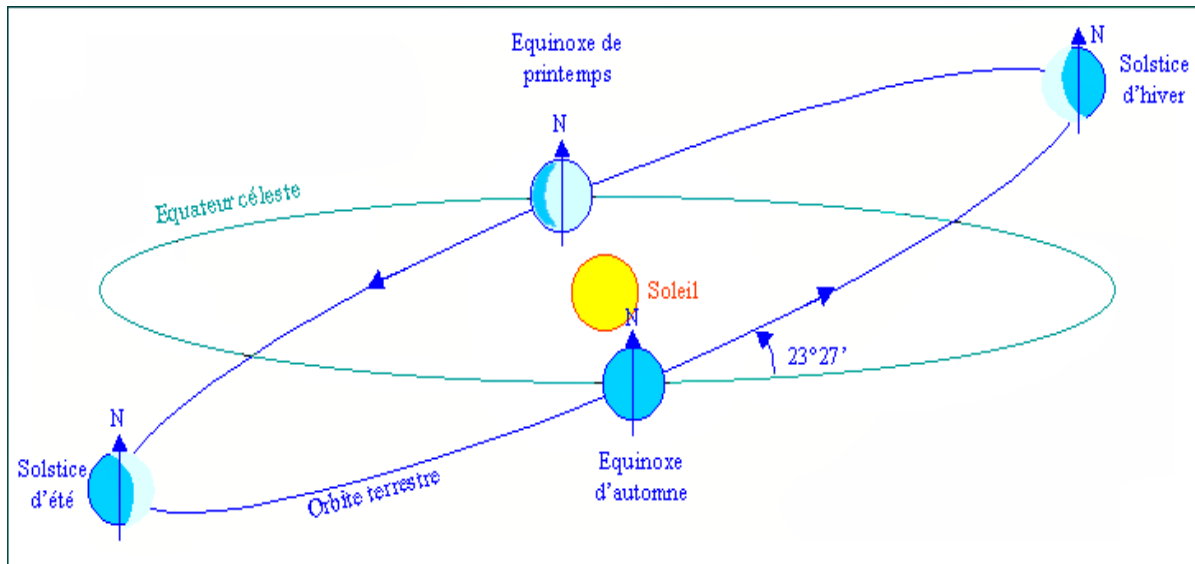


Figure I. 11 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.

- **Position du soleil par rapport à la terre :**

Il est possible de déterminer la position du soleil dans la voûte céleste en fonction du temps et de la position de l'observation sur la terre.

- **Repérage d'un site à la surface de la terre (coordonnées géographiques) :**

Pour repérer un site donné à la surface terrestre, on définit les grandeurs suivantes :

- La latitude θ :** C'est l'angle θ que fait la verticale du lieu avec le plan équatorial. Si $\theta > 0$, le site se trouve dans l'hémisphère nord, sinon le site est dans l'hémisphère sud.
- La longitude φ :** C'est l'angle φ formé par le méridien de Greenwich et le méridien du lieu considéré. La longitude est comprise entre -180 (vers l'ouest) et $+180$ (vers l'est). Comme la terre met 24 heures pour faire un tour sur elle même (360°), chaque heure représente 15° d'écart de longitude et donc, chaque degré de longitude représente 4 minutes.
- L'altitude :** C'est la distance verticale exprimé en mètres, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence.

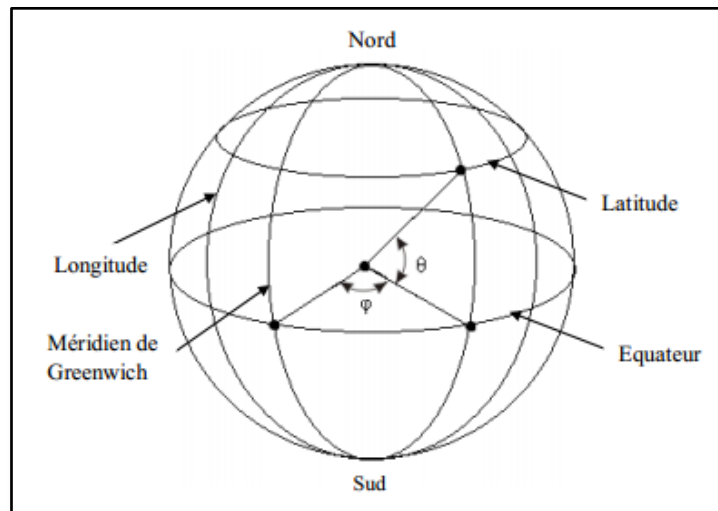


Figure I. 12 : Coordonnées terrestres.

I.4.2.2 Mouvement apparent du Soleil :

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la (Figure I.13), Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L - d)$. La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

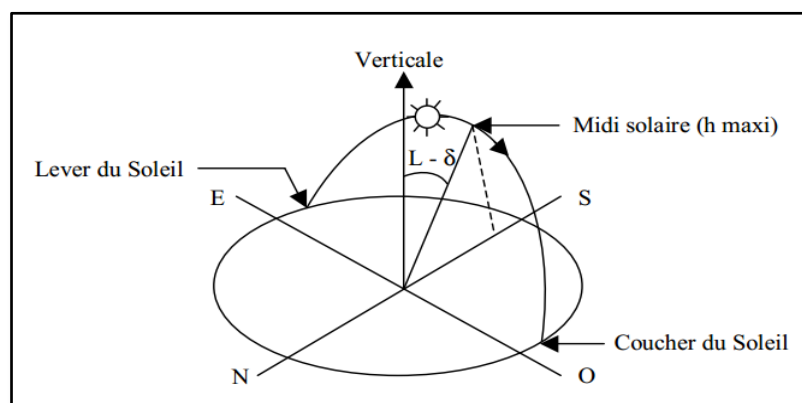


Figure I. 13 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L .

➤ La trajectoire apparente du soleil :

La position du soleil dans la voûte céleste est repérée à tout instant de la journée par deux systèmes de coordonnées :

a) Les coordonnées équatoriales :

Les coordonnées équatoriales sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont :

❖ *La déclinaison δ :*

C'est l'angle que forme la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année : elle vaut 0 aux équinoxes et atteint ses deux valeurs extrêmes au solstice d'hiver ($-23^{\circ},27'$) et au solstice d'été ($+23^{\circ},27'$). Plusieurs expressions ont été développées pour évaluer la déclinaison, la plus simple est celle utilisée par Cooper [14].

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (j + 284) \right] \quad (\text{I.1})$$

❖ *L'angle horaire ω (ah) :*

L'angle horaire mesure le mouvement du soleil par rapport à midi qui est l'instant où le soleil passe au plan méridien du lieu zénith. Cet angle est formé entre la projection du soleil sur le plan équatorial à un moment donné et la projection du Soleil sur ce même plan au midi vrai. L'angle horaire est donné par la relation suivante [15].

$$\omega = 15(TSV - 12) \quad (\text{I.2})$$

Où TSV est le temps solaire vrai qui sera décrit dans les paragraphes suivant.

b) Les coordonnées horizontales :

Le soleil est repéré par les grandeurs suivantes :

❖ *L'azimut ψ :* L'azimut est l'angle entre le plan vertical contenant le rayon solaire et la direction sud. Il se compte de 0° à 360° à partir du sud dans le sens rétrograde. La relation qui donne l'azimut est donnée ci-dessous par M.IQBAL [16].

$$\cos \psi = (\sin \gamma \sin \theta - \sin \delta) / \cos \gamma \cos \theta \quad (\text{I.3})$$

❖ *L'angle de la hauteur solaire γ (hs) :*

C'est l'angle compris entre la direction du soleil et le plan horizontal. γ Varie de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir. L'angle de la hauteur solaire est donné par M.IQBAL:

$$\sin \gamma = \sin \theta \sin \delta + \cos \theta \cos \delta \cos \omega \quad (\text{I.4})$$

❖ *La distance zénithale z :*

C'est l'angle entre la direction du soleil et la verticale du lieu (zénith). L'angle z est complémentaire de γ par M.IQBAL.

$$\cos z = \sin \delta \sin \theta + \cos \delta \cos \theta \cos \omega \quad (\text{I.5})$$

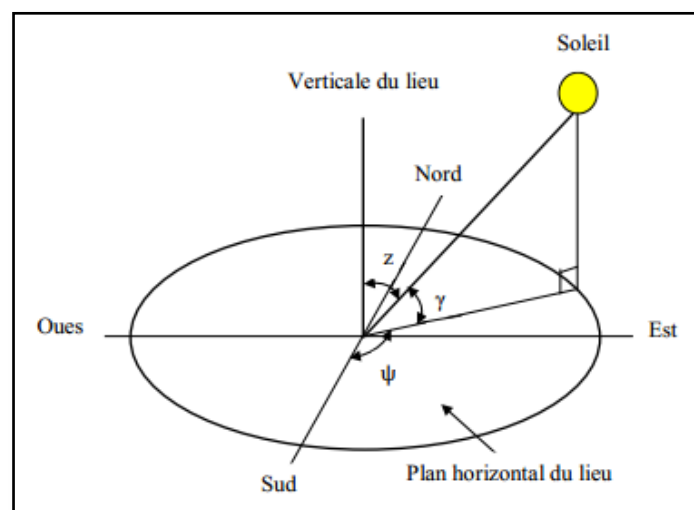


Figure I. 14 : Coordonnées solaire selon le repère horizontal.

I.4.3 Aspects énergétiques :

I.4.3.1 Le rayonnement solaire à la traversée de l'atmosphère :

Le rayonnement solaire se compose de radiations électromagnétiques émises par le soleil, dont le spectre s'étend des plus petites longueurs d'ondes (rayons gamma) vers les grandes ondes radioélectriques. Les parties de ce spectre qui jouent un rôle dans l'interaction du rayonnement solaire avec l'environnement terrestre sont essentiellement les bandes

infrarouges, visibles et ultraviolettes, ainsi que la gamme radioélectrique et celles des microondes. La distribution spectrale de ce rayonnement est donnée par la (**Figure I.15**).

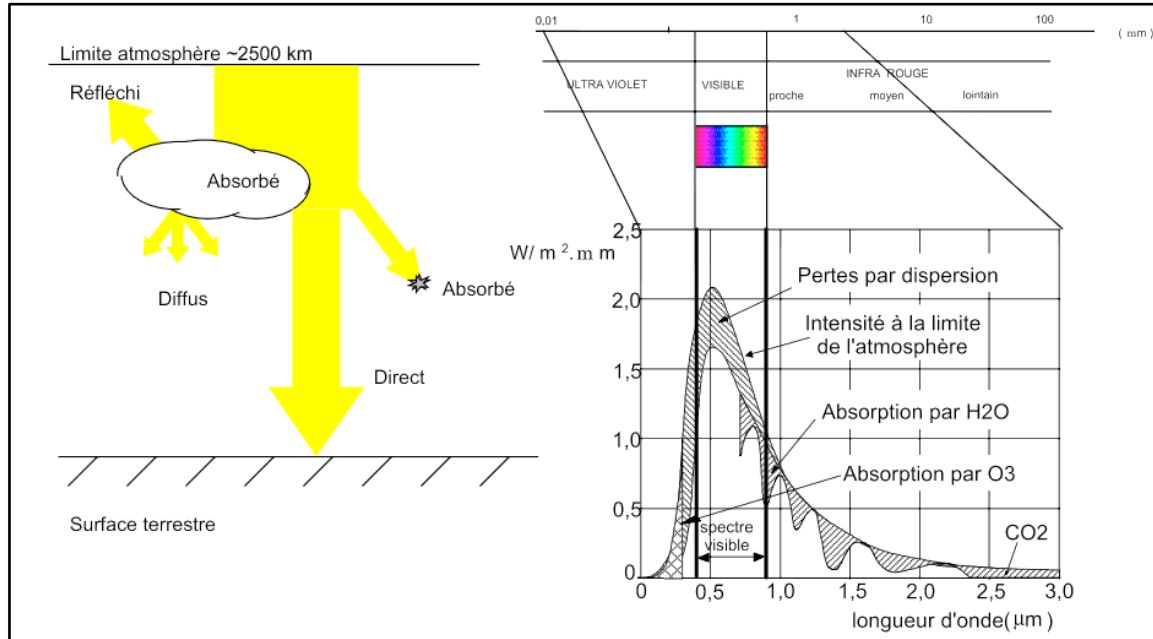


Figure I. 15 : *La répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère.*

La part du rayonnement qui traverse sans encombre l'atmosphère rencontre directement la surface terrestre : c'est le rayonnement direct. La part du rayonnement solaire réfléchi ou absorbé par des particules solides ou de gaz et rayonné à nouveau rencontre la surface terrestre dans toutes les directions : c'est le rayonnement diffus. La somme des rayonnements direct et diffus (**Figure I.16**) est appelée rayonnement global R_g . Il est de 1000 W/m^2 maximum dans des conditions optimales (ciel clair et sans nuages, à midi). Les capteurs solaires sont, selon le modèle et le dimensionnement de l'installation, en mesure d'utiliser jusqu'à 75 % environ du rayonnement global.

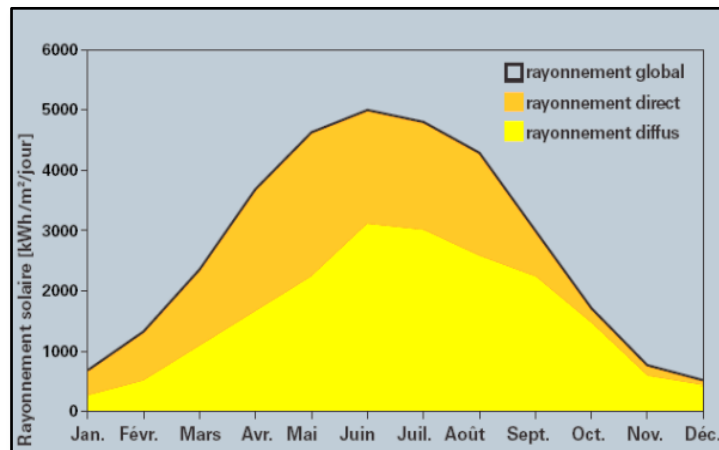


Figure I. 16: Puissance ratonnée quotidiennement par le soleil sur une année.

- **Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur la quantité d'énergie captée :**

L'orientation sud et une inclinaison de 30 à 45° environ par rapport à l'horizontale assurent les meilleurs rendements pour une installation solaire. Mais même avec des écarts importants (orientation sud-ouest à sud-est, inclinaison de 25 à 70°), une installation solaire reste rentable (**Figure I.17**).

Une inclinaison plus faible est conseillée si les capteurs ne peuvent pas être orientés vers le sud. Des capteurs solaires inclinés à 30° et orientés à 45° sud-ouest présentent encore 95 % de la puissance optimale. Et même en cas d'orientation est ou ouest, il est possible d'espérer encore 85 % si le toit est incliné de 25 à 40°. Une inclinaison plus forte du capteur offre l'avantage d'une fourniture d'énergie lissée sur l'année.

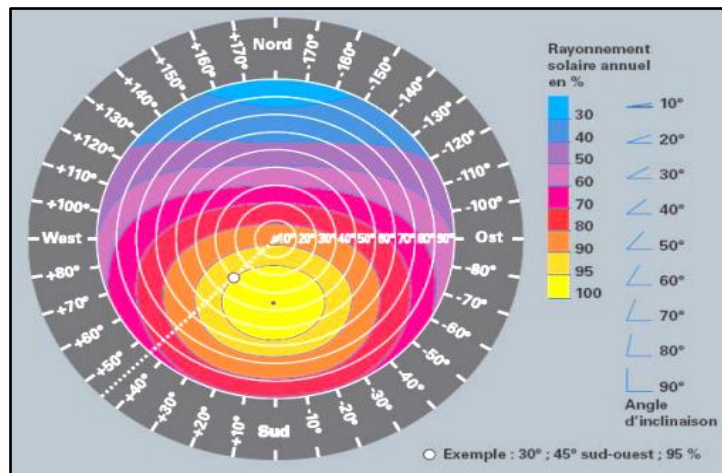


Figure I. 17 : Influence de l'orientation, de l'inclinaison et de l'ombrage sur l'énergie rayonnée.

I.5 Contexte national :

I.5.1 Situation géographique :

L'Algérie, située au nord d'Afrique, sur la côte méditerranéenne, de par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde et en particulier de la région MENA ^[17] (Figure I.18). Il possède un immense territoire avec plus de 2 millions de km² et dont plus de 80% est désertique est caractérisé par un important ensoleillement durant toute l'année (plus de 5000 Wh/m².j) et une profondeur raisonnable des eaux souterraines, constituant ainsi un environnement adéquat pour l'utilisation et au développement des systèmes d'énergie solaire.

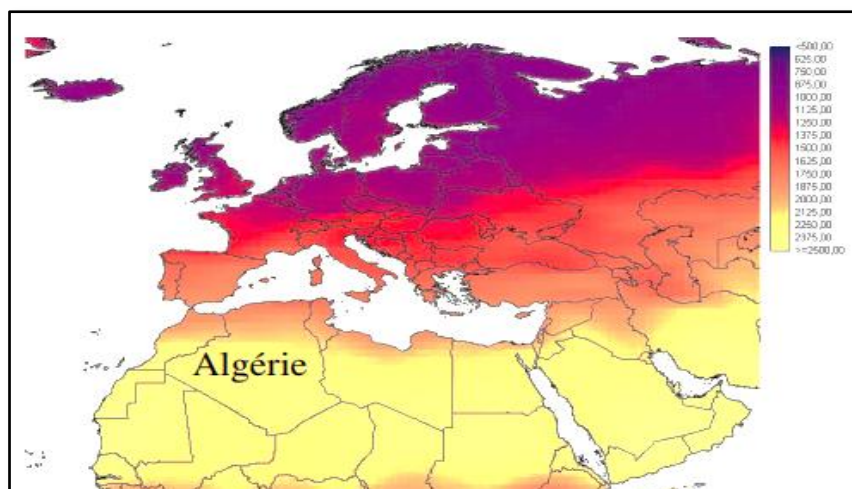


Figure I. 18 : La situation géographique de l'Algérie.

I.5.2 Le potentiel national en énergies renouvelables :

Aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, presque exclusivement, par les hydrocarbures, notamment le gaz naturel, énergie la plus disponible. Il n'est donc fait appel aux autres formes d'énergie que lorsque le gaz ne peut pas être utilisé. Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Comparativement, les potentiels en éolien, en biomasse, en géothermie et en hydroélectricité sont beaucoup moins importants. Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse et en géothermie.

‘Les niveaux des besoins en gaz naturel du marché national seraient de l'ordre de 45 milliards de m³ en 2020 et 55 milliards de m³ en 2030. À ces besoins s'ajoutent les volumes dédiés à l'exportation dont les revenus contribuent au financement de l'économie nationale. De même, la production d'électricité devrait se situer entre 75 à 80 TWh en 2020 et entre 130 à 150 TWh en 2030. L'intégration massive du renouvelable dans le mix énergétique constitue en ce sens un enjeu majeur en vue de préserver les ressources fossiles, de diversifier les filières de production de l'électricité et de contribuer au développement durable.

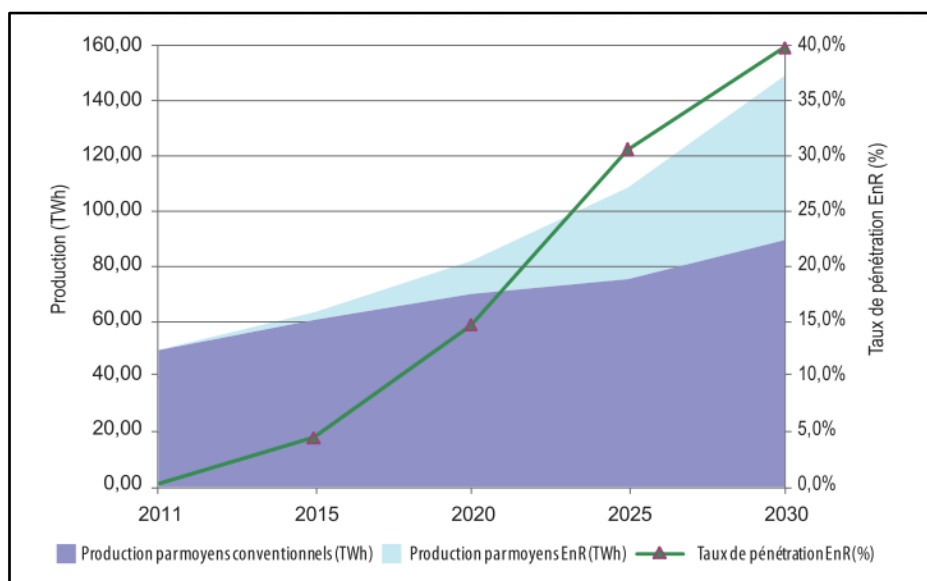


Figure I. 19 : Programme des énergies renouvelables Pénétration des ENR dans la production nationale ^[18].

« Toutes ces considérations justifient la forte intégration, dès aujourd'hui, des énergies renouvelables dans la stratégie d'offre énergétique à long terme, tout en accordant un rôle important aux économies d'énergie et à l'efficacité énergétique. L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile » ^[19].

« A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable. En effet, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir du solaire photovoltaïque et du solaire thermique qui seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance » ^[18].

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Qui constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37 de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

Conclusion :

L'accès à l'énergie est une préoccupation centrale dans la problématique du développement. A l'heure actuelle, un très grand nombre de personnes n'a toujours pas accès aux formes « modernes » d'énergie telles que l'électricité, le GPL, ou les énergies renouvelables. La demande est majoritairement couverte par des combustibles traditionnels, qui, en plus d'être très peu efficaces, posent de graves problèmes de santé et de pollution atmosphérique.

Ce premier chapitre récapitule les cadres réglementaires actuels et des obstacles à surmonter pour libérer le grand potentiel des énergies renouvelables notamment l'énergie solaire et leur permettre de contribuer enfin de façon majeure à la production énergétique mondiale. Ce faisant, elles pourront également contribuer à une croissance économiquement attractive sur le plan environnemental, au développement technologique, à la compétitivité sur le marché mondial et être le fleuron de l'industrie et de la recherche. Une mobilisation raisonnée et coordonnée de toutes les technologies renouvelables est très importante. Cela dépend des possibilités techniques, des coûts réels, du potentiel de réduction des coûts et de la maturité des technologies.

Bibliographie :

RAPPORT

- [1] Bernard MULTON Agrégé de génie électrique et Hamid BEN AHMED, Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité Maître de conférences HDR à l'École normale supérieure de Cachan site de Bretagne Chercheur au laboratoire SATIE – CNRS.
- [4] 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).
- [5] Source : Équipe du Rapport sur le développement dans le monde, sur la base de données IIASA 2009.
- [8] La convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique.
- [9] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ...
- [11] Source: unfccc et European environment agency.
- [14] P.I. Cooper, « The absorption of radiation in solar stills », *Sol. Energy* 12 (3), 333-346, 1969.
- [15] A.ZEROUAL, « Contribution à l'étude statistique et stochastique des données solaires au site de Marrakech », Diplôme d'étude supérieure de 3^{ème} cycle sciences physiques, spécialité traitement du signal, Université CADI AYYAD, 1988.
- [16] M.IQBAL, « An introduction to solar radiation », Academic press, New York, 1983.
- [17] *MENA: Middle East and North Africa.*
- [18] Abdelaziz boumahra, PDG de Rouibaeclairage.
- [19] Les Professeurs Yamani Noureddine, Mohammedi Kamal de l'université de Boumerdès et Khellaf Abdallah du Centre de développement des énergies renouvelables, CDER.

SITES INTERNET

- [2] <http://portail.cder.dz/spip.php?article2939>
- [3] <http://portail.cder.dz/spip.php?article1174>
- [6] http://www.lemonde.fr/planete/article/2011/11/09/les-emissions-de-co2-pourraient-augmenter-de-20-d-ici-a-2035_1601285_3244.html
- [7] <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15961>
- [10] <http://www.planetoscope.com/co2/261-emissions-mondiales-de-co2-dans-l-atmosphere.html>
- [12] http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/KeyFindings_2012_fra_02a.pdf
- [13] [WWW.asal-dz.org](http://www.asal-dz.org), 'Apport de la Télédétection pour la production d'un Atlas du Gisement solaire'.

CHAPITRE II

Analyse des différents systèmes de rafraîchissement solaire

Introduction:	33
I.1 Rafraîchissement solaire :	33
I.1.1 L'état de l'art de la climatisation solaire:	34
I.1.2 Principes généraux de climatisation:	35
I.1.3 Avantages et inconvénients de la climatisation solaire :	36
I.2 Techniques de Production de froid solaire :	37
I.2.1 Rafraîchissement par le solaire photovoltaïque :.....	38
I.2.2 L'état de l'art des systèmes de rafraîchissement thermique :	44
I.2.2.1 Rafraîchissement solaire thermomécanique :	45
I.2.2.2 Rafraîchissement par sorption :	47
I.2.2.2.1 Absorption :	50
I.2.2.2.2 Adsorption :	51
I.2.2.2.3 Dessicantcooling :	53
I.2.3 Avantages et inconvénients de chaque technique :	57
I.2.4 Les aspects économiques des systèmes de climatisation solaire :	57
I.2.5 Les capteurs solaires thermiques utilisés pour les systèmes de climatisation solaire :.....	59
I.2.6 Nouvelles technologies de refroidissement :	62
I.2.7 Revue des installations de climatisation solaire dans le monde :	63
I.3 Les modèles dynamiques :	64
Conclusion :	65
Bibliographie :	66

TABLE DES FIGURES :

Figure II.1: *Adéquation entre la présence de soleil et besoin en climatisation.* 34

Figure II. 2: *Comparaison entre les systèmes de la climatisation solaire et la climatisation conventionnelle ^[8].*..... 37

Figure II.3 : *Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque.*..... 39

Figure II.4: *Schéma d'un climatiseur à compression électrique à base solaire.*..... 40

Figure II.5: *Schéma représente l'usage direct de l'énergie solaire thermique.*..... 45

Figure II.6: *Système de rafraîchissement solaire thermomécanique.* 45

Figure II.7: *Système de climatisation solaire par sorption.* 48

Figure II.8 : *Les différentes technologies de production de froid solaire [Henning, 07].* 49

Figure II. 10 : *Schéma de principe de fonctionnement d'une machine à absorption à base solaire.* 51

Figure II. 11: *Schéma de principe d'une machine à adsorption.*..... 52

Figure II. 12: *Schéma de principe de fonctionnement d'une machine à adsorption à base solaire.* 53

Figure II. 13: *Système de climatisation à dessicant cooling.* 54

Figure II. 14 : *Cycle standard de réfrigération à dessiccation avec l'énergie solaire thermique et le changement des états d'air pendant le processus dans le diagramme humide T_S.*55

Figure II. 15: *Exemple d'une unité de traitement d'air à dessiccation avec une roue déshydratante (débit d'air nominale est de 4500 m³/h).*..... 56

Figure II.16: *Plage des coûts spécifiques pour les différents types de refroidisseurs en fonction de la puissance de refroidissement (chiffres comprennent les coûts dispositif de rejet de chaleur, c'est à dire, l'air de refroidissement ou d'une tour de refroidissement, mais n'inclut pas le coût d'installation).* 58

Figure II. 17 : *Efficacité des différents capteurs solaires et applications aux différentes technologies de climatisation solaire. (INES)* 61

TABLEAUX :

Tableau II.1: *Les applications de la climatisation dans secteur résidentiel et tertiaire.* 36

Tableau II. 2: *L'ensemble des techniques de rafraîchissement solaire.*..... 38

Tableau II. 3: *Panorama des technologies de rafraîchissement solaire les plus couramment utilisées.* 43

Tableau II. 4 : *Systèmes de rafraîchissement solaire thermique.*..... 44

Tableau II. 5 : *Avantages et Inconvénients des technologies de climatisation solaire commercialement disponibles.* 57

Tableau II. 6 : *Les différents capteurs utilisés pour les différentes applications de climatisation solaire.*..... 60

Tableau II. 7: *Récapitulatif sur quelques technologies de climatisation solaire.* 63

Nomenclature :

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	<i>unité</i>
A_s	<i>La surface de la cellule</i>	m^2
COP	<i>Coefficient de Performance</i>	-
I_p	<i>L'irradiation directe du faisceau solaire</i>	kW/m^2
\dot{Q}	<i>La puissance</i>	kW
T_H	<i>Temperature of high – temperature heat source</i>	k
T_L	<i>Temperature of low – temperature heat source</i>	k
T_M	<i>Temperature of low – temperature heat sink</i>	k
\dot{W}	<i>La puissance mécanique</i>	kW
μ	<i>Efficacité</i>	-
Indice		
<i>a</i>	<i>absorbeur</i>	
<i>c</i>	<i>condenseur</i>	
<i>e</i>	<i>évaporateur</i>	
<i>g</i>	<i>générateur</i>	
<i>s</i>	<i>radiation solaire</i>	

Introduction:

La climatisation de la plupart des bâtiments est assurée par des machines frigorifiques à compression, ce qui va clairement à l'opposé d'objectifs d'économie d'énergie et de protection de l'environnement ^[1]. L'Algérie connaît une demande de confort thermique de plus en plus exigeante de la part du citoyen. Cette demande nécessite en particulier des installations de chauffage et de climatisation très énergivores. En plus, en été, la charge électrique maximale annuelle de pointe est souvent enregistrée dans la matinée, plus précisément vers midi. La croissance de cette demande, en particulier dans les régions chaudes, imposent de s'orienter vers de nouvelles solutions. De ce fait le rafraîchissement solaire de bâtiments est une des solutions les plus attractives à l'heure actuelle. Contrairement aux autres applications solaires telles que l'eau chaude, la demande en climatisation est en adéquation avec la période où le rayonnement solaire est le plus intense ^[2]. Le climat Algérien favorise l'utilisation de ces systèmes puisqu'il dispose d'un bon gisement solaire ^[3].

I.1 Rafraîchissement solaire :

Le rafraîchissement solaire terme antinomique, consiste à produire du froid à partir de l'énergie solaire, son intérêt est immédiat, il réside dans la simultanéité de la demande de froid et de l'ensoleillement cf. (**Figure II.1**). Lorsque la chaleur nécessaire au fonctionnement de la machine frigorifique est fournie par le soleil, le froid fourni est gratuit.

Cette idée d'adéquation entre ensoleillement et utilisation de cette énergie solaire est très importante et c'est d'ailleurs l'un des problèmes majeurs des applications classiques et éprouvées de l'énergie solaire qu'elle soit convertie en énergie électrique ou calorifique. En effet, lorsque l'on utilise, des panneaux solaires thermiques afin d'assurer le chauffage d'une habitation par plancher solaire directe ou émetteur basse température, il est évident que l'adéquation entre l'ensoleillement et le besoin de chauffage au niveau annuel est très mauvais. La même remarque peut être au niveau de la production d'eau chaude sanitaire (ECS) (Eau chaude sanitaire) et dans ce cas-là quant à l'adéquation quotidienne. Il n'est en effet pas évident du tout que l'utilisation maximum d'ECS soit en corrélation avec l'ensoleillement maximum. C'est exactement le même type de problématique au niveau de la production d'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques (PV).

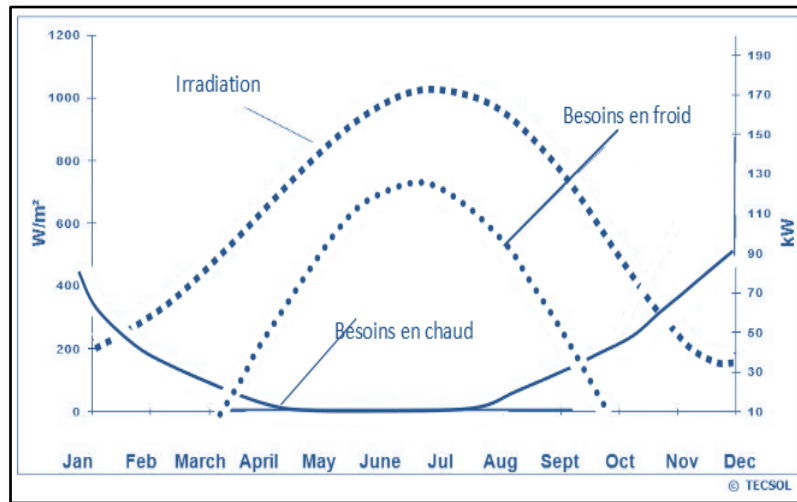


Figure II.1: Adéquation entre la présence de soleil et besoin en climatisation.

Les mêmes panneaux solaires thermiques pourront alors être utilisés en hiver pour assurer le chauffage des locaux et en été leur rafraîchissement. Leur utilisation sur l'année par rapport aux cas habituels où ces panneaux ne servent que durant une période, en l'occurrence l'hiver dans le cas du chauffage.

I.1.1 L'état de l'art de la climatisation solaire:

L'installation de climatisation est en très forte augmentation au travers le monde, cette filière est d'ailleurs souvent vécue dans les régions chaudes et/ou tropicales comme un vivier de métiers d'avenir. À expliquer Daniel MUGNIER ^[4]. Même avec une utilisation optimale des techniques passives, un système de climatisation peut s'avérer nécessaire, dans ce contexte, l'utilisation de l'énergie solaire pour le rafraîchissement est un concept séduisant, surtout quand la source de chaleur utilisée est "gratuite" comme c'est le cas de l'énergie solaire. L'idée n'est pas nouvelle car dès 1956 F. TROMBE et M. FOEX travaillaient dans cette voie ^[5]. Mais ce n'est que depuis quelques années que s'affirme réellement la volonté de développer les filières de réfrigération solaire. L'intérêt de ces filières est manifeste, que ce soit pour les pays industrialisés, ou que ce soit pour une utilisation dans les pays en voie de développement. En ce qui concerne les premiers, la consommation de l'ensemble des machines frigorifiques est loin d'être négligeable. Par exemple pour la France en 1978, elle représente 5 % de la consommation totale d'électricité ^[6]. Par ailleurs, les systèmes de climatisation ou de rafraîchissement solaires pourraient sans aucun doute contribuer à une économie substantielle d'énergie. En plus, ces systèmes ont l'avantage de supprimer la plupart

des nuisances d'une climatisation classique : une consommation d'électricité réduite, des fluides frigorigènes inoffensifs, des nuisances sonores supprimées, une réponse aux problématiques en termes d'infrastructures réseaux électriques en milieu insulaire face au développement considérable de la climatisation « standard ».

I.1.2 Principes généraux de climatisation:

Utiliser l'énergie solaire pour produire du froid peut revêtir plusieurs aspects mais l'objectif final est toujours de limiter l'utilisation d'une climatisation classique réputée pour ses impacts négatifs sur l'environnement. Les potentialités du marché du froid solaire sont énormes, d'autant plus que les besoins en réfrigération croissent en permanence. Dans le monde entier, environ 100 millions de climatiseurs fixes sont vendus chaque année. La dépense d'énergie primaire pour cette climatisation est d'environ 150 kWh/m²/an, bien plus élevé que la consommation d'énergie de chauffage des bâtiments neufs ^[7].

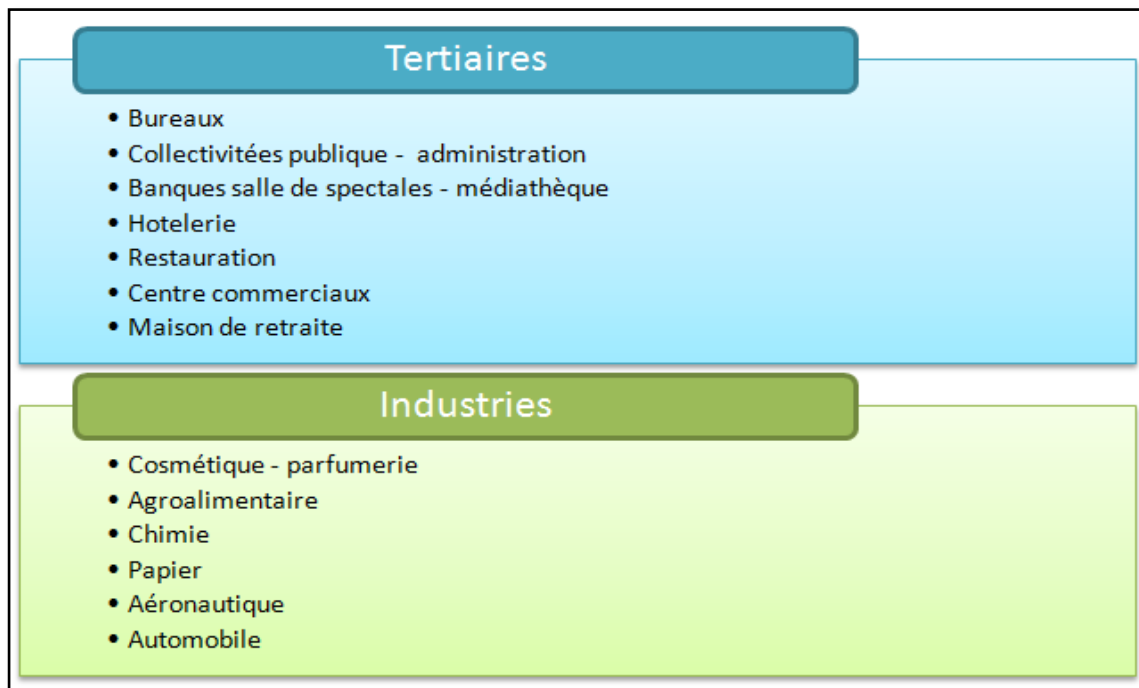
Un climatiseur traditionnel produit du froid en comprimant un fluide dit « frigorigène » ou « réfrigérant » qui a la capacité d'absorber de grosse quantité de chaleur (calories) lorsqu'il passe de sa phase liquide à sa phase gazeuse au niveau de l'évaporateur. Un climatiseur consomme par conséquent de l'électricité pour actionner le compresseur et du fluide frigorigène. En effet, bien qu'il soit en circuit fermé, les fuites de fluide ne sont pas rares. Les impacts sur la consommation d'électricité et l'environnement sont donc loin d'être négligeables sachant que les fluides frigorigènes sont des gaz à effet de serre dont le pouvoir de réchauffement est beaucoup plus élevé que celui du CO₂ : jusqu'à 2.000 fois et plus. Utilisation de l'énergie solaire pour ces installations s'avère nécessaire. Dans le cas de la climatisation solaire, l'énergie calorifique délivrée par le système solaire est utilisée par des machines de production de froid ou de traitement d'air pour produire de l'énergie frigorifique permettant d'assurer le rafraîchissement des locaux. Cette technique est écologique puisque elle a des avantages considérables, tout en réduisant les émissions de CO₂, et aussi en supprimant l'utilisation de réfrigérants contestés, les chlorofluorocarbure (CFC).

« Systèmes de conditionnement d'air des bâtiments assistés par le solaire » (L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). Autrement dit, l'alimentation de l'installation repose sur un mix énergie solaire/énergie conventionnelle, la contribution solaire pouvant aller de quelques pourcent à 100 % théoriquement. Lorsque l'installation fonctionne uniquement grâce à la ressource solaire, le système ne permet alors d'obtenir qu'une

diminution de la température de l'air du local de quelques degrés par rapport à l'air extérieur: on parle alors de rafraîchissement. À l'inverse, une installation associant systèmes solaire et d'appoint permet de maintenir une ambiance thermique et hygrométrique constante dans les locaux, quelles que soient les conditions extérieures : on parle alors de climatisation, explique l'ADEME dans une note de synthèse.

○ **Quelques applications de la climatisation :**

Tableau II.1: Les applications de la climatisation dans secteur résidentiel et tertiaire.



I.1.3 Avantages et inconvénients de la climatisation solaire :

Quelle que soit la technique utilisée (absorption, adsorption ou DEC), la climatisation solaire permet d'exploiter une énergie renouvelable et gratuite, Elle offre une solution de climatisation propre. Les fluides frigorigènes employés sont totalement inoffensifs pour l'environnement (à la différence des fluides utilisés dans les systèmes conventionnels). Par ailleurs, la climatisation solaire permet de réduire les émissions de CO2.

Elle a aussi pour avantage de pouvoir fournir le plus de froid quand il fait le plus chaud, dans les périodes où le soleil est le plus disponible. Efficaces et silencieuses, ces technologies ont une durée de vie plus longue que les systèmes de réfrigération classiques (25 ans contre 10 ou 15 ans pour un système classique). Cependant, la climatisation solaire affiche quelques

inconvenients d'ordre essentiellement économique. Elle serait trois à cinq fois plus coûteuse qu'une climatisation traditionnelle. Toutefois, d'après les experts, les prix devraient rapidement baisser dans les années à venir. Autre point négatif, le nouveau système ne serait pas encore adapté à l'habitation individuelle étant donné que le dispositif de climatisation solaire ne pourrait rafraîchir qu'une surface équivalente au triple de celle prise par ses panneaux photovoltaïques. De ce fait, le développement de ce nouveau système de climatisation rencontrerait quelques freins en termes de réglementation due à son faible coefficient de performance (COP).

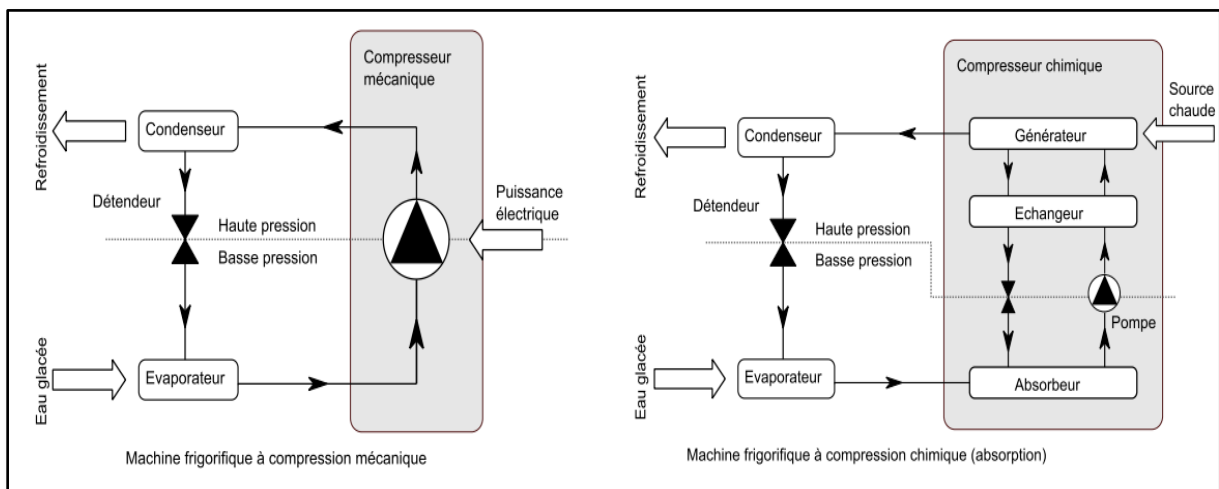
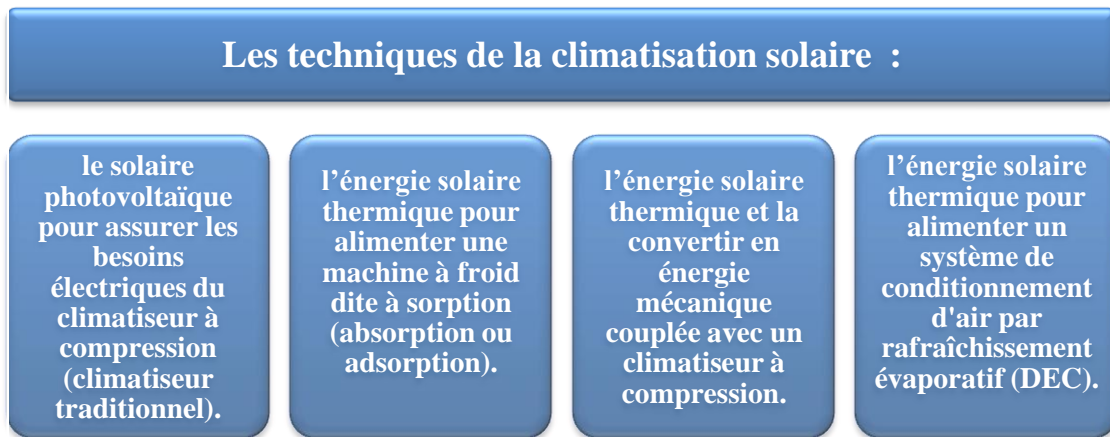


Figure II. 2: Comparaison entre les systèmes de la climatisation solaire et la climatisation conventionnelle ^[8].

I.2 Techniques de Production de froid solaire :

Il existe quatre techniques de produire du froid (**Tableau II.2**) en utilisant l'énergie solaire, La première, qui est la moins innovante, utilise l'électricité photovoltaïque pour faire fonctionner un climatiseur traditionnel. La deuxième technique consiste à convertir l'énergie solaire en énergie mécanique qui sera ensuite couplée avec un climatiseur à compression pour réfrigérer. La troisième solution utilise la conversion de l'énergie thermique du soleil pour alimenter une machine à froid dite « à sorption », absorption ou adsorption, pour refroidir son environnement. Alors que la quatrième méthode consiste à utiliser la chaleur produite à partir de l'énergie solaire pour alimenter un système de conditionnement d'air par rafraîchissement évaporatif (Dessicant Evaporatif Cooling).

Tableau II. 2: L'ensemble des techniques de rafraîchissement solaire.



I.2.1 Rafraîchissement par le solaire photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839), ou la technique associée. L'intérêt de cette technique est de convertir l'énergie du Soleil directement en électricité. La première application est apparue dans le domaine spatial pour les satellites. D'autres secteurs ont ensuite utilisé la technologie photovoltaïque notamment les télécommunications, le balisage maritime et aérien, l'éclairage domestique et le pompage de l'eau. Mais comme le Soleil n'est pas visible en un point de la Terre 24/24 heures, cette application nécessite l'utilisation de batteries ou autres systèmes qui assurent le stockage de l'énergie en vue d'une consommation hors période d'ensoleillement.

L'électricité solaire pourrait représenter jusqu'à 20% à 25% de la production mondiale d'électricité d'ici 2050. Cette constatation émane de deux nouvelles analyses de (AIE) (L'Agence internationale de l'énergie) sur le solaire photovoltaïque (PV) et l'énergie solaire à concentration (CSP), lancées à Valence en Espagne en mai 2010 lors de la Conférence plan solaire méditerrané en organisée par la présidence espagnole de l'UE.

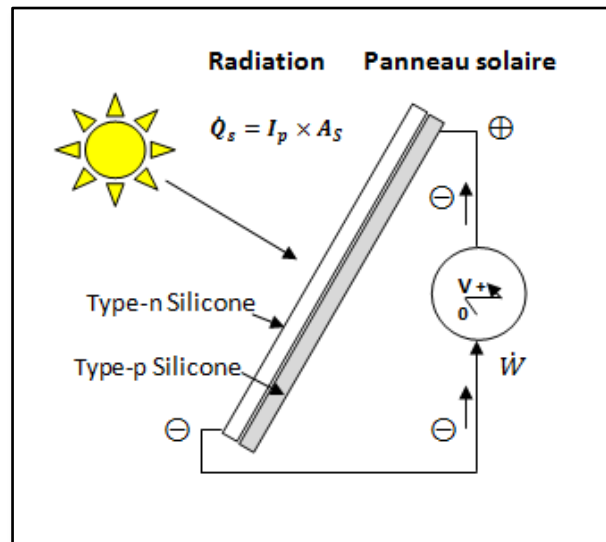


Figure II.3 : Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque.

L'alimentation d'un groupe à compression classique par des panneaux photovoltaïques n'est pas envisageable actuellement, essentiellement pour des questions de coût des panneaux. Selon l'Institut national du Solaire (INES), dans quelques décennies, lorsque le prix de ces derniers aura suffisamment diminué, et que des groupes frigorifiques utilisant des fluides frigorigènes sans impacts sur l'effet de serre ou la couche d'ozone seront disponibles, il faudra se reposer la question. Un système rafraîchissement par le solaire photovoltaïque se compose principalement de panneaux photovoltaïques et un dispositif de refroidissement électrique.

Dans l'équation. (II.1), le rendement d'un panneau solaire photovoltaïque est le rapport entre la puissance \dot{W} (KW) et le produit de la surface de la cellule /le panneau solaire A_s (m^2) et l'irradiation directe du faisceau solaire $I_p = 1 \text{ KW}/m^2$ est couramment utilisé pour le calcul du rendement nominal.

$$\mu_{\text{puissance-solaire}} = \frac{\dot{W}}{I_p \times A_s} = \frac{W}{Q_s} \quad (\text{II.1})$$

Le plus grand avantage de l'utilisation des panneaux solaires photovoltaïques pour la production du froid serait une simple construction à haute efficacité quand il est combiné avec un climatiseur classique à compression de vapeur. Le schéma de principe d'un tel système est donné dans la (Figure II.4).

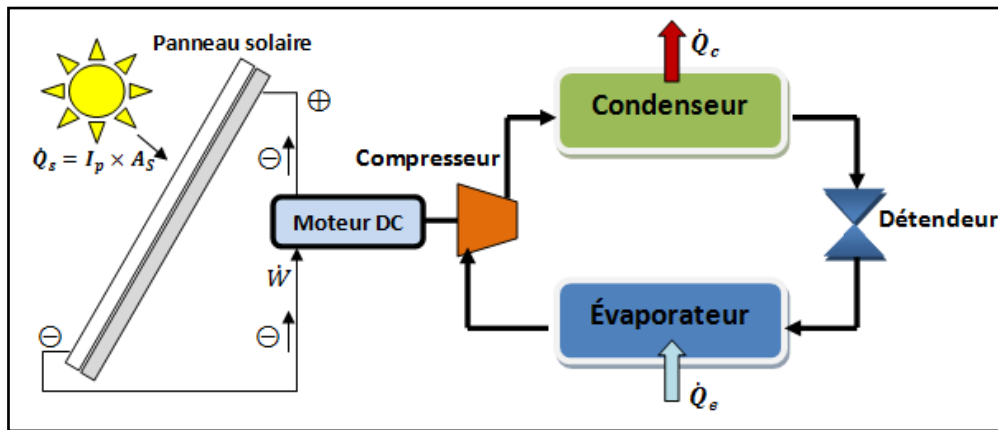


Figure II.4: Schéma d'un climatiseur à compression électrique à base solaire.

Dans la (Figure II.4), la puissance \dot{W} est consommée par le compresseur mécanique pour produire une puissance frigorifique \dot{Q}_e . L'efficacité de la machine de réfrigération est définie comme étant la puissance frigorifique \dot{Q}_e divisé par \dot{W} comme dans l'équation. (II.2).

$$\mu_{\text{puissance frigorifique}} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}} \quad (\text{II.2})$$

La combinaison des deux efficacités dans les équations. (II.1) et (II.2) donne l'énergie solaire nécessaire pour le refroidissement ou l'efficacité globale d'un système solaire à refroidissement électrique comme dans l'équation. (II.3).

$$\mu_{\text{froid solaire}} = \mu_{\text{puissance solaire}} \times \mu_{\text{puissance frigorifique}} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_s} \quad (\text{II.3})$$

NB :

COP (Coefficient de Performance) est un terme alternatif à l'efficacité, il est couramment utilisé dans les domaines de la réfrigération.

Considérant que le COP d'un système bien conçu d'air refroidi par un climatiseur à compression de vapeur est de l'ordre 3 à 4, quand il est combiné avec des panneaux solaires photovoltaïques avec une efficacité de 10%, le système va produire le froid à un rendement global entre 30 et 40%.

Les systèmes de climatisation à compression de vapeur à base solaire sont rares et seulement quelques systèmes sont trouvés dans la littérature [Rudischer et al, 2005].

Le COP_s des machines de refroidissement à compression de vapeur est varié de 1,1 à 3,3 pour des températures vaporisation variante entre -5 et 15 ° C et des températures de condensation entre 45 et 61 ° C. Des modules PV Monocristallins et des compresseurs à vitesse variable ont été utilisés avec des batteries où des générateurs pour le stockage.

Il y a plusieurs défis dans l'ensemble de la commercialisation de ce type de systèmes:





Tout d'abord, les systèmes doivent être équipés avec des moyens pour faire face au taux de la variation de production de l'électricité au cours du temps, par exemple batterie électrique, à usage mixte du réseau électrique et solaire ou un compresseur à capacité variable et ainsi de suite. Deuxièmement, climatiseurs à haute efficacité basée sur les gaz frigorigènes respectueux à l'environnement devrait être disponible sur le marché. Enfin, le prix des panneaux solaires photovoltaïques doivent être encore diminué afin de pouvoir entrer en concurrence avec les autres technologies de rafraîchissement solaire. Jusqu'à présent, le problème majeur du rafraîchissement à base solaire photovoltaïque est le prix élevé du panneau solaire photovoltaïque. Si 10% d'efficacité électrique du panneau solaire est combiné avec un climatiseur à compression de vapeur d'un $COP = 3,0$, le rendement global sera de 30% [Dans Grossman (2002)].

En conclusion, on peut tout de même se demander s'il vaut mieux utiliser une climatisation solaire s'appuyant sur un procédé thermodynamique nécessitant un apport de chaleur donc des panneaux solaires thermiques ou alors installer une centrale photovoltaïque pour une climatisation conventionnelle. Pour répondre à cette question il faudrait réaliser une comparaison économique et énergétique aussi des deux solutions. Cependant, même si avec la solution photovoltaïque, on utilise une énergie d'origine renouvelable, il subsiste toujours le problème de l'utilisation de fluides frigorigènes HCFC. En effet, les climatisations solaires thermiques n'utilisent pas de tels fluides.

Donc la climatisation solaire thermiques, c'est elle qui présente l'intérêt environnemental le plus important et dont le développement est plus notable aujourd'hui. Le (Tableau II.3) représente les types de systèmes de climatisation solaire thermique. Ce sont donc des systèmes qui, comme nous l'avons dit, utilisent comme principale source d'énergie, de la chaleur solaire et qui produisent, en fonction de la technologie utilisée de l'eau glacée ou directement de l'air conditionné. Les technologies et les systèmes que nous allons voir n'ont aucune application de faible puissance frigorifique applicable à l'habitat individuel par

exemple et aux particuliers. Les applications recensées aujourd'hui sont essentiellement la climatisation de bâtiments tertiaires ou du moins des bâtiments demandant une grande puissance frigorifique.

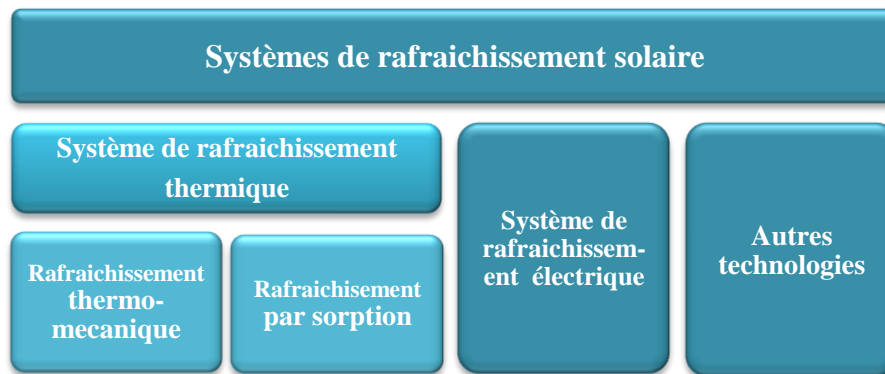
Tableau II. 3: Panorama des technologies de rafraîchissement solaire les plus couramment utilisées.

méthode	Cycle fermé		Cycle ouvert	
Cycle du réfrigérant	Cycle du réfrigèrent fermé		Le réfrigérant (eau) est en contact avec l'atmosphère	
principe	Eau glacée		Dés humidification de l'air et refroidissement évaporatif	
Phase du sorbant	Solide	liquide	Solide	Liquide
				
Couples utilisés	Eau-silica gel	Eau-bromure de lithium Ammoniaque-eau	Eau-silica gel Eau-chlorure de lithium	Eau-chlorure de calcium Eau- chlorure de lithium
Technologie disponible sur le marché	Machine à adsorption	Machine à absorption	Système à dessiccation	Proche de l'introduction sur le marché
Gamma puissance froid (KW froid)	50 - 340KW	15KW - 5KW	20KW -350KW par module	
COP nominal	0.5 - 0.7	0.6 - 0.75 (simple effet)	0.5 - >1	>1
Température de fonctionnement	60 - 90°C	80 – 110°C	45 – 95°C	45 – 70°C
Capteur solaire	Tubes sous vide, capteurs plans	Tube sous vide	Capteurs plans, capteurs à air	Capteurs plans, capteurs à air

I.2.2 L'état de l'art des systèmes de rafraîchissement thermique :

Contrairement à la climatisation électrique traditionnelle qui produit du froid en comprimant un fluide, dans les machines à sorption, la compression mécanique est remplacée par une compression thermique. Le fluide frigorigène utilisé dans ces systèmes est de l'eau additionnée d'un second composant. Si ce dernier est un liquide, on parle alors d'absorbant et de machine à absorption, si c'est un solide poreux, on parle alors d'adsorbant et de machine à adsorption.

Tableau II. 4 : Systèmes de rafraîchissement solaire thermique.



L'énergie solaire thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire soit en usage direct comme le chauffe-eau et les chauffages solaires, cuisinières et sécheuses solaires ; ou en usage indirect, le rafraîchissement solaire, dessalement, etc. De ce fait, elle est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau ou des locaux. Et pour cela on utilise les capteurs thermiques. Il en existe plusieurs catégories, mais le principe est toujours le même : le capteur thermique absorbe les photons solaires et les transforme en chaleur. Celle-ci est ensuite transmise par un fluide caloporteur qui la transporte vers un réservoir de stockage de chaleur, cette chaleur qui va être utilisée par la suite dans un système, soit un système de rafraîchissement solaire.

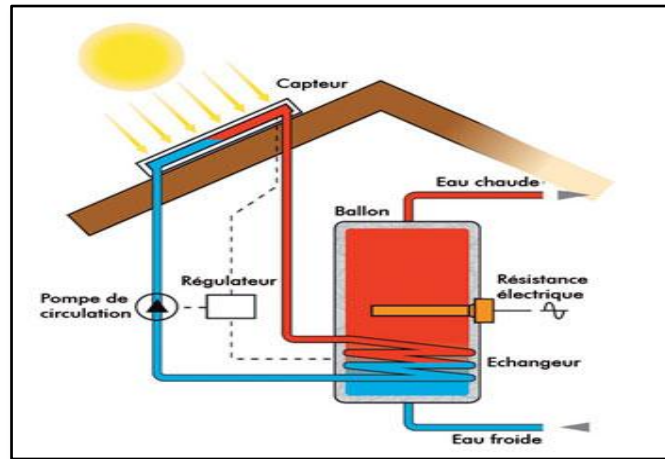


Figure II.5: Schéma représente l'usage direct de l'énergie solaire thermique.

I.2.2.1 Rafraîchissement solaire thermomécanique :

Dans un système de rafraîchissement solaire thermomécanique, un moteur thermique convertit la chaleur solaire en puissance mécanique, qui à son tour entraîne un compresseur de vapeur mécanique d'une machine à réfrigération; Un schéma de principe d'un tel système de refroidissement est montré dans la (Figure II.6).

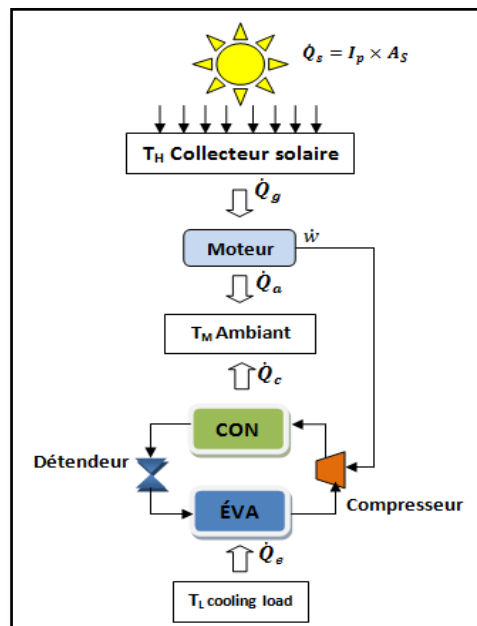


Figure II.6: Système de rafraîchissement solaire thermomécanique.

Dans la (Figure II.6), un capteur solaire reçoit l'énergie solaire \dot{Q}_s , produite entre la surface du capteur A_s (m^2), et l'irradiation solaire normale à la surface I_p (KW/m^2).

Voir l'équation (II.4), à partir de l'énergie solaire \dot{Q}_s et de la chaleur fournie \dot{Q}_g à un moteur thermique à la température T_H . L'apport entre \dot{Q}_g et \dot{Q}_s est défini comme étant le rendement thermique d'un capteur solaire thermique, $\mu_{\text{Capteur-solaire}}$.

$$\mu_{\text{Capteur-solaire}} = \frac{\dot{Q}_g}{I_p \times A_s} = \frac{\dot{Q}_g}{\dot{Q}_s} \quad (\text{II.4})$$

$\mu_{\text{Capteur-solaire}}$ Serait de 1,0 si le capteur solaire est un corps noir parfaitement isolé. En réalité, il est inférieur à 1 en raison des pertes optiques et thermiques.

Un moteur thermique produit une puissance mécanique \dot{W} et rejette de la chaleur \dot{Q}_a à une température ambiante T_M . L'efficacité du moteur $\mu_{\text{moteur thermique}}$ est définie comme étant le rapport entre la puissance produite et la chaleur fournie \dot{Q}_g dans l'équation (II.5).

$$\mu_{\text{moteur thermique}} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_g} \quad (\text{II.5})$$

La puissance mécanique \dot{W} à son tour entraîne le compresseur d'une machine de réfrigération pour extraire la chaleur \dot{Q}_e à partir du local à refroidir à la température T_L . La chaleur \dot{Q}_c , qui est égale à la somme de \dot{Q}_e et \dot{W} , est rejetée à l'air ambiant à la température T_M . L'efficacité de la machine à réfrigération est la même que dans l'équation (II.2).

Ensuite l'efficacité globale d'un système thermomécanique de refroidissement solaire est proposée par les trois efficacités dans les équations (II.4), (II.5) et (II.2) comme suivant :

$$\mu_{\text{globale}} = \mu_{\text{Capteur-solaire}} \times \mu_{\text{moteur thermique}} \times \mu_{\text{puissance frigorifique}} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_s} \quad (\text{II.6})$$

Les efficacités maximales du véritable moteur et machine de réfrigération sont limitées par celles des Cycles de Carnot travaillant dans les mêmes températures. L'efficacité d'un cycle moteur de Carnot travaillant entre les températures T_H et T_M est donnée par :

$$\mu_{\text{mécanique}}^{\text{Carnot}} = \frac{T_H - T_M}{T_H} \quad (\text{II.7})$$

Et pour le rendement d'un cycle de réfrigération de Carnot travaillant entre les Température ; T_M et T_L est donnée par :

$$\mu_{\text{thermique}}^{\text{Carnot}} = \frac{T_L}{T_M - T_L} \quad (\text{II.8})$$

Le produit de deux rendements de Carnot dans l'équation (II.7) et (II.8) donne l'efficacité d'une machine frigorifique idéale entre les trois températures entraîné par la chaleur et le travail.

$$\mu_{\text{thermomécanique}}^{\text{Carnot}} = \mu_{\text{mécanique}}^{\text{Carnot}} \times \mu_{\text{thermique}}^{\text{Carnot}} = \frac{T_L}{T_H} \left(\frac{T_H - T_M}{T_M - T_L} \right) \quad (\text{II.9})$$

Dans un système solaire thermomécanique, l'efficacité d'un moteur thermique est d'un intérêt particulier. Parce que la température de la source chaude T_H varie dans différents projets, la performance d'un réel moteur est souvent comparée à celle d'un cycle de Carnot travaillant aux mêmes températures. Le rapport entre l'efficacité réelle et l'efficacité de Carnot est appelé « l'efficacité de deuxième loi ». Il s'agit d'une mesure de façon étroite d'une véritable machine fonctionne à une machine idéale.

1.2.2.2 Rafrâichissement par sorption :

La sorption est le processus par lequel une substance est adsorbée ou absorbée sur ou dans une autre substance ^[9]. Elle résulte de l'action de molécules de gaz ou de liquide mis en contact avec un matériau solide, et qui adhèrent à sa surface (adsorption) ou s'incorpore dans la totalité de son volume (absorption). Dans les deux cas, la molécule fixée n'est plus présente dans le solvant ^[10]. L'effet de refroidissement est obtenu en disposant correctement ces processus. Puisque l'énergie primaire impliquée dans ces processus est la chaleur du soleil plutôt que de travaille, un Système de réfrigération par sorption a une capacité unique de transformation de l'énergie thermique directement en énergie frigorifique.

Parmi les deux substances, la substance dont la température d'ébullition est inférieure est appelé sorbate et l'autre est appelée sorbant. La chaleur est produite pendant que le sorbant absorbe le sorbate, qui joue le rôle de fluide frigorigène. Inversement, il convient d'ajouter de la chaleur à l'agent absorbant pour séparer le réfrigérant. La (Figure II.7) montre un schéma d'un système de sorption fermé. Dans la figure, la composante d'où la sorption est à lieu est désigné comme absorbeur et celle d'où la désorption est à lieu est désigné comme un générateur.

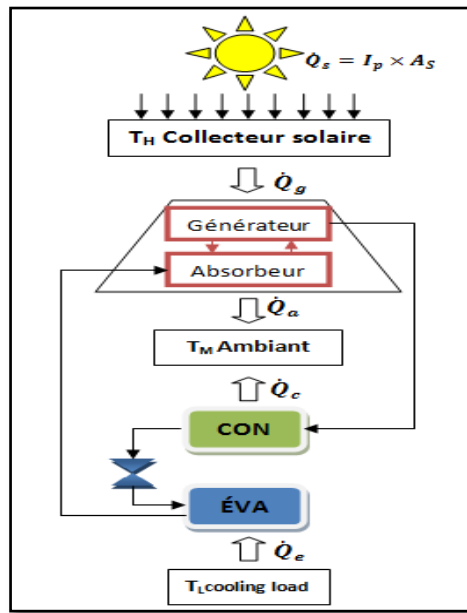


Figure II.7: Système de climatisation solaire par sorption.

En raison de l'ambiguïté dans la définition des fonctions du moteur et du compresseur dans une machine de refroidissement à sorption, une seule efficacité de refroidissement par la chaleur est utilisée l'équation. (II.10), qui peut être utilisée pour n'importe quelle machine de refroidissement entraînée par la chaleur. Cette efficacité est plus communément appelé COP.

$$\mu_{\text{Chaleur-froid}} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad (\text{II.10})$$

- **Technologies de climatisation solaire par sorption :**

Il existe plusieurs voies d'utilisation de l'énergie solaire pour produire du froid. La première est basée sur l'emploi de l'électricité, la deuxième sur l'utilisation d'un procédé thermomécanique, enfin la troisième sur des cycles basé sur la sorption d'un gaz. Toutes les techniques utilisées sont listées dans la (Figure II.8), en bleu les technologies actuellement en test à l'échelle réelle, et en vert les technologies commercialement disponibles.

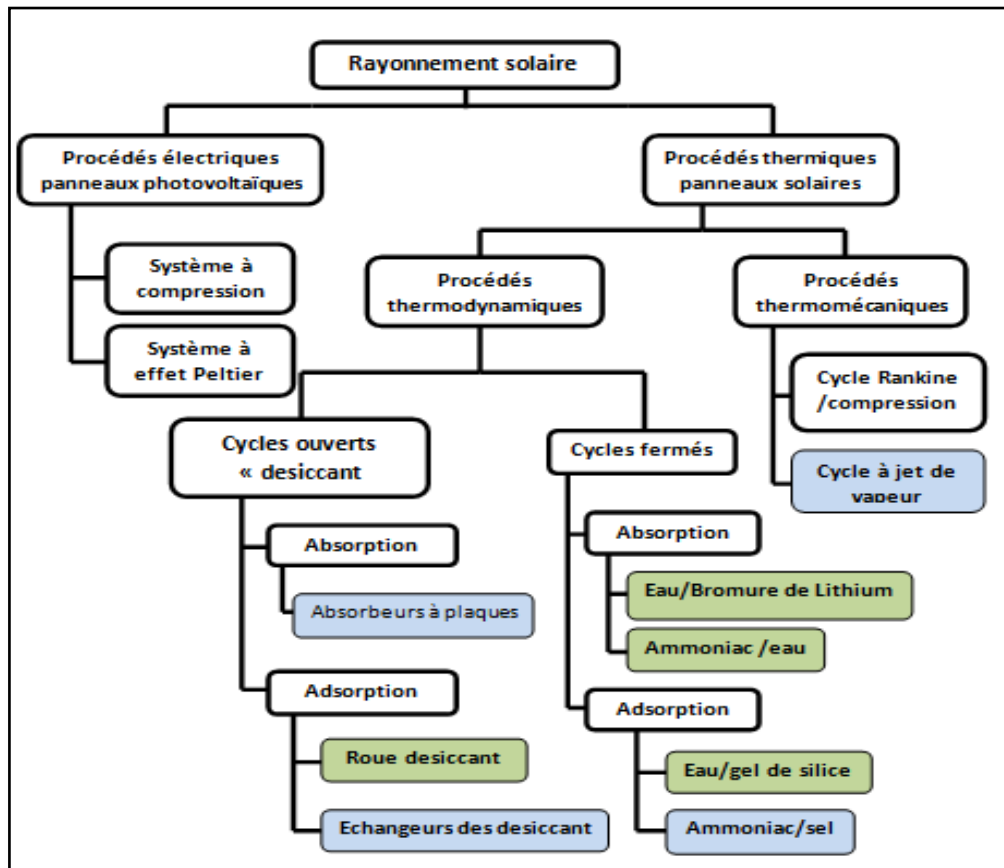


Figure II.8 : Les différentes technologies de production de froid solaire [Henning, 07].

-Les systèmes fermés : Dans les systèmes fermés, un groupe de production de froid à sorption produit de l'eau glacée. Dans le cas d'absorption, l'absorbant est liquide et dans la plupart des cas il s'agit du couple eau/LiBr. Quant à l'adsorption, l'adsorbant est solide et il s'agit en général du couple gel silica/eau ou zéolithe/eau. Si la machine de sorption est entraînée par l'énergie solaire, celle-ci doit fournir au minimum 10% à 55% de l'énergie totale consommée pour pouvoir obtenir des résultats comparables à la production du froid par compression.

-Les systèmes ouverts : Les systèmes ouverts à dessiccation, quant à eux, sont des systèmes dans lesquels l'eau est en contact direct avec l'air. En effet, l'air est d'abord déshumidifié par un absorbant ou un adsorbant et ensuite refroidi grâce à l'évaporation de l'eau. Ces systèmes sont particulièrement recommandés lorsque la fourniture d'air frais est le critère primordial, le confort venant seulement après.

I.2.2.2.1 Absorption :

Ce sont les machines les plus répandues, travaillant en cycle fermé. La compression thermique est obtenue en utilisant un couple réfrigérant/liquide absorbant, et une source de chaleur « soleil » qui remplace la consommation électrique du compresseur mécanique. Pour de l'eau glacée au-dessus de 0°C, comme c'est le cas en climatisation, c'est le couple eau/bromure de lithium (H₂O/LiBr) qui est utilisé, l'eau étant le réfrigérant. La plupart des systèmes utilisent une pompe à solution, très faiblement consommatrice d'électricité. Dans un système (H₂O/LiBr), la cristallisation de la solution doit être évitée par un contrôle interne de la température du circuit de refroidissement.

- **Principe de fonctionnement :**

Une solution composée d'une solution binaire, absorbant/réfrigérant est portée à l'ébullition à l'intérieur du désorbeur (1) grâce à l'apport calorifique de panneaux solaire thermiques. la pression augmente et le réfrigérant s'évapore en se séparant de l'absorbant, Les vapeurs du réfrigérant sont dirigées vers le condenseur (2) où elles cèdent leur chaleur par refroidissement au contact de l'air ambiant, Les condensas du réfrigérant sont détendus (3) pour accéder à la zone basse pression de l'installation, Le réfrigérant à l'état liquide est dirigé dans l'évaporateur (4) où il se vaporise instantanément en prélevant les calories du local à refroidir Conjointement, la solution absorbante « pauvre en réfrigérant » est soutirée du désorbeur via une vanne de détente pour alimenter l'absorbeur (5). Les vapeurs des réfrigérantes mises en contact avec cette solution sont alors absorbées, Le couple réfrigérant-absorbant ainsi régénéré est ramené vers le désorbeur par une pompe (6), le cycle peut alors recommencer.

Les puissances frigorifiques des machines à absorption sont généralement de l'ordre de plusieurs centaines de kW froid. Elles sont généralement alimentées par un réseau de chaleur, de la chaleur résiduelle ou une cogénération. La température de la source chaude est généralement au-dessus de 80 °C pour des machines à simple effet, avec un COP entre 0,6 et 0,8. Les machines double effet, utilisant la chaleur motrice sur deux niveaux, nécessitent des températures supérieures à 140 °C, pour des COP pouvant atteindre 1,2.

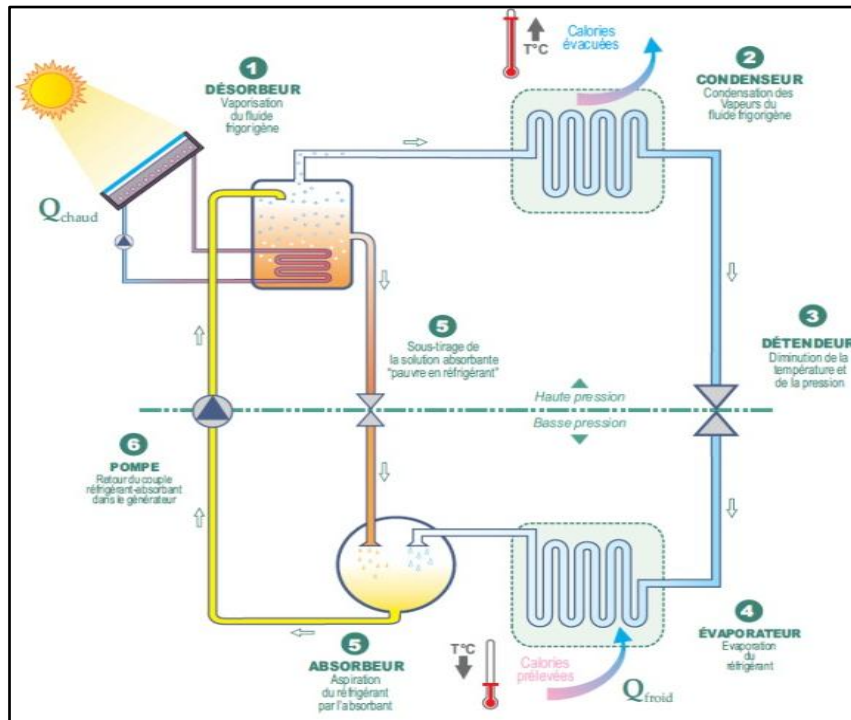


Figure II. 9 : Schéma de principe de fonctionnement d'une machine à absorption à base solaire.

Quelques machines à absorption de capacité inférieure à 50 kW sont disponibles. Pour le rafraîchissement solaire à absorption, ce sont souvent ces petites machines qui sont utilisées. Une machine, développée récemment pour des petites capacités, permet un fonctionnement à charge partielle, avec une température de 65 °C et un COP d'environ 0,7 ; ce qui la rend particulièrement intéressante pour une alimentation solaire. Ceci montre le fort potentiel d'amélioration qui existe encore pour ce type de machines.

I.2.2.2 Adsorption :

Ici, au lieu d'une solution liquide, un matériau solide (un adsorbant) est utilisé. Les systèmes disponibles sur le marché utilisent l'eau comme réfrigérant et le silica-gel comme adsorbant. La machine comprend deux compartiments remplis d'adsorbant (compartiments 1 et 2 de la Figure II.11), un évaporateur et un condenseur. L'adsorbant du premier compartiment est régénéré par chauffage (eau chaude solaire), la vapeur d'eau ainsi générée étant envoyée dans le condenseur où elle se condense. L'eau liquide, via une vanne de détente, est envoyée à basse pression dans l'évaporateur où elle s'évapore c'est phase de « production de froid ». L'adsorbant du compartiment 2 maintient la basse pression en adsorbant cette vapeur d'eau. Ce compartiment doit être refroidi pour entre tenir le processus d'adsorption. Lorsque la « production de froid » diminue (saturation de l'adsorbant en vapeur

d'eau), les fonctions des deux compartiments sont permutées par ouverture et fermeture de clapets. Actuellement, seuls quelques fabricants asiatiques proposent ce type de machines à adsorption.

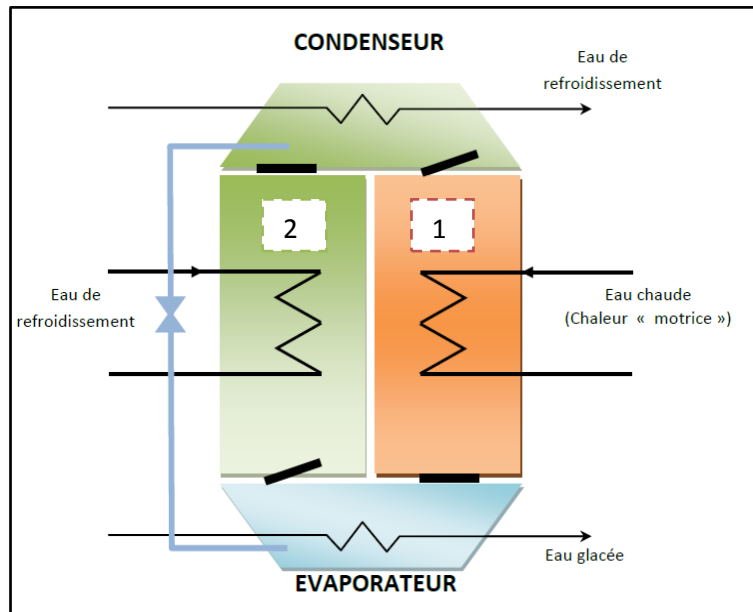


Figure II. 10: Schéma de principe d'une machine à adsorption.

- **Principe de fonctionnement :**

Un premier compartiment contenant le solide adsorbant en équilibre thermodynamique avec le fluide réfrigérant reçoit l'apport calorifique de panneaux solaires thermiques, l'adsorbant s'échauffe, ce qui provoque la désorption du réfrigérant et une élévation de pression, lorsque la pression de vapeur du réfrigérant atteint la valeur correspondant à la pression du condenseur, le clapet **C1** s'est ouvert et les vapeurs sont connectées au condenseur, Dans le condenseur, les vapeurs du réfrigérant cèdent leur chaleur par refroidissement au contact de l'air ambiant, Les condensas du réfrigérant sont détendus pour accéder à la zone basse pression de l'installation, Le réfrigérant à l'état liquide est dirigé dans l'évaporateur il se vaporise instantanément en prélevant les calories du local à refroidir, L'adsorbant du deuxième compartiment est refroidi au contact d'un circuit d'eau et maintient la basse pression. Le clapet **C2** est ouvert afin de permettre l'adsorption des vapeurs stockées dans l'évaporateur .Un nouveau cycle peut alors recommencer.

La fonction désorbeur –absorbeur de chaque compartiment est permutée à chaque cycle par ouverture et fermeture des clapets **C1 C'2** et **C'1 C2**.

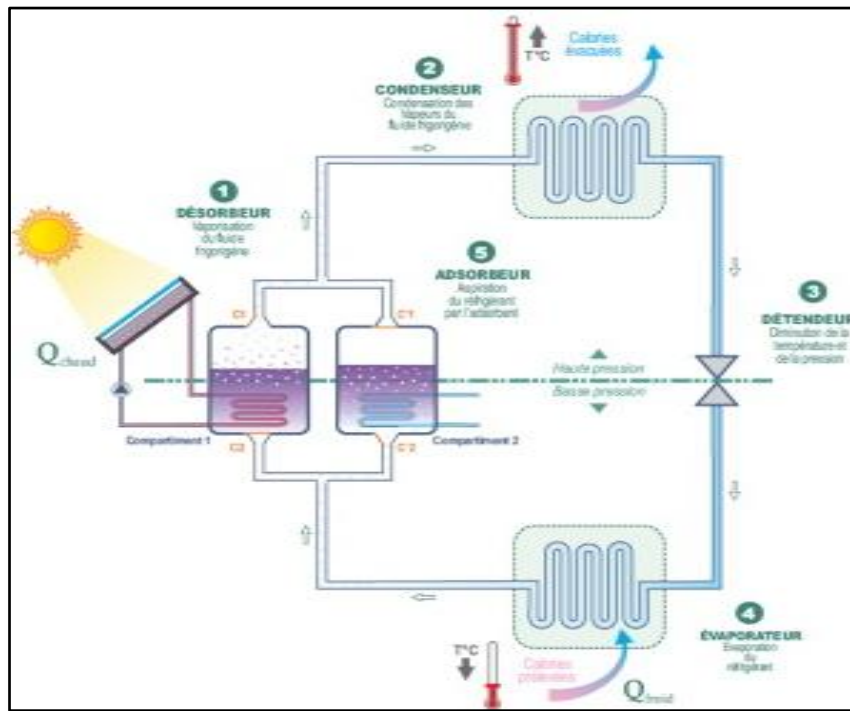


Figure II. 11: Schéma de principe de fonctionnement d'une machine à adsorption à base solaire.

Avec une température de source chaude d'environ 80 °C, ces systèmes obtiennent des COP d'environ 0,6 mais peuvent fonctionner jusqu'à des températures d'environ 50 °C. La capacité des machines va de 50 à 500 kW froid. La robustesse de ces machines à adsorption est un atout. Il n'y a, d'autre part, aucun danger de cristallisation et donc, pas de contrainte sur la température intermédiaire de refroidissement. Il n'y a pas de pompe à solution; les consommations électriques sont donc particulièrement réduites. Seuls leur taille et leur poids élevés sont un inconvénient. Il existe cependant un potentiel important d'amélioration au niveau des échangeurs dans les compartiments d'adsorption, et donc de réduction de poids et de volume pour les futures générations de machines à adsorption.

D'autre part, étant donné le faible nombre de machines produites, le coût des machines à adsorption est actuellement élevé.

I.2.2.2.3 Dessicant cooling :

Les systèmes à dessiccation sont des systèmes ouverts utilisant l'eau, en contact direct avec l'air, comme réfrigérant. Le cycle de rafraîchissement est une combinaison de rafraîchissement évaporatif avec une déshumidification par un matériau hygroscopique, qui peut être aussi bien liquide que solide.

Le terme « ouvert » signifie que le réfrigérant est évacué du système après qu'il ait produit son effet refroidissant, et qu'une nouvelle quantité de réfrigérant doit être injectée, le tout dans une boucle ouverte. Seule l'eau peut être utilisée comme réfrigérant puisqu'elle est en contact direct avec l'air ambiant. La technologie la plus courante aujourd'hui utilise des roues à dessiccation rotatives, avec du silica-gel ou du chlorure de lithium comme matériau de sorption.

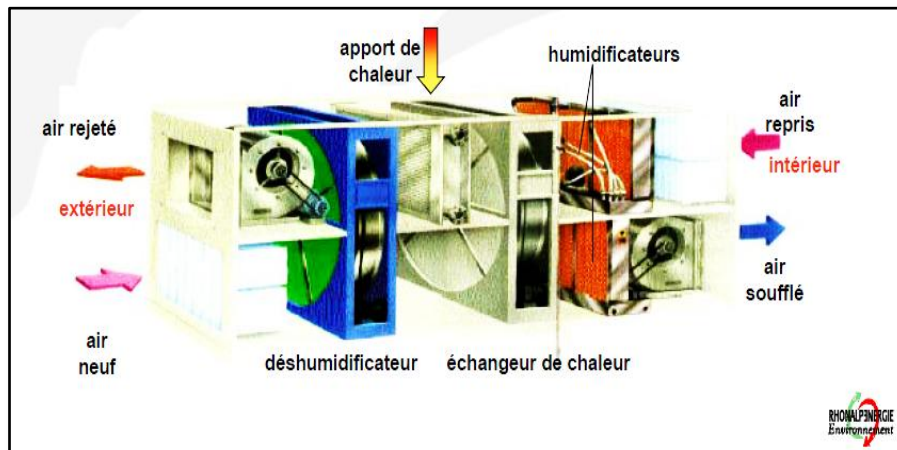


Figure II. 12: Système de climatisation à dessiccant cooling.

- **Principe de fonctionnement :**

- **Rafraîchissement :**

Le procédé de base permettant le conditionnement d'air est le suivant:

L'air entrant, chaud et humide, traverse une roue à dessiccation en rotation lente, et est donc déshumidifié (1-2), L'air étant réchauffé par le phénomène d'adsorption, un premier refroidissement est obtenu au travers d'un échangeur thermique (roue métallique en nid d'abeilles, en rotation : (2-3) L'air est ensuite humidifié, et donc refroidi, dans un humidificateur (3-4), permettant d'ajuster le niveau d'humidité et de température souhaité pour l'air neuf. L'air repris dans la pièce est humidifié pratiquement jusqu'au point de saturation (7-8), pour bénéficier au maximum du potentiel de refroidissement dans l'échangeur thermique (9-10). Enfin, la roue à dessiccation doit être régénérée (10- 11), en utilisant de la chaleur à un niveau de température relativement faible (50 °à 75 °C), permettant ainsi de poursuivre le processus continu de déshumidification.

Les systèmes ouverts constituent actuellement une part relativement faible des installations existantes de l'ordre de 10 à 15 %.

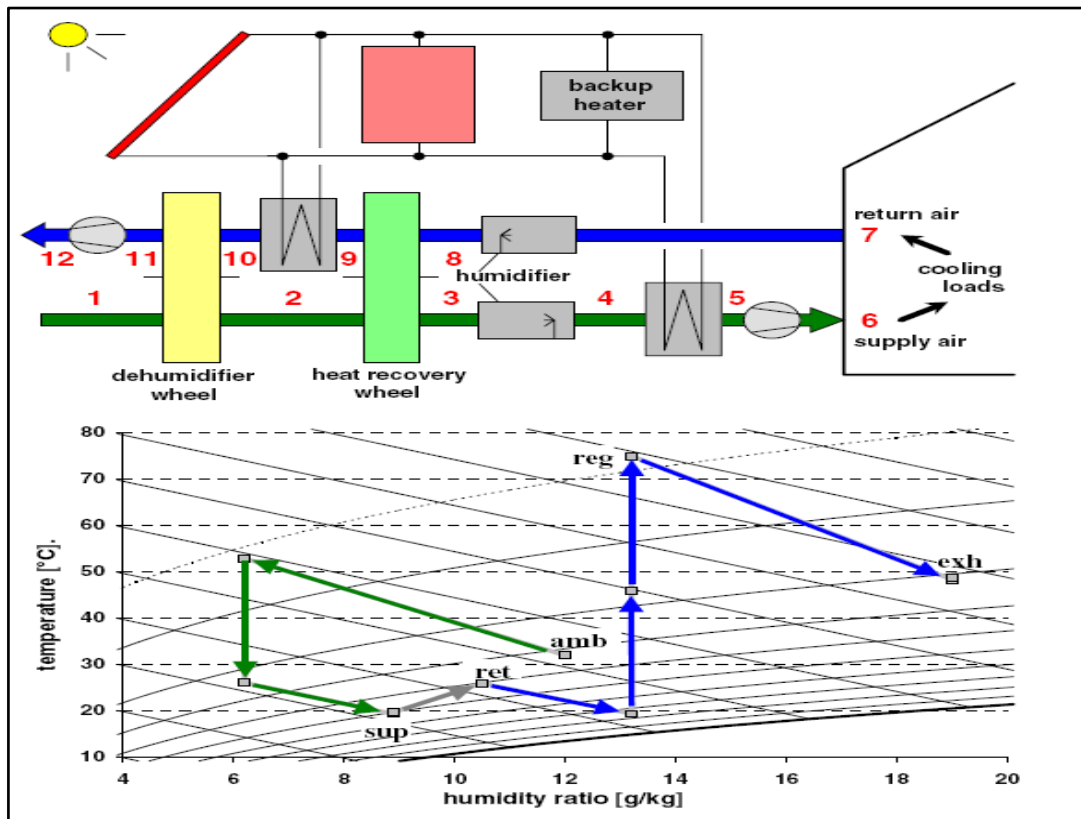


Figure II. 13 : Cycle standard de réfrigération à dessiccation avec l'énergie solaire thermique et le changement des états d'air pendant le processus dans le diagramme humide T_S.

○ **Chauffage :**

Pendant les périodes où les besoins de chauffage sont limités, la récupération de chaleur sur l'air sortant et l'échange enthalpique, utilisant une vitesse de rotation plus élevée de la roue à dessiccation, sont suffisants. Lorsque les besoins de chauffage sont plus importants, l'énergie solaire, et le cas échéant, une énergie d'appoint (4-5) est utilisée. Les capteurs solaires plans à eau, voire à air, sont les plus couramment utilisés dans ce type d'installation. L'eau utilisée comme fluide de transfert énergétique, associée à un ballon de stockage de l'eau chaude, permet de faire face, pour partie, aux périodes sans ensoleillement. Le système nécessite alors un échangeur thermique complémentaire eau/air ((4-5) pour le chauffage ou (9-10) pour le rafraîchissement). Une autre solution, conduisant à un coût d'investissement plus faible, utilise directement l'énergie solaire de régénération par le biais de capteurs à air.

Il est important de mentionner que dans beaucoup des systèmes à dessiccation une dérivation est installée qui permet qu'une partie de l'air provenant de l'unité de récupération de chaleur contournant la régénération de chauffage de l'air et la roue dessiccante. Selon les conditions réelles, plus de 20% de l'air peut passer à travers la dérivation économisant ainsi de

la chaleur de régénération et également de l'électricité, en raison de la chute de pression réduite le long de la roue dessiccante.

Le $COP_{\text{thermique}}$ d'un système de rafraîchissement à dessiccation est défini comme étant le rapport entre l'enthalpie changée entre l'air ambiant et l'air fourni, multiplié par la masse d'écoulement d'air, et la chaleur externe fournie au réchauffeur de régénération, \dot{Q}_{reg} :

$$COP_{\text{thermique}} = \frac{\dot{m}_{\text{fourni}} \times (h_{\text{amb}} - h_{\text{fourni}})}{\dot{Q}_{\text{reg}}} = \frac{\dot{m}_1 \times (h_1 - h_6)}{\dot{Q}_{\text{reg}}} \quad (\text{II.10})$$

La valeur du $COP_{\text{thermique}}$ d'un système de rafraîchissement à dessiccation dépend fortement aux conditions de l'air ambiant et de l'air d'alimentation. Dans des conditions normales de conception, un COP thermique d'environ 0,7 est obtenue et la puissance de refroidissement se situe dans la plage d'environ 5-6 kW par 1000 m³/h d'alimentation d'air. Un exemple d'une unité de traitement d'air à dessiccation avec une configuration comme il est montré dans la (**Figure II.14**). L'unité de déshumidification par sorption est un élément central dans un système de rafraîchissement à dessiccation, qui n'est pas mis en œuvre dans la plupart des unités standards de traitement d'air.



Figure II. 14: Exemple d'une unité de traitement d'air à dessiccation avec une roue déshydratante (débit d'air nominale est de 4500 m³/h).

I.2.3 Avantages et inconvénients de chaque technique :

Tableau II. 5 : Avantages et Inconvénients des technologies de climatisation solaire commercialement disponibles.

Technique	Avantages	Inconvénients
Compression classique	Le COP est très élevé (2-4) Encombrement réduit par KW de froid produit. Mise en fonctionnement rapide Rejet thermique limité.	Vibrations et bruits Consommation électrique énorme. Utilisation des gaz nocifs pour l'environnement.
Absorption	Coefficient de performance thermique élevé. Technique de climatisations solaire majoritaire et reconnue.	Tour de refroidissement nécessaire. Température de régénération élevée. Risques de cristallisation.
Adsorption	Température de régénération moyenne. Simplicité et robustesse.	Tour de refroidissement nécessaire. Seules les puissances élevées sont disponibles. Volume des machines. Caractère cyclique Coût.
Desiccant cooling	Température de régénération faible à moyenne. Composants connus et largement utilisés. Coûts d'investissement faible.	Système tout air neuf non adapté à tous les bâtiments. Maintenance soignée obligatoire. Peu performant dans les climats chauds et humides (COP_{th} dépendant des conditions intérieures et extérieurs).

I.2.4 Les aspects économiques des systèmes de climatisation solaire :

Aujourd'hui ; La plupart des projets solaires réalisés de climatisation sont en recherche ou en nature démonstration et encore beaucoup de conception supplémentaires et d'effort de planification sont nécessaires dans la phase de la mise en œuvre d'un tel projet. Ceci, et notamment la production de composants particuliers actuellement en dessous du niveau de la

fabrication industrielle en grande série, provoque un coût d'investissement supérieur du coût d'investissement d'une solution d'un système conventionnel bien que le système de rafraîchissement entraînée par l'énergie solaire peut soutenir la protection de l'environnement en économisant d'énergie primaire considérablement et contribue ainsi aux objectifs afin de réduire les émissions à effet de serre pertinentes.

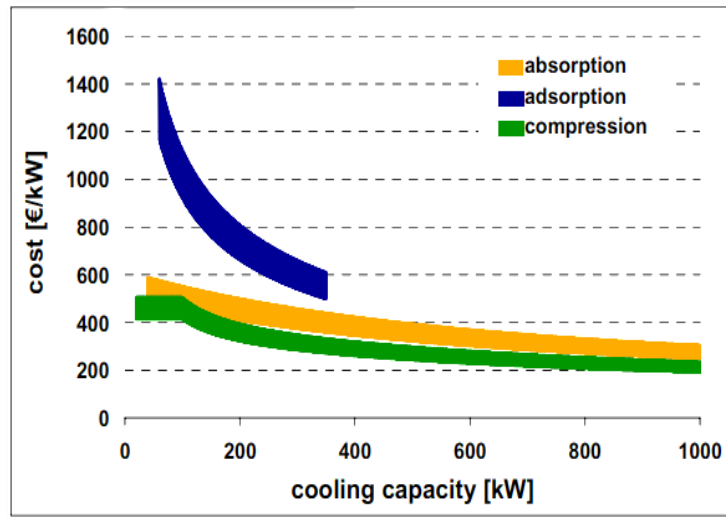


Figure II.15: Plage des coûts spécifiques pour les différents types de refroidisseurs en fonction de la puissance de refroidissement (chiffres comprennent les coûts dispositif de rejet de chaleur, c'est à dire, l'air de refroidissement ou d'une tour de refroidissement, mais n'inclut pas le coût d'installation).

La (Figure II.15) montre à titre d'exemple les coûts d'investissement pour différents types de refroidisseurs en fonction de la puissance de refroidissement installée. Pour les systèmes de refroidissement à dessiccation utilisant une roue de sorption pour la déshumidification, la plage du coût moyen d'investissement est de 5 € à 10 € par m³ / h d'alimentation nominale de débit d'air (sans système solaire thermique). Le prix dépend fortement du taux de débit d'air nominal du système qui est proportionnel directement à sa section transversale de la roue dessiccante (Fraunhofer : Institut solar energie système).

Pour une estimation du total des coûts, les frais de fonctionnement de l'ensemble du système doivent être inclus dans le calcul, pour déterminer les coûts annuels. Dans le cadre du projet européen SACE .

- ❖ Climatisation solaire en Europe ^[11], la performance énergétique du coût des systèmes de refroidissement assisté par le solaire ont été analysées pour être identifiés .

- ❖ les performances de la plupart des technologies de climatisation solaires pertinentes par rapport aux structures de charge différentes et à différents sites européens.


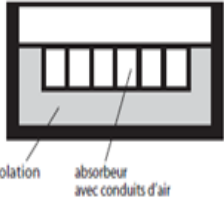

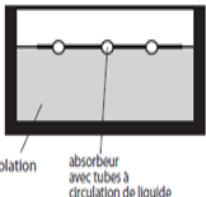

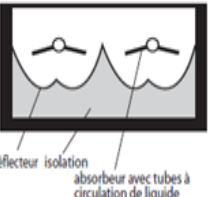

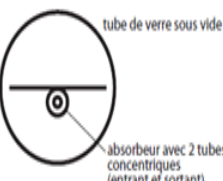
- ❖ Configurations, conduisant à un minimum de coût en ce qui concerne les aspects environnementaux.
- ❖ Les conditions économiques et techniques, afin d'accroître la performance énergétique du coût des systèmes.

Tous les systèmes assistés par le solaire ont été comparés par rapport aux systèmes de référence définis, qui sont les solutions classiques sans aucune assistance solaire.

I.2.5 Les capteurs solaires thermiques utilisés pour les systèmes de climatisation solaire :

Dans les systèmes de climatisation à base solaire, la différence dans le fonctionnement de capteurs solaires par rapport aux systèmes de capteurs solaires thermiques pour la production d'eau chaude est le niveau de température élevé, au cours de laquelle la chaleur utile doit être fournie. Les principaux types de capteurs solaires disponibles sur le marché sont présentés dans le (**Tableau II.6**). Le rafraîchissement solaire se différencie de la production d'eau chaude par le niveau élevé de température à laquelle la chaleur utile doit être fournie. Pour les groupes de froid à sorption absorption et adsorption), la température utile dépasse généralement 80°C ; les valeurs les plus basses étant d'environ 50°C. Pour les systèmes à dessiccation, la température de fonctionnement va de 55°C à 90°C. Compte-tenu des débits élevés nécessaires pour alimenter le système, une stratification du volume de stockage de l'eau chaude est difficile et la température de retour dans le capteur est donc relativement élevée, elle aussi. Ceci induit une limitation dans le choix du type de capteur.

Tableau II. 6 : Les différents capteurs utilisés pour les différentes applications de climatisation solaire.

Type de capteur	Capteur à air	Capteur plan	Capteur plan à concentrateur parabolique	Capteur sous vide
Abréviations	CA	CP	CPC	CSV
	 verre  isolation absorbeur avec conduits d'air	 verre  isolation absorbeur avec tubes à circulation de liquide	 verre  réflecteur isolation absorbeur avec tubes à circulation de liquide	 Un exemple de capteur sous vide  tube de verre sous vide absorbeur avec 2 tubes concentriques (entrant et sortant)
Principe	Chauffage direct de l'air	Chauffage d'un liquide (eau, eau+glycol)	Chauffage d'un liquide (eau, eau glycol), concentration du rayonnement	Tube sous vide pour réduire les pertes thermique. Différentes technologies : <ul style="list-style-type: none"> · capteur à caloducs · capteur à flux direct · capteur à concentration, type Sydney
Principales applications	Préchauffage de l'air de ventilation	Eau chaude sanitaire	Eau chaude sanitaire et industrielle	Eau chaude sanitaire et industrielle
Principales applications en rafraîchissement solaire	Systèmes ouverts à dessiccation	Systèmes à dessiccation, adsorption, absorption (simple effet) avec capteurs sélectifs	Adsorption et absorption (simple effet)	-Adsorption, absorption (simple effet) -Absorption (double effet) : Sydney

La (Figure II.16) montre les courbes de rendement typiques pour des différents capteurs solaires thermiques. Par conséquent, les capteurs plans et les capteurs solaires à air peuvent être mis en œuvre avec plus d'avantages dans les systèmes à dessiccation à base solaire. Dans les configurations utilisant un refroidisseur à adsorption ou d'un refroidisseur à absorption à simple effet, l'utilisation des capteurs plan sélectivement revêtues est limitée aux zones où la disponibilité d'irradiation solaire est élevée. Pour les autres régions et pour les refroidisseurs nécessitant des températures d'entraînement plus élevées, des hauts collectionneurs efficaces doivent être mise en œuvre, par exemple les capteurs à tubes sous vide. Des températures plus élevées peuvent être obtenues avec un montage fixe des capteurs à tubes sous vide en utilisant la concentration ou même avec l'utilisation des capteurs de suivi de haute concentration optique au niveau des régions dont les quantités de rayonnement du faisceau solaire sont suffisamment élevées. Ceci s'agit d'une option intéressante pour les systèmes de climatisation à base solaire utilisant des refroidisseurs à absorption à haute efficacité (2-effet) ou de nouvelles technologies telles que les refroidisseurs à jet de vapeur (Technical overview of active techniques).

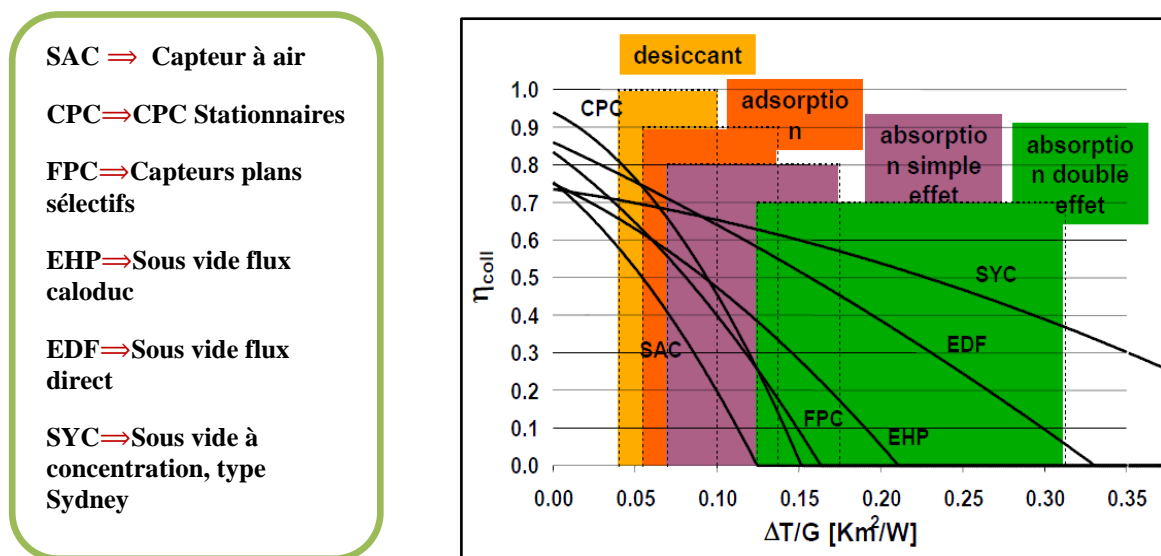


Figure II. 16 : Efficacité des différents capteurs solaires et applications aux différentes technologies de climatisation solaire. (INES)

I.2.6 Nouvelles technologies de refroidissement :

Un nouveau développement pour la climatisation solaire est un refroidisseur basé sur un cycle jet de vapeur. Actuellement, ce type de refroidisseurs est utilisé de préférence dans les procédés industriels de haute demande de puissance refroidissement et un fonctionnement en continu. Dans les projets pilotes et les pré-enquêtes, Ce principe de refroidissement est adapté aux unités de petite taille (20 à 200 puissance de refroidissement kW) pour être combinés avec des systèmes solaires thermiques. Comme un avantage par rapport aux systèmes d'absorption d'adsorption, les valeurs de la COP à charge partielle peut dépasser la valeur 1.0. Seulement l'eau est utilisée dans le cycle de fluide et le principe de construction est simple, sans parties mobiles. Commande de la puissance de refroidissement est obtenu par commutation jusqu'à quatre unités de jet de vapeur par étapes en fonction de la demande de charge. La température proposée de la conduite de cycle de refroidissement par jet de vapeur est habituellement de 200 ° C et, par conséquent, capteurs à concentration avec des systèmes de suivi sont requis. À la suite des études en cours, le système peut être économiquement compétitif comparant à d'autres technologies de climatisation solaire. D'autres réductions de coûts sont susceptibles avec la fabrication des séries de systèmes à jet de vapeur adaptés.

D'autres du développement ont été réalisés sur les refroidisseurs à absorption, utilisant de l'ammoniac-eau comme fluide de travail. Ce type de refroidisseurs est généralement fabriqué avec de grandes capacités pour des températures de réfrigération inférieures à 0 ° C, ce qui nécessite des températures de génération élevées au-delà de 100°C, et fonctionnant avec un $COP_{\text{thermique}}$ relativement faible d'environ 0,5. Dans les projets pilotes, des prometteurs refroidisseurs NH_3/H_2O ont été adaptés pour travailler avec des températures basses entre 65°C – 80 °C dans le générateur et donc peut être chauffée par les systèmes thermiques solaires. La température d'évaporation dans ces développements est d'environ 5°C et le COP est supérieur à 0,6 ^[12].

Tableau II. 7: Récapitulatif sur quelques technologies de climatisation solaire.

Systèmes de rafraîchissement solaire		COP	Année
Autres technologies	Rafrâichissement électrochimique.		2003
	Rafrâichissement par éjection.	0.2 à 0.33	1970
	Systeme hybride : Compression mécanique à vapeur – Rafrâichissement par sorption. Rankine – Systeme par absorption.		
Autres propositions	Utiliser les éjecteurs de vapeur à jet pour améliorer les performances de cycles à absorption.	1.1 à 1.36	1996
	Utiliser les éjecteurs de liquide à jet pour augmenter ou abaisser la pression d'un composant.		1993
	Utilisation des membranes pour des procédés de séparation dans des cycles d'absorption.	> 0.9	2001

I.2.7 Revue des installations de climatisation solaire dans le monde :

Des statistiques au niveau mondial sur les installations de production de froid solaire nous informent de l'existence d'environ quatre-vingt installations de ce type ^[13]. Autour de 60% de ces installations sont dédiées à l'usage industriel, 15% sont destinées aux laboratoires et aux centres d'éducation, 6% au secteur hôtellerie-restauration et finalement 9% aux fins diverses comme des hôpitaux et des centres sportifs.

La majorité des installations investiguées ont recours à la production de froid par absorption ; 53% des installations emploient des capteurs solaires plans, 37% des capteurs sous vide et seulement 10% des capteurs paraboliques et des capteurs à air.

D'après les travaux de la Tâche 38 de l'AIE (de 2006 à 2010), les termes standards qui régissent le domaine de la climatisation solaire dans le monde ne sont pas encore définis, ce qui a été avant le cas avec des systèmes solaires combiné (SSC) ^[14].

I.3 Les modèles dynamiques :

Vu le nombre de systèmes à évaluer, il a été décidé de prendre une approche modulaire dans la modélisation d'un système, qui est similaire à celle de Grossman et Michelson (1985). Comme on peut le conclure de la section précédente, mais une configuration différente, refroidisseurs à absorption ont des composants communs tels que générateur, absorbeur, condenseur et évaporateur. Par conséquent, si les modèles de ces composants sont écrits d'une telle façon qu'ils peuvent être utilisés pour différents systèmes, beaucoup d'efforts et de temps peut être sauvé qui serait autrement nécessaires à l'écriture d'un nouveau programme pour différents systèmes. Très récemment, cette approche a également été prise par Fu et al (2006), d'où une bibliothèque de modèle dynamique a été développée pour la simulation des systèmes d'absorption pour Dymola, qui est un logiciel de simulation fournissant un environnement complet pour le développement du modèle dynamique. Leur but était de réduire le temps de développement pour la modélisation du système par " objet-orientée " de modélisation.

Un autre aspect important qui mérite d'être mentionné dans l'approche de modélisation actuelle est que les modèles des composantes ont été développés pour des temps de calcul minimal. Régissant les équations et les propriétés corrélations ont été simplifiées dans les marges d'erreur acceptables. Considérant que la simulation dynamique en ingénierie solaire est souvent destinée à l'évaluation des performances saisonnières ou annuelles d'un système, le temps de calcul court est un avantage pratique important.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les techniques de climatisation solaire. Le principe est d'utiliser l'énergie solaire pour produire du froid afin de limiter l'utilisation d'une climatisation classique consommant de l'électricité et pour éviter ses impacts négatifs sur l'environnement. Il est important de noter que des mesures passives doivent être entreprises dans le bâtiment afin de limiter les besoins en refroidissement avant de considérer l'emploi de techniques actives de climatisation solaire. Cette partie nous a permis de passer en revue les différents types de capteurs disponibles afin de déterminer par la suite suivant les besoins de nos applications, lesquels seraient les plus adaptés. Il en ressort que de façon générale les capteurs sous vide sont les plus utilisés du fait de leur rendement à haute température. On note cependant plusieurs exemples d'installations de production de froid solaire ayant recours à des capteurs plans à haut rendement.

Parmi ces dernières, trois technologies sont disponibles commercialement, à savoir l'absorption, l'adsorption et le desiccant cooling. Les études comparatives de la littérature montrent que les technologies de froid solaire permettent d'économiser de l'énergie primaire et de réduire les rejets de CO₂.

Le travail de cette étude porte sur la première technologie de climatisation solaire, l'absorption en cycle fermé. Après avoir présenté le contexte de l'étude, nous nous limitons maintenant à cette technologie. Dans le chapitre suivant, on s'attache à décrire les modèles dynamiques qui seront élaborés pour les différents composants de système de rafraîchissement solaire à absorption.

Bibliographie :**RAPPORT**

- [1] Ahmed BELLAGI, Radhouane BEN JEMAA, Etude d'une installation de climatisation solaire. Unité de Recherche en Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie.
- [2] P. Parene, F. Garde, F. Lucas, Simulation et optimisation d'un système de rafraîchissement solaire par absorption couplé à un bâtiment, IBPSA France 2006 a La Réunion, 2 et 3 Novembre 2006.
- [3] ADEME France, Note de synthèse sur la climatisation solaire, Département Energies Renouvelables (Juillet 2007).
- [4] Monsieur Daniel MUGNIER – docteur – ingénieur en énergétique et expert en climatisation/chauffage solaire – TECSOL.
- [5] F. TROMBE, M. FOEX : "Sur la production de froid à l'aide du rayonnement solaire" Compte rendu hebdomadaire de l'Académie des Sciences t 242 n° 8 (1956).
- [6] R. THEVENOT "Economie énergétique dans les utilisations agroalimentaires du Froid" RGF (12-1982).
- [7] La climatisation solaire Actu-Environnement.com - Publié le 08/06/2009, La climatisation solaire | 8 juin 2009 | Chapitre 2 / 7.
- [8] Intégration des systèmes à absorption solaire de petites puissances aux bâtiments - approche multifonction solaire : chauffage, ECS et rafraîchissement en 2011.
- [12] Dong-Seon KIM. Solar Absorption Cooling. Master of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul geboren te Yesan, Zuid Korea 2007.
- [13] Sparber W., Napolitano A. et Melograno P. Overview on worldwide installed solar cooling systems. Tarragona, Spain: s.n., 2007. 2nd International Conference Solar Air Conditioning.
- [14] Intégration des systèmes à absorption solaire de petites puissances aux bâtiments - approche multifonction solaire : chauffage, ECS et rafraîchissement.

SITES INTERNET

- [9] ↑ <http://goldbook.iupac.org/S05769.htm>
- [10] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Adsorption>
- [11] <http://www.ocp.tudelft.nl/ev/res/sace.htm>

CHAPITRE III :

Modélisation des composants d'un système de rafraîchissement par sorption.

Introduction :	71
III.1 Rafraîchissement par absorption :	71
III.2 Absorption par LiBr-H₂O :	72
III.2.1 Présentation du modèle :	73
III.2.2 Hypothèses :	74
III.2.3 Analyses des composants :	75
III.2.3.1 Évaporateur :	75
III.2.3.2 Absorbeur :	77
III.2.3.3 Générateur (désorbeur) :	79
III.2.3.4 Condenseur :	79
III.2.3.5 Coefficient de performance :	80
III.2.4 Programmation MATLAB :	81
III.2.5 Analyse paramétrique :	83
III.2.5.1 Effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur :	83
III.2.5.2 Effet de la température du générateur :	85
III.2.5.3 Effet de la température de l'échangeur thermique :	86
III.2.5.4 Effet de la concentration de la solution :	88
III.3 Cristallisation :	89
Conclusion :	91
Bibliographie	96

Table des figures :

Figure III. 1 : Cycle d'absorption Eau /LiBr à simple effet.....	73
Figure III. 2 : Schéma d'une installation à absorption de H ₂ O/LiBr sur le diagramme	74
Figure III. 3 : L'effet du pourcentage de LiBr à l'entrée de l'absorbeur.....	84
Figure III. 4 : Effet de la température de générateur.....	86
Figure III. 5 : Effet des températures de l'échangeur de chaleur	87
Figure III. 6 : Effet du concentration de la solution.....	89

Tableaux :

Tableau III. 1 : Les paramètres de conception pour un refroidisseur d'absorption Eau-LiBr à simple effet.....	75
Tableau III. 2 : Les données pour le système de refroidissement Eau-LiBr à simple effet	76
Tableau III. 3 : Les flux énergétique aux différents composants du système	80
Tableau III. 4 : Résultats de l'effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur.....	83
Tableau III. 5 : Résultats sur l'effet de la température du générateur.....	85
Tableau III. 6 : Résultats sur l'effet de la température de l'échangeur thermique.....	87
Tableau III. 7 : Résultat sur Effet de la concentration de la solution.....	88

Nomenclature :

Symbole	Description	Unité
<i>COP</i>	<i>Coefficient de performance</i>	-
<i>h</i>	<i>Enthalpie</i>	Kj/Kg
<i>ṁ</i>	<i>Débit massique</i>	Kg/s
<i>P</i>	<i>Pression</i>	Kpa
<i>Q̇_e</i>	<i>Capacité de l'évaporateur</i>	KW
<i>Q̇_a</i>	<i>Chaleur rejetée par l'absorbeur</i>	KW
<i>Q̇_c</i>	<i>Chaleur rejetée par le condenseur</i>	KW
<i>Q̇_g</i>	<i>Chaleur injecté dans le générateur</i>	KW
<i>T</i>	<i>Température</i>	°C
<i>v</i>	<i>Volume spécifique</i>	m ³ /kg
<i>w</i>	<i>La puissance de la pompe</i>	W
<i>X</i>	<i>Rapport de LiBr dans la solution</i>	%
<i>ρ_x</i>	<i>Densité</i>	kg/m ³

Introduction

Les machines frigorifiques à absorption sont de plus en plus utilisées notamment dans les installations de rafraîchissement solaire appliqué aux bâtiments. Dans ce cas, elles sont alimentées par de l'eau chaude produite par un champ de capteurs solaires thermiques.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode pour évaluer les caractéristiques et les performances d'une machine à absorption simple effet, fonctionnant avec le mélange binaire bromure de lithium (absorbant) / eau (fluide frigorigène). Les équations de transfert de chaleur et de masse reflétant les différents processus des fluides actifs sont spécifiées. Ces équations sont à la base d'un programme informatique MATLAB, où une analyse paramétrique est effectuée. Les échangeurs de chaleur à tubes verticaux à seule passe sont utilisés pour l'absorbeur et pour l'évaporateur. L'échangeur intermédiaire de chaleur de la solution est un échangeur de chaleur annulaire à un seul passage. Le condenseur et le générateur sont des échangeurs de chaleur à tubes horizontaux (G.A. Florides, 2002) [1].

III.1 Rafrâchissement par absorption :

Les machines à absorption sont thermiquement activées, et pour cette raison, une puissance élevée à l'entrée n'est pas nécessaire. De ce fait le solaire thermique, le gaz, la chaleur géothermique...etc. peuvent assurer un refroidissement fiable et silencieux par les machines à absorption (ASHRAE, 1997). Un certain nombre de couples réfrigérant-absorbant peuvent être utilisés, dont les plus courants sont Eau/LiBr et NH₃/Eau. Ces deux paires offrent de bonnes performances thermodynamique, et ils sont respectueux à l'environnement.

Le Couple (Absorbant-réfrigérant) dans un système de réfrigération à absorption doit répondre à un certain nombre important d'exigences, qui sont :

1. *Absence de phase solide* – le couple réfrigérant-absorbant ne doit pas former une phase solide dans la plage de concentration et de température de fonctionnement. La formation de solides peut arrêter l'écoulement et causer des problèmes à l'équipement.

2. *Rapport de la volatilité* - Le fluide réfrigérant doit être plus volatil que l'absorbant afin qu'il puisse être séparé facilement par l'échauffement.

3. *Affinité* - L'absorbant doit avoir une forte affinité avec le réfrigérant selon les conditions dans lesquelles l'absorption a lieu. Cette affinité permet à un débit optimisé de fournir le même effet de réfrigération, et par conséquent, les pertes par chaleur sensible sont diminuées.

4. *Pression* – Des pressions de fonctionnement modérées doivent être utilisées, afin d'éviter l'utilisation d'un équipement à paroi dure et de réduire la puissance électrique nécessaire pour pomper des fluides du côté basse pression au côté haute pression. Aussi, très basse pression (vide) nécessite l'utilisation d'un équipement volumineux et des moyens spéciaux afin de réduire les chutes de pression dans l'écoulement de la vapeur réfrigérante.

5. *Stabilité* – la stabilité est nécessaire pour éviter la formation indésirable de gaz, solides ou substances corrosives.

6. *Corrosion* - Les fluides doivent être non corrosifs. Si les fluides sont corrosifs, des inhibiteurs de corrosion doivent être utilisés, ce qui peut influencer sur les performances thermodynamiques de l'équipement.

7. *Sécurité* - les fluides doivent être non toxiques et non inflammables.

8. *La chaleur latente* - Pour maintenir le taux de circulation du fluide frigorigène et absorbant au minimum, la chaleur latente de fluide frigorigène doit être aussi élevée que possible.

Le couple *Eau- Ammoniac* n'est pas adapté pour une utilisation avec des capteurs solaires en raison de la température élevée nécessaire dans le générateur (125-170° C). Cette température ne peut être obtenue qu'avec des collecteurs paraboliques à concentration nécessitant un entretien spécifique en raison des systèmes traqueurs.

Les températures nécessaires dans le générateur pour le couple *Eau-LiBr* sont plus faibles (75-120° C). Ces températures peuvent être obtenues avec des capteurs plans de haute performance, les collecteurs paraboliques et les capteurs à tubes sous vide de faible coût sont plus faciles à installer et à exploiter que les collecteurs paraboliques à concentration (Atmaca, 2002).

III.2 Absorption par LiBr-H₂O

Ce type d'équipement est classé selon le procédé de la source de chaleur au niveau du générateur. La technologie d'absorption à simple effet fournit un coefficient de performance (COP) d'environ 0,7 pour des températures de génération entre 75 et 120° C. La technologie à

double effet donne un COP plus élevé, mais elle ne peut être utilisée que lorsque la température de la source de chaleur (soleil) est très élevée. Les systèmes à double effet peuvent être obtenus en ajoutant un système d'appoint au cycle à simple effet. De ce fait, le rejet de la chaleur de l'étage de haute température est utilisé pour alimenter l'étage de basse température. Il convient de noter que le réfrigérant dans ce système est l'eau et le bromure de lithium agit comme absorbant, qui absorbe la vapeur d'eau, ce qui rend le pompage de l'absorbeur au générateur facile et économique (Florides, 2002) [2]. Un système à absorption H₂O/LiBr à simple effet est illustré dans la figure (III.1), sa présentation schématisée sur un diagramme pression-température est illustré dans la figure (III.2).

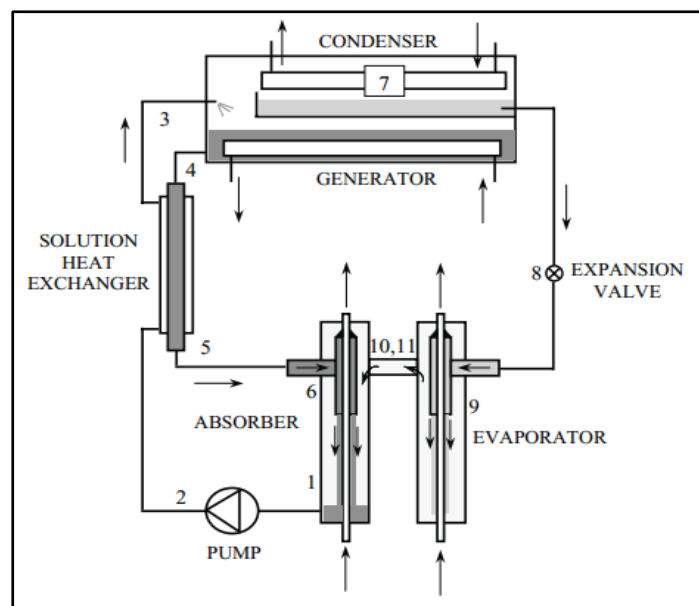


Figure III. 1 : Cycle d'absorption Eau /LiBr à simple effet

III.2.1 Présentation du modèle

La machine à absorption modélisée est de type simple effet, elle fonctionne avec le couple LiBr/eau et son schéma de principe, regroupant tous ses principaux composants est représenté sur la figure (III.1).

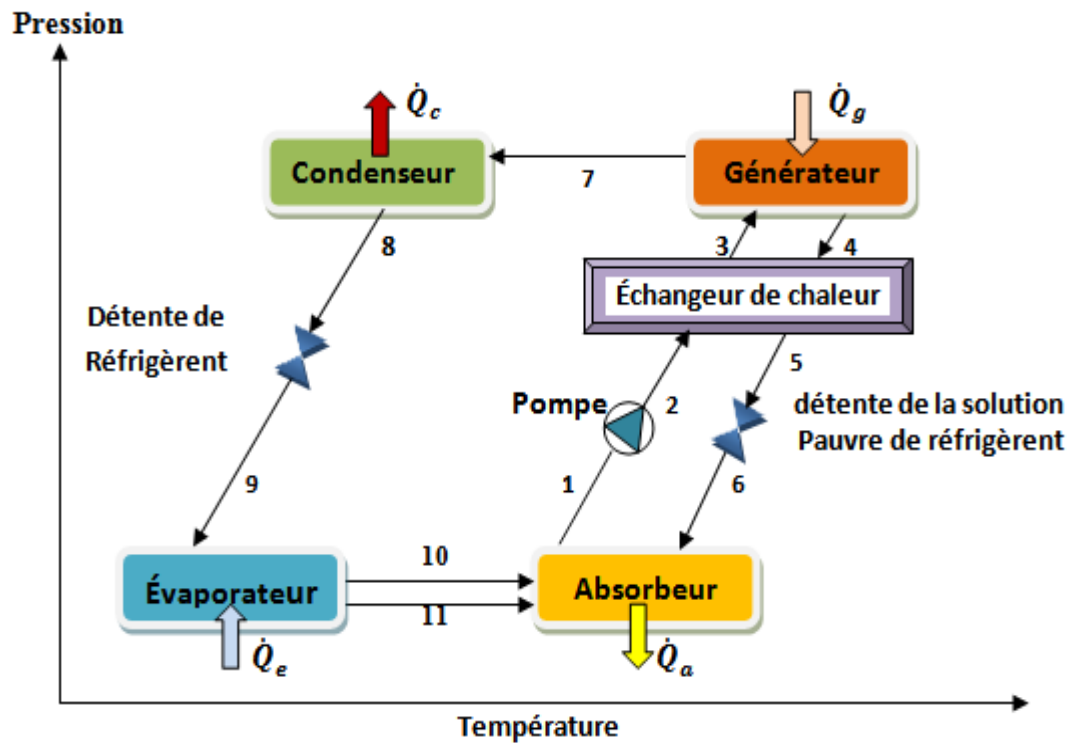


Figure III. 2 : Schéma d'une installation à absorption de H₂O/LiBr sur le diagramme (P, T)

III.2.2 Hypothèses

Pour effectuer des estimations de dimensionnement des équipements et par conséquent l'évaluation des performances d'un système à absorption LiBr-eau à simple effet, des hypothèses de base et les paramètres d'entrée doivent être pris en considération. En référence aux figures (III.1) et (III.2), les hypothèses de base sont (Florides, 2002)[3]:

1. L'état d'équilibre du réfrigérant est une eau pure.
2. Il n'y a pas de variations de pression, sauf à travers les détendeurs et la pompe.
3. Le réfrigérant au point 1, 4, 8 et 11, est un liquide saturé.
4. Le réfrigérant au point 10, est une vapeur saturée.
5. la détente est isenthalpique.
6. La pompe est isentropique.
7. Il n'y a pas les pertes de chaleur.

Le procédé de conception est démontré ci-dessous. Les paramètres de conception considérée sont listés dans le tab (III.1).

<i>Paramètres</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur d'entrés</i>
<i>Puissance de l'évaporateur</i>	\dot{Q}_e	10 KW
<i>Température de l'évaporateur</i>	T_{10}	6°C
<i>Température de sortie de générateur</i>	T_4	90°C
<i>Fraction massique de la solution riche</i>	X_1	55 % LiBr
<i>Fraction massique de la solution pauvre</i>	X_4	60 % LiBr
<i>Température de sortie de l'échangeur a solution</i>	T_3	65°C
<i>Température de la vapeur surchauffée</i>	T_7	85°C
<i>La quantité de liquide sortante de l'évaporateur</i>	\dot{m}_{11}	0.025 * \dot{m}_{10}

Tableau III. 1 : Les paramètres de conception pour un refroidisseur d'absorption Eau-LiBr à simple effet

III.2.3 Analyses des composants :

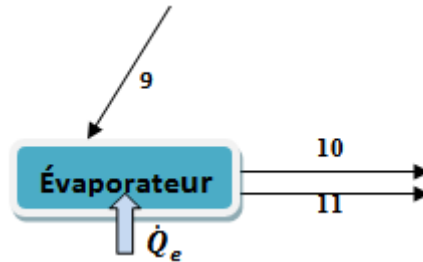
III.2.4 Évaporateur :

Étant donné, que dans l'évaporateur, le réfrigérant (l'eau) à la température (T_{10}) est une vapeur saturée, la pression de saturation au point 10, telle que calculée à partir de la courbe correspondante [4] (Voir l'annexe A), est de 0,934 kPa, et l'enthalpie est 2511,8 kJ / kg. Étant donné, qu'au point 11, le réfrigérant est un liquide saturé, son enthalpie est de 25,21 kJ / kg. L'enthalpie au point 9 est déterminée à partir du processus de détente du réfrigérant (détente isenthalpique), ce qui donne $h_9 = h_8$.

Pour déterminer h_8 , la pression en ce point doit être déterminée. Étant donné, qu'au point 4, la fraction massique de la solution est de 60% LiBr et la température à l'état saturé est supposée d'être 90° C, le LiBr donne une pression de saturation de 9,657 kPa et $h_4 = 212,2$ kJ / kg.

Considérant que la pression au point 4 est la même qu'au point 8, donc $h_8 = h_9 = 201.48 \text{ kJ / kg}$.

Une fois les valeurs d'enthalpie, à tous les points connectés à l'évaporateur sont connues, les bilans massique et énergétique peuvent être appliqués afin de trouver le débit massique du réfrigérant et le taux transfert de chaleur dans l'évaporateur.



Le bilan massique au niveau de l'évaporateur est :

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} \quad (\text{III.1})$$

Le bilan énergétique au niveau de l'évaporateur est:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_{11}h_{11} - \dot{m}_9h_9 \quad (\text{III.2})$$

Étant donné que la puissance de l'évaporateur \dot{Q}_e est 10,0 kW et $m_{11} = 2.5 \% m_{10}$ les débits massiques peuvent être calculés. Les résultats sont présentés dans le tableau (III.2).

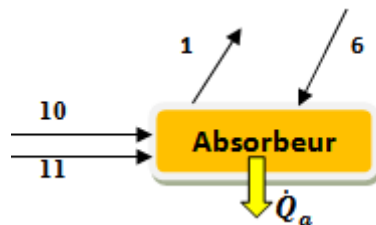
Tableau III. 2 : Les données pour le système de refroidissement Eau-LiBr à simple effet

Point	$h \text{ (Kj/Kg)}$	$\dot{m} \text{ (Kg/s)}$	P(Kpa)	T(°C)	X(% LiBr)	Remarques
1	80.0483	0.0533	0.9343	33.4184	55	Solution riche de LiBr_H2O
2	85.4271	0.0533	9.6571	36.0216	55	Solution riche de LiBr_H2O
3	145.3803	0.0533	9.6571	65	55	Liquide sou refroidi
4	212.1909	0.0489	9.6571	90	60	Solution pauvre de LiBr_H2O

5	146.7874	0.0489	9.6571	56.1134	60	Solution pauvre de LiBr_H2O
6	146.7874	0.0489	0.9343	43.0180	60	Solution pauvre de LiBr_H2O
7	2586.9	0.0044	9.6571	85	0	Vapeur surchauffée
8	201.4812	0.0044	9.6571	48.1253	0	liquide saturée
9	201.4812	0.0044	0.9343	6	0	Mélange (liquide_vapeur) d'eau
10	2511.8	0.0043	0.9343	6	0	Vapeur d'eau saturée
11	25.2137	0.00010842	0.9343	6	0	liquide saturée

III.2.4.1 Absorbeur :

Puisque les valeurs de \dot{m}_{10} et \dot{m}_{11} sont connues,



Les bilans massiques au niveau de l'absorbeur donnent:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} + \dot{m}_6 \quad (\text{III.3})$$

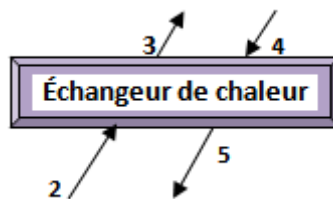
Et

$$\dot{m}_1 x_1 = x_6 \dot{m}_6 \quad (\text{III.4})$$

Les fractions massiques x_1 et x_6 dans l'éq(III.4) sont données, et par conséquent, les débits \dot{m}_1 et \dot{m}_6 peuvent être calculés. Les résultats sont présentés dans le tableau (III.2).

Le taux de transfert de chaleur dans l'absorbeur peut être déterminé à partir des valeurs d'enthalpie de chaque point d'état connecté. Au point (1), l'enthalpie est déterminée à partir de la fraction massique (55%) et l'hypothèse que l'état est un liquide saturé à la même pression de l'évaporateur (0,934kPa). Cette valeur est $h_1 = 80.05 \text{ kJ / kg}$. La valeur de l'enthalpie au point (6) est déterminée tel que $h_6 = h_5$ (détente isenthalpique).

L'enthalpie au point (5) n'est pas connue, mais elle peut être déterminée à partir du bilan énergétique au niveau de l'échangeur de chaleur, en supposant que l'échangeur est adiabatique ceci donne :



$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \quad (\text{III.5})$$

La température au point (3) est une donnée (65°C), et puisque la fraction massique pour les points (1) à (3) est la même, l'enthalpie à ce point est déterminé comme étant $h_3 = 145.38 \text{ kJ / kg}$. En fait, l'état au point (3) peut être liquide sous-refroidi. Cependant, aux conditions d'intérêt, la pression a un effet négligeable sur l'enthalpie du liquide sous-refroidi, et la valeur saturante à la même température et fraction massique peut être une approximation suffisante. L'enthalpie au point (2) est déterminée à partir du modèle d'une pompe isentropique. La puissance de la pompe (\dot{w}) peut être donc obtenue à partir de l'éq(III.6) :

$$\dot{w} = \dot{m}_1 v_1 (P_2 - P_1) \quad (\text{III.6})$$

Dans l'éq (III.6), il est supposé que le volume spécifique ($v, \text{ m}^3/\text{kg}$) de la solution liquide ne change pratiquement pas de point (1) au point (2). Le volume spécifique de la solution liquide peut être obtenu à partir de la courbe correspondante [3] (voir l'annexe A).

Pour la présente étude, puisque toutes les variables sont connues 'voir tableau (III.2)', la puissance de la pompe est égale à :

$$\dot{w} = 0,29 \text{ W}$$

L'éq (III.5) peut être donc résolue afin de trouver l'enthalpie au point (5), donnant $h_5 = 146,79$ kJ / kg. La température T_5 peut être déterminée aussi à partir de la valeur de l'enthalpie, ce qui donne $T_5 = 56,11^\circ \text{C}$.

Enfin, le bilan énergétique au niveau de l'absorbeur est :

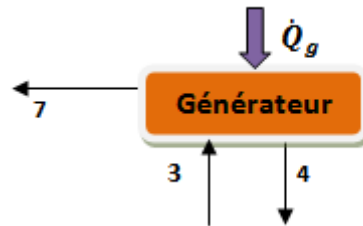
$$\dot{Q}_a = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_{11}h_{11} + \dot{m}_6h_6 - \dot{m}_1h_1 \quad (\text{III.7})$$

Ce qui donne :

$$\dot{Q}_a = 13,80 \text{ KW}$$

III.2.4.2 Générateur (désorbeur) :

L'apport de chaleur au niveau de générateur est déterminé à partir du bilan énergétique, qui est:



$$\dot{Q}_g = \dot{m}_4h_4 + \dot{m}_7h_7 - \dot{m}_3h_3 \quad (\text{III.8})$$

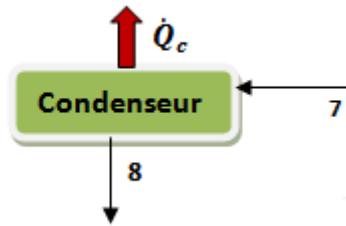
Ce qui donne :

$$\dot{Q}_g = 14,12 \text{ KW}$$

L'enthalpie au point (7) peut être déterminée, puisque la température en ce point est une valeur donnée. En général, l'état au point (7) est de la vapeur d'eau surchauffée, donc l'enthalpie peut être déterminée dès que la pression et la température sont connues.

III.2.4.3 Condenseur :

La puissance du condenseur peut être déterminée à partir d'un bilan énergétique, ce qui donne:



$$\dot{Q}_c = \dot{m}_7(h_7 - h_8) \quad (\text{III.9})$$

Le résultat est:

$$\dot{Q}_c = 10.60 \text{ KW}$$

III.2.4.4 Coefficient de performance :

Le COP_{th} est défini comme étant :

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad (\text{III.10})$$

La valeur de COP_{th} est donc : 0.708

Les flux d'énergie dans les différentes composantes du système est illustré dans le tableau(III.3). Pour trouver des conditions appropriées pour des applications spécifiques, une analyse paramétrique peut être réalisée en utilisant le programme informatique MATLAB, qui suit la séquence décrite ci-dessus et les corrélations mathématiques pour les propriétés des fluides indiqués dans l'annexe A. Une telle analyse paramétrique est présentée ci-dessous.

Tableau III. 3 : Les flux énergétique aux différents composants du système

<i>Description</i>	<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>	<i>Résultat</i>
<i>Puissance de l'évaporateur</i>	\dot{Q}_e	KW	10
<i>travail de la pompe</i>	w	KW	0.2869

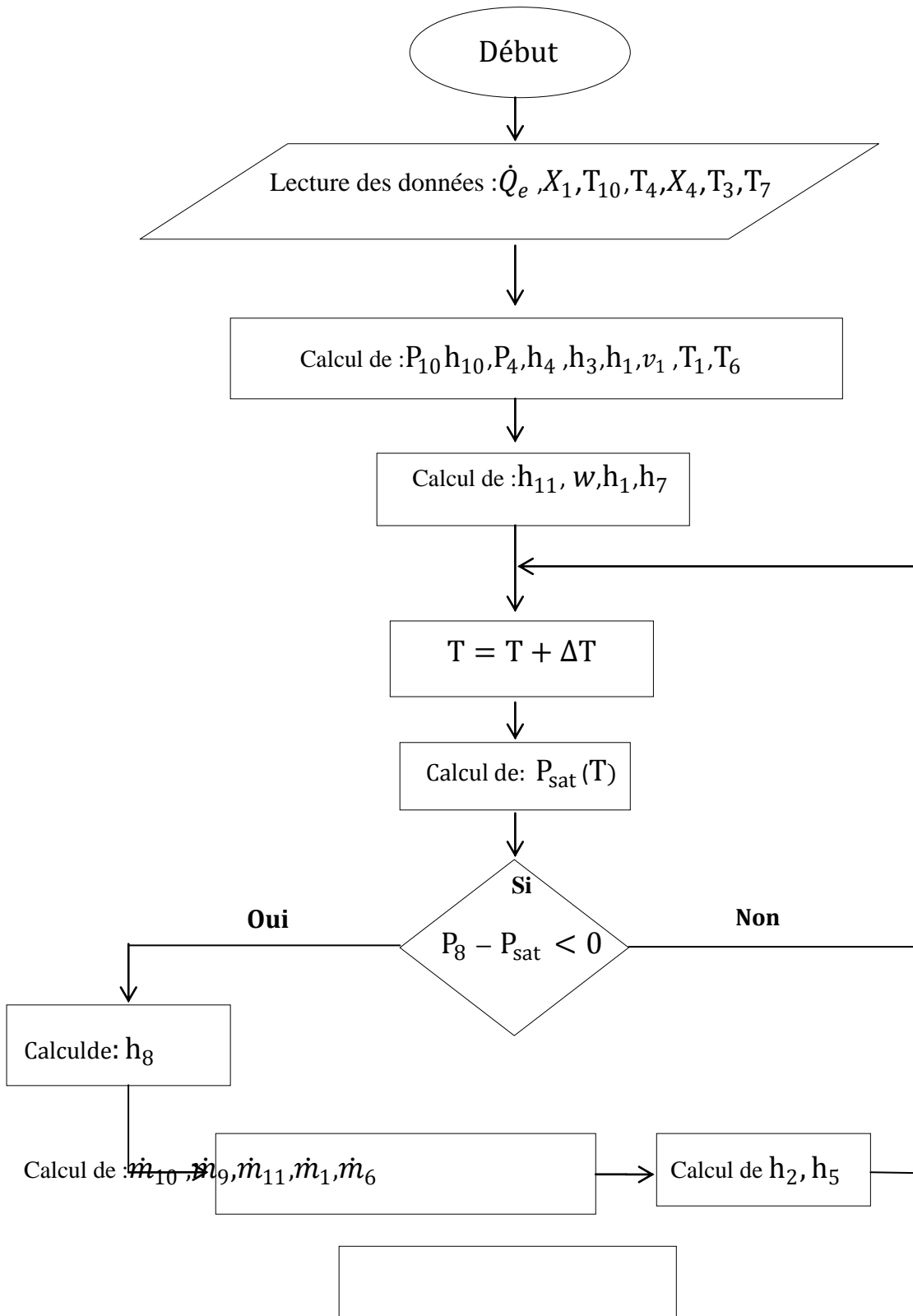
<i>Chaleur rejetée par l'absorbeur</i>	\dot{Q}_a	KW	13.8031
<i>Chaleur injecté dans le générateur</i>	\dot{Q}_g	KW	14.1197
<i>Chaleur rejetée par le condenseur</i>	\dot{Q}_c	KW	10.6035
<i>Coefficient de performance</i>	COP	/	0.7082

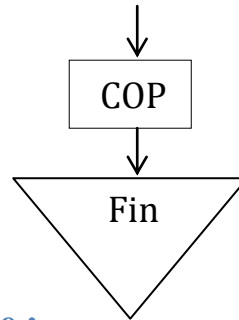
III.2.5 Programmation MATLAB :

Les résultats obtenus dans le tableau (III.2) sont calculés par le programme MATLAB, nous avons programmé les équations mentionnés dans (l'annexe A), afin de trouver les différents paramètres au niveau de chaque point de l'installation. Ces paramètres qui vont nous servir pour faire une analyse paramétrique de la machine à absorption et voir l'influence de chaque paramètre sur les performances de celle-ci .

L'algorithme ci-dessous illustre les différentes étapes de programme que nous avons effectué afin de calculer les différents paramètres et le coefficient de performance(COP) de la machine a absorption à simple effet.

Organigramme :



Calcul de : $\dot{Q}_a, \dot{Q}_g, \dot{Q}_c$ 

III.2.6 Analyse paramétrique :

III.2.6.1 Effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur :

Pour vérifier cet effet, les conditions suivantes sont utilisées:

1. Température à la sortie de l'échangeur de chaleur, $T_3 = 55^\circ \text{C}$.
2. Température de la solution à la sortie de générateur, $T_4 = 75^\circ \text{C}$.
3. Température du condenseur, $T_7 = 70^\circ \text{C}$.
4. Capacité de l'évaporateur 10 kW.
5. Température de l'évaporateur 6°C .
6. Le rapport en % de LiBr à la sortie de l'absorbeur $X_1 = 60\%$.
7. Pression de générateur et condenseur = 4,82 kPa.
8. Pression de l'absorbeur et l'évaporateur = 0,934 kPa.

Tableau III. 4 : Résultats de l'effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur

$X_4(\%)$	$\dot{m}_1(m/s)$	$T_1(^{\circ}C)$	COP
45	0,0173	17,9782	0,8705
47,5	0,0208	21,2007	0,8518
50	0,0259	24,8929	0,8286
52,5	0,0346	28,9878	0,7977
55	0,0519	33,4184	0,7499
57,5	0,1038	38,1175	0,6467

Figure III. 3 : *L'effet du pourcentage de LiBr à l'entrée de l'absorbeur.*

Étant donné que le taux en % de LiBr à la sortie de l'absorbeur est maintenu constant à 60%, le taux de circulation et donc le débit massique de la solution augmente avec l'augmentation du pourcentage du LiBr à l'entrée de l'absorbeur entraînant ainsi la diminution du COP. Pour une puissance de réfrigération constante, plus l'écart de concentrations entre l'entrée et la sortie de l'absorbeur est faible, plus le travail consommé par la pompe est important.

D'autre part, pour maintenir le cycle en fonctionnement au stade prévu, la température à la sortie de l'absorbeur (T_1) doit être maintenue à un niveau inférieur. Cela présente des difficultés avec la température de l'eau de refroidissement de l'échangeur de chaleur dans l'absorbeur. De ce fait, cette température peut être comprise entre 20 et 25° C, ce qui signifie que la température la plus basse à la sortie de l'absorbeur se situerait autour de 30°C.

III.2.6.2 Effet de la température du générateur :

Pour vérifier cet effet, les conditions suivantes sont utilisées:

1. Température à la sortie de l'échangeur de chaleur, $T_3 = 55^\circ\text{C}$.
2. Capacité de l'évaporateur 10 kW.
3. Température de l'évaporateur 6°C .
4. Rapport en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur = 52,5%.
5. Rapport en % de LiBr à la sortie de l'absorbeur = 60%.
6. Température à la sortie de l'absorbeur, $T_1 = 29^\circ\text{C}$.
7. Pression de l'absorbeur et l'évaporateur = 0,9343 kPa.

Tableau III. 5 : Résultats sur l'effet de la température du générateur.

$T_4(^{\circ}\text{C})$	$P_4(\text{KPa})$	$\dot{m}_1(\text{Kg/s})$	COP
65	2,9224	0,034	0,8557
70	3,7704	0,0343	0,826
75	4,8245	0,0346	0,7977
80	6,1252	0,0349	0,7707
85	7,7185	0,0352	0,7449

90	9,6571	0,0356	0,7201
95	12,0003	0,0359	0,6961
100	14,8152	0,0363	0,6729
105	18,1767	0,0367	0,6503
110	22,1683	0,0372	0,6281
115	26,8823	0,0378	0,6062

Figure III. 4 : Effet de la température de générateur.

Comme on le voit dans la figure (III.4) lorsque la température de générateur augmente, la pression aussi augmente, ce qui a pour effet d'abaisser le COP de l'appareil, compte tenu que les pressions et les températures aux autres points de l'installation sont maintenues constantes. Le débit massique au niveau de la pompe est légèrement changé, de 0,034 kg/s pour une température de sortie du générateur de 65° C à 0,037 kg/s pour une température de 115 °C.

III.2.6.3 Effet de la température de l'échangeur thermique :

Pour vérifier cet effet, les conditions suivantes sont utilisées:

1. Capacité de l'évaporateur 10 KW.
2. Température de l'évaporateur 6° C.
3. Pression au niveau du générateur et du condenseur = 4,82 kPa.
4. Rapport en pourcentage de LiBr à la sortie de l'absorbeur = 52,5%.
5. Rapport en pourcentage de LiBr à l'entrée de l'absorbeur = 60%.
6. Température à la sortie de l'absorbeur, $T_1 = 29^\circ \text{C}$.
7. Pression au niveau de l'absorbeur et de l'évaporateur = 0,934 kPa.

$T_3(^{\circ}\text{C})$	$T_5(^{\circ}\text{C})$	$T_4(^{\circ}\text{C})$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	COP
-------------------------	-------------------------	-------------------------	-------------------------	-----

40	62,5722	75	28,9878	0,733
45	56,259	75	28,9878	0,7534
50	49,9405	75	28,9878	0,7749
55	43,6165	75	28,9878	0,7977
60	37,2872	75	28,9878	0,8219
65	30,9524	75	28,9878	0,8477

Tableau III. 6 : Résultats sur l'effet de la température de l'échangeur thermique.

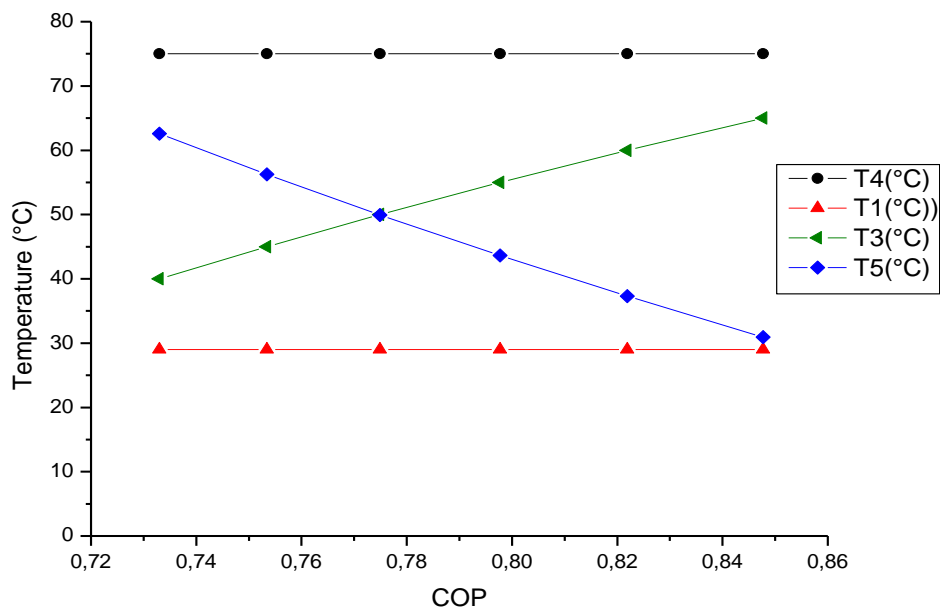


Figure III. 5 : Effet des températures de l'échangeur de chaleur

L'échangeur de chaleur à solution augmente l'efficacité de l'appareil. Plus sa surface d'échange est élevée, plus son effet sera important, puisque l'énergie utile peut être extraite de la solution du générateur alimentant l'absorbeur et être transféré à la solution retournant au générateur, d'où elle sera chauffée au point d'évaporation comme on l'observe dans la figure (III.5), le COP de l'appareil dans les conditions spécifiées est passé de 0,72 à un maximum de 0,85.

III.2.6.4 Effet de la concentration de la solution :

Pour vérifier l'efficacité de la concentration de la solution, une différence constante de 6% entre le rapport en % de LiBr à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur. En outre, les conditions suivantes sont utilisées:

1. Capacité de l'évaporateur= 10 kW.
2. Température de l'évaporateur 6° C.
3. Température de la solution à la sortie du générateur, $T_4 = 75^{\circ}\text{C}$
4. Température de la solution à la sortie de l'échangeur de chaleur, $T_3 = 55^{\circ}\text{C}$.
5. Pression au niveau de l'absorbeur et de l'évaporateur = 0,934 kPa.

$X_1(\%)$	$X_6(\%)$	$\dot{m}_1(\text{Kg/s})$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$P_4(\text{KPa})$	COP
46	52	0,0386	19,2065	10,3494	0,7915
48	54	0,0398	21,9037	8,698	0,7873
50	56	0,041	24,8929	7,2273	0,7823
52	58	0,0421	28,1398	5,9369	0,7771
54	60	0,0432	31,6102	4,8245	0,7723
56	62	0,0444	35,2695	3,884	0,7682
58	64	0,0455	39,0836	3,1048	0,7653

Tableau III. 7 : Résultat sur Effet de la concentration de la solution.

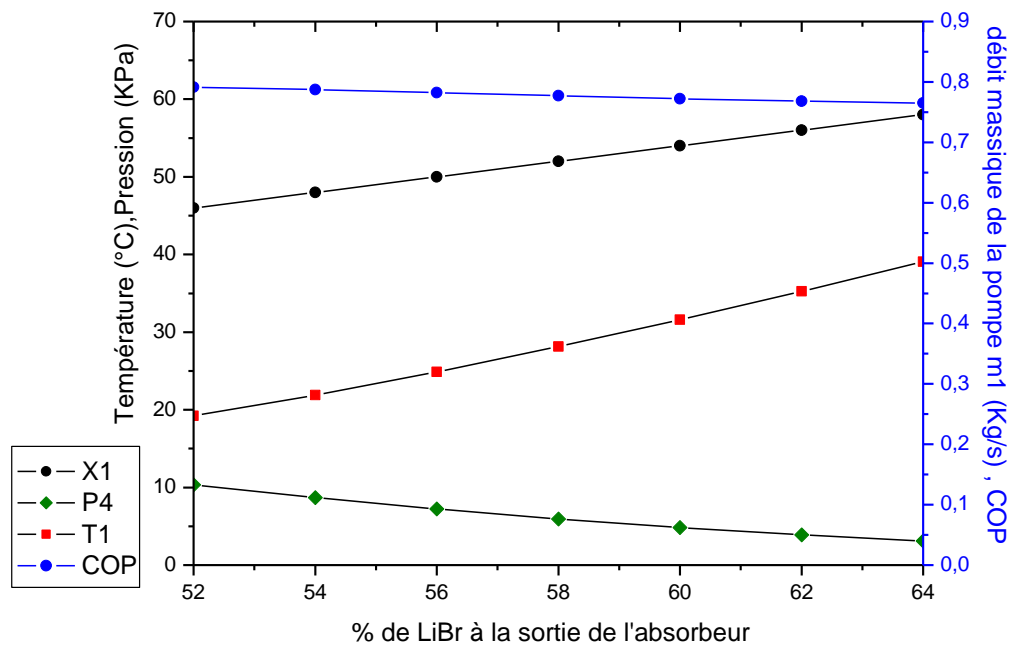


Figure III. 6 : Effet de la concentration de la solution.

Les résultats présentés dans la figure (III.6) indiquent que, pour une plus petite proportion en % de LiBr dans la solution, les résultats sont légèrement meilleurs, car la solution va absorber la vapeur d'eau supplémentaire plus facilement. Le COP pour les conditions choisies variera entre 0,79 à 0,76. Le principal inconvénient est la température de la solution à la sortie de l'absorbeur (T1), qui devra être conservée à basse température pour les plus petits rapports en % de LiBr dans la solution. Comme mentionné précédemment, une température raisonnable à la sortie de l'absorbeur se situerait autour de 30°C, ce qui aboutirait à un pourcentage de LiBr à la sortie de l'absorbeur au-dessus de 58%.

III.3 Cristallisation :

LiBr est un sel, et à l'état solide, il présente une structure cristalline. Lorsque LiBr est dissous dans l'eau, il y a une température de la solution minimale spécifique pour n'importe quelle concentration de sel donnée. Le sel commence à quitter la solution et cristalliser en dessous de cette température minimale. Dans une machine à absorption, si la concentration de la solution est trop élevée ou si la température de la solution est trop faible, la cristallisation peut se produire. Ceci est le plus susceptible de se produire dans l'échangeur de chaleur à solution, ce qui interrompt le fonctionnement de la machine (Absorption Refrigeration) [4]. Dans un tel cas, la température de la solution concentrée doit être soulevée au-dessus de son point de

saturation de telle sorte que les cristaux de sel reviendront une solution, ce qui libère la machine.

La cause la plus fréquente de cristallisation est la fuite d'air dans la machine, ce qui entraîne une pression accrue dans l'évaporateur. Ceci, à son tour, entraîne des températures d'évaporation plus élevées et, par conséquent, des capacités inférieures. Dans des conditions de charge élevée, le système de control augmente l'apport de chaleur au générateur, entraînant une augmentation des concentrations de solution au point où cristallisation peut se produire. Les gaz non absorbables, comme l'hydrogène, produites au cours de la corrosion, peut également être présente, ce qui réduit les performances du condenseur et de l'absorbeur à la fois(Radermacher R, 1996)[5]. Une méthode directe pour maintenir la pression requise est d'évacuer la phase gazeuse périodiquement avec une pompe à vide(Florides, 2002).

L'eau du condenseur excessivement froid, couplée à une condition de charge élevée, est une autre cause de cristallisation. Dans les conceptions modernes, la température de l'eau de tour de refroidissement est autorisée à flotter avec des variations de charge et la température de l'air extérieur. De cette façon, en utilisant des températures d'eau de refroidissement qui sont au-dessous de la conception, l'unité performanceest améliorée. Toutefois, dans l'échangeur de chaleur à solution sous des conditions de charge élevées, la température d'entrée de la solution diluée peut être suffisamment faible pour réduire la température de la solution fortement concentrée revenant de générateur jusqu'au point de cristallisation.

Une troisième raison est une panne de courant électrique. Lors de l'arrêt normal, la machine est soumise à un cycle de dilution, ce qui abaisse la concentration de la solution tout au long de la machine. Dans un tel cas, la machine peut refroidir à température ambiante sans cristallisation produisant dans les solutions. La cristallisation est plus susceptible de se produire lorsque la machine est à l'arrêt tout en fonctionnant à pleine charge, lorsque les solutions très concentrées sont présentes dans l'échangeur de chaleur à solution.

CONCLUSION :

Une méthode pour évaluer les caractéristiques et les performances d'une machine à absorption d'Eau-LiBr à simple effet a été présentée, la chaleur nécessaire et les équations de transfert de masse et les équations appropriées décrivant les propriétés des fluides de travail ont été précisées. Ces équations ont été utilisées dans un programme informatique MATLAB, et une analyse de paramétrique est effectuée. Cette analyse montre que plus la différence du taux en pourcentage de LiBr entre l'entrée de l'absorbeur et la sortie est la plus petite sera la masse circulant dans l'absorbeur. D'autre part, afin de maintenir le cycle en cours d'exécution à un étage spécifié, la température à la sortie de l'absorbeur doit être maintenue à un plus faible niveau lorsque le rapport en pourcentage de LiBr à sortie de l'absorbeur est inférieur.

Considérant que les pressions et les températures à d'autres points de l'unité sont maintenues constantes, le COP de l'unité est diminué lorsque la température du générateur est augmentée, ce qui conduit à une augmentation de la pression du générateur. L'échangeur de chaleur à solution augmente l'efficacité de l'appareil. Plus la surface de l'échangeur de chaleur est importante, plus son effet est important.

Enfin, lors de la vérification de l'efficacité de la concentration de la solution d'une différence constante de 6% entre le taux en pourcentage de LiBr à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur, il a été constaté qu'une plus petite proportion en pourcentage des solutions LiBr aurait des résultats légèrement meilleurs. Le principal inconvénient est la température de la solution à la sortie de l'absorbeur (T_1), qui devra être maintenue à une température basse pour les plus petits rapports en pourcentage de la solution LiBr. Une température raisonnable à la sortie de l'absorbeur se situerait autour de 30° C, ce qui aboutirait à un pourcentage de LiBr à la sortie de l'absorbeur au-dessus de 58%.

ANNEXE.A :***A.1. la pression et températures de la solution LiBr et du réfrigérant***(ASHRAE, 1997)[6]:

Entre 45% < X < 70% LiBr.

T_{sol} : Température de la solution (°C), Entre 5 < T_{sol} < 175°C.

$T_{réf}$: Température du réfrigérant à l'état saturé (°C), Entre -15 < $T_{réf}$ < 110°C.

P: Pression de saturation (kPa).

$$A_0 = -2.00755, A_1 = 0.16976, \quad A_2 = -0.003133362, \quad A_3 = 0.0000197668$$

$$B_0 = 124.937, B_1 = -7.71649, \quad B_2 = 0.152286, \quad B_3 = -0.0007959$$

$$\Sigma A = A_0 X^0 + A_1 X^1 + A_2 X^2 + A_3 X^3$$

$$\Sigma B = B_0 X^0 + B_1 X^1 + B_2 X^2 + B_3 X^3$$

$$C = 7.05, \quad D = -1596.49, \quad E = -104095.5$$

$$\log P = C + D / (T_{réf} + 273) + E / (T_{réf} + 273)^2$$

$$T_{réf} = \left(-2E / (D + [D^2 - 4E(C - \log P)]^{0.5}) \right) - 273$$

$$T_{sol} = \Sigma B + T_{réf} \Sigma A$$

A.2. Enthalpie de la solution LiBr(ASHRAE, 1997)[7]:

Entre 40% < X < 70% LiBr

T = Température de la solution (°C). Entre 15°C < T < 165°C.

h = Enthalpie (kJ/kg).

$$A_0 = -2024.33, A_1 = 163.309, A_2 = -4.88161, \quad A_3 = 0.06302948, A_4 = -0.0002913704$$

$$B_0 = 18.2829, B_1 = -1.1691757, B_2 = 0.03248041, B_3 = -0.0004034184, B_4 = 0.0000018520569$$

$$C_0 = -0.037008214, C_1 = 0.0028877666, C_2 = -0.000081313015, C_3 = 0.00000099116628, C_4 = 0.0000000044441207.$$

$$\Sigma A = A_0 X^0 + A_1 X^1 + A_2 X^2 + A_3 X^3 + A_4 X^4$$

$$\Sigma B = B_0 X^0 + B_1 X^1 + B_2 X^2 + B_3 X^3 + B_4 X^4$$

$$\Sigma C = C_0 X^0 + C_1 X^1 + C_2 X^2 + C_3 X^3 + C_4 X^4$$

$$h = \Sigma A + \Sigma B + \Sigma C T^2$$

A.3. La Densité de la solution LiBr(Lee RJ, 1990)[8] :

Entre 20% < X < 60% LiBr.

T:Température de la solution (°C), 0<T<200°C,

ρ_x : Densité de solution LiBr (kg/m³).

$$X_0 = X / 100$$

$$\rho_x = 1145.36 + 470.84X_0 + 1374.79X_0^2 - (0.333393 + 0.571749X_0)(273 + T)$$

A.4. La pression de Saturation de la vapeur d'eau (Rogers GFC M. Y., 1992)[9]:

P: Pression de Saturation(kPa).

T: Température (°C).

$$P = 0.000000000002T^6 - 0.0000000003T^5 + 0.0000002T^4 + 0.00003T^3 + 0.0014T^2 + 0.0444T + 0.6108$$

A.5. Enthalpie de la vapeur d'eau saturé(Rogers GFC M. Y., 1992):

h_g :Enthalpie de la vapeur(kJ/kg).

T:Température (°C).

$$h_g = -0.00125397T^2 + 1.88060937T + 2500.559.$$

A.6. la chaleur Latente de condensation de la vapeur d'eau :

h_{fg} : La chaleur latente de condensation (kJ/kg).

T: Température de saturation (°C).

$$h_{fg} = -0.00132635T^2 - 2.29983657T + 2500.43063$$

A.7. Enthalpie de la vapeur surchauffée :

H_{sh} :Enthalpie de la vapeur surchauffée (kJ/kg).

$T_{réf}$: Température du réfrigérant à l'état saturée (°C).

T_{actual} : Température de vapeur (°C).

P: Pression de vapeur (kPa).

T: Température du vapeur surchauffée(°C).

$$T = T_{actual} - T_{réf}$$

$$H_{SH1} = 32.508 \ln(P) + 2513.2$$

$$H_{SH2} = 0.00001P^2 + 0.1193P + 2689 ;$$

$$H_{SH} = ((H_{SH2} - H_{SH1}) / 100)T + H_{SH1} .$$

Bibliographie:

- [1] ASHRAE. (1997). *Handbook of Fundamentals*. . Atlanta.
- [2] Atmaca, I. (2002). *Simulation of solar-powered absorption cooling*.
- [3] *Design and construction of a LiBr–water G.A. Florides, ,. S. (2002). absorption machine . Wrobel .*
- [4] *Refrigeration, A. (n.d.). Absorption Refrigeration. The Trane Company, La Crosse, Wisconsin 54601: Trane Air Conditioning Clinic.*
- [5] *Radermacher R, K. S. (1996). Absorption chillers and heat pumps. CRS Press; Herold EK.*
- [6] *Florides, G. (2002). Design and construction of a LiBr–water absorption machine.*
- [7] *G.A. Florides, ,. S. (2002). Design and construction of a LiBr–water absorption machine . Wrobel .*
- [8] *Lee RJ, D. R. (1990). Properties of lithium bromide–water solutions at high temperatures and concentration. II. Density and viscosity.*
- [9] *Rogers GFC, M. Y. (1992). Thermodynamic and transport properties of fluids.*

CHAPITRE III :

Modélisation des composants d'un système de rafraîchissement à absorption.

Introduction :	72
III.1 Rafraîchissement par absorption :.....	72
III.2 Absorption par H ₂ O /LiBr :.....	73
III.2.1 Présentation du modèle.....	75
III.2.2 Hypothèses.....	75
III.2.3 Analyses des composants :	76
III.2.3.1 Évaporateur :.....	76
III.2.3.2 Absorbeur :	78
III.2.3.3 Générateur (désorbeur) :.....	80
III.2.3.4 Condenseur :	81
III.2.3.5 Coefficient de performance :	81
III.2.4 Programmation MATLAB :.....	82
III.2.5 Analyse paramétrique :.....	84
III.2.5.1 Effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur :.....	84
III.2.5.2 Effet de la température du générateur :.....	86
III.2.5.3 Effet de la température de l'échangeur thermique :.....	87
III.2.5.4 Effet de la concentration de la solution :.....	89
III.3 Cristallisation :	91
Conclusion :	93
Bibliographie:	96

TABLE DES FIGURES :

Figure III. 1 : <i>Cycle d'absorption Eau /LiBr à simple effet</i>	74
Figure III. 2 : <i>Schéma d'une installation à absorption de H₂O/LiBr sur le diagramme</i>	75
Figure III. 3 : <i>L'effet du pourcentage de LiBr à l'entrée de l'absorbeur.</i>	85
Figure III. 4 : <i>Effet de la température de générateur.</i>	87
Figure III. 5 : <i>Effet des températures de l'échangeur de chaleur</i>	88
Figure III. 6 : <i>Effet du concentration de la solution.</i>	90

TABLEAUX :

Tableau III. 1 : <i>Les paramètres de conception pour un refroidisseur d'absorption Eau-LiBr à simple effet</i>	76
Tableau III. 2 : <i>Les données pour le système de refroidissement Eau-LiBr à simple effet</i>	78
Tableau III. 3 : <i>Les flux énergétique aux différents composants du système</i>	82
Tableau III. 4 : <i>Résultats de l'effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur</i>	84
Tableau III. 5 : <i>Résultats sur l'effet de la température du générateur.</i>	86
Tableau III. 6 : <i>Résultats sur l'effet de la température de l'échangeur thermique.</i>	88
Tableau III. 7 : <i>Résultat sur Effet de la concentration de la solution.</i>	89

Nomenclature :

<i>Symbole</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
COP	<i>Coefficient de performance</i>	-
h	<i>Enthalpie</i>	Kj/Kg
ṁ	<i>Débit massique</i>	Kg/s
P	<i>Pression</i>	Kpa
Q̇_e	<i>Capacité de l'évaporateur</i>	KW
Q̇_a	<i>Chaleur rejetée par l'absorbeur</i>	KW
Q̇_c	<i>Chaleur rejetée par le condenseur</i>	KW
Q̇_g	<i>Chaleur injecté dans le générateur</i>	KW
T	<i>Température</i>	°C
v	<i>Volume spécifique</i>	m ³ / kg
w	<i>La puissance de la pompe</i>	W
X	<i>Rapport de LiBr dans la solution</i>	%
ρ_x	<i>Densité</i>	kg/m ³

Introduction :

Les machines frigorifiques à absorption sont de plus en plus utilisées notamment dans les installations de rafraîchissement solaire appliqué aux bâtiments. Dans ce cas, elles sont alimentées par de l'eau chaude produite par un champ de capteurs solaires thermiques.

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode pour évaluer les caractéristiques et les performances d'une machine à absorption simple effet, fonctionnant avec le mélange binaire bromure de lithium (absorbant) / eau (fluide frigorigène). Les équations de transfert de chaleur et de masse reflétant les différents processus des fluides actifs sont spécifiées. Ces équations sont à la base d'un programme informatique MATLAB, où une analyse paramétrique est effectuée. Les échangeurs de chaleur à tubes verticaux à seule passe sont utilisés pour l'absorbeur et pour l'évaporateur. L'échangeur intermédiaire de chaleur de la solution est un échangeur de chaleur annulaire à un seul passage. Le condenseur et le générateur sont des échangeurs de chaleur à tubes horizontaux (G.A. Florides, 2002)^[1].

III.1 Rafraîchissement par absorption :

Les machines à absorption sont thermiquement activées, et pour cette raison, une puissance élevée à l'entrée n'est pas nécessaire. De ce fait le solaire thermique, le gaz, la chaleur géothermique...etc. peuvent assurer un refroidissement fiable et silencieux par les machines à absorption (ASHRAE, 1997). Un certain nombre de couples réfrigérant-absorbant peuvent être utilisés, dont les plus courants sont Eau/LiBr et NH₃/Eau. Ces deux paires offrent de bonnes performances thermodynamique, et ils sont respectueux à l'environnement.

Le Couple (Absorbant-réfrigérant) dans un système de réfrigération à absorption doit répondre à un certain nombre important d'exigences, qui sont :

1. *Absence de phase solide* – le couple réfrigérant-absorbant ne doit pas former une phase solide dans la plage de concentration et de température de fonctionnement. La formation de solides peut arrêter l'écoulement et causer des problèmes à l'équipement.
2. *Rapport de la volatilité* - Le fluide réfrigérant doit être plus volatil que l'absorbant afin qu'il puisse être séparé facilement par l'échauffement.

3. *Affinité* - L'absorbant doit avoir une forte affinité avec le réfrigérant selon les conditions dans lesquelles l'absorption a lieu. Cette affinité permet à un débit optimisé de fournir le même effet de réfrigération, et par conséquent, les pertes par chaleur sensible sont diminuées.

4. *Pression* – Des pressions de fonctionnement modérées doivent être utilisées, afin d'éviter l'utilisation d'un équipement à paroi dure et de réduire la puissance électrique nécessaire pour pomper des fluides du côté basse pression au côté haute pression. Aussi, très basse pression (vide) nécessite l'utilisation d'un équipement volumineux et des moyens spéciaux afin de réduire les chutes de pression dans l'écoulement de la vapeur réfrigérante.

5. *Stabilité* – la stabilité est nécessaire pour éviter la formation indésirable de gaz, solides ou substances corrosives.

6. *Corrosion* - Les fluides doivent être non corrosifs. Si les fluides sont corrosifs, des inhibiteurs de corrosion doivent être utilisés, ce qui peut influencer sur les performances thermodynamiques de l'équipement.

7. *Sécurité* - les fluides doivent être non toxiques et non inflammables.

8. *La chaleur latente* - Pour maintenir le taux de circulation du fluide frigorigène et absorbant au minimum, la chaleur latente de fluide frigorigène doit être aussi élevée que possible.

Le couple *Eau- Ammoniac* n'est pas adapté pour une utilisation avec des capteurs solaires en raison de la température élevée nécessaire dans le générateur (125-170° C). Cette température ne peut être obtenue qu'avec des collecteurs paraboliques à concentration nécessitant un entretien spécifique en raison des systèmes traqueurs.

Les températures nécessaires dans le générateur pour le couple *Eau-LiBr* sont plus faibles (75-120° C). Ces températures peuvent être obtenues avec des capteurs plans de haute performance, les collecteurs paraboliques et les capteurs à tubes sous vide de faible coût sont plus faciles à installer et à exploiter que les collecteurs paraboliques à concentration (Atmaca, 2002).

III.2 Absorption par H₂O /LiBr :

Ce type d'équipement est classé selon le procédé de la source de chaleur au niveau du générateur. La technologie d'absorption à simple effet fournit un coefficient de performance (COP) d'environ 0,7 pour des températures de génération entre 75 et 120° C. La technologie à double effet donne un COP plus élevé, mais elle ne peut être utilisée que lorsque la température de la source de chaleur (soleil) est très élevée. Les systèmes à double effet peuvent être obtenus en ajoutant un système d'appoint au cycle à simple effet. De ce fait, le rejet de la chaleur de l'étage de haute température est utilisé pour alimenter l'étage basse température. Il convient de noter que le réfrigérant dans ce système est l'eau et le bromure de lithium agit comme absorbant, qui absorbe la vapeur d'eau, ce qui rend le pompage de l'absorbeur au générateur facile et économique (Florides, 2002)^[2]. Un système à absorption H₂O/LiBr à simple effet est illustré dans la figure (III.1), sa présentation schématique sur un diagramme pression-température est illustré dans la figure (III.2).

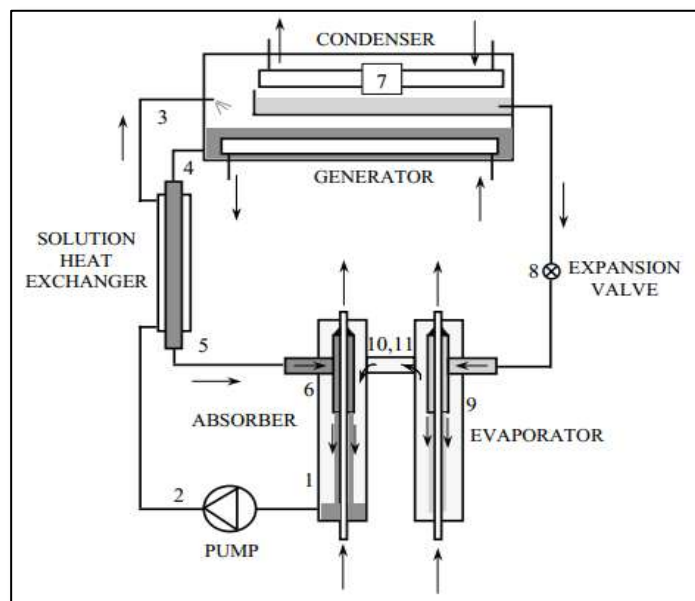


Figure III. 1 : Cycle d'absorption Eau /LiBr à simple effet.

III.2.1 Présentation du modèle

La machine à absorption modélisée est de type simple effet, elle fonctionne avec le couple Eau/LiBr et son schéma de principe, regroupant tous ses principaux composants est représenté sur la figure (III.1).

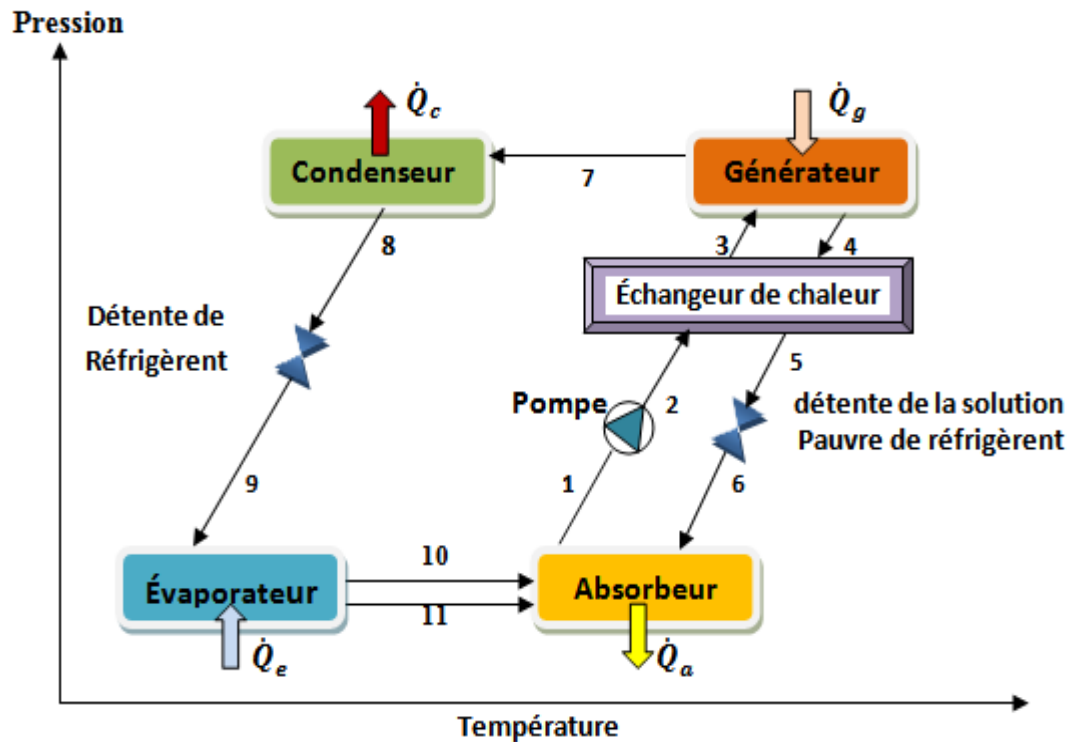


Figure III. 2 : Schéma d'une installation à absorption de H₂O/LiBr sur le diagramme (P, T).

III.2.2 Hypothèses

Pour effectuer des estimations de dimensionnement des équipements et par conséquent l'évaluation des performances d'un système à absorption LiBr-eau à simple effet, des hypothèses de base et les paramètres d'entrée doivent être pris en considération. En référence aux figures (III.1) et(III.2), les hypothèses de base sont (Florides, 2002)^[3]:

1. L'état d'équilibre du réfrigérant est une eau pure.
2. Il n'y a pas de variations de pression, sauf à travers les détendeurs et la pompe.
3. Le réfrigérant au point 1, 4, 8 et 11, est un liquide saturé.
4. Le réfrigérant au point 10, est une vapeur saturée.

5. la détente est isenthalpique.
6. La pompe est isentropique.
7. Il n'y a pas les pertes de chaleur.

Le procédé de conception est démontré ci-dessous. Les paramètres de conception considérée sont listés dans le tab (III.1).

<i>Paramètres</i>	<i>Symbole</i>	<i>Valeur d'entrés</i>
<i>Puissance de l'évaporateur</i>	\dot{Q}_e	10 KW
<i>Température de l'évaporateur</i>	T_{10}	6°C
<i>Température de sortie de générateur</i>	T_4	90°C
<i>Fraction massique de la solution riche</i>	X_1	55 % LiBr
<i>Fraction massique de la solution pauvre</i>	X_4	60 % LiBr
<i>Température de sortie de l'échangeur a solution</i>	T_3	65°C
<i>Température de la vapeur surchauffée</i>	T_7	85°C
<i>La quantité de liquide sortante de l'évaporateur</i>	\dot{m}_{11}	0.025 * \dot{m}_{10}

Tableau III. 1 : Les paramètres de conception pour un refroidisseur d'absorption Eau-LiBr à simple effet.

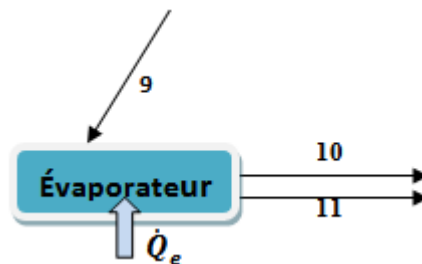
III.2.3 Analyses des composants :

III.2.3.1 Évaporateur :

Étant donné, que dans l'évaporateur, le réfrigérant (l'eau) à la température (T_{10}) est une vapeur saturée, la pression de saturation au point 10, telle que calculée à partir de la courbe correspondante ^[4] (Voir l'annexe A), est de 0,934 kPa, et l'enthalpie est 2511,8 kJ / kg. Étant donné, qu'au point 11, le réfrigérant est un liquide saturé, son enthalpie est de 25,21 kJ / kg. L'enthalpie au point (9) est déterminée à partir du processus de détente du réfrigérant (détente isenthalpique), ce qui donne $h_9 = h_8$.

Pour déterminer h_8 , la pression en ce point doit être déterminée. Étant donné, qu'au point 4, la fraction massique de la solution est de 60% LiBr et la température à l'état saturé est supposée d'être 90° C, le LiBr donne une pression de saturation de 9,657 kPa et $h_4 = 212,2$ kJ / kg. Considérant que la pression au point (4) est la même qu'au le point 8, donc $h_8 = h_9 = 201.48$ kJ / kg.

Une fois les valeurs d'enthalpie, à tous les points connectés à l'évaporateur sont connues, les bilans massique et énergétique peuvent être appliqués afin de trouver le débit massique du réfrigérant et le taux transfert de chaleur dans l'évaporateur.



Le bilan massique au niveau de l'évaporateur est :

$$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} \quad (\text{III.1})$$

Le bilan énergétique au niveau de l'évaporateur est:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{m}_{11}h_{11} - \dot{m}_9h_9 \quad (\text{III.2})$$

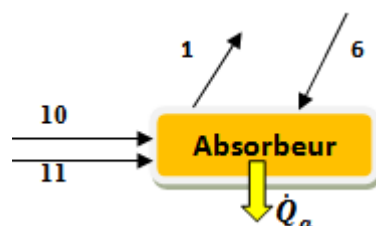
Étant donné que la puissance de l'évaporateur \dot{Q}_e est 10,0 kW et $m_{11}=2.5 \% m_{10}$ les débits massiques peuvent être calculés. Les résultats sont présentés dans le tableau (III.2).

Tableau III. 2 : Les données pour le système de refroidissement Eau-LiBr à simple effet.

Point	h (Kj/Kg)	\dot{m} (Kg/s)	P (Kpa)	T (°C)	X (% LiBr)	Remarques
1	80.0483	0.0533	0.9343	33.4184	55	Solution riche de LiBr_H2O
2	85.4271	0.0533	9.6571	36.0216	55	Solution riche de LiBr_H2O
3	145.3803	0.0533	9.6571	65	55	Liquide sou refroidi
4	212.1909	0.0489	9.6571	90	60	Solution pauvre de LiBr_H2O
5	146.7874	0.0489	9.6571	56.1134	60	Solution pauvre de LiBr_H2O
6	146.7874	0.0489	0.9343	43.0180	60	Solution pauvre de LiBr_H2O
7	2586.9	0.0044	9.6571	85	0	Vapeur surchauffée
8	201.4812	0.0044	9.6571	48.1253	0	liquide saturée
9	201.4812	0.0044	0.9343	6	0	Mélange (liquide_vapeur) d'eau
10	2511.8	0.0043	0.9343	6	0	Vapeur d'eau saturée
11	25.2137	0.00010842	0.9343	6	0	liquide saturée

III.2.3.2 Absorbeur :

Puisque les valeurs de \dot{m}_{10} et \dot{m}_{11} sont connues,



Les bilans massiques au niveau de l'absorbeur donnent:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{10} + \dot{m}_{11} + \dot{m}_6 \quad (\text{III.3})$$

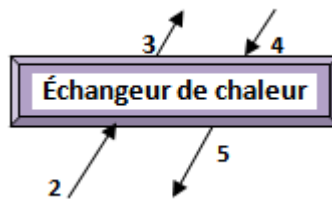
Et

$$\dot{m}_1 x_1 = x_6 \dot{m}_6 \quad (\text{III.4})$$

Les fractions massiques x_1 et x_6 dans l'éq (III.4) sont données, et par conséquent, les débits \dot{m}_1 et \dot{m}_6 peuvent être calculés. Les résultats sont présentés dans le tableau (III.2).

Le taux de transfert de chaleur dans l'absorbeur peut être déterminé à partir des valeurs d'enthalpie de chaque point d'état connecté. Au point (1), l'enthalpie est déterminée à partir de la fraction massique (55%) et l'hypothèse que l'état est un liquide saturé à la même pression de l'évaporateur (0,934kPa). Cette valeur est $h_1 = 80.05 \text{ kJ / kg}$. La valeur de l'enthalpie au point (6) est déterminée tel que $h_6 = h_5$ (détente isenthalpique).

L'enthalpie au point (5) n'est pas connue, mais elle peut être déterminée à partir du bilan énergétique au niveau de l'échangeur de chaleur, en supposant que l'échangeur est adiabatique ceci donne :



$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_4 h_4 = \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_5 h_5 \quad (\text{III.5})$$

La température au point (3) est une donnée (65°C), et puisque la fraction massique pour les points (1) à (3) est la même, l'enthalpie à ce point est déterminé comme étant $h_3 = 145.38 \text{ kJ / kg}$. En fait, l'état au point (3) peut être liquide sous-refroidi. Cependant, aux conditions d'intérêt, la pression a un effet négligeable sur l'enthalpie du liquide sous-refroidi, et la valeur saturante à la même température et fraction massique peut être une approximation suffisante.

L'enthalpie au point (2) est déterminée à partir du modèle d'une pompe isentropique. La puissance de la pompe (\dot{w}) peut être donc obtenue à partir de l'éq (III.6) :

$$\dot{w} = \dot{m}_1 v_1 (P_2 - P_1) \quad (\text{III.6})$$

Dans l'éq (III.6), il est supposé que le volume spécifique (v , m^3/kg) de la solution liquide ne change pratiquement pas de point (1) au point (2). Le volume spécifique de la solution liquide peut être obtenu à partir de la courbe correspondante [3] (voir l'annexe A).

Pour la présente étude, puisque toutes les variables sont connues 'voir tableau (III.2)', la puissance de la pompe est égale à:

$$\dot{w} = 0,29 \text{ W}$$

L'éq (III.5) peut être donc résolue afin de trouver l'enthalpie au point (5), donnant $h_5 = 146,79$ kJ / kg. La température T_5 peut être déterminée aussi à partir de la valeur de l'enthalpie, ce qui donne $T_5 = 56,11^\circ \text{ C}$.

Enfin, le bilan énergétique au niveau de l'absorbeur est :

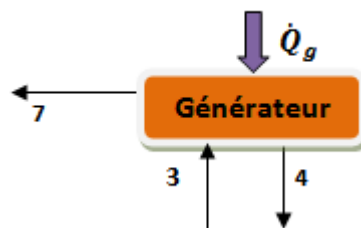
$$\dot{Q}_a = \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{11} h_{11} + \dot{m}_6 h_6 - \dot{m}_1 h_1 \quad (\text{III.7})$$

Ce qui donne :

$$\dot{Q}_a = 13,80 \text{ KW}$$

III.2.3.3 Générateur (désorbeur) :

L'apport de chaleur au niveau de générateur est déterminé à partir du bilan énergétique, qui est:



$$\dot{Q}_g = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_7 h_7 - \dot{m}_3 h_3 \quad (\text{III.8})$$

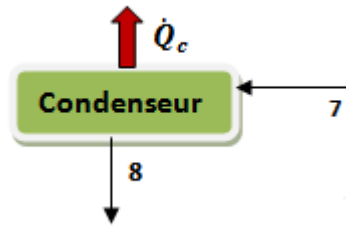
Ce qui donne :

$$\dot{Q}_g = 14.12 \text{ KW}$$

L'enthalpie au point (7) peut être déterminée, puisque la température en ce point est une valeur donnée. En général, l'état au point (7) est de la vapeur d'eau surchauffée, donc l'enthalpie peut être déterminée dès que la pression et la température sont connues.

III.2.3.4 Condenseur :

La puissance du condenseur peut être déterminée à partir d'un bilan énergétique, ce qui donne:



$$\dot{Q}_c = \dot{m}_7 (h_7 - h_8) \quad (\text{III.9})$$

Le résultat est:

$$\dot{Q}_c = 10.60 \text{ KW}$$

III.2.3.5 Coefficient de performance :

Le COP_{th} est défini comme étant :

$$COP_{th} = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g} \quad (\text{III.10})$$

La valeur de COP_{th} est donc : 0.708

Les flux d'énergie dans les différentes composantes du système est illustré dans le tableau (III.3). Pour trouver des conditions appropriées pour des applications spécifiques, une analyse paramétrique peut être réalisée en utilisant le programme informatique MATLAB, qui suit la

séquence décrite ci-dessus et les corrélations mathématique pour les propriétés des fluides indiqués dans l'annexe A. Une telle analyse paramétrique est présentée ci-dessous.

Tableau III. 3 : Les flux énergétique aux différents composants du système

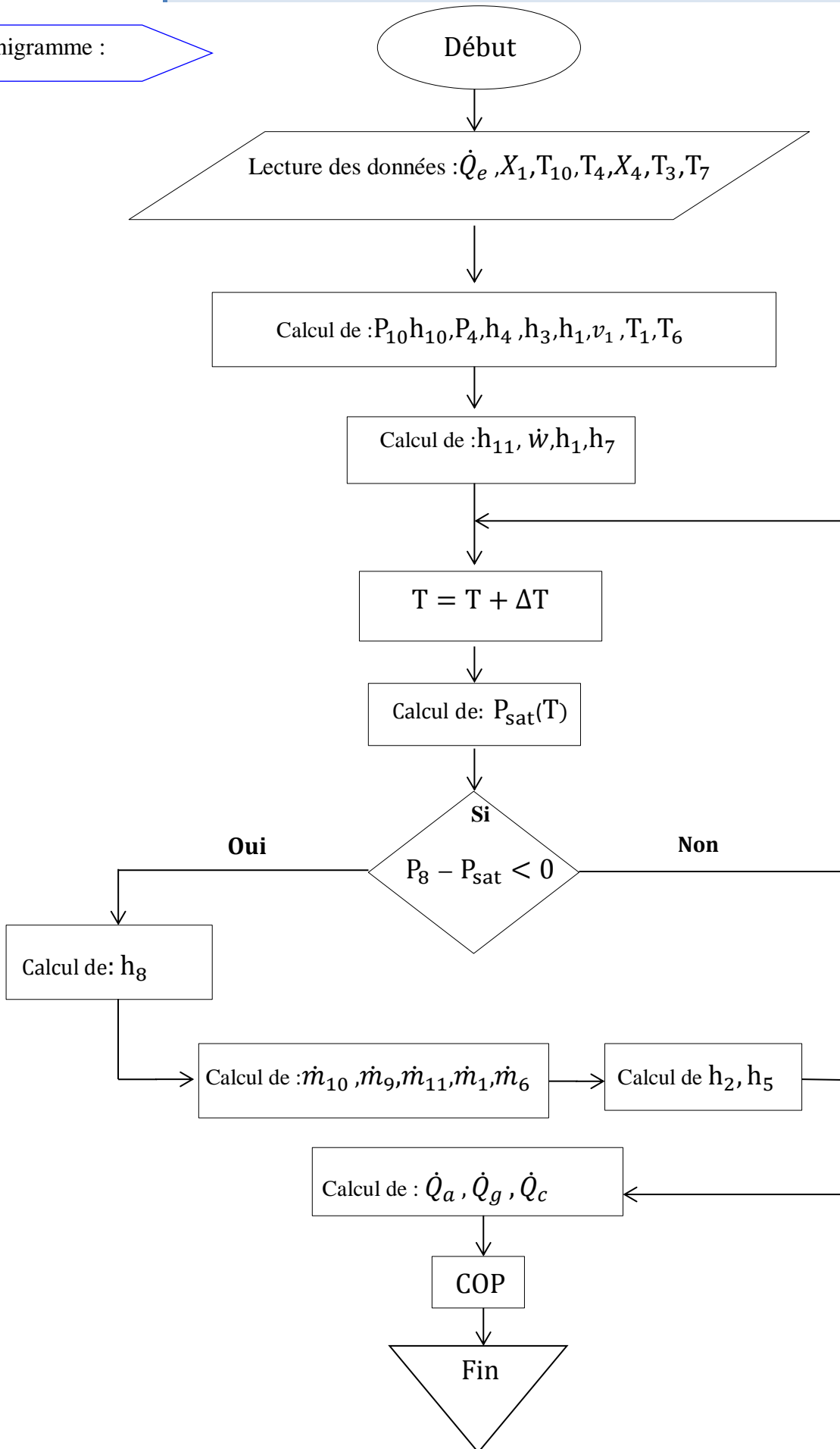
<i>Description</i>	<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>	<i>Résultat</i>
<i>Puissance de l'évaporateur</i>	\dot{Q}_e	KW	10
<i>travail de la pompe</i>	w	KW	0.2869
<i>Chaleur rejetée par l'absorbeur</i>	\dot{Q}_a	KW	13.8031
<i>Chaleur injecté dans le générateur</i>	\dot{Q}_g	KW	14.1197
<i>Chaleur rejetée par le condenseur</i>	\dot{Q}_c	KW	10.6035
<i>Coefficient de performance</i>	COP	/	0.7082

III.2.4 Programmation MATLAB :

Les résultats obtenus dans le tableau (III.2) sont calculés par le programme MATLAB, nous avons programmé les équations mentionnés dans (l'annexe A), afin de trouver les différents paramètres au niveau de chaque point de l'installation. Ces paramètres qui vont nous servir pour faire une analyse paramétrique de la machine à absorption et voir l'influence de chaque paramètre sur les performances de celle-ci.

L'algorithme ci-dessous illustre les différentes étapes de programme que nous avons effectué afin de calculer les différents paramètres et le coefficient de performance(COP) de la machine a absorption à simple effet.

Organigramme :



III.2.5 Analyse paramétrique :

III.2.5.1 Effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur :

Pour vérifier cet effet, les conditions suivantes sont utilisées:

1. Température à la sortie de l'échangeur de chaleur, $T_3 = 55^\circ \text{C}$.
2. Température de la solution à la sortie de générateur, $T_4 = 75^\circ \text{C}$.
3. Température du condenseur, $T_7 = 70^\circ \text{C}$.
4. Capacité de l'évaporateur 10 kW.
5. Température de l'évaporateur 6°C .
6. Le rapport en % de LiBr à la sortie de l'absorbeur $X_1 = 60\%$.
7. Pression de générateur et condenseur = 4,82 kPa.
8. Pression de l'absorbeur et l'évaporateur = 0,934 kPa.

Tableau III. 4 : Résultats de l'effet du taux en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur

$X_4(\%)$	$\dot{m}_1(m/s)$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	COP
45	0,0173	17,9782	0,8705
47,5	0,0208	21,2007	0,8518
50	0,0259	24,8929	0,8286
52,5	0,0346	28,9878	0,7977
55	0,0519	33,4184	0,7499
57,5	0,1038	38,1175	0,6467

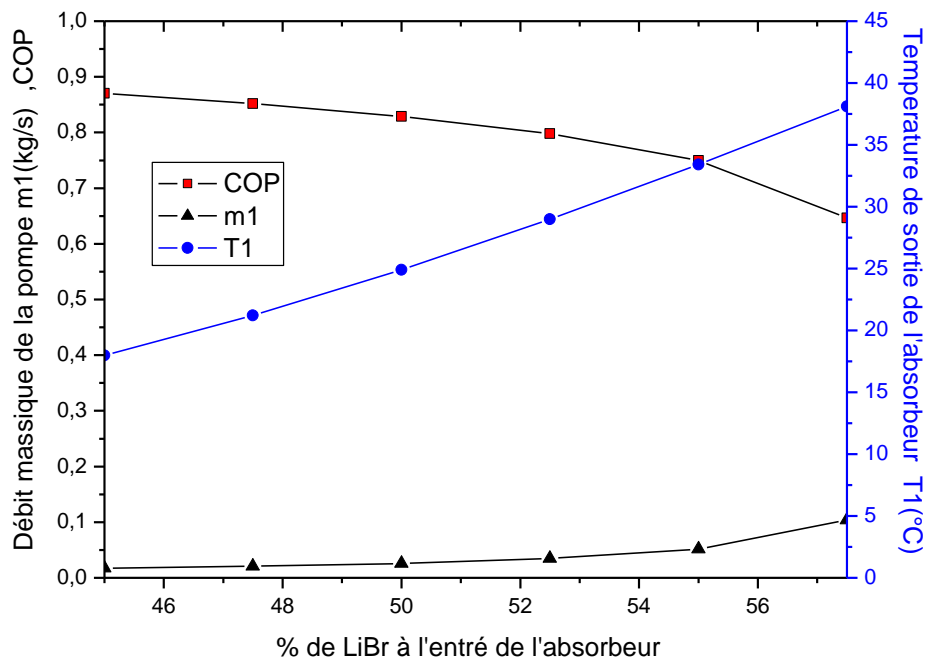


Figure III. 3 : L'effet du pourcentage de LiBr à l'entrée de l'absorbeur.

Étant donné que le taux en % de LiBr à la sortie de l'absorbeur est maintenu constant à 60%, le taux de circulation et donc le débit massique de la solution augmente avec l'augmentation du pourcentage du LiBr à l'entrée de l'absorbeur entraînant ainsi la diminution du COP. Pour une puissance de réfrigération constante, plus l'écart de concentrations entre l'entrée et la sortie de l'absorbeur est faible, plus le travail consommé par la pompe est important.

D'autre part, pour maintenir le cycle en fonctionnement au stade prévu, la température à la sortie de l'absorbeur (T_1) doit être maintenue à un niveau inférieur. Cela présente des difficultés avec la température de l'eau de refroidissement de l'échangeur de chaleur dans l'absorbeur. De ce fait, cette température peut être comprise entre 20 et 25° C, ce qui signifie que la température la plus basse à la sortie de l'absorbeur se situerait autour de 30°C.

III.2.5.2 Effet de la température du générateur :

Pour vérifier cet effet, les conditions suivantes sont utilisées:

1. Température à la sortie de l'échangeur de chaleur, $T_3 = 55^\circ\text{C}$.
2. Capacité de l'évaporateur 10 kW.
3. Température de l'évaporateur 6°C .
4. Rapport en % de LiBr à l'entrée de l'absorbeur = 52,5%.
5. Rapport en % de LiBr à la sortie de l'absorbeur = 60%.
6. Température à la sortie de l'absorbeur, $T_1 = 29^\circ\text{C}$.
7. Pression de l'absorbeur et l'évaporateur = 0,9343 kPa.

Tableau III. 5 : Résultats sur l'effet de la température du générateur.

$T_4(^{\circ}\text{C})$	$P_4(\text{KPa})$	$\dot{m}_1(\text{Kg/s})$	COP
65	2,9224	0,034	0,8557
70	3,7704	0,0343	0,826
75	4,8245	0,0346	0,7977
80	6,1252	0,0349	0,7707
85	7,7185	0,0352	0,7449
90	9,6571	0,0356	0,7201
95	12,0003	0,0359	0,6961
100	14,8152	0,0363	0,6729
105	18,1767	0,0367	0,6503
110	22,1683	0,0372	0,6281
115	26,8823	0,0378	0,6062

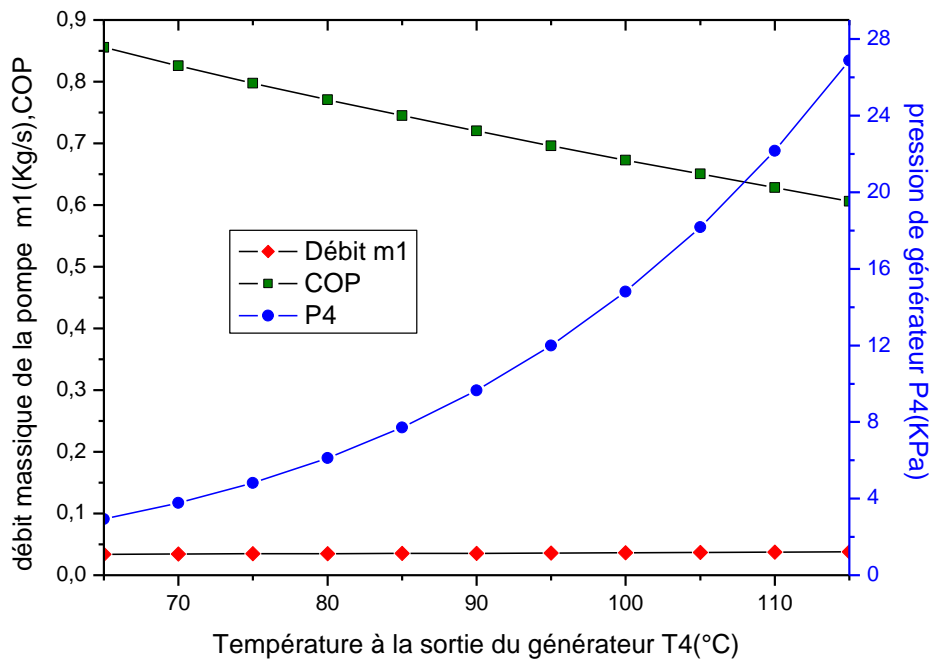


Figure III. 4 : Effet de la température de générateur.

Comme on le voit dans la figure (III.4) lorsque la température de générateur augmente, la pression aussi augmente, ce qui a pour effet d'abaisser le COP de l'appareil, compte tenu que les pressions et les températures aux autres points de l'installation sont maintenues constantes. Le débit massique au niveau de la pompe est légèrement changé, de 0,034 kg/s pour une température de sortie du générateur de 65° C à 0,037 kg/s pour une température de 115 °C.

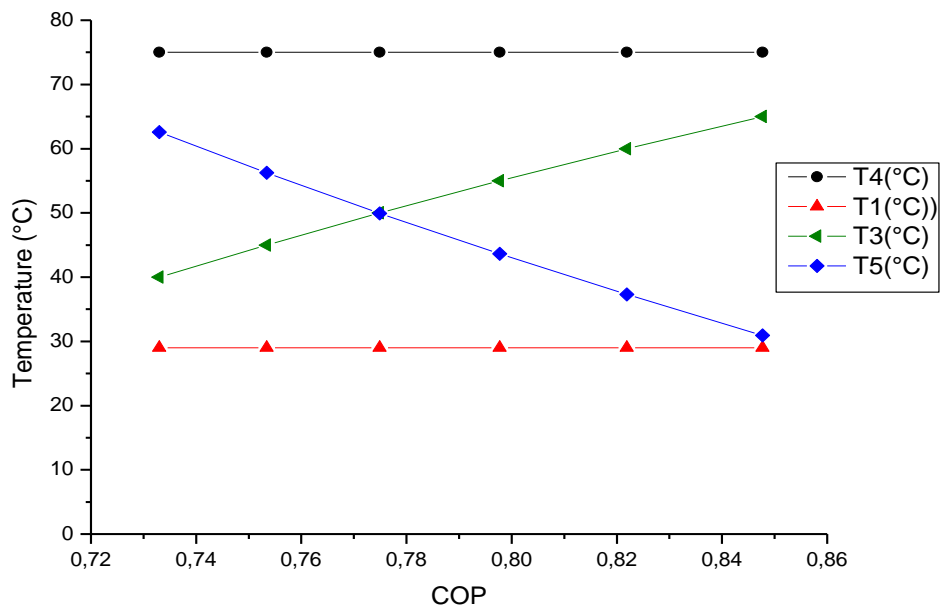
III.2.5.3 Effet de la température de l'échangeur thermique :

Pour vérifier cet effet, les conditions suivantes sont utilisées:

1. Capacité de l'évaporateur 10 KW.
2. Température de l'évaporateur 6° C.
3. Pression au niveau du générateur et du condenseur = 4,82 kPa.
4. Rapport en pourcentage de LiBr à la sortie de l'absorbeur = 52,5%.
5. Rapport en pourcentage de LiBr à l'entrée de l'absorbeur = 60%.
6. Température à la sortie de l'absorbeur, $T_1 = 29^\circ$ C.
7. Pression au niveau de l'absorbeur et de l'évaporateur = 0,934 kPa.

Tableau III. 6 : Résultats sur l'effet de la température de l'échangeur thermique.

T_3 (°C)	T_5 (°C)	T_4 (°C)	T_1 (°C)	COP
40	62,5722	75	28,9878	0,733
45	56,259	75	28,9878	0,7534
50	49,9405	75	28,9878	0,7749
55	43,6165	75	28,9878	0,7977
60	37,2872	75	28,9878	0,8219
65	30,9524	75	28,9878	0,8477

**Figure III. 5 : Effet des températures de l'échangeur de chaleur.**

L'échangeur de chaleur à solution augmente l'efficacité de l'appareil. Plus sa surface d'échange est élevée, plus son effet sera important, puisque l'énergie utile peut être extraite de la solution du générateur alimentant l'absorbeur et être transférée à la solution retournant au générateur, d'où elle sera chauffée au point d'évaporation comme on l'observe dans la figure

(III.5), le COP de l'appareil dans les conditions spécifiées est passé de 0,72 à un maximum de 0,85.

III.2.5.4 Effet de la concentration de la solution :

Pour vérifier l'efficacité de la concentration de la solution, une différence constante de 6% entre le rapport en % de LiBr à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur. En outre, les conditions suivantes sont utilisées:

1. Capacité de l'évaporateur= 10 kW.
2. Température de l'évaporateur 6° C.
3. Température de la solution à la sortie du générateur, $T_4 = 75^{\circ}\text{C}$
4. Température de la solution à la sortie de l'échangeur de chaleur, $T_3 = 55^{\circ}\text{C}$.
5. Pression au niveau de l'absorbeur et de l'évaporateur = 0,934 kPa.

Tableau III. 7 : Résultat sur Effet de la concentration de la solution.

$X_1(\%)$	$X_6(\%)$	$\dot{m}_1(\text{Kg/s})$	$T_1(^{\circ}\text{C})$	$P_4(\text{KPa})$	COP
46	52	0,0386	19,2065	10,3494	0,7915
48	54	0,0398	21,9037	8,698	0,7873
50	56	0,041	24,8929	7,2273	0,7823
52	58	0,0421	28,1398	5,9369	0,7771
54	60	0,0432	31,6102	4,8245	0,7723
56	62	0,0444	35,2695	3,884	0,7682
58	64	0,0455	39,0836	3,1048	0,7653

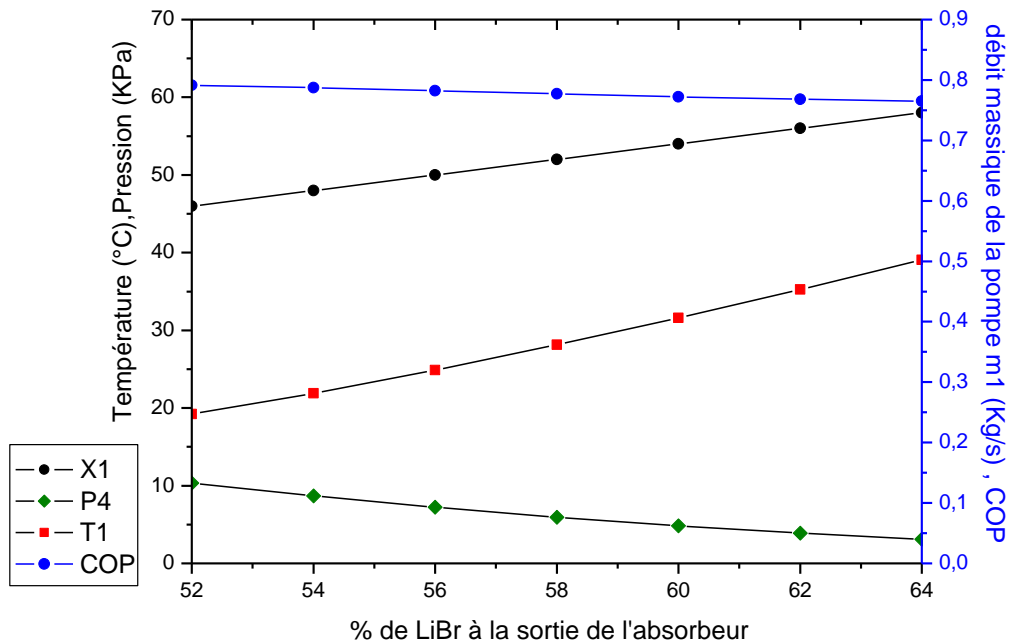


Figure III. 6 : Effet de la concentration de la solution.

Les résultats présentés dans la figure (III.6) indiquent que, pour une plus petite proportion en % de LiBr dans la solution, résultats sont légèrement meilleurs, car la solution va absorber la vapeur d'eau supplémentaire plus facilement. Le COP pour les conditions choisies variera entre 0,79 à 0,76. Le principal inconvénient est la température de la solution à la sortie de l'absorbeur (T1), qui devra être conservé à basse température pour les plus petits rapports en % de LiBr dans la solution. Comme mentionné précédemment, une température raisonnable à la sortie de l'absorbeur se situerait autour de 30°C, ce qui aboutirait à un pourcentage de LiBr à la sortie de l'absorbeur au-dessus de 58%.

III.3 Cristallisation :

LiBr est un sel, et à l'état solide, il présente une structure cristalline. Lorsque LiBr est dissous dans l'eau, il y a une température de la solution minimale spécifique pour n'importe quelle concentration de sel donnée. Le sel commence à quitter la solution et cristalliser en dessous de cette température minimale. Dans une machine à absorption, si la concentration de la solution est trop élevée ou si la température de la solution est trop faible, la cristallisation peut se produire. Ceci est le plus susceptible de se produire dans l'échangeur de chaleur à solution, ce qui interrompt le fonctionnement de la machine (Absorption Refrigeration)^[5]. Dans un tel cas, la température de la solution concentrée doit être soulevée au-dessus de son point de saturation de telle sorte que les cristaux de sel reviendront une solution, ce qui libère la machine.

La cause la plus fréquente de cristallisation est la fuite d'air dans la machine, ce qui entraîne une pression accrue dans l'évaporateur. Ceci, à son tour, entraîne des températures d'évaporation plus élevées et, par conséquent, des capacités inférieures. Dans des conditions de charge élevée, le système de control augmente l'apport de chaleur au générateur, entraînant une augmentation des concentrations de solution au point où cristallisation peut se produire. Les gaz non absorbables, comme l'hydrogène, produites au cours de la corrosion, peut également être présente, ce qui réduit les performances du condenseur et de l'absorbeur à la fois (Radermacher R, 1996)^[6]. Une méthode directe pour maintenir la pression requise est d'évacuer la phase gazeuse périodiquement avec une pompe à vide (Florides, 2002).

L'eau du condenseur excessivement froid, couplée à une condition de charge élevée, est une autre cause de cristallisation. Dans les conceptions modernes, la température de l'eau de tour de refroidissement est autorisée à flotter avec des variations de charge et la température de l'air extérieur. De cette façon, en utilisant des températures d'eau de refroidissement qui sont au-dessous de la conception, l'unité performance est améliorée. Toutefois, dans l'échangeur de chaleur à solution sous des conditions de charge élevées, la température d'entrée de la solution diluée peut être suffisamment faible pour réduire la température de la solution fortement concentrée revenant de générateur jusqu'au point de cristallisation.

Une troisième raison est une panne de courant électrique. Lors de l'arrêt normal, la machine est soumise à un cycle de dilution, ce qui abaisse la concentration de la solution tout au long de la machine. Dans un tel cas, la machine peut refroidir à température ambiante sans

crystallisation produisant dans les solutions. La cristallisation est plus susceptible de se produire lorsque la machine est à l'arrêt tout en fonctionnant à pleine charge, lorsque les solutions très concentrées sont présentes dans l'échangeur de chaleur à solution.

Conclusion :

Une méthode pour évaluer les caractéristiques et les performances d'une machine à absorption d'Eau-LiBr à simple effet a été présentée, la chaleur nécessaire et les équations de transfert de masse et les équations appropriées décrivant les propriétés des fluides de travail ont été précisées. Ces équations ont été utilisées dans un programme informatique MATLAB, et une analyse de paramétrie est effectuée. Cette analyse montre que plus la différence de taux en pourcentage de LiBr entre l'entrée de l'absorbeur et la sortie est la plus petite sera la masse circulant dans l'absorbeur. D'autre part, afin de maintenir le cycle en cours d'exécution à un étage spécifié, la température à la sortie de l'absorbeur doit être maintenue à un plus faible niveau lorsque le rapport en pourcentage de LiBr à sortie de l'absorbeur est inférieur.

Considérant que les pressions et les températures à d'autres points de l'unité sont maintenus constantes, le COP de l'unité est diminué lorsque la température du générateur est augmentée, ce qui conduit à une augmentation de la pression du générateur. L'échangeur de chaleur à solution augmente l'efficacité de l'appareil. Plus la surface de l'échangeur de chaleur est importante, plus son effet est important.

Enfin, lors de la vérification de l'efficacité de la concentration de la solution d'une différence constante de 6% entre le taux en pourcentage de LiBr à l'entrée et à la sortie de l'absorbeur, il a été constaté qu'une plus petite proportion en pourcentage des solutions LiBr aurait des résultats légèrement meilleurs. Le principal inconvénient est la température de la solution à la sortie de l'absorbeur (T_1), qui devra être maintenu à une température basse pour les plus petits rapports en pourcentage de la solution LiBr. Une température raisonnable à la sortie de l'absorbeur se situerait autour de 30° C, ce qui aboutirait à un pourcentage de LiBr à la sortie de l'absorbeur au-dessus de 58%.

ANNEXE.A :**A.1. la pression et températures de la solution LiBr et du réfrigérant (ASHRAE, 1997)^[6]:**

Entre 45% < X < 70% LiBr.

T_{sol} : Température de la solution (°C), Entre 5 < T_{sol} < 175°C.

$T_{réf}$: Température du réfrigérant à l'état saturé (°C), Entre -15 < $T_{réf}$ < 110°C.

P: Pression de saturation (kPa).

$$A_0 = -2.00755, A_1 = 0.16976, \quad A_2 = -0.003133362, \quad A_3 = 0.0000197668$$

$$B_0 = 124.937, B_1 = -7.71649, \quad B_2 = 0.152286, \quad B_3 = -0.0007959$$

$$\Sigma A = A_0 X^0 + A_1 X^1 + A_2 X^2 + A_3 X^3$$

$$\Sigma B = B_0 X^0 + B_1 X^1 + B_2 X^2 + B_3 X^3$$

$$C = 7.05, \quad D = -1596.49, \quad E = -104095.5$$

$$\log P = C + D / (T_{réf} + 273) + E / (T_{réf} + 273)^2$$

$$T_{réf} = \left(-2E / (D + [D^2 - 4E(C - \log P)]^{0.5}) \right) - 273$$

$$T_{sol} = \Sigma B + T_{réf} \Sigma A$$

A.2. Enthalpie de la solution LiBr (ASHRAE, 1997)^[7]:

Entre 40% < X < 70% LiBr

T = Température de la solution (°C). Entre 15°C < T < 165°C.

h = Enthalpie (kJ/kg).

$$A_0 = -2024.33, A_1 = 163.309, A_2 = -4.88161, \quad A_3 = 0.06302948, A_4 = -0.0002913704$$

$$B_0 = 18.2829, B_1 = -1.1691757, B_2 = 0.03248041, B_3 = -0.0004034184, B_4 = 0.0000018520569$$

$$C_0 = -0.037008214, C_1 = 0.0028877666, C_2 = -0.000081313015, C_3 = 0.00000099116628, C_4 = 0.0000000044441207.$$

$$\Sigma A = A_0 X^0 + A_1 X^1 + A_2 X^2 + A_3 X^3 + A_4 X^4$$

$$\Sigma B = B_0 X^0 + B_1 X^1 + B_2 X^2 + B_3 X^3 + B_4 X^4$$

$$\Sigma C = C_0 X^0 + C_1 X^1 + C_2 X^2 + C_3 X^3 + C_4 X^4$$

$$h = \Sigma A + \Sigma B + \Sigma C T^2$$

A.3. La Densité de la solution LiBr (Lee RJ, 1990)^[8] :

Entre 20% < X < 60% LiBr.

T: Température de la solution (°C), 0 < T < 200°C,

ρ_x : Densité de solution LiBr (kg/m³).

$$X_0 = X / 100$$

$$\rho_x = 1145.36 + 470.84X_0 + 1374.79X_0^2 - (0.333393 + 0.571749X_0)(273 + T)$$

A.4. La pression de Saturation de la vapeur d'eau (Rogers GFC M. Y., 1992)^[9]:

P: Pression de Saturation (kPa).

T: Température (°C).

$$P = 0.000000000002T^6 - 0.0000000003T^5 + 0.0000002T^4 + 0.00003T^3 + 0.0014T^2 + 0.0444T + 0.6108$$

A.5. Enthalpie de la vapeur d'eau saturé (Rogers GFC M. Y., 1992):

h_g : Enthalpie de la vapeur (kJ/kg).

T: Température (°C).

$$h_g = -0.00125397T^2 + 1.88060937T + 2500.559.$$

A.6. la chaleur Latente de condensation de la vapeur d'eau :

h_{fg} : La chaleur latente de condensation (kJ/kg).

T: Température de saturation (°C).

$$h_{fg} = -0.00132635T^2 - 2.29983657T + 2500.43063$$

A.7. Enthalpie de la vapeur surchauffée :

H_{sh} : Enthalpie de la vapeur surchauffée (kJ/kg).

$T_{réf}$: Température du réfrigérant à l'état saturé (°C).

T_{actual} : Température de vapeur (°C).

P: Pression de vapeur (kPa).

T: Température du vapeur surchauffée (°C).

$$T = T_{actual} - T_{réf}$$

$$H_{SH1} = 32.508 \ln(P) + 2513.2$$

$$H_{SH2} = 0.00001P^2 + 0.1193P + 2689 ;$$

$$H_{SH} = ((H_{SH2} - H_{SH1}) / 100)T + H_{SH1} .$$

Bibliographie:

- [1] ASHRAE. (1997). *Handbook of Fundamentals*. . Atlanta.
- [2] Atmaca, I. (2002). *Simulation of solar-powered absorption cooling*.
- [3] *Design and construction of a LiBr–water* G.A. Florides, ,. S. (2002). *absorption machine* . Wrobel .
- [4] *Refrigeration*, A. (n.d.). *Absorption Refrigeration. The Trane Company, La Crosse, Wisconsin 54601: Trane Air Conditioning Clinic*.
- [5] *Radermacher R, K. S. (1996). Absorption chillers and heat pumps. CRS Press; Herold EK*.
- [6] *Florides, G. (2002). Design and construction of a LiBr–water absorption machine*.
- [7] *G.A. Florides, ,. S. (2002). Design and construction of a LiBr–water absorption machine* . Wrobel .
- [8] *Lee RJ, D. R. (1990). Properties of lithium bromide–water solutions at high temperatures and concentration. II. Density and viscosity*.
- [9] *Rogers GFC, M. Y. (1992). Thermodynamic and transport properties of fluids*.

Bibliographie

CHAPITRE I:

RAPPORT

- [1] *Bernard MULTON Agrégé de génie électrique et Hamid BEN AHMED, Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité Maître de conférences HDR à l'École normale supérieure de Cachan site de Bretagne Chercheur au laboratoire SATIE – CNRS.*
- [4] *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).*
- [5] *Source : Équipe du Rapport sur le développement dans le monde, sur la base de données IIASA 2009.*
- [8] *La convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique.*
- [9] *Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat ...*
- [11] *Source: unfccc et European environment agency.*
- [14] *P.I. Cooper, « The absorption of radiation in solar stills », Sol. Energy 12 (3), 333-346, 1969.*
- [15] *A.ZEROUAL, « Contribution à l'étude statistique et stochastique des données solaires au site de Marrakech », Diplôme d'étude supérieure de 3^{ème} cycle sciences physiques, spécialité traitement du signal, Université CADI AYYAD, 1988.*
- [16] *M.IQBAL, « An introduction to solar radiation », Academic press, New York, 1983.*
- [17] *MENA: Middle East and North Africa.*
- [18] *Abdelaziz boumahra, PDG de Rouibaeclairage.*
- [19] *Les Professeurs Yamani Noureddine, Mohammedi Kamal de l'université de Boumerdès et Khellaf Abdallah du Centre de développement des énergies renouvelables, CDER.*
- [20] *Abdelaziz boumahra, PDG de Rouibaeclairage.*

SITES INTERNET

- [2] <http://portail.cder.dz/spip.php?article2939>
- [3] <http://portail.cder.dz/spip.php?article1174>
- [6] http://www.lemonde.fr/planete/article/2011/11/09/les-emissions-de-co2-pourraient-augmenter-de-20-d-ici-a-2035_1601285_3244.html
- [7] <http://www2.ademe.fr/servlet/KBaseShow?sort=-1&cid=96&m=3&catid=15961>
- [10] <http://www.planetoscope.com/co2/261-emissions-mondiales-de-co2-dans-l-atmosphere.html>
- [12] http://www.ren21.net/Portals/0/documents/activities/gsr/KeyFindings_2012_fra_02a.pdf
- [13] WWW.asal-dz.org, 'Apport de la Télédétection pour la production d'un Atlas du Gisement solaire'.

CHAPITRE II

RAPPORT

- [1] *Ahmed BELLAGI, Radhouane BEN JEMAA, Etude d'une installation de climatisation solaire. Unité de Recherche en Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunisie.*
- [2] *P. Parene, F. Garde, F. Lucas, Simulation et optimisation d'un système de rafraîchissement solaire par absorption couplé à un bâtiment, IBPSA France 2006 a La Réunion, 2 et 3 Novembre 2006.*
- [3] *ADEME France, Note de synthèse sur la climatisation solaire, Département Energies Renouvelables (Juillet 2007).*
- [4] *Monsieur Daniel MUGNIER – docteur – ingénieur en énergétique et expert en climatisation/chauffage solaire – TECSOL.*
- [5] *F. TROMBE, M. FOEX : "Sur la production de froid à l'aide du rayonnement solaire" Compte rendu hebdomadaire de l'Académie des Sciences t 242 n° 8 (1956).*
- [6] *R. THEVENOT "Economie énergétique dans les utilisations agroalimentaires du Froid" RGF (12-1982).*

- [7] *La climatisation solaire* Actu-Environnement.com - Publié le 08/06/2009, La climatisation solaire | 8 juin 2009 | Chapitre 2 / 7.
- [8] *Intégration des systèmes à absorption solaire de petites puissances aux bâtiments - approche multifonction solaire : chauffage, ECS et rafraîchissement en 2011.*
- [12] Sparber W., Napolitano A. et Melograno P. *Overview on worldwide installed solar cooling systems. Tarragona, Spain: s.n., 2007. 2nd International Conference Solar Air Conditioning.*
- [13] *Intégration des systèmes à absorption solaire de petites puissances aux bâtiments - approche multifonction solaire : chauffage, ECS et rafraîchissement.*
- [18] Abdelaziz boumahra, PDG de Rouibaeclairage.
- [19] Les Professeurs Yamani Noureddine, Mohammedi Kamal de l'université de Boumerdès et Khellaf Abdallah du Centre de développement des énergies renouvelables, CDER.

SITES INTERNET

- [9] <http://goldbook.iupac.org/S05769.htm>
- [10] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Adsorption>
- [11] <http://www.ocp.tudelft.nl/ev/res/sace.htm>

CHAPITRE III

RAPPORT

- [1] ASHRAE. (1997). *Handbook of Fundamentals*. . Atlanta.
- [2] Atmaca, I. (2002). *Simulation of solar-powered absorption cooling.*
- [3] *Design and construction of a LiBr–water G.A. Florides, ,. S. (2002). absorption machine . Wrobel .*
- [4] *Refrigeration, A. (n.d.). Absorption Refrigeration. The Trane Company, La Crosse, Wisconsin 54601: Trane Air Conditioning Clinic.*
- [5] *Radermacher R, K. S. (1996). Absorption chillers and heat pumps. CRS Press; Herold EK.*

- [6] *Florides, G. (2002). Design and construction of a LiBr–water absorption machine.*
- [7] *G.A. Florides, , S. (2002). Design and construction of a LiBr–water absorption machine . Wrobel .*
- [8] *Lee RJ, D. R. (1990). Properties of lithium bromide–water solutions at high temperatures and concentration. II. Density and viscosity.*
- [9] *Rogers GFC, M. Y. (1992). Thermodynamic and transport properties of fluids.*

Conclusion générale & perspectives

Conclusion générale & perspective :

À partir d'études de cas récentes et réelles, de bonnes pratiques et tirant profit de la compétition entre les filières thermiques et photovoltaïques ; Ce travail de fin d'étude a été l'occasion de réaliser un état de l'art sur le rafraîchissement solaire en abordant les aspects fondamentaux, techniques, économiques et environnementaux.

Notre travail s'adresse aux étudiants, aux professionnels de l'ingénierie, aux scientifiques, aux donneurs d'ordre et à tous ceux qui souhaitent s'orienter dans cette voie destinée à un avenir prometteur.

Les systèmes de rafraîchissement solaires font partie des alternatives intéressantes aux systèmes de climatisation classiques, dans la mesure où la source d'énergie est gratuite. En contrepartie, leur COP est relativement faible, par rapport aux systèmes classiques, d'où le grand intérêt des études paramétriques qui permettront le choix judicieux des différents paramètres afin d'optimiser le fonctionnement et la surface de capteurs nécessaire.

Dans la première partie de ce travail nous avons apporté sur le grand potentiel des énergies renouvelables notamment l'énergie solaire et son pouvoir majeur de contribuer dans la production énergétique mondiale. Afin de parvenir à une croissance économiquement attractive sur le plan environnemental, au développement technologique, à la compétitivité sur le marché mondial et être le fleuron de l'industrie et de la recherche.

Dans la deuxième partie, nous avons présenté les différentes techniques de climatisation solaire. Le principe est d'utiliser l'énergie solaire pour produire du froid afin de limiter l'utilisation d'une climatisation classique consommant de l'électricité et pour éviter ses impacts négatifs sur l'environnement. Cette partie nous a permis de passer en revue les différents types de capteurs disponibles afin de déterminer par la suite suivant les besoins de chaque application, lesquels seraient les plus adaptés. Il en ressort que de façon générale les capteurs sous vide sont les plus utilisés du fait de leur rendement à haute température. On note cependant plusieurs exemples d'installations de production de froid solaire ayant recours à des capteurs plans à haut rendement. Parmi ces dernières, trois technologies sont disponibles

commerciallement, à savoir l'absorption, l'adsorption et le desiccant cooling. Les études comparatives de la littérature montrent que les technologies de froid solaire permettent d'économiser de l'énergie primaire et de réduire les rejets de CO₂.

La troisième partie de ce travail porte sur la première technologie de climatisation solaire, l'absorption en cycle fermé. Après avoir présenté le contexte de l'étude, nous nous limitons maintenant à cette technologie. Des modèles mathématiques qui ont été élaborés pour les différents composants du système de rafraîchissement solaire à absorption. L'étude de cette machine, nécessite la connaissance d'un nombre important de paramètres, ayant une influence directe sur son fonctionnement. Tous ces paramètres jouent un rôle important dans l'optimisation de la machine. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des différents paramètres sur la performance de l'installation. Il apparaît clairement que le coefficient de performance COP n'est pas un critère suffisant à lui seul pour le choix optimal de la machine, mais il existe d'autres paramètres essentiels ayant une grande influence sur la performance de la machine, tels que:

- f La température du condenseur T_C ;
- f La température de l'absorbeur T_{ab} ;
- f La température de l'évaporateur T_e ;
- f La température du générateur T_g .

Enfin, dans ces conditions, il devient possible d'envisager que, dans quelques années, le solaire en général et la climatisation solaire en particulier soient totalement compétitifs par rapport aux autres technologies. Toutes ces raisons concourent à inciter à étudier les possibilités actuelles et dans un futur proche de l'utilisation de la climatisation solaire. C'est cette problématique qui va être abordée dans le futur en apportant des réponses à la question cruciale : dans quelles conditions la solution de la climatisation solaire est-elle viable ? Sans négliger de répondre à la question : dans quel cas faut-il éviter la climatisation solaire en raison de son inadaptation ?