

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

UNIVERSITE ABOU BAKER BELKAID TLEMEN

Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique
Spécialité : Génie Thermique et Energies Renouvelables

Thème

**Intégration d'un système de rafraîchissement
solaire au bâtiment.**

Faisabilité technico-économique

Présenter par :

- **BENAHMED Lamia**
- **BEN MOSTEFA Fatima Zahra**

Devant le jury

- | | | |
|-------------------------------------|------------|-------------------------------|
| • President: B. KERBOUA | MCA | Faculté de Technologie |
| • Examineur: L. BENSEDDIK | MAA | Faculté de Technologie |
| • Examineur: M. BENRAMDANE | MAA | Faculté de Technologie |
| • Encadreur: A. ALIANE | MAA | Faculté de Technologie |
| • Co-Encadreur: B. GUENDOUZE | Doc | Faculté de Technologie |

Année universitaire :2012-2013

Tables des matières

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I : Introduction à la réfrigération solaire	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Contexte général	3
I.2.1 L'enjeu énergétique.....	4
I.2.2 L'explosion énergétique.....	4
I.2.3 L'évolution de la consommation dans le monde	5
I.2.4 Une demande croissante	6
I.2.5 Energie et pollution	7
I.3 Contexte national	8
I.3.1 Introduction des principales techniques de la climatisation solaire.....	8
I.3.2 La climatisation géothermique : une solution adaptée en Algérie.....	8
I.3.3 La première expérience de l'Algérie dans le domaine de la climatisation par énergie renouvelable.....	9
I.4 Etat de l'art de la climatisation solaire	10
I.4.1	Introduction
.....	10
I.4.2 Rappel sur Climatisation traditionnelle	11
I.4.2.1 Historique.....	11
I.4.2.2 La climatisation aujourd'hui	12
a) Panorama de la climatisation dans le monde.....	12
b) Le taux d'équipement en climatisation dans le monde	13
c) Dépense annuelle consacrée à la climatisation dans le monde....	14
d) Panorama de la climatisation en Europe	14
I.4.3 La climatisation solaire.....	15
I.4.3.1 Climatisation solaire et énergie solaire	15
I.4.3.2 Principe de fonctionnement.....	16
I.4.3.3 Installation global d'un rafraichisseur solaire	16
I.4.3.4 Pour quoi l'alternative solaire ?.....	17
I.4.3.5 Principes généraux de la climatisation solaire	18
I.4.3.6 Comment utiliser l'énergie solaire pour produire du froid ?.....	19
I.4.3.7 Avantage de la climatisation solaire.....	20
I.5 Les différentes technologies de produire de froid solaire	20
I.5.1. Utilisation des cellules photovoltaïque.....	21

I.5.1.1 les systèmes à compression de vapeur	21
I.5.1.2 Les systèmes à effet de peltier	23
I.5.2 Utilisation des capteurs solaire thermique	23
I.5.2.1 Technique basées sur un processus thermomécanique.....	23
a) Cycle de Rankine	23
b) Le cycle à jet de vapeur.....	24
I.5.2.2 Technique basée sur la sorption d'un gaz	26
a) Principe de la sorption	26
b) Technique basée sur la sorption d'un gaz	26
✓ La machine à absorption	26
✓ La machine à adsorption.....	28
I.6 Conclusion	30

CHAPITRE II : Analyse des installations de rafraichissement solaire

II.1 Introduction	31
II.2 La climatisation traditionnelle	32
II.2.1 fonctionnement d'un système de climatisation	32
II.2.1.2 Principe de fonctionnement d'un système de climatisation.....	32
a)Principe de base	
b) Principe de fonctionnement de la réfrigération	
II.2.2. Les systèmes de climatisation à compression mécanique	32
II.2.2.1 Principe de fonctionnement de la machine à compression mécanique	32
II.2.2.2 Etude du cycle frigorifique.....	33
II.2.2.3 Représentation sur le diagramme entropique.....	34
II.3. La climatisation solaire.....	34
II.3.1 Introduction.....	34
II.3.2 Principe de fonctionnement de la climatisation solaire	35
II.3.3 Les technologies de la climatisation solaire	35
II.3.3.1 la climatisation solaire par absorption	36
a) principe de fonctionnement.....	37
b) Détermination du coefficient de performance (COP)	38
c) Les avantages de l'absorption	40
d) Les inconvénients de l'absorption.....	40
e) Les rendements.....	40
Conclusion	41
II.3.3.2 La climatisation solaire par adsorption	41

a) Mode de fonctionnement du cycle réfrigérant	42
b) Diagramme d'Oldham.....	42
c) Les avantages de l'adsorption	43
d) Les inconvénients de l'adsorption.....	43
e) L'efficacité énergétique ou COP _{froid}	43
II.3.3.3 La climatisation solaire par dessiccation.....	45
a) Principe de fonctionnement.....	45
b) Mode de fonctionnement du cycle réfrigérant	45
c) Conclusion.....	47
II.4. La rentabilité de la climatisation solaire	47
II.5. Quel système est le plus rentable ?.....	47
II.6. Les capteurs solaires	48
II.6.1. Les capteurs solaires plans ou capteur héliothermique	48
II.6.2. Les capteurs solaires à air	49
II.6.2.1 Les principaux avantages.	49
II.6.2.2 Les principaux inconvénients	50
II.6.3. Les capteurs solaires sous-vide	50
II.6.3.1 Avantages des capteurs solaires sous-vides	51
II.6.3.2 Performance des capteurs solaires sous-vide	51
II.6.4. Les capteurs solaires à concentration	51
II.7 Etude technico-économique.....	52
II.7.1 Méthodologie de l'évaluation comparative pour les systèmes climatisation solaire	52
II.7.2 Evaluation technique des systèmes de climatisation solaire.....	52
II.7.2.1. Capteurs solaires photovoltaïques	52
II.7.2.1.1 Évaluation des performances des capteurs plans et les capteurs à tubes	
sous vide.....	52
II.7.2.1.2. Evaluation des performances des cellules photovoltaïques	54
II.7.3 Équipement de refroidissement	54
II.7.3.1 L'énergie auxiliaire de la machine	54
II.7.4 Evaluation comparative des technologies de réfrigération solaire	55
II.8 Conclusion.....	57

CHAPITRE III : Comparaison technico-économique entre un système thermique et photovoltaïque

III.1 Introduction	59
III.2 Description du TRNSYS	59

III.2.1	Utilisation du logiciel TRNSYS.....	60
III.2.1.1	METENORM	60
III.2.1.2	TRNSYS Simulation Studio.....	60
III.2.1.3	TRNBuild	61
III.2.2	Les avantages du logiciel TRNSYS	62
III.3	Présentation de la maison	62
III.3.1	Dimensionnement de la maison	63
III.3.2	Les caractéristiques de la maison	64
III.4	Simulation TRNSYS	65
III.4.1	La climatisation solaire thermique	65
III.4.1.1	Description du rôle des composants de l'installation	66
III.4.1.1.1	Conditions météorologiques	66
III.4.1.1.2	Système solaire.....	66
III.4.1.1.3	Machine à absorption	67
III.4.1.1.4	construction de la maison	67
III.4.1.2	Les types TRNSYS	68
III.4.1.3	Résultats et interprétations	68
III.4.2	la climatisation solaire photovoltaïques	73
III.4.2.1	Le principe photovoltaïque.....	73
III.4.2.2	L'installation du système photovoltaïque.....	74
III.4.2.3	Les composants de l'installation	75
III.4.2.4	Les types TRNSYS	76
III.4.2.3	Résultats et interprétations	77
III.4.3	Comparaison technico-économique entre le système thermique et le système photovoltaïque.....	80
III.5	Conclusion.....	86
III.6	Discussion générale.....	87
	Conclusion générale.....	88

Listes des figures

- Figure I.1** Les énergies renouvelables propres et durables et essentielles.
- Figure I.2** Evolution de la consommation d'énergie par région.
- Figure I.3** Demande mondiale d'énergie primaire.
- Figure I.4** Pompe à chaleur.
- Figure I.5** Ecole primaire alimentée par climatisation géothermie.
- Figure I.6** Marché mondial de la climatisation (en volume) en 2000.
- Figure I.7** Dépense annuelle consacrée à la climatisation.
- Figure I.8** Augmentation de la surface climatisée par des installations centralisées entre 1980 et 2000 en l'Europe.
- Figure I.9** Principe de fonctionnement de rafraichissement solaire.
- Figure I.10** Installation globale d'un rafraichisseur solaire.
- Figure I.11** Adéquation entre demande et ressource solaire.
- Figure I.12** Les différentes technologies de production de froid solaire.
- Figure I.13** Schéma d'une machine frigorifique photovoltaïque.
- Figure I.14** Machine frigorifique couple à cycle de Rankine.
- Figure I.15** Système à éjection.
- Figure I.16** Schéma de fonctionnement du cycle absorption à simple effet.
- Figure 1.17** Schéma de fonctionnement d'une machine à adsorption.
- Figure I.18** Schéma d'une machine a dessiccation.
- Figure II.1** schéma de principe d'une machine à compression mécanique.
- Figure II.2** Cycle frigorifique.
- Figure II.3** Diagramme enthalpique du cycle frigorifique.
- Figure II.4** Principe de fonctionnement de la climatisation solaire.
- Figure II.5** les types de systèmes de climatisation solaire.
- Figure II.6** Schéma de principe d'un système à absorption.
- Figure II.7** Schéma de principe d'une climatisation à adsorption.
- Figure II.8** diagramme d'Oldham.
- Figure II.9** l'évolution de COP pour une machine à adsorption et une machine à absorption.
- Figure II.10** Schéma de principe de la climatisation DEC.
- Figure II.11** Schéma d'un capteur solaire plan.
- Figure II.12** Schéma d'un capteur solaire Sous-vide.
- Figure II.13** Vue générale d'un C.S à concentration.
- Figure II.14** Les combinaisons des technologies solaires possibles.
- Figure II.15** Moyenne des Capex panne, (coût du terrain considéré est du désert d'Abu Dhabi).

Figure II.16 Annuelle moyenne d'efficacité globale (barres hachurées représentent des options à grande échelle).

Figure III.1 TRNSYS simulation studio.

Figure III.2 L'installation de projet et la fenêtre de zones.

Figure III.3 Coupe de la maison.

Figure III.4 le plan de la maison.

Figure III.5 Les composants de l'installation thermique.

Figure III.6 la variation de l'énergie des deux pompes durant une année.

Figure III.7 La variation de l'énergie perdue par le ballon de stockage durant une année.

Figure III.8 la variation annuelle de l'énergie du capteur et l'énergie auxiliaire.

Figure III.9 La variation annuelle de la fraction solaire.

Figure III.10 Principe photovoltaïque.

Figure III.11 l'installation photovoltaïque.

Figure III.12 Energie du capteur solaire durant une année.

Figure III.13 variation annuelle de l'énergie du capteur solaire et l'énergie auxiliaire.

Figure III.14 variation de la fraction solaire durant une année.

Figure III.15 la variation annuelle de l'énergie totale.

Figure III.16 Variation annuelle de la fraction solaire.

Figure III.17 la variation de l'énergie auxiliaire thermique et photovoltaïque.

Figure III.18 variation annuelle de l'énergie du capteur thermique et photovoltaïque.

Figure III.19 la variation de l'énergie des capteurs thermique et photovoltaïque.

Listes des tableaux

Tableau I.1 les différents inventions dans la climatisation traditionnelle.

Tableau I.2 Taux d'équipement en climatisation dans le monde en 1997.

Tableau III.1 Les dimensions de la maison.

Tableau III.2 Les différents matériaux de composition de la maison.

Tableau III.3 Paramètres du capteur solaire sous-vide.

Tableau III.4 Les types TRNSYS.

Tableau III.5 La variation annuelle de l'énergie fournie par les deux pompes.

Tableau III.6 La variation annuelle de l'énergie perdue par le ballon de stockage.

Tableau III.7 la variation annuelle de l'énergie du capteur et l'énergie auxiliaire.

Tableau III.8 La variation annuelle de la fraction solaire.

Tableau III.9 les TYPES TRNSYS de l'installation photovoltaïque.

Tableau III.10 Energie du capteur solaire durant une année.

Tableau III.11 variation de l'énergie du capteur solaire et l'énergie auxiliaire durant **une année**.

Tableau III.12 variation de la fraction solaire durant une année.

Tableau III.13 la variation annuelle de l'énergie totale.

Tableau III.14 Variation de la fraction solaire.

Tableau III.15 la variation de l'énergie auxiliaire thermique et photovoltaïque.

Tableau III.16 variation annuelle de l'énergie du capteur thermique et photovoltaïque.

Tableau III.17 la variation de l'énergie des capteurs thermique et photovoltaïque.

Nomenclatures

Nomenclatures	Désignation	Unité
T	Température	K
P	Pression	Pa
X	Titre du frigorigène ou de l'absorbant dans la solution	%
Q	Puissance	Kw
h	Enthalpie	KJ/kg
m	Débit massique	Kg/s
COP	Coefficient de performance	-
W	Travail	J
FR	Taux de circulation	-
ΔX	Plage de dégazage	-
R_b	facteur géométrique calculé comme le rapport entre le rayonnement du faisceau sur une surface inclinée à celle sur une surface horizontale	-
I_b	Irradiation du faisceau sur une surface horizontale	w/m^2
I	Irradiation totale sur une surface horizontale	w/m^2
I_t	Irradiation totale sur la surface de capteur	w/m^2
I_d	Irradiation diffuse sur une surface horizontale	w/m^2
C_2	Constante de performance du capteur fournie par le fabricant	$w/(m^2.k^2)$
A	Surface d'ouverture du collecteur	m^2
η	Rendement	-
L_v	Chaleur latente	Kj/kg
C_p	Capacité calorifique	Kj/kg.k

Indice

Indices	Désignation
CP	Capteur plan
CT	Capteur tube sous vide
A	Absorbeur
G	Générateur
C	Condenseur, concentrée
E	Evaporateur
F	Frigorigène
P	Pompe
R	Refroidissement
D	Diluée
Ent	Entrée
Sor	Sortie
CCG	Cout de production de froid
Cell	Cellule
PV	Photovoltaïque
IAM	Modificateur de l'Angle Incident
β	Angle d'inclinaison du capteur horizontale
α	Rapport entre l'investissement en capitale et les paiements annuels fixes
τ	Facteur de transmission

Introduction générale

La consommation mondiale de l'énergie est sans cesse croissante. L'épuisement des ressources d'énergie fossiles et le réchauffement climatique de la planète ont conduit les différents pays à promouvoir les politiques de développement durable et de protection de l'environnement.

La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre. La grande préoccupation du monde actuel est d'atténuer cette pollution en essayant d'adapter les sources d'énergie classiques à des critères très sévères et de développer d'autres alternatives mettant en valeur les différentes formes des énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 à la suite de la signature du protocole de Kyoto, protocole qui prévoit notamment une baisse de 5.2 % des émissions de gaz à effet de serre des pays riches sur la période 2002-2012 par rapport à 1990. L'industrie de la réfrigération et du conditionnement d'air s'est trouvée parmi les plus durement concernées par cet accord. En plus du bannissement de l'utilisation des HFC, les directives principales concernent l'amélioration des performances des machines afin de réduire les consommations, la conception durable et positive dans le secteur résidentiel. S'ajoute à ces contraintes, l'augmentation de la consommation énergétique dédiée à la réfrigération suite à l'augmentation de la demande. Le projet EECCAC [2003] estime une augmentation de 40% de la demande en froid de 1990 à 2020.

La situation géographique de l'Algérie 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 par énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications de la climatisation ou la consommation de l'énergie est très importante.

Notre pays s'est engagé dans de grands projets de promotion immobilière. Il est donc clair que la demande en confort thermique va augmenter en conséquence et constituera une charge supplémentaire sur le réseau énergétique actuel déjà en difficulté surtout en périodes caniculaires. La prise en compte de la spécificité de notre climat et l'intégration des technologies solaires aux projets permettront de réduire les charges en matière de confort thermique.

La réfrigération solaire permet d'économiser certainement une quantité substantielle de la consommation d'énergie primaire. Cela réduit la production de dioxyde de carbone et les pics de consommation d'électricité en été, qui est un avantage important pour l'environnement et l'économie nationale. Mais quand il s'agit de bénéfice financier, la situation est bien différente. Toutefois, l'essor que connaît le développement des technologies solaires et la manière de les intégrer au réseau conventionnel sont prometteuses.

Notre travail consiste à étudier la faisabilité technico-économique des installations et pour cela on compare deux installations de rafraichissement solaire intégrées à une maison dans la wilaya de Tlemcen, on utilise dans la première installation un capteur photovoltaïque couplé avec une machine à compression de vapeur, et la deuxième installation utilise un capteur solaire couplé avec une machine à absorption.

Compte tenu de notre problématique générale, le travail est articulé sur trois chapitres :

Le premier chapitre présente le contexte national et international du recours à l'alternative solaire puis une présentation de différentes technologies de production du froid solaire.

Le second chapitre s'intéresse à montrer et analyser les installations de rafraichissement solaire et les différents capteurs utilisés.

En fin, le troisième chapitre consiste en une simulation dynamique de deux installations. La première concerne une installation conventionnelle de climatisation couplée avec un capteur photovoltaïque et l'autre concerne une installation à absorption couplée avec un capteur solaire sous vide.une comparaison des performances est présentée et on termine par une conclusion générale.

I.1 Introduction

Exploitation d'énergie fossile a accompagné le développement du monde industriel.

La consommation énergétique des bâtiments commerciaux et résidentiels représente de délestage au niveau d réseau.

Le recours aux technologies de rafraichissement solaire peut permettre d'alléger cette demande en électricité. L'un des principaux atouts de ce système réside dans le fait qu'il a simultanément entre la demande en rafraichissement et la disponibilité du rayonnement solaire. Les performances des équipements fonctionnant à l'aide de l'énergie solaire sont d'ores et déjà établies depuis ces dernières années. Nous aborderons au travers de ce chapitre de présenter la problématique énergétique entourant ces travaux un axe d'étude dans le monde. Le souci de confort thermique grandissant ainsi que la banalisation des unités de climatisation individuelle ont provoqué une augmentation de la demande en climatisation .Cette forte croissance des installations de climatisation induit nécessairement un besoin en énergie primaire conséquent. A l'heure actuelle, la majeure partie de ces installations utilisent des systèmes à compression nécessitant de l'électricité pour leur fonctionnement. Des pics de demandes électriques très importantes sont observés durant l'été.

I.2 Contexte général

L'énergie, une richesse inégalement consommée, Sans énergie, pas de vie, pas de développement.

Or, aujourd'hui, sur notre planète, la surconsommation la plus débridée côtoie des pénuries criantes : un citoyen américain consomme à lui seul 8 tonnes d'équivalent-pétrole par an, alors qu'un habitant du Bangladesh doit vivre avec 40 fois moins. La consommation d'électricité est encore plus inégale : 7070 kWh par an et par personne en France, contre ... 22 kWh seulement en Ethiopie!Et 40 % de la population mondiale reste tout simplement privée d'électricité.[1]

I.2.1 L'enjeu énergétique

Parce qu'elle régit les activités humaines, l'énergie est une ressource incontournable. Les choix du passé nous ont rendus dépendants de trois produits énergétiques non renouvelables : le pétrole, le gaz et le charbon. Cette dépendance est particulièrement forte pour les pays les plus développés aux modes de vie énergivores. Elle génère des tensions géopolitiques et de graves conséquences environnementales. Dans un monde où la demande énergétique augmente, la question du remplacement d'énergies fossiles par des énergies renouvelables, propres et durables est essentielle.



Figure I.1 les énergies renouvelables propres et durables et essentielles [2].

I.2.2 L'explosion énergétique

La consommation mondiale d'énergie est restée très longtemps stable lorsque l'homme n'utilisait l'énergie que pour sa survie et ses besoins alimentaires.

À partir de 1850 la révolution industrielle a provoqué une augmentation brutale des besoins en énergie. Celle-ci n'a cessé ensuite de croître de façon explosive sous l'effet conjoint de l'augmentation du niveau de vie et la croissance simultanée de la population.

Actuellement la demande mondiale d'énergie croît de 2 % par an en moyenne [3]. Elle a tendance à ralentir dans les pays industrialisés, mais augmente dans les pays émergents.

I.2.3 L'évolution de la consommation dans le monde

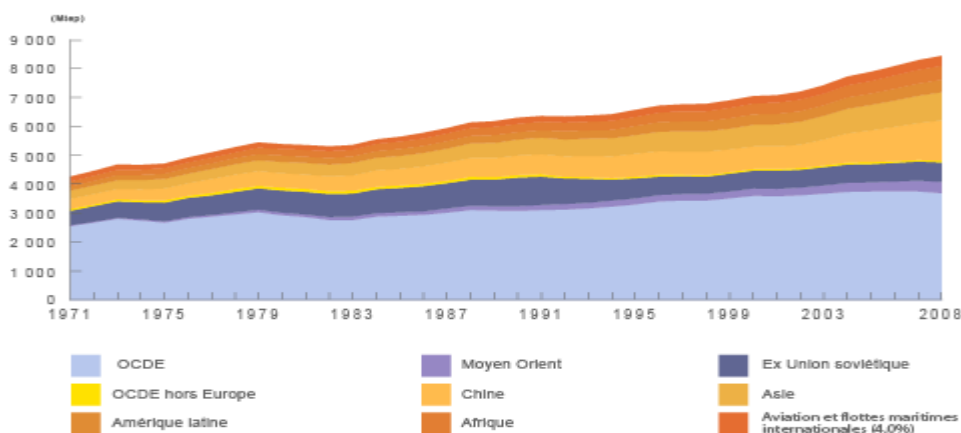
En 2010, la consommation d'énergie mondiale a progressé de 5,5 %, après le déclin de 1 % observé en 2009, ce qui s'est traduit par une croissance de près de 6 % des émissions de CO₂ liées à l'énergie, atteignant un niveau sans précédent.

Les pays émergents contribuent pour 2/3 à cette augmentation globale, avec environ 460 Mtep, la Chine représentant à elle seule 1/4 de la croissance de la consommation énergétique mondiale en 2010 [4].

Le pétrole, le gaz naturel et le charbon ont contribué de manière égale à cette augmentation de la demande d'énergie en 2010, largement liée à la reprise industrielle.

Les ressources ou réserves énergétiques mondiales - conventionnelles et prouvées - d'énergies non renouvelables (fossiles et uranium) pouvaient être estimées en 2008 à 965 milliards de tonne d'équivalent pétrole (tep), soit 85 ans de production actuelle. Cette durée est très variable selon le type d'énergie : 44 ans pour le pétrole conventionnel, 183 ans pour le charbon. La consommation énergétique mondiale (énergie finale) [4] était de 8,2 milliards de tep en 2007 (4,7 en 1973), pour une production énergétique mondiale (énergie primaire) de 12 milliards de tep.

Dans les 18 dernières années, la consommation d'énergie dans le monde a augmenté de 40%.



Fi

Figure I.2 Evolution de la consommation d'énergie par région [4].

Cette évolution est la combinaison de la stagnation depuis 10 ans de la consommation des pays anciennement industrialisés, représentés par le groupe des pays de l'OCDE, et des nouvelles économies qui sont en forte croissance.

La Chine exemple des nouveaux pays industrialisés, voit sa consommation d'énergie plus que tripler de 1990 à 2008. Sa part dans la consommation mondiale double et passe de 7,5% à 16,4%. La consommation par habitant en Chine est maintenant égale à consommation par habitant dans le monde.

La consommation de l'Afrique augmente de 50% de 1990 à 2008, mais reste marginale dans la consommation mondiale (environ 5,7% pour plus de 15% de la population mondiale).

I.2.4 Une Demande croissante

Cependant, ces données sont à relativiser car elles se basent sur la consommation actuelle alors qu'il est clair qu'elle va considérablement augmenter. La croissance sollicite depuis le début de l'ère industrielle une demande en énergie croissante. La demande énergétique mondiale pourrait augmenter de plus de 50% d'ici à 2030 [5] en l'absence de politiques publiques en ce domaine. Aujourd'hui, les demandes énergétiques sont amplifiées par la poussée démographique et économique de nouvelles zones en pleine croissance telles que la Chine et l'Inde. Or, on estime qu'en 2030 les énergies fossiles devraient encore représenter près de 80% des énergies utilisées. Les enjeux actuels seront encore plus importants à cette date.

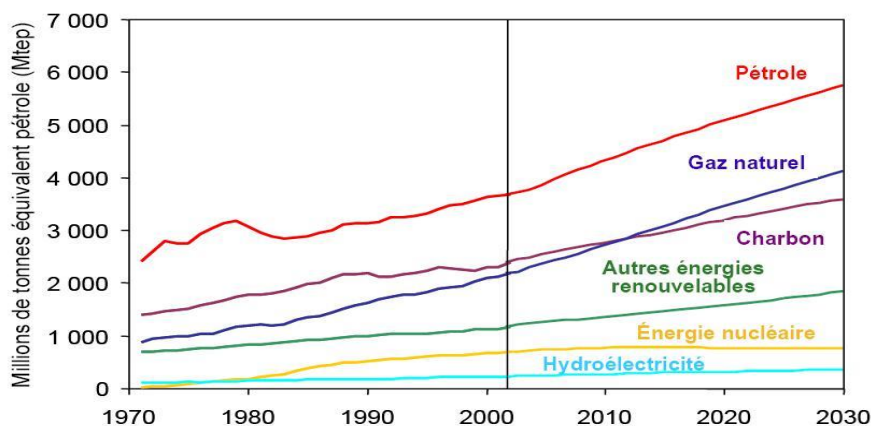


Figure I.3 Demande mondiale d'énergie primaire [5].

Toute l'histoire du développement économique est liée à une utilisation croissante d'énergie. Le mouvement ne peut que s'accélérer avec l'entrée en scène des pays émergents. Or il se heurte à deux contraintes de plus en plus fortes : l'épuisement programmé des principales ressources énergétiques fossiles et le réchauffement climatique à cause des émissions de gaz à effet de serre. Le dépassement de ces contradictions nécessitera une transformation profonde des modes de production et de consommation, de façon urgente au sein des pays riches et, très rapidement, au sein des pays émergents.

I.2.5 Énergie et pollution

- La consommation d'énergies fossiles est une des principales sources de la dégradation de l'environnement.
- Les gaz qui augmentent l'effet de serre (CO_2 , NO_x , SO_2) sont principalement issus de la combustion des carburants fossiles, de l'activité industrielle et de la déforestation.
- Certains gaz utilisés pour la production de froid et la climatisation des habitations et des automobiles provoquent une dégradation de la couche d'ozone qui laisse alors passer les rayons UV-B. Ces rayons peuvent avoir des effets nocifs sur l'écosystème mais aussi sur la santé.
- Les pluies acides sont une forme de pollution atmosphérique causée par les oxydes de soufre et les oxydes d'azote. Ces gaz, principalement issus des usines et des automobiles, acidifient les nuages et retombent sous forme de pluies qui affectent gravement les écosystèmes.
- Les déchets nucléaires issus de la production d'énergie atomique représentent un risque sans précédent pour les générations à venir, certains restants en activité pendant des milliers d'années. À l'heure actuelle, aucune solution n'a été trouvée pour les retraiter de façon satisfaisante. Ni l'enfouissement ni le stockage ne peuvent être considérés comme durablement fiables.
- La déforestation à des fins de production d'énergie est une des principales causes de la **désertification des sols**. [1].

I.3 Contexte national

I.3.1 Introduction des principales techniques de climatisation solaire dans l'Algérie

L'utilisation de l'énergie solaire pour la climatisation est une application à promouvoir particulièrement au sud du pays, d'autant que les besoins en froid coïncident, la plupart du temps, avec la disponibilité du rayonnement solaire (fonctionnement au fil du soleil).

Par ailleurs, le champ de capteurs solaires pourrait aussi servir à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage des locaux pendant la saison froide. Le rendement global de l'installation est de ce fait très intéressant.

D'ici 2013, des études seront lancées pour s'approprier et maîtriser les techniques de rafraîchissement solaire et permettront de retenir le système le mieux adapté au contexte algérien. Deux projets pilotes de climatisation par machine à absorption et par machine à adsorption porteront sur la climatisation solaire de bâtiments au sud du pays [6].

I.3.2 La climatisation géothermique : une solution adaptée à l'Algérie

En Algérie la climatisation est très énergivore en matière de consommation énergétique. Une solution se trouve dans l'exploitation des ressources naturelles non conventionnelles telles que la première étape à privilégier. Mais le recours à la géothermie peut permettre d'aller plus loin en raison de son indépendance des éléments climatiques, sa présence locale et son respect de l'environnement. La géothermie consiste à prélever l'énergie présente dans les terrains ou dans les aquifères superficiels pour la transmettre à une habitation via une pompe à chaleur. Cette technique allie performance énergétique, économique et environnementale pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire [7].

I.3.3 La première expérience algérienne dans le domaine de la climatisation par énergie renouvelable

La première expérience algérienne dans le domaine de la climatisation par pompe à chaleur utilisant l'eau chaude issue des sources géothermales a été menée par l'entreprise Alsolar dans le cadre du programme de promotion des énergies propres et renouvelables initié par le Ministère de l'environnement et de l'aménagement du territoire et la Direction de l'environnement de la Wilaya de Saïda. Cette installation a été réalisée à l'école primaire Si Ben Salah, située à Sidi Aïssa dans la wilaya de Saïda.

Cette installation, alimentée à partir d'une source géothermale dont la température est de 47 °C et le débit de 25 m³/h, est composée essentiellement de trois systèmes : un système de récupération de la chaleur géothermique ; un système de ventilo-convecteur constitué de deux circuits d'eau et d'un circuit d'air utilisés pour le chauffage de la cantine en saison hivernale et pour la climatisation saison estivale ; et une pompe à chaleur air-eau qui assure la climatisation durant toute l'année.

L'intervention du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) consiste en l'étude expérimentale approfondie effectuée sur l'installation de climatisation géothermique. Des résultats satisfaisants ont été obtenus démontrant l'efficacité énergétique de ces systèmes installés en Algérie.

Ces systèmes peuvent être utilisés dans toutes les wilayas qui disposent d'une source thermique dont la température dépasse les 30 °C [7].



Figure I.4 Pompe à chaleur [7].



Figure I.5 Ecole primaire alimentée par climatisation géothermie [7].

I.4 Etat de l'art de la climatisation solaire

I.4.1 Introduction

L'expression « climatisation solaire » désigne l'ensemble des moyens de climatiser en utilisant comme ressource énergétique primaire la chaleur communiquée par les rayonnements du soleil.

Ce mode de climatisation qui peut se substituer à l'utilisation de ressources fossiles présente comme principal intérêt de pouvoir fournir le plus de froid quand il fait le plus chaud, ce qui correspond généralement aux périodes où le soleil est le plus disponible.

I.4.2 Rappel sur la climatisation traditionnelle

I.4.2.1 Historique

La climatisation moderne a été inventée par Willis H. Carrier en 1902, encore que l'on ait pu rencontrer bien avant cette date dès le 16^{ème} siècle des systèmes naturels de rafraîchissement, obtenus par ruissellement d'eau, provoquant ainsi par évaporation une diminution de la température d'air. Les Romains utilisaient un tunnel souterrain d'apport d'air extérieur qui était un vrai climatiseur puisque l'air entrant dans la maison était assez invariablement autour de 10-12 °C hivers comme été. Ensuite dès la fin du XVIIIe siècle, nous retrouvons des réseaux de climatisation avec des blocs de glace intégrés à même les réseaux avec ventilation forcée.

Pour le rafraîchissement des boissons, les civilisations grecques et égyptiennes utilisaient l'effet d'évaporation de l'eau à travers les vases et les jarres poreux.

C'est au XIXème siècle que sont apparues les premières machines frigorifiques à compression de fluide [8].

1834	Jacob PERKINS, de Londres, construit la première machine de réfrigération à compression mécanique avec de l'éther comme réfrigérant ;
1859	le Français Ferdinand CARRE réalise la première installation industrielle (machine à absorption d'eau + NH ₃) ;
1930	grâce à l'étude théorique du chimiste belge Frédéric SWARTS, le grand essor de l'industrie du froid s'installe, avec la mise au point par une société américaine d'un nouveau fluide frigorigène « Le DICHLORODIFLUOROMETHANE (R12) » ;

	les CFC, chloro-fluoro carbonés sont utilisés comme fluides frigorigènes
1950	Général Motors met en place des glaces teintées sur ses véhicules pour réduire la température intérieure engendrée par rayonnement. En France, le chauffage de l'habitacle des véhicules se généralise ;
1955	les premiers systèmes de conditionnement d'air font leur apparition sur des véhicules américains type Chevrolet. L'ensemble du système était pré-assemblé par Frigidaire à l'usine de Dayton (Ohio) et mis en place sur environ 3500 véhicules durant la même année ;
1960	les concepteurs aboutissent à combiner le système de réfrigération à celui de chauffage ;
1970	les constructeurs européens adoptent la climatisation dans leurs véhicules ;
1980	apparition des premiers systèmes de climatisation automatisés sur les véhicules.
1991	la SAAB 9000 turbo est le premier véhicule à recevoir du fluide frigorigène R 134 sans chlore dans son installation de climatisation ;
1995	certaines pays, dont la France et l'Allemagne, interdisent les produits à base de chlore dans les systèmes de réfrigération ;

Tableau I.1 les différentes inventions dans la climatisation traditionnelle [9].

I.4.2.2 La Climatisation aujourd'hui

a) Panorama de la climatisation dans le monde

Le marché mondial de la climatisation est toujours en expansion et a été estimé à 39,7 millions d'appareils vendus en 2000. Ce résultat se répartit entre 29,9 millions d'unités RAC (Room Air Conditioners, c'est à dire climatiseurs individuels) et 9,8 millions d'unités CAC (Central

Air Conditioners, c'est à dire climatisation centralisée). Le marché Américain reste le premier avec 13,2 millions d'unités vendues en 2000 avec une croissance de 3,1%. Le marché Chinois explose avec 9,2 millions d'unités vendues. Le marché Japonais a connu une croissance de 9% entre 1999 et 2000, passant ainsi à 7,7 millions d'unités vendues en 2000. En 2000, le marché mondial de la climatisation était estimé à 35 milliards de US\$[1].

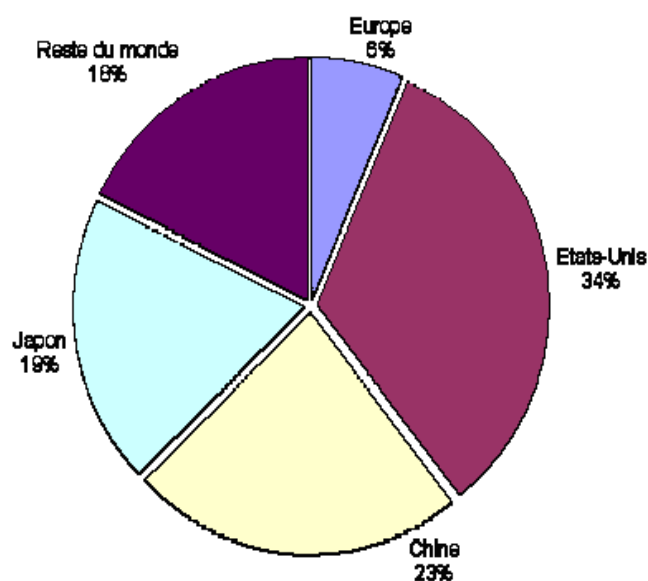


Figure I.6 Marché mondial de la climatisation (en volume) en 2000[1].

b) Le taux d'équipement en climatisation dans le monde

Les climatiseurs sont plus répandus dans le secteur tertiaire. Le taux d'équipement en Europe est très en deçà des valeurs des autres pays de l'OCDE (100 % au Japon et 80 % aux Etats-Unis). Ceci en fait donc un terrain à conquérir pour tous les fabricants, en effet le potentiel y est énorme.

PAYS	TERTIAIRE	RESIDENTIEL
Japon	100%	85%
Etats-Unis	80%	65%
Europe	27%	5%

Tableau I.2 Taux d'équipement en climatisation dans le monde en 1997[1].

c) Dépense annuelle consacrée à la climatisation dans le monde

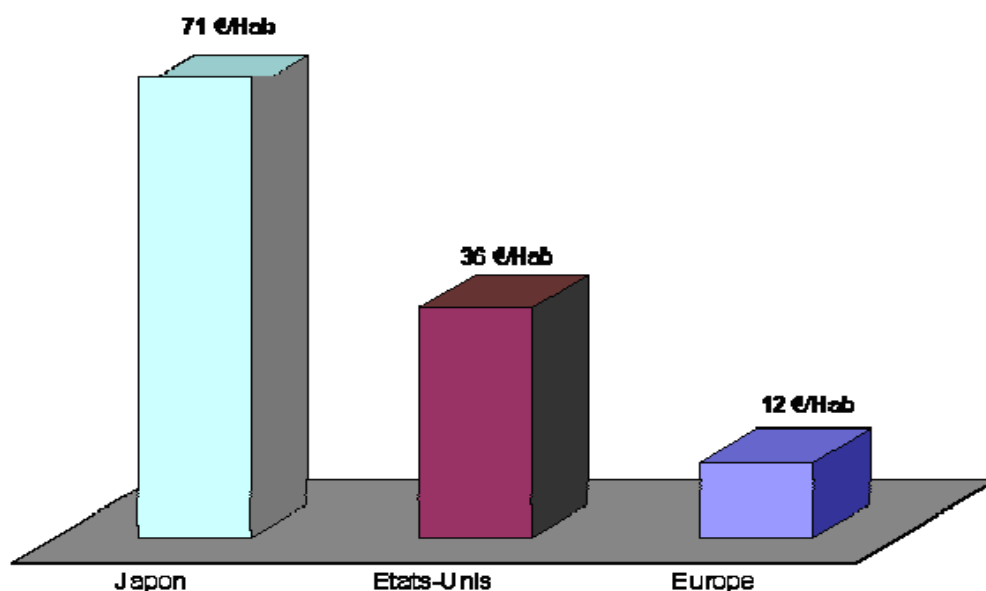


Figure I.7 Dépense annuelle consacrée à la climatisation [1].

d) Panorama de la climatisation en Europe

Le marché de la climatisation centralisée croît fortement en Europe depuis plusieurs années. Dans l'étude EECCAC (EnergyEfficiency and Certification of Central Air Conditioners) [5], la croissance de la surface climatisée par des installations centralisées a été estimée en Europe entre 1980 et 2000.

Cette croissance est en partie reliée au développement des immeubles de bureaux, ce qui explique la plus forte croissance dans des pays d'Europe centrale (Allemagne) qu'au Portugal et en France [1].

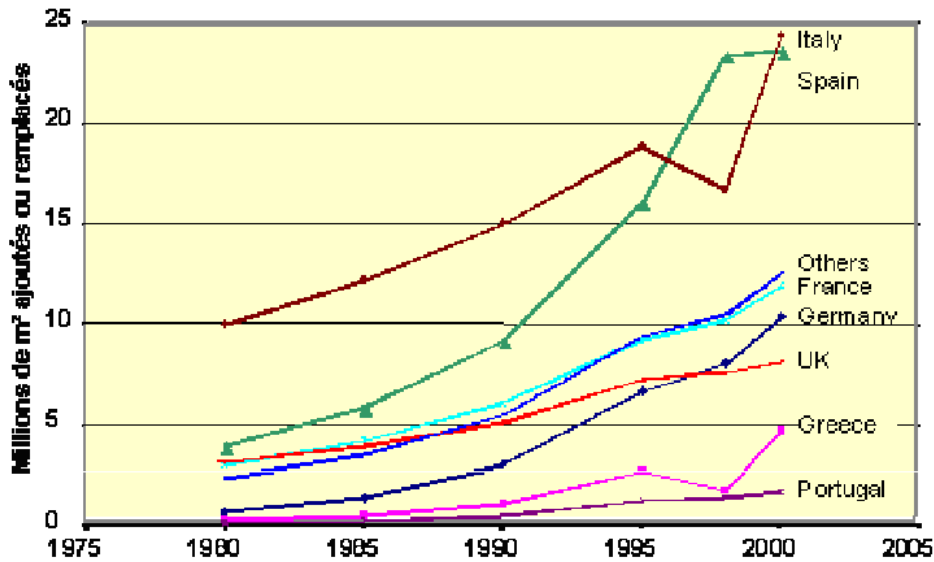


Figure I.8 Augmentation de la surface climatisée centralisée par pays entre 1980 et 2000 [9].

I.4.3 La climatisation solaire

I.4.3.1 climatisation solaire et Energie solaire

Produire du froid avec l'énergie solaire qui réchauffe la Terre.

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. Cette source inépuisable à l'échelle humaine est toutefois inégalement répartie à l'échelle de la planète avec un maximum à l'équateur.

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. Ajoutons qu'il est totalement modulable puisque la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.

La chaleur diffusée par le rayonnement solaire peut également être utilisée pour de nombreuses applications et à différents niveaux de température. À basse et moyenne température, l'énergie solaire est utilisée dans le bâtiment pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS), chauffer les locaux et l'eau des piscines. Ces utilisations sont regroupées sous l'appellation « solaire thermique ».

D'autres utilisations en revanche font encore l'objet de recherche & développement. C'est le cas notamment de la climatisation solaire ou comment produire du froid grâce au soleil.

I.4.3.2 Principe de fonctionnement

La technique utilisée dans le cadre de la climatisation solaire consiste à transformer la lumière en énergie thermique au moyen d'un capteur solaire sous vide. La chaleur ainsi produite est dirigée vers une machine à adsorption où est dissociée, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit, par adsorption de chaleur, des frigories. Le froid est ensuite distribué par un réseau d'eau glacée qui peut alimenter une centrale de ventilation collective.

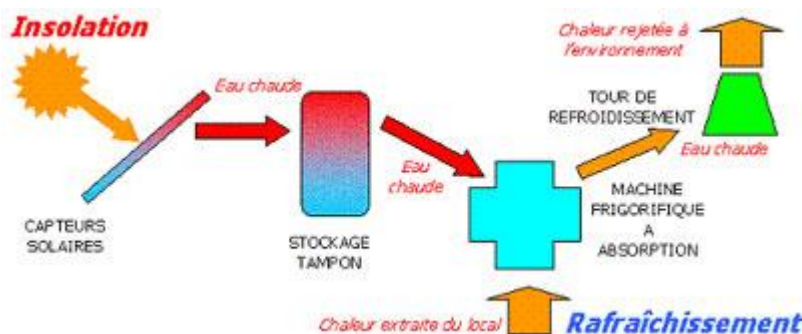


Figure 1.9 Principe de fonctionnement de rafraîchissement solaire [10].

I.4.3.3 Installation globale d'un rafraîchisseur solaire

De manière générale, les installations solaires de production de froid sont

composées des éléments suivants : un champ de capteurs solaires et son circuit primaire, un échangeur et un circuit secondaire qui alimente la machine à froid, une machine à absorption ou à adsorption ou un système DEC et un système de régulation générale.

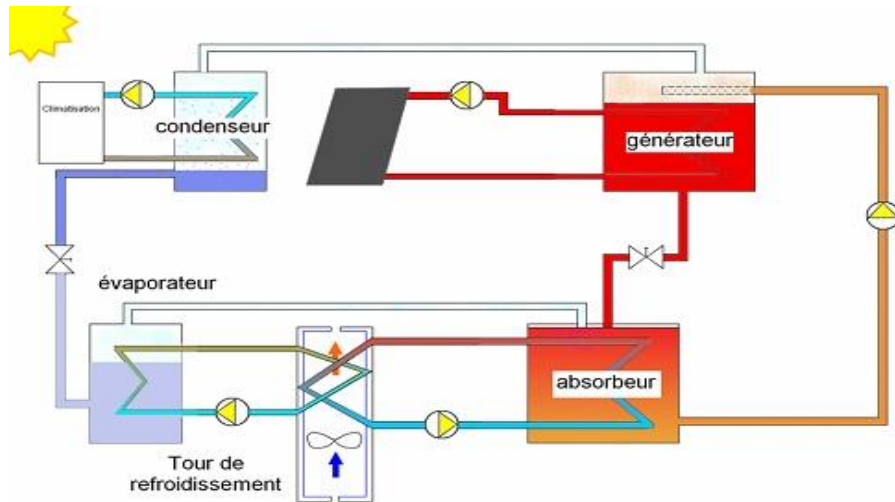


Figure I.10 Installation globale d'un rafraîchisseur solaire [11].

I.4. 3.4 Pour quoi l'alternative solaire ?

Lorsque, malgré une utilisation optimale des techniques passives, un système de climatisation s'avère nécessaire, le rafraîchissement solaire peut être une solution intéressante.

En effet, durant l'été, la demande électrique croît fortement du fait d'un usage intensif des systèmes de climatisation, d'où des pics de consommation à l'origine de la plupart des problèmes d'approvisionnement. La pénurie est encore plus grande les années "sèches", les centrales hydroélectriques étant incapables de couvrir une partie de ces pics.

Dans ce contexte, l'utilisation de l'énergie solaire pour le rafraîchissement est un concept séduisant, puisque les besoins en froid coïncident la plupart du temps avec la disponibilité du rayonnement solaire.

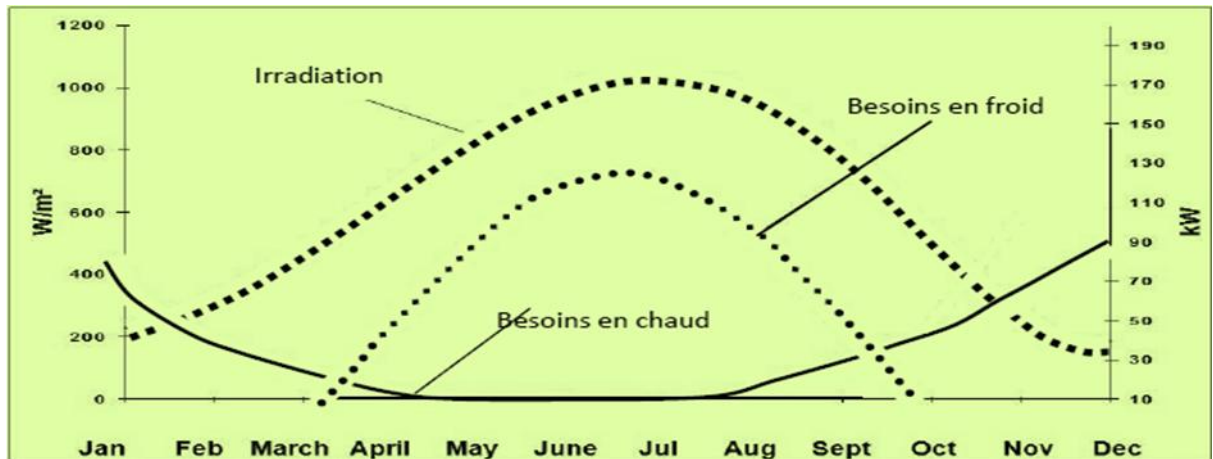


Figure I.11 Adéquation entre demande et ressource solaire [12].

I.4.3.5 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.
- 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. Utiliser l'énergie solaire pour ces installations vise donc à limiter ces impacts.
- Dans le cas de la climatisation solaire, l'énergie calorifique délivrée par

Le système solaire est utilisé 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. Selon l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) [13], il faut parler plus précisément de « systèmes de conditionnement d'air des bâtiments assistés par le solaire ». 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 [13].

I.4.3.6 Comment utiliser l'énergie solaire pour produire du froid

1 : utiliser le solaire photovoltaïque pour assurer les besoins électriques du climatiseur à compression (climatiseur traditionnel),

2 : utiliser de l'énergie solaire thermique et la convertir en énergie mécanique couplée avec un climatiseur à compression.

3 : utiliser l'énergie solaire thermique pour alimenter une machine à froid dite à sorption (absorption ou adsorption)

4 : utiliser l'énergie solaire thermique pour alimenter un système de conditionnement d'air par rafraîchissement évaporatif (DEC).

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.

Parmi les quatre voies possibles, les deux dernières ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche car elles sont les plus prometteuses. Aujourd'hui les technologies sont abouties. De nombreuses installations de démonstration ont été construites avant un développement à grande échelle [14].

I.4.3.7 Avantage de la climatisation solaire

Les systèmes de rafraîchissement solaire apparaissent comme pouvant représenter une alternative prometteuse aux systèmes de refroidissement par compression de vapeur classiques, avec certains avantages :

- ❖ la consommation d'électricité peut être jusqu'à 20 fois inférieure à celle d'un système classique à compression,
- ❖ les fluides frigorigènes employés n'ont pas d'impact sur la couche d'ozone et sur l'effet de serre puisqu'il s'agit d'eau, d'ammoniac et/ou de solutions salines,
- ❖ Un faible niveau sonore.
- ❖ De plus, l'intérêt du procédé est que les besoins en froid coïncident la plupart du temps avec la disponibilité du rayonnement solaire.

I.5 Les différentes technologies de production de froid solaire

Production du froid à partir de l'énergie solaire basée sur plusieurs méthodes ils sont comme suit : l'emploi de l'électricité, un procédé thermomécanique et des cycles basés sur la sorption d'un gaz. Toutes les techniques utilisées sont listées dans la Figure I.12

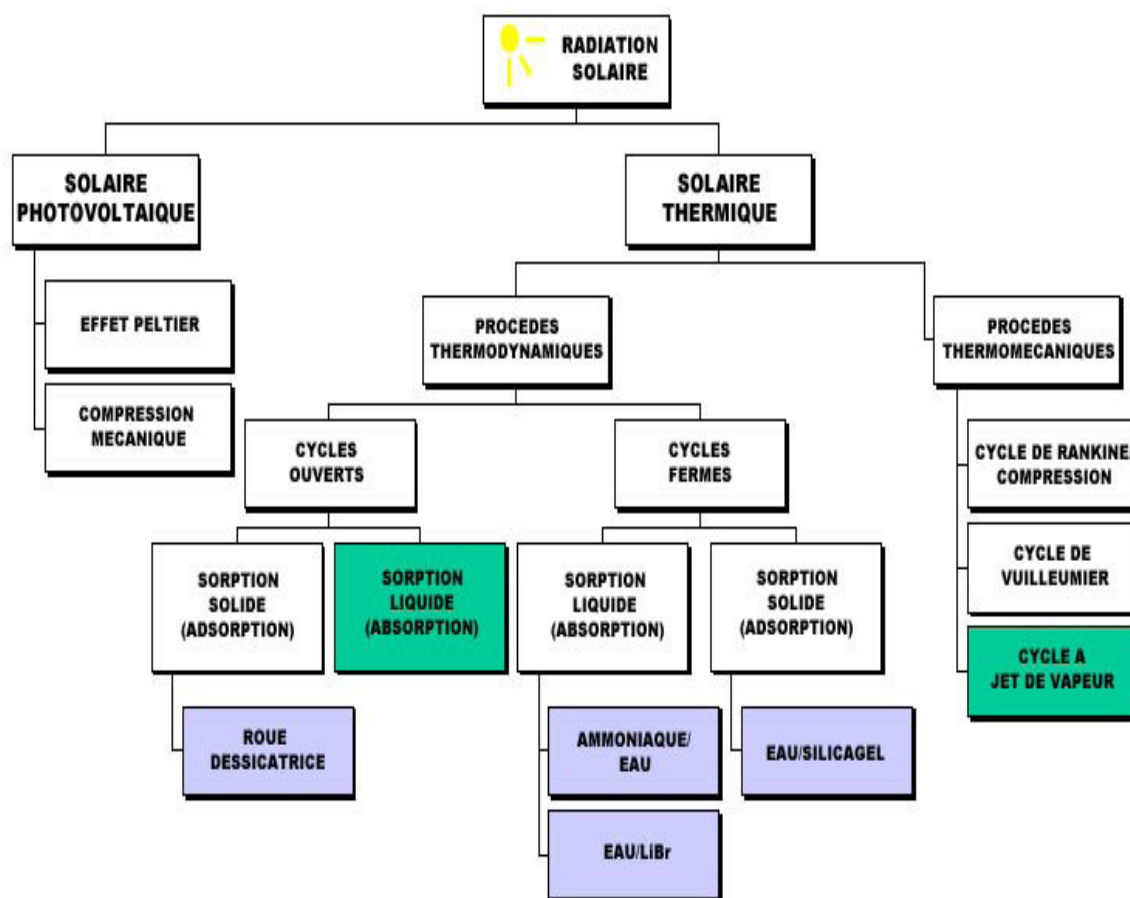


Figure I.12 les différentes technologies de production du froid solaire [15]

Remarque : les systèmes : absorption, adsorption, dessiccant cooling ainsi que le système à Compression de vapeur seront présentés en détail dans le chapitre prochain.

I.5.1 Utilisation des cellules photovoltaïque

I.5.1.1 les systèmes à compression de vapeur

La Figure I.13 montre le schéma d'une machine frigorifique classique à compression alimentée par un générateur d'électricité photovoltaïque. En l'absence d'onduleur, l'entraînement du compresseur doit être assuré par un moteur à courant continu plus coûteux. Un onduleur, surtout de faible puissance, a cependant toujours un rendement médiocre, 70 à 80% dans les meilleurs cas.

Le caractère intermittent du rayonnement solaire impose un stockage, soit d'électricité par batterie, soit un stockage sous forme de froid, soit sous forme de fluide frigorigène sous pression. Vu le cout des batteries et de leur entretien, le stockage par batterie est limité aux faibles puissances.

La durée du stockage à prévoir dépend de l'utilisation et du climat, variant de quelques jours à une dizaine de jours pour la conservation des vaccins et médicaments.

Ces armoires frigorifiques de petite capacité (environ 150 l) destinées aux besoins domestiques ou à ceux des dispensaires de campagne, constituent aujourd'hui l'essentiel du marché des frigos solaires photovoltaïques, la valeur des produits conservés et la faible puissance installée garantissant la rentabilité.

Vu le cout élevé des modules photovoltaïques, des efforts importants ont été faits pour diminuer au maximum l'énergie électrique journalière nécessaire. Une isolation soignée, d'une épaisseur de 8 à 12 cm, permet de réduire les pertes à vide en dessous de 30 W, une fraction significative de celles-ci étant alors due aux inévitables ouvertures de portes. Le cycle frigorifique peut aussi être modifié pour porter le COP de sa valeur habituelle voisine de 1 à plus de 1,5 [9].

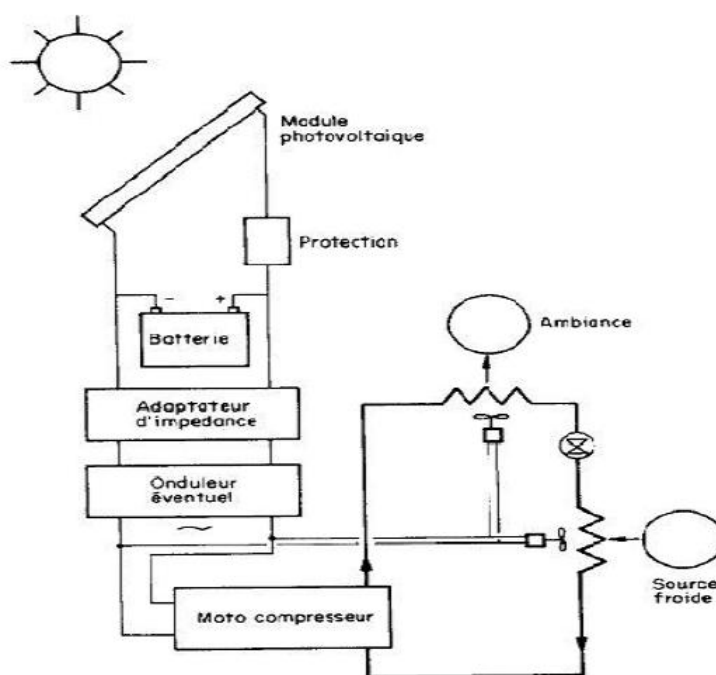


Figure I.13 Schéma d'une machine frigorifique photovoltaïque [16].

Le résultat net est que la consommation d'une armoire frigorifique solaire de 150 I produisant 1kg de glace par jour a été ramenée, dans une ambiance tropicale à 43 °C, autour de 750 Wh/jour, soit trois à quatre fois moins qu'un équipement classique.

Avec des COP de la machine frigorifique variant de 0,8 à 1,5 et des panneaux photovoltaïques au silicium de 13% de rendement, le COPS oscille donc de 0,10 à 0,20.

Pour les installations moyennes nécessitant une énergie de plus de 50 kWh/jour, l'installation d'un groupe Diesel électrogène ou une extension de réseau est plus avantageuse mais moins fiable.

I.5.1.2 Les systèmes à effet Peltier [17]

L'effet Peltier, appelé aussi effet thermoélectrique, est un phénomène physique de déplacement de la chaleur en présence d'un courant électrique parcourant deux matériaux conducteurs de natures différentes en contact. Ce phénomène ne permet pas d'avoir une forte puissance froide développée et n'est donc pas envisageable.

I.5.2 Utilisation des capteurs solaires thermiques

L'énergie solaire est utilisée comme source de chaleur grâce à des capteurs solaires thermiques, dans une machine produisant un travail mécanique, lequel est à son tour utilisé pour produire du froid. Citons :

I.5.2.1 Technique basées sur un processus thermomécanique [17]

a) cycle de Rankine

La première classe comprend des machines telle que celle de la figure I.14 dans lesquelles, un moteur thermique, utilisant les capteurs et l'ambiance comme sources, entraîne une machine frigorifique à compression classique.

Une simple juxtaposition cumule les pertes des deux machines en y ajoutant des problèmes de vibration, d'étanchéité et de régulation. Il faut intégrer les machines motrice et réceptrice et réaliser le transfert d'énergie de façon simple et fiable. Les

diverses voies possibles ont été expérimentées sur des prototypes de puissance moyenne. Les rendements exergetiques obtenus varient de 20 à 25%

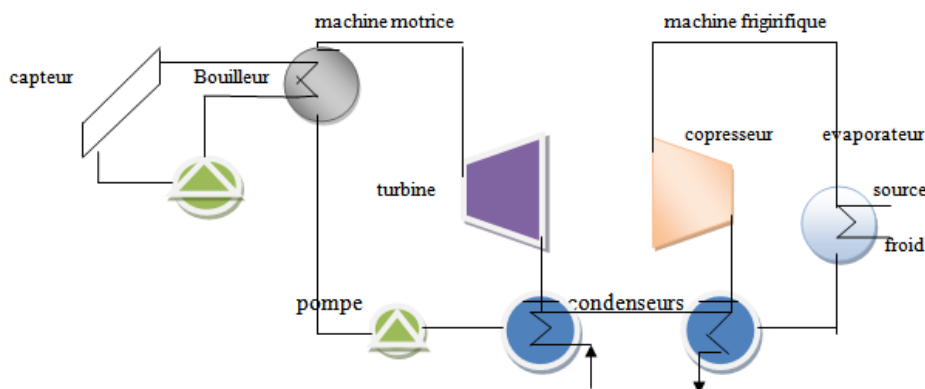


Figure I.14 Machine frigorifique couplée à cycle de Rankine [8].

Vu le caractère intermittent et variable de l'énergie solaire, un bon fonctionnement à charge partielle et des possibilités de démarrage et d'arrêt spontanés constituent des atouts majeurs en réfrigération solaire.

Enfin, les machines à double cycle de Rankine peuvent fonctionner dans une très large gamme de températures en particulier, avec de la chaleur à basse température fournie par des collecteurs plans [8].

b) Le cycle à jet de vapeur [9]

Principe de fonctionnement

L'éjecteur est une tuyère d'abord convergente – l'accroissement de la vitesse du jet diminue la pression ce qui permet l'aspiration voulue – puis lentement divergente. L'augmentation progressive de la section offerte à la vapeur ralentit sa vitesse et la pression remonte.

La figure I.15 représente schématiquement le circuit du système à éjection le plus simple à un seul étage d'éjecteur. Il est formé de deux boucles :

- 1) La « boucle frigorifique » BF parcourue par le fluide frigorigène et comportant :
 - L'éjecteur EJ qui aspire la vapeur issue de l'évaporateur EV et la

comprime avant son introduction dans le condenseur CD,

- Le condenseur CD qui liquéfie la vapeur du frigorigène,
- La bouteille de liquide BL qui représente la réserve de liquide frigorigène,
- Le détendeur DT qui règle l'apport de liquide frigorigène dans l'évaporateur,
- L'évaporateur EV où s'effectue la production de froid par vaporisation du liquide frigorigène. Cet échangeur thermique est placé dans l'enceinte à refroidir EF ;

2) La « boucle motrice » BM parcourue par le fluide moteur actif et comportant :

- L'éjecteur où l'énergie cinétique du jet de vapeur du fluide actif, qui pénètre dans l'éjecteur par l'injecteur IN, sert à assurer la circulation du frigorigène dans la boucle frigorifique BF,
- Le condenseur CD qui liquéfie la vapeur du fluide actif sortant de l'éjecteur,
- la bouteille de liquide BL, la réserve de fluide actif liquide,
- la pompe PA qui alimente le bouilleur en liquide à vaporiser,
- le bouilleur BO « chaudière » qui reçoit l'énergie thermique alimentant la machine. Sous l'action du chauffage, le liquide se vaporise et la vapeur formée se surchauffe avant de pénétrer dans l'injecteur de l'éjecteur[10].

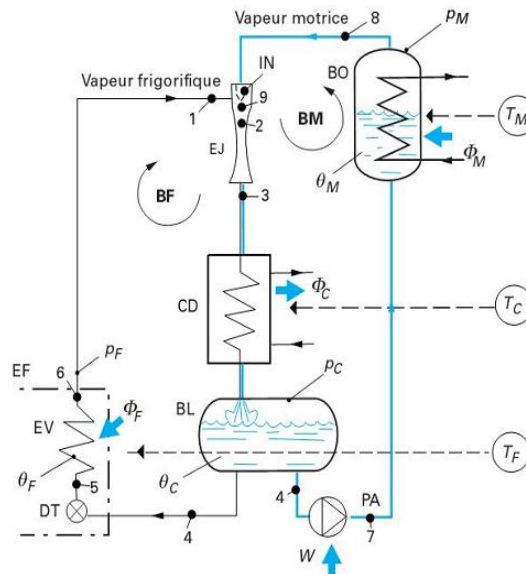


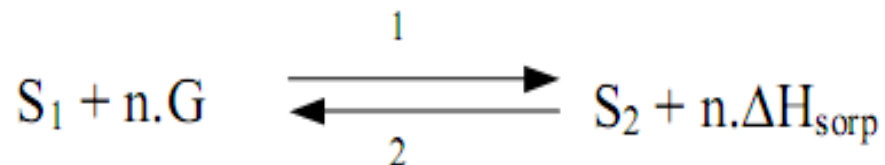
Figure I.15 Système à éjection [9].

Comme on le voit sur la figure, il apparaît clairement que les deux boucles ne sont pas séparables. Le système en question est bien intégré ou non dissociable : l'éjecteur, qui joue ici un double rôle (à la fois « moteur thermique » pour la boucle motrice et « compresseur » pour la boucle frigorifique), le condenseur et la bouteille de liquide sont communs aux deux boucles. Ici, c'est la même substance qui est utilisée comme frigorigène et comme fluide moteur, et il en est généralement ainsi.

I.5.2.2 Technique basée sur la sorption d'un gaz

a) Principe de la sorption

Les procédés thermochimiques reposent sur la gestion de la thermicité d'un phénomène renversable de sorption entre un gaz G et un sorbant (liquide ou solide) S:



Dans le sens 1 (appelé synthèse dans le cas d'une réaction chimique solide-gaz ou sorption dans le cas de l'ab- et de l'ad-sorption), le gaz G se fixe sur le sorbant S_1 . Ce phénomène est exothermique et libère la quantité de chaleur de sorption ΔH_{sorp} . Dans le sens 2 (appelé décomposition ou désorption respectivement), le sorbant S_2 libère du gaz G. Ce phénomène endothermique nécessite l'apport de la quantité de chaleur ΔH_{sorp} .

b) Technique basée sur la sorption d'un gaz

➤ machine à absorption

La machine à absorption en cycle fermée utilise une solution d'eau et de bromure de lithium. La compression thermique est obtenue en utilisant un couple réfrigérant/liquide absorbant, et une source de chaleur qui remplace la consommation électrique du compresseur mécanique et c'est grâce à des capteurs solaires sous vide posés en toiture que la chaleur est produite. La plupart des systèmes utilisent une pompe à solution, très faiblement consommatrice d'électricité [7].

La climatisation solaire est composée :

- D'un désorbeur, qui a pour rôle de vaporiser le fluide caloporteur.
- D'un condenseur, qui a pour rôle de condenser le fluide caloporteur en état vapeur à l'état liquide.
- D'un détendeur, qui a pour rôle de diminuer la température et la pression du fluide.
- D'un évaporateur, qui sert à échanger de la chaleur entre l'air chaud et le fluide s'évaporant, en créant du froid.
- D'un absorbeur, qui sert à absorber le réfrigérant et
- D'une pompe, qui sert ramener le couple réfrigérant/absorbant dans le désorbeur.

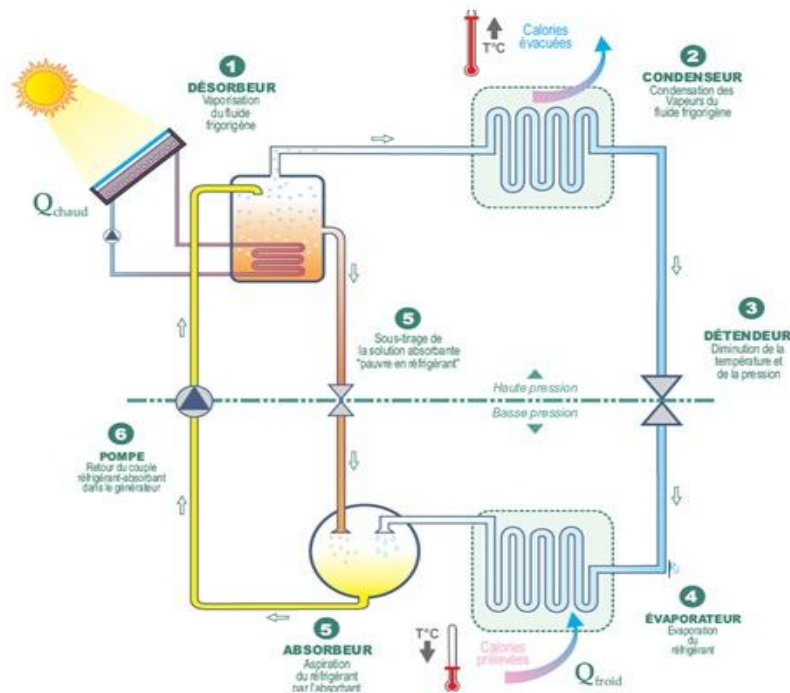


Figure 1.16 Schéma de fonctionnement du cycle absorption à simple effet [7]

Dans les cas de climatisation solaire, où la température de la source froide est supérieure à $5^{\circ}C$, la paire eau/bromure de lithium est généralement utilisée. Avec un système ($H_2O/LiBr$), la cristallisation de la solution doit être évitée par un contrôle de la température de refroidissement. La température de la source chaude est comprise entre 80 et $100^{\circ}C$. Dans des conditions optimales de fonctionnement, le coefficient de performance thermique est de l'ordre de $0,7$ [18].

Des travaux ont été menés pour améliorer l'efficacité des machines à absorption. Ils ont conduit aux machines double effet qui permettent d'obtenir un COP_{th} compris entre 1 et 1,2 avec des températures de génération demandées de l'ordre de 130°C à 160°C, c'est-à-dire nécessitant des capteurs à concentration suivant le rayonnement solaire. L'utilisation de ces machines double effet avec l'énergie solaire reste une application possible et intéressante en termes d'efficacité [20] mais marginale (1 ou 2 opérations recensées [21] en raison des températures de fonctionnement demandées.

Les machines à absorption simple effet sont actuellement disponibles auprès de nombreux fabricants pour différentes capacités allant de 15 kW à plusieurs centaines de kilowatts. On assiste aujourd'hui à d'importants travaux de recherche et développement se focalisant sur le développement de petites machines à absorption compatibles avec l'énergie solaire destinées in fine au marché résidentiel.

➤ **La machine à adsorption**

Lorsque le gaz ne se fixe pas dans un liquide, mais sur un matériau hautement poreux, on parle d'adsorption. Cette faculté de matériaux tels que les gels de silice, ou les Zéolites est utilisée dans des machines les couplant à la vapeur d'eau pour réaliser le cycle de refroidissement (présenté à la Figure 1.8). L'utilisation de matériaux solides oblige alors à avoir un fonctionnement cyclique et non continu comme pour l'absorption. Deux masses de matériaux adsorbants sont alternativement chauffées par la source chaude pour désorber la vapeur d'eau qui va ensuite se condenser dans le condenseur. Puis l'eau est ensuite évaporée dans l'évaporateur où le froid est alors produit. Cette vapeur d'eau s'adsorbe ensuite sur le matériau adsorbant et le cycle recommence.

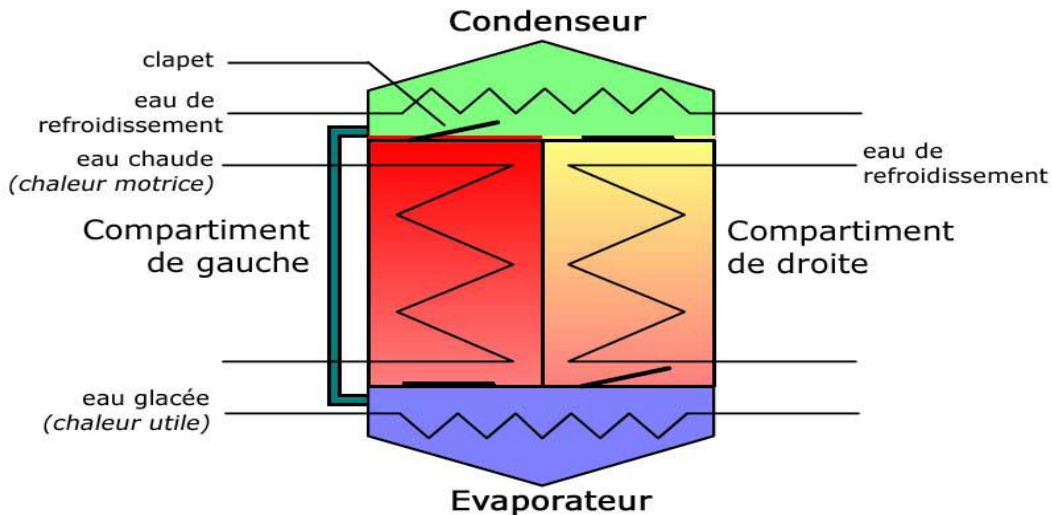


Figure 1.17 Schéma de fonctionnement d'une machine à adsorption.

Les machines à adsorption sont peu développées et concernent pour l'instant seulement des puissances importantes, à partir de 70 kW. Le COP_{th} est d'environ 0.6 [22]. Des recherches sont actuellement conduites pour améliorer le caractère cyclique générateur de beaucoup d'instabilité, ainsi que pour améliorer leur compacité et proposer des petites puissances [23].

➤ Le dessiccant cooling

Les systèmes dessiccant cooling sont utilisés pour produire directement de l'air frais, et non pas pour refroidir l'eau de la boucle de refroidissement comme dans le cas des machines citées précédemment. Ainsi ils ne peuvent être utilisés que dans le cas où la climatisation du local se fait grâce à un système à air basé sur une centrale de traitement d'air (CTA) [24].

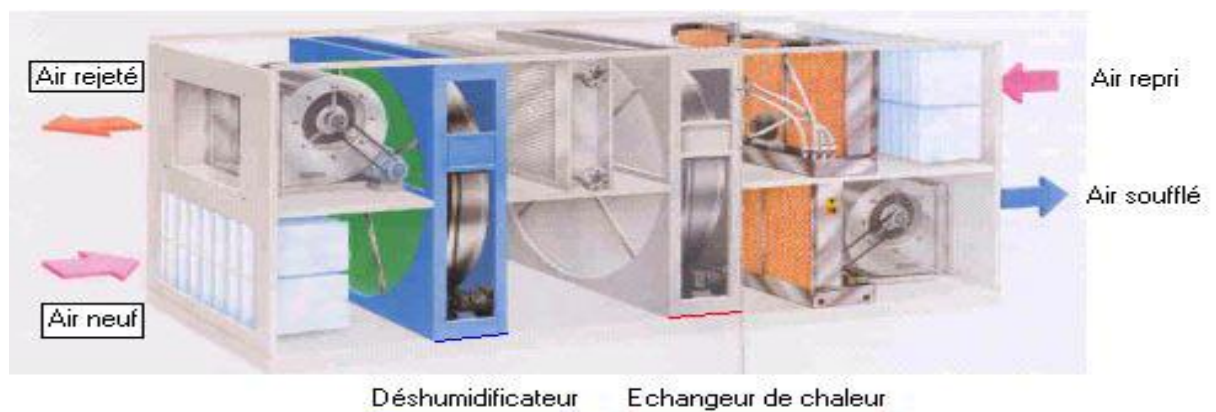


Figure I.18 Schéma d'une machine à dessiccation.

Le desiccant cooling est donc un cycle ouvert, qui s'appuie principalement sur l'utilisation de l'eau et de son potentiel de changement de phase pour refroidir l'air soufflé dans un local. Pour maximiser l'effet de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, le flux d'air ventilé est tout d'abord desséché dans une roue à dessiccation (roue composée d'une matrice circulaire de fibre de verre ou d'aluminium sur laquelle est déposé le matériau dessicatif) ou dans un lit dans lequel est vaporisée une solution desiccant, puis refroidi dans un échangeur, et enfin humidifié adiabatiquement dans un laveur d'air.

Le COP_{th} est d'environ 0.5. La puissance de refroidissement est limitée par le débit de renouvellement d'air. Ce système doit donc être utilisé pour des bâtiments où les besoins sont restreints, ou pour une application de rafraîchissement simple.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait un rappel sur le contexte énergétique général et sa problématique environnementale pour bien comprendre l'urgence de la mise en place d'une réelle politique d'économies d'énergie et de développement des énergies renouvelables.

Un panorama de la climatisation conventionnelle et solaire est établi afin d'avoir une idée complète et claire sur ce domaine.

Dans le prochain chapitre, on va démontrer d'une façon détaillée les différentes Installations de la climatisation solaire.

II.1 Introduction

Durant la dernière décennie, une demande de confort accrue et des températures élevées en été ont conduit à un fort développement de la climatisation dans les bâtiments tertiaires. Ce développement est responsable d'un fort pic de consommation électrique en été, le système de production et de transport d'électricité se rapprochant parfois de ses limites de capacité. Associés aux éventuelles fuites de fluides frigorigènes, ces pics de production électrique induisent une augmentation des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Soucieux de laisser une planète propre à nos enfants, nous sommes de plus en plus concernés par l'environnement et le développement durable. Les ressources naturelles fossiles sont chères et en quantité limitée.

Il existe pourtant une énergie gratuite, propre et inépuisable : **l'énergie solaire.**

Dans les zones isolées, l'utilisation de l'énergie solaire est tout à fait appropriée et s'avère rentable dans bon nombre d'applications. En effet, dans certaines régions à faible densité de population, le raccordement au réseau électrique est difficile voire impossible, ce qui justifie le recours à une solution alternative : l'énergie solaire. Deux milliards d'habitants dans le monde ne sont actuellement pas connectés à un réseau de distribution électrique, parce qu'ils en sont trop éloignés.

Dans les zones qui profitent d'un ensoleillement peu important, l'utilisation de l'énergie solaire est tout à fait possible

Les systèmes de rafraîchissement solaires ont l'avantage de supprimer la plupart des nuisances d'une climatisation classique : la consommation d'électricité peut être jusqu'à 20 fois inférieure à celle d'un système classique à compression, les fluides frigorigènes employés sont inoffensifs puisqu'il s'agit d'eau et de solutions salines et la nuisance sonore du compresseur est supprimée. De plus, l'absence de compresseur mécanique évite les vibrations d'où le fait que ces machines demandent un entretien limité et présentent une grande longévité.

Dans des climats chauds, le chauffage et la demande de rafraîchissement de logements domestiques (intérieurs) peuvent être réduits considérablement avec des mesures diverses comme la bonne isolation, le double vitrage, l'utilisation de masse (messe) thermique et la ventilation.

L'intérêt du refroidissement solaire réside dans la simultanéité de la demande de froid et de l'ensoleillement.

II.2. La climatisation traditionnelle

II. 2.1 Fonctionnement d'un système de climatisation

La climatisation résidentielle varie en fonction de facteurs locaux comme la disponibilité de sources d'énergie (à la fois actuelle et projetée), le climat, le prix de l'installation, les circonstances socio-économiques et l'existence d'un personnel spécialisé dans l'installation et la maintenance. Elle dépend aussi de facteurs inhérents à l'application et comprennent le type de logement, les caractéristiques de construction et les codes du bâtiment. En conséquence, de nombreux systèmes différents sont choisis pour fournir des combinaisons de chauffage, de refroidissement, humidification, déshumidification, et de purification.

II.2.1.2 Principes de fonctionnement d'un système de climatisation [25]

a) Principe de base

La climatisation est basée sur le transport de la chaleur d'un endroit vers un autre.

Pour cela, que faut-il ?

Un appareil intérieur, un appareil extérieur, un circuit fermé de tuyauteries en cuivre qui relie les unités intérieures et extérieures entre elles et dans lequel circule le réfrigérant. C'est ce réfrigérant qui va transporter l'énergie produite d'un local vers un autre local

b) Principe de fonctionnement de la réfrigération

Le principe de base est fort simple : pour produire du froid, il faut du chaud. Car dans notre réfrigérateur, notre congélateur ou notre climatiseur, se cache en fait une pompe à chaleur inversée, qui dans un processus d'échange thermique, va produire du froid avec un fluide frigorigène compressé. Mais cette pompe à chaleur inversée est un compresseur électrique, gros consommateur d'électricité. Et la climatisation électrique à compression domine le marché.

II.2.2 Les systèmes de climatisation à compression mécanique

II.2.2.1 Principe de fonctionnement de la machine à compression mécanique

Les machines frigorifiques sont les plus répandues, c'est d'ailleurs sur ce principe et avec le même cycle thermodynamique que fonctionnent la grande majorité des réfrigérateurs, des congélateurs mais aussi des climatiseurs individuels, des

groupes frigorifiques de production d'eau glacée approvisionnant des batteries froide de centrales de traitement d'air, des pompes à chaleurs réversibles.

Il est intéressant d'en rappeler le principe de fonctionnement, car ce sont ces mêmes principes de base qui seront utilisés pour la production de froid par sorption que nous verrons plus en avant et qui seront utilisés pour la climatisation solaire.

La figure si dessous représente les éléments composant la machine frigorifique :

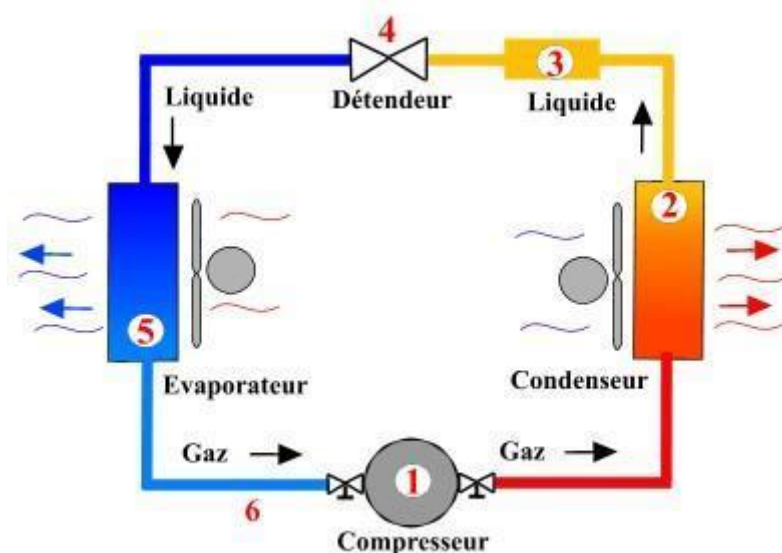


Figure II.1 schéma de principe d'une machine à compression mécanique [26].

Cette machine est composée des éléments suivants [27]

II.2.2 Etude du cycle frigorifique

1. l'évaporateur

Il consiste généralement en une tuyauterie, souvent en forme de serpentin, à l'intérieur de laquelle s'évapore le fluide frigorigène afin de produire du froid.

La température du liquide en évaporation correspond à la pression qui règne dans l'évaporateur.

2. Un compresseur

Il agit comme une pompe, son rôle est d'une part d'évacuer la vapeur du fluide frigorigène venant de l'évaporateur et de maintenir la pression requise à l'intérieur de celui-ci, d'autre part d'élever la pression de cette vapeur à un niveau suffisamment élevé et de l'envoyer au condenseur.

L'entraînement du compresseur est généralement assuré par un moteur électrique.

3. Un condenseur

Il assure la liquéfaction de la vapeur comprimée chaude est transmise à un agent de refroidissement extérieur (air ou eau), ce qui permet sa liquéfaction. Le fluide, de nouveau à l'état liquide, revient à l'évaporateur pour être de nouveau utilisé.

4. Un détendeur

Il est constitué d'une vanne qui règle le débit du fluide frigorigène retournant à l'évaporateur.

La quantité soumise à l'évaporateur en un temps donné doit être égale à celle pouvant être vaporisée, ce qui correspond à la chaleur absorbée. Ainsi le détendeur permet de maintenir dans l'évaporateur et le condenseur les pressions et les températures les plus adaptées à l'installation considérée et aux conditions extérieures données.

II.2.2.3 Représentation sur le diagramme enthalpique

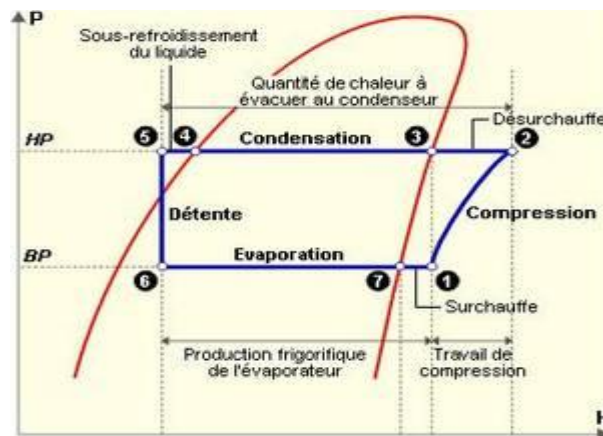


Figure II.3 Diagramme enthalpique du cycle frigorifique [1].

Description

Le fluide frigorigène est comprimé par le compresseur pour être à haute température et haute pression, il passe ensuite dans le condenseur, dans le quel il est refroidi par la source à haute température, de la chaleur est récupérée, ensuite le fluide est détendu, sa pression et sa température chutent fortement, le fluide frigorigène passe à l'état liquide. Le passage par l'évaporateur permet son évaporation et la production de froid à la source froide.

II.3. La climatisation solaire

II.3.1. Introduction

(Produire du froid avec le soleil)

On a vu les applications solaires pour la production d'eau chaude et le chauffage. Mais si on pouvait concevoir un « combi-système solaire réversible » qui pourrait fournir de la chaleur en hiver et du froid en été, la boucle serait bouclée. C'est possible, mais pas si simple.

Devant l'impact écologique négatif des climatiseurs classiques, il est plus que temps de se pencher avec attention sur cette alternative salutaire. La technique solaire ouvre de nombreuses applications car il y a une synchronisation idéale entre la demande frigorifique et le gisement solaire.

C'est une solution propre, efficace et silencieuse. Elle réduit des émissions de CO₂, l'emploi de fluides frigorigènes et le bruit urbain. Mais la technique est encore en phase de développement et il n'y a qu'une cinquantaine d'installations en Europe.

II.3.2. Principe de fonctionnement de la climatisation solaire [12]

La technique la plus commune consiste à utiliser des capteurs solaires pour fournir de la chaleur qui est dirigée vers une machine à absorption. Cette machine dissocie, par ébullition, une solution d'eau et de bromure de lithium. Après refroidissement, la recombinaison des deux composants produit du froid, par absorption de chaleur. Le froid est ensuite distribué comme pour la climatisation classique.

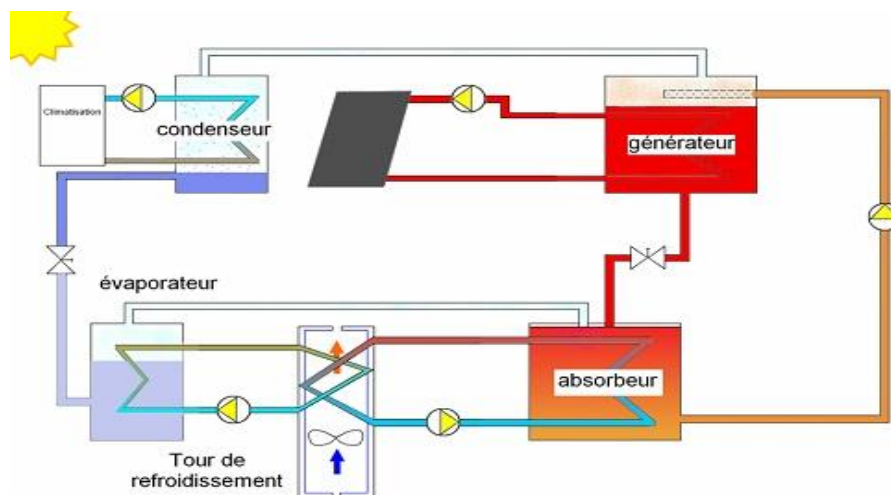


Figure II.4 Principe de fonctionnement de la climatisation solaire [11].

II.3.3. Les technologies de la climatisation solaire

En climatisation solaire, on peut définir deux technologies : les systèmes fermés avec une réfrigération à « absorption » ou à « adsorption », et les systèmes ouverts avec une réfrigération par « dessiccation ».

Le schéma ci dessous représente les types de systèmes que nous allons voir maintenant. Ce sont donc des systèmes qui, comme nous l'avons dit, utilisent comme principale source d'énergie, de la chaleur 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.



Figure II.5 les types de systèmes de climatisation solaire [1]

Nous verrons donc en tout 3 technologies aujourd'hui disponibles sur le marché et dont il existe des exemples en fonctionnement. Deux de ces dernières permettent de produire de l'eau glacée :

- Les groupes frigorifiques à Absorption
- Les groupes frigorifiques à Adsorption

La 3ème technologie permet de produire directement de l'air conditionné :

Le refroidissement évaporatif potentialisé par dessiccation ou Desiccant Evaporative Cooling (DEC) en anglais.

Ces systèmes de climatisation par dessiccation (DEC) ou évaporation, augmentent l'humidité de l'air et réduisent la température ambiante.

Nous allons voir par la suite les techniques de la climatisation solaire d'une façon plus détaillée :

II.3.3.1 La climatisation solaire par absorption

La climatisation solaire à « absorption » est l'une des techniques les plus utilisées pour le moment. Technologie encore jeune, elle ne présente pas de difficultés

à mettre en œuvre. Le principe est déjà largement utilisé dans nos réfrigérateurs à compression, il est simplement décliné pour le solaire. La seule contrainte que ce système impose, c'est de choisir des capteurs à tubes sous vide, ayant une meilleure inertie thermique que les capteurs plans.

Cette technologie permet d'atteindre des puissances disponibles de 35 à 5 000 kW.

a) Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une machine simple effet est le même que pour un système classique à compression, avec un fluide frigorigène qui se vaporise à basse température (production de froid) et se condense à plus haute température (rejet de chaleur). Le compresseur mécanique est remplacé par un compresseur thermo-chimique (desorbeur / absorbeur) qui utilise un couple réfrigérant / liquide absorbant (solution saline) et une source de chaleur motrice.

La solution saline (Cf. Figure II.6) à faible concentration d'absorbant est chauffée dans le désorbeur (ou générateur) grâce à la chaleur motrice, et libère de l'eau sous forme gazeuse, qui va se condenser dans le condenseur. La solution saline est ainsi concentrée. Le réfrigérant se vaporise dans l'évaporateur et est absorbé par la solution concentrée dans l'absorbeur. L'absorption est un phénomène exothermique, qui est défavorisée par une haute température. C'est pourquoi un dispositif (généralement une tour de refroidissement humide) est utilisé pour évacuer la chaleur générée dans l'absorbeur et dans le condenseur.

Un échangeur de chaleur entre l'absorbeur et le désorbeur existe afin de préchauffer la solution froide venant de l'absorbeur et refroidir la solution en sortie du générateur. Le cycle de la machine à absorption est basé sur le fait que la température d'ébullition d'un mélange est plus haute que celle d'un liquide pur.

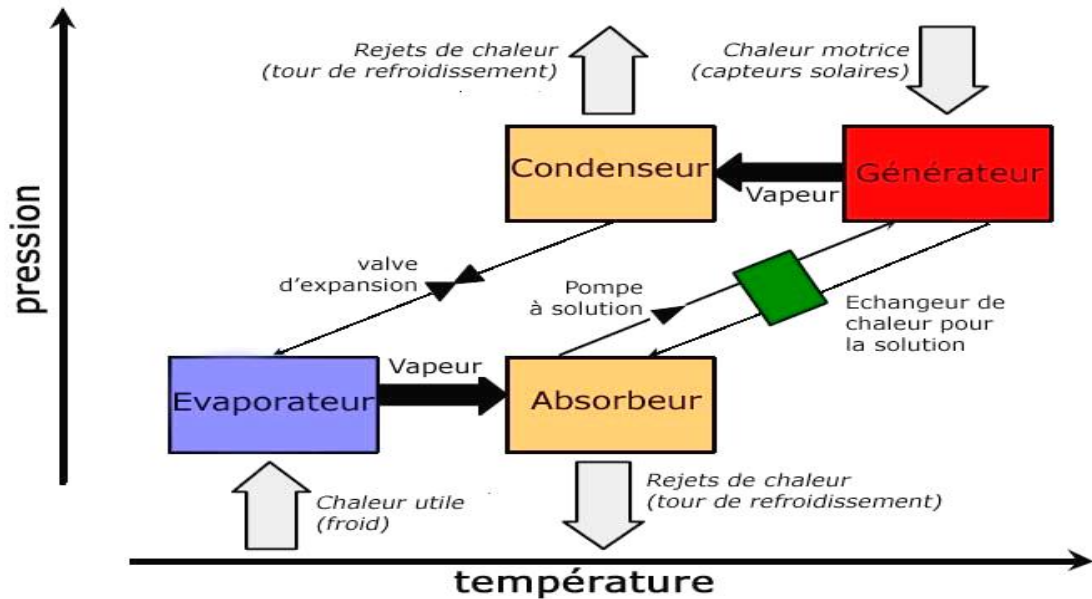


Figure II.6 Schéma de fonctionnement du cycle absorption à simple effet [18]

b) Détermination du coefficient de performance COP [27]

Pour estimer le COP d'une machine à absorption simple effet, on définit le coefficient de performance d'une machine à absorption comme le rapport entre la puissance utile et la puissance consommée (mécanique+thermique).

- ❖ Puissance consommée = Q_{bouil} (puissance fournie au niveau de bouilleur) + Q_P (Puissance de la pompe).
- ❖ Puissance utile = Q_{evap} (froid utile au niveau de l'évaporateur).

Pour cela, nous utilisons souvent deux bilans : le bilan massique et le bilan enthalpique .

Soient q_{mf} , q_{ma} , q_{mg} et X_f , X_d , X_c respectivement les débits massiques et les titres massiques du frigorigène, de la solution diluée de la solution concentré.

Bien évidemment ces titres massiques du frigorigène sont reliés aux titres massiques d'absorbant par :

➤ Bilan massique

Soient m_f , m_a , m_g et X_f , X_d , X_c respectivement les débits massiques et les titres massiques du frigorigène, de la solution diluée de la solution concentré.

Bien évidemment ces titres massiques du frigorigène sont reliés aux titres massiques d'absorbant par :

$$q_{mf} + q_{mg} - q_{ma} = 0 \quad (\text{bilan global de la solution}) \quad (\text{II.1})$$

$$q_{mg} \cdot X_c - q_{ma} \cdot X_d = 0 \quad (\text{bilan frigorigène}) \quad (\text{II.2})$$

On déduit une expression de m_g et de m_a en fonction de m_f et des différents titres en frigorigène.

$$q_{ma} = q_{mf} \frac{X_c}{X_c - X_d} \quad (\text{II.3})$$

$$q_{mg} = q_{mf} \frac{X_d}{X_c - X_d} \quad (\text{II.4})$$

➤ **Bilan enthalpique**

On effectue les bilans enthalpiques sur chaque composant échangeant de la chaleur ou du travail avec le milieu extérieur :

$$\text{On a } Q_a + Q_c = Q_e + Q_g \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Condenseur : } Q_c = q_{mf} (h_1 - h_7) = q_{mc} C_p (T_{ch,sor} - T_{ch,ent}) \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Evaporateur : } Q_e = q_{mf} (h_3 - h_2) = q_{mr} C_p (T_{r,sor} - T_{r,ent}) \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Générateur : } Q_g = q_{mf} \cdot h_7 + q_{mg} \cdot h_8 - q_{ma} \cdot h_6 = q_{mc} \cdot L_v \quad (\text{II.8})$$

$$\text{Absorbeur : } Q_a = q_{ma} \cdot h_4 - q_{mf} \cdot h_3 - q_{mg} \cdot h_{10} = q_{mc} C_p (T_{a,sor} - T_{a,ent}) \quad (\text{II.9})$$

$$\text{Pompe : } W = q_{ma} \cdot (h_5 - h_4) \quad (\text{II.10})$$

On détermine aussi :

➤ **Débit spécifique de solution (Taux De Circulation)**

Le débit spécifique de solution (FR), qui est le rapport des flux massiques de la solution riche (ma) refoulée par la pompe et de vapeur (mf) désorbée au générateur, s'écrit :

$$FR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{X_c}{X_c - X_d} \quad (\text{II.11})$$

D'où :

X_c : le titre de la solution concentrée quittant le générateur pour rejoindre l'absorbeur.

X_d : le titre du mélange binaire riche en fluide frigorigène quittant l'absorbeur pour rejoindre le générateur.

➤ **La plage de dégazage**

La différence ($X_c - X_d$) est appelée la plage de dégazage on la note (ΔX)

$$\Delta X = X_c - X_d \quad (\text{II.12})$$

On utilisant les équations précédentes, on peut exprimer le coefficient de performance (COP)

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{evap}}}{Q_{\text{des+w}}} = \frac{q_{\text{mf}} \cdot (h_3 - h_2)}{q_{\text{mf}} \cdot h_7 + q_{\text{mg}} \cdot h_8 + q_{\text{ma}} \cdot (h_5 - h_4 - h_6)} \quad (\text{II.13})$$

$$\text{COP} = \frac{q_{\text{mf}} \cdot (h_3 - h_2)}{q_{\text{mf}} \cdot \left(h_7 + \frac{X_d}{X_c - X_d} \cdot h_8 - \frac{X_c}{X_c - X_d} \cdot (h_5 + h_4 - h_6) \right)} \quad (\text{II.14})$$

$$\text{COP} = \frac{\Delta x \cdot (h_3 - h_2)}{\Delta x \cdot h_7 + x_d \cdot h_8 - x_c \cdot (h_5 - h_4 - h_6)} \quad (\text{II.15})$$

Le COP d'une machine à absorption généralement rencontrés $0,5 < \text{COP}_{\text{froid}} < 0,7$

c) Les avantages de l'absorption

- Consommation d'électricité divisée par 20 par rapport aux machines à compression mécanique

- Le fluide frigorigène est inoffensif
- Nuisance sonore du compresseur supprimée
- Absence de pièce mécanique en rotation donc d'usure prématurée

d) Inconvénients de l'absorption

- Le principal inconvénient de ces groupes à absorption est leur coût à l'investissement beaucoup plus élevé que pour un groupe à compression mécanique traditionnel équivalent.

e) Les rendements [11]

Dans un système de climatisation solaire à « *absorption* », on fait face à deux types de rendements :

- **Le rendement thermique** : comme tous les appareils dédiés à faire du froid, la climatisation solaire à un coefficient de performance (COP). Ce COP est défini comme le rapport de la puissance de froid, divisée par la puissance de chauffe nécessaire. On atteint des COP de 0,7 dans des systèmes mono étages, des COP supérieurs à 1 pour des systèmes multi étages. Toutefois, les températures d'entrée dans l'évaporateur augmentent dans les systèmes multi étages (130 – 160°C pour 80 – 110°C dans les systèmes mono étages).

- **Le rendement des capteurs solaires** : en général, pour les capteurs solaires thermiques (chauffe-eau solaire), le rendement baisse lorsque la température du capteur monte. Dans le cas d'une installation de refroidissement à absorption, en revanche, le rendement augmente lorsque la température de chauffage monte. Tout l'art de développer des concepts performants réside donc dans le choix de meilleurs capteurs (à tubes sous vide) qui conduisent à une réduction au minimum des dépenses en énergie solaire primaire.

En conclusion

Un système solaire à haute température sera plus performant pour le fonctionnement d'une installation de refroidissement par « *absorption* ».

II.3.3.2 La climatisation solaire par adsorption [11]

Le système à « *adsorption* » est un système qui fonctionne en circuit fermé mais qui utilise dans ce cas, un moyen de sorption solide, le gel de silice. Contrairement aux systèmes à « *absorption* » qui peuvent développer des puissances allant jusqu'à 5 000 kW, une climatisation solaire à « *adsorption* » se limite dans des puissances de 50 à 430 kW.

a) Mode de fonctionnement du cycle réfrigérant

Le dispositif réfrigérant à « *adsorption* » se compose d'un récipient sous vide, subdivisé en quatre chambres. Deux des chambres sont remplies d'un sorbant du gel de silice. Le réfrigérant est tout simplement de l'eau.

Dans la première chambre, l'évaporateur (1), le réfrigérant s'évapore sous basse pression et à basse température. La chaleur d'évaporation nécessaire est extraite de l'eau à refroidir.

Dans la seconde chambre, le désorbeur (2), alimenté par la chaleur solaire des capteurs à environ 80°C, l'échangeur de chaleur est un serpentin de cuivre enrobé de gel de silice qui remplit la chambre. La chaleur solaire « chasse » le réfrigérant absorbé par le gel de silice.

Dans la troisième chambre, l'accumulateur ou « adsorbant » (3), la vapeur d'eau est adsorbée par le gel de silice qui enrobe le serpentin de cuivre, comme dans la seconde chambre. La chaleur qui en résulte est évacuée vers une tour de réfrigération. Il y a donc un échange entre la chambre deux (le désorbeur) et la chambre trois (l'adsorbant) après chaque cycle de réfrigération/chauffage.

La quatrième chambre supérieure est le condenseur (4). Le réfrigérant y est condensé, puis conduit dans l'évaporateur.

Toutes les chambres sont reliées par des vannes à clapet, actionnées automatiquement par les écarts de pression dominants, de sorte qu'un processus circulaire périodique fermé s'établit. La chaleur perdue peut éventuellement être récupérée. Le cycle total dure environ sept minutes avec un passage de vingt secondes lors de la phase de transition de flux entre deux chambres, de sorte que la chaleur est récupérée.

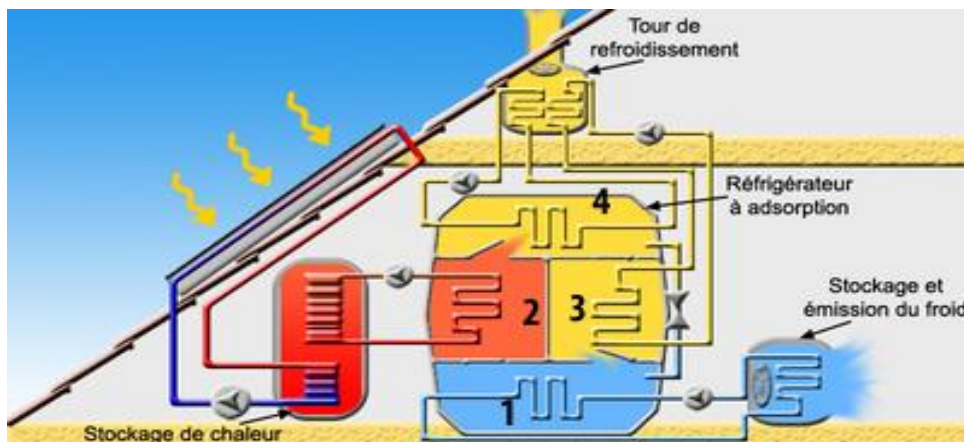


Figure II.7 Schéma de principe d'une climatisation à adsorption [11]

b) Diagramme d'Oldham

C'est le diagramme le plus utilisé et le plus pratique pour une étude du cycle de l'adsorbant. Il donne la teneur de l'adsorbant en fluide frigorigène (isostères) en fonction de la température et de la pression.

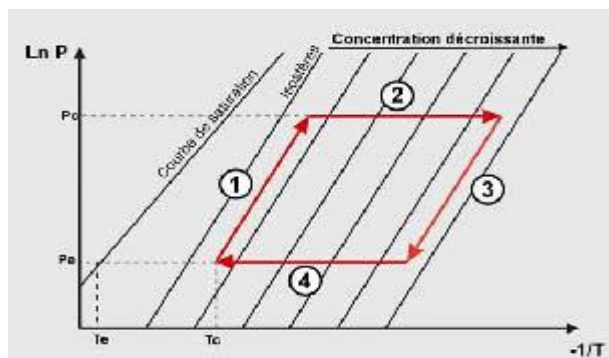


Figure II-8 diagramme d'Oldham [1]

- **ETAPE 1: Chauffage et compression thermique**

La chambre d'adsorption droite (dont l'adsorbant est saturé de vapeur de fluide frigorigène) est isolée et reçoit de la chaleur. La température de l'adsorbant augmente ainsi que sa pression.

- **ETAPE 2: Chauffage et désorption + Condensation**

La chambre d'adsorption droite continue de recevoir de la chaleur tout en étant connecté au condenseur. La température de l'adsorbant continue d'augmenter ce qui induit la **désorption de la vapeur**. Cette vapeur désorbée à haute pression est liquéfiée dans le condenseur grâce à la circulation d'une eau de refroidissement ($\approx 30^{\circ}\text{C}$) qui correspond à la **Source Chaude**.

- **ETAPE3 : Refroidissement et baisse de pression**

La chambre d'adsorption gauche (sans vapeur de fluide frigorigène) est isolée être refroidie par l'eau de refroidissement. La température de l'adsorbant diminue ce qui induit une baisse de pression. **Équivalent de la détente** pour les machines frigorifiques traditionnelles.

- **ETAPE 4: Refroidissement et adsorption + Evaporation**

La chambre d'adsorption gauche continue de libérer de la chaleur tout en étant connectée à l'évaporateur ce qui y impose sa basse pression. La température de l'adsorbant continue de diminuer, ce qui induit l'adsorption de la vapeur (qui est exothermique). Cette vapeur adsorbée provient de la vaporisation effectuée dans l'évaporateur. **La chaleur de vaporisation est prélevée à la Source Froide** (ici, l'eau à refroidir).

- c) **Les avantages d'une climatisation à adsorption**

C'est un système assez simple de conception avec peu de pièces en mouvement (seulement les vannes à clapet). C'est un système aux frais de fonctionnement économiques si on le compare à une climatisation traditionnelle. En cas d'arrêt brutal du système, cela n'entraîne aucun dégât et le redémarrage est très facile.

Au démarrage, la température de refroidissement est atteinte en deux minutes. La température d'entrée de l'eau chaude peut atteindre 100°C sans porter préjudice au système. On peut facilement atteindre des températures de 5°C au niveau de l'eau froide, ce qui est largement suffisant pour une climatisation. La combinaison de gel de silice comme adsorbant et l'eau, comme réfrigérant, protège l'environnement. Le gel de silice ne vieillit pas et se régénère pendant les cycles de fonctionnement sans aucune perte d'adsorption.

d) Inconvénients de l'adsorption

- Les groupes à adsorption sont plus chers, plus lourds et plus volumineux que les groupes à absorption et leur choix moins grand.
- Rejets à haute température dans l'atmosphère
- Production du froid discontinue
- Encombrement matériel

e) L'efficacité énergétique ou COP_{froid} [1]

On note tout de suite que la valeur du COP_{froid} d'une machine à adsorption est très inférieure à celui d'une machine à compression mécanique traditionnelle. Cependant, la valeur du COP_{froid} est essentiellement en fonction de l'énergie calorifique apportée aux chambres d'adsorption pour la régénération de l'adsorbant (l'énergie nécessaire au fonctionnement des circulateurs étant faible par rapport à Q chambre adsorption). Ces valeurs de COP_{froid} données ci-dessus sont à prendre entre guillemets car ils correspondent à des machines à adsorption fonctionnant avec des énergies non renouvelables et non gratuites. Or dans le cas d'une machine frigorifique solaire à adsorption cette énergie calorifique est en majeure partie gratuite car venant de l'eau chaude solaire. Le graphique ci dessous permet de visualiser l'évolution du COP pour une machine à adsorption et une machine à absorption en fonction de la température de l'eau chaude solaire assurant l'apport calorifique nécessaire au fonctionnement d'un groupe à absorption comme d'un groupe à adsorption.

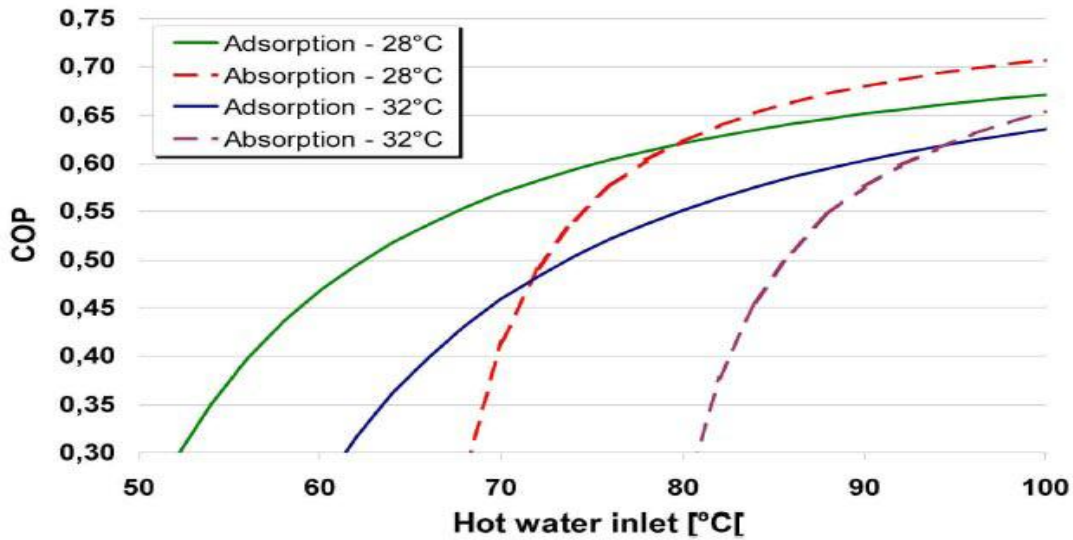


Figure II.9 l'évolution de COP pour une machine à adsorption et une machine à absorption [1]

Il y a 2 courbes tracées pour chaque type de groupe de production frigorifique. Elles correspondent chacune à une température donnée de l'eau de refroidissement du condenseur. On voit dans les 2 cas que le COP est amélioré si l'on a une température d'eau de refroidissement plus basse au condenseur. En effet, la condensation se réalisera de manière plus complète.

La deuxième observation que l'on peut faire sur ce graphique est que le COP d'une machine à adsorption est comparable à celui d'une machine à absorption pour une température d'eau chaude élevée. Cependant, on remarque également qu'il est possible d'utiliser un groupe à adsorption dès 55°C avec un COP relativement correcte alors que pour obtenir un COP comparable avec une même température d'eau de refroidissement au condenseur pour un groupe à absorption, il faut pouvoir fournir une eau au moins égale à 70 °C. Il est donc possible d'utiliser de capteurs solaires thermiques plans pour le fonctionnement d'un groupe à adsorption. Ceci est le principal avantage de cette technologie vis à vis de l'absorption.

En conclusion, cette technologie est récente mais prometteuse pour le refroidissement des locaux du tertiaire. Cela peut être un très bon investissement pour des hôtels par exemple

II.3.3.3 La climatisation solaire par dessiccation : les systèmes ouverts [11]

Contrairement à la climatisation solaire produisant de l'eau froide dans un cycle de froid fermé, la climatisation solaire par dessiccation, est un système ouvert. C'est un système qui travaille directement par déshydratation et refroidissement de l'air. Il ne demande pas des températures d'entrée très élevées (45 à 95°C), et donc de simples capteurs plans peuvent suffire. Du fait que le réfrigérant (eau) est en contact direct avec l'atmosphère, on peut aussi utiliser des capteurs à air.

a) Principe de fonctionnement

Dans la climatisation solaire par dessiccation DEC, de l'Anglais « *Dessicant Evaporating Cooling* », on aspire l'air extérieur filtré et on le déshydrate avec une roue à sorption pour être ensuite pré-réfrigéré dans un système de récupération de la chaleur. Ensuite arrosé d'eau, celle-ci s'évapore, en prenant dans l'air la chaleur d'évaporation nécessaire et donc en refroidissant le milieu ambiant. On peut ainsi refroidir l'air jusqu'à 16°C.

Ce procédé fonctionne d'autant mieux que l'air est plus sec, d'où la déshydratation en amont.

b) Mode de fonctionnement du cycle réfrigérant

Dans ce procédé, la roue à sorption est le point central du système. Elle contient du gel de silice (silicagel), un déshydratant écologiquement neutre, fabriqué à base de silicium, et qui est bien connu de tous pour, entre autres, servir de déshumidificateur dans les emballages d'appareils électroniques (les petits sachets de granulés qu'on trouve au fond des boîtes des appareils photos, des téléphones portables, de la Hi-Fi, des téléviseurs).

L'air extérieur filtré (1) contient de la vapeur d'eau en suspension qui se fixe sur le gel de silice dans la roue à sorption (2) qui retient les molécules d'eau jusqu'à saturation. L'air ainsi asséché passe au travers d'un récupérateur de chaleur (3) qui va absorber les calories de l'air sec et ainsi le pré-réfrigéré. En faisant passer l'air dans un refroidisseur à eau (4), l'eau va absorber les calories restantes dans l'air avant que celui-ci soit propulsé dans le bâtiment à refroidir par un ventilateur (5).

Pour la saturation en eau du gel de silice de la roue à sorption, un second circuit inverse capte l'air retour réchauffé du bâtiment. On fait passer l'air dans un refroidisseur à eau (6) puis dans le récupérateur de chaleur (7). Grâce à l'approvisionnement en chaleur (8) provenant des capteurs solaires avec un niveau de température relativement faible (45 à 95°C), les molécules d'eau présentes dans le gel de silice dans la roue à sorption (9) sont chassées par la vapeur produite par le

réchauffement brutal de l'air refroidi (6 et 7) au contact de la chaleur solaire (8) et expulsées par le ventilateur (10) dans l'environnement ou dans un récupérateur. La roue à sorption est ainsi de nouveau prête à retenir la vapeur d'eau de l'air ambiant au prochain cycle frigorifique.

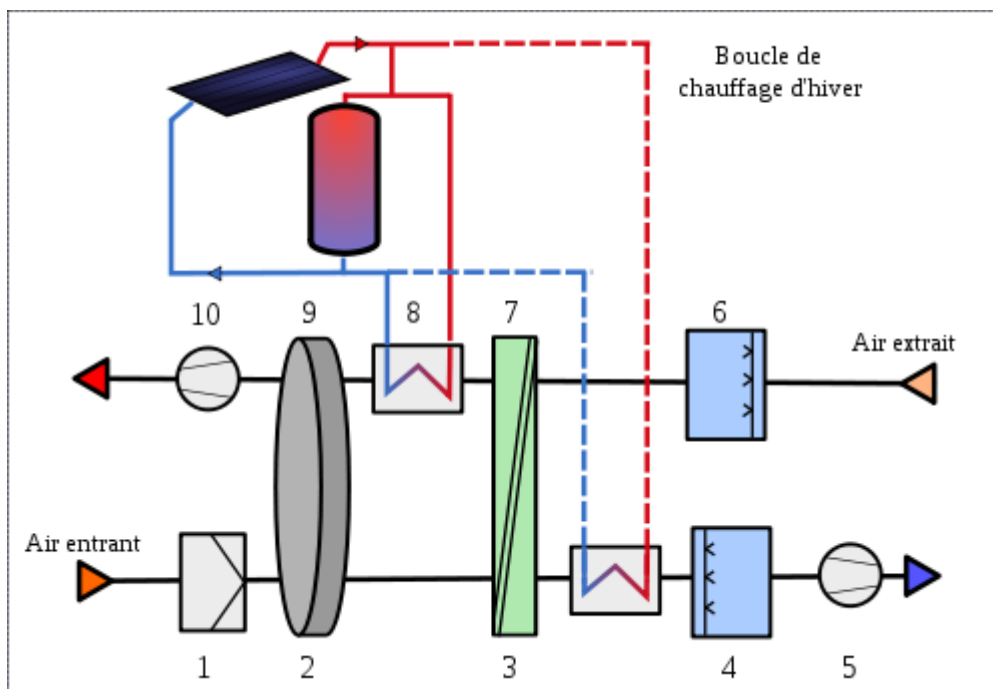


Figure II.10 Schéma de principe de la climatisation DEC [11]

Remarque

En hiver et dans les périodes de transition (printemps et automne), le système DEC fonctionne comme une climatisation traditionnelle à pompe à chaleur, en utilisant la roue à sorption (2) comme récupérateur de chaleur. L'installation solaire permet alors grâce à ses capteurs et un circuit de prolongement, de réchauffer l'air entrant (entre 3 et 4).

En conclusion

Les systèmes solaires DEC sont particulièrement efficaces en climat assez sec. Pour les régions humides, on se tournera vers un système solaire à « absorption » ou à « adsorption ».

II.4. La rentabilité de la climatisation solaire

Il est très rare que l'on installe des refroidissements de bâtiments, exclusivement solaires. Dans nos régions tempérées, les procédés solaires de climatisation peuvent être économiquement rentables si l'on utilise en complément des sources de chaleur bon marché, comme la chaleur perdue des appareils informatiques dans les

administrations, ou le chauffage géothermique urbain en été. Comme les coûts de la chaleur solaire sont plus élevés que ceux de la chaleur perdue, une certaine rentabilité est assez difficile à atteindre. Mais ces technologies sont nouvelles, elles ont besoin d'être développées... et peut être....

II.5 Quel système est le plus rentable ?

Parmi les systèmes que nous vous avons présentés dans ce dossier, la climatisation solaire DEC (DessicantEvaporatingCooling) est la plus proche de cet objectif de rentabilité. Mais comme nous l'avons dit, ce procédé est efficace dans les régions au climat assez sec.

La rentabilité économique sera plus difficile à atteindre avec un système à « *adsorption* », car les coûts d'investissement, y compris les périphériques nécessaires, sont environ deux fois supérieurs à ceux des installations de refroidissement classiques à compression. Le champ des capteurs cylindro-paraboliques qui concentrent bien l'énergie solaire, représente une installation volumineuse et un coût élevé à l'installation. Mais la fiabilité de l'ensemble (faible taux de pannes), l'absence de réfrigérants polluants (seulement de l'eau), font de cette technique un système écologiquement rentable.

Reste, les systèmes à « *absorption* » qui sont plus proches de notre classique réfrigérateur à compression et qui permettent de développer des installations jusqu'à 5 MW de puissance de froid (5 000 kW). Ils consomment très peu d'électricité, durent assez longtemps pour être rentable et demandent très peu d'entretien. De plus, la possibilité de créer des installations à plusieurs niveaux, permet d'atteindre des COP (Coefficient de Performance) supérieurs à 1. Le COP d'une installation à deux étages s'élève en moyenne à 1,4. Ainsi pour une puissance de froid de 100 kW, on n'a besoin que d'une puissance de chauffage de 71, 4 kW. On diminue ainsi la surface de capteurs solaires nécessaires. La grosse production de vapeur saturée à haute pression qui en résulte peut, en plus, d'alimenter le système de réfrigération, être utilisée à d'autres usages (approvisionnement en chaleur industrielle d'une blanchisserie par exemple).

II.6 Les capteurs solaires

Un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou collecteur solaire ou simplement capteur solaire) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide)

sous forme de chaleur afin de contribuer à la production d'eau chaude. Cette technologie est souvent confondue avec les panneaux photovoltaïques, qui eux transforment la lumière (les photons) en électricité.

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considérée, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre. Il faut choisir le type de capteurs qui correspond le mieux au niveau de température auquel on désire « travailler ».

II.6.1. Les capteurs solaires thermiques plans ou capteurs héliothermiques

Le capteur héliothermique, ou capteur plan, est un dispositif dont l'objectif est de capter la chaleur émise par le soleil.

Il consiste généralement en un coffre rigide et vitré à l'intérieur duquel une plaque et des tubes métalliques noirs (absorbeur) reçoivent le rayonnement solaire et chauffent un liquide caloporteur (antigel).

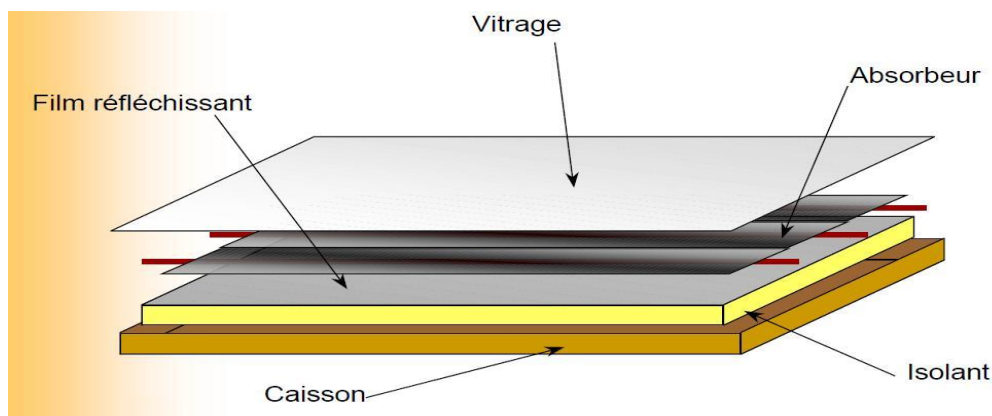


Figure II.11 schéma d'un capteur solaire plan [28]

Applications

L'application la plus courante du solaire thermique est le chauffe-eau solaire. On peut aussi recourir au solaire thermique pour le chauffage, soit par l'eau soit par l'air (solution la moins chère). Les systèmes solaires sont également utilisés pour le chauffage des piscines, les chauffe-eau des hôtels, des hôpitaux, le refroidissement de l'air ou de système remplaçant le chauffage (au lieu de l'air conditionné), le dessalement de l'eau de mer dans les endroits où l'eau potable est rare.

II.6.2 Les capteurs solaires thermiques à air

Ils sont principalement utilisés pour les chauffages des locaux. Ces capteurs peuvent être utilisés également dans les installations de climatisation par dessiccation. Le principe de fonctionnement est le même mis à part qu'il n'y a pas de pompe de circulation mais des ventilateurs permettant de faire circuler l'air.

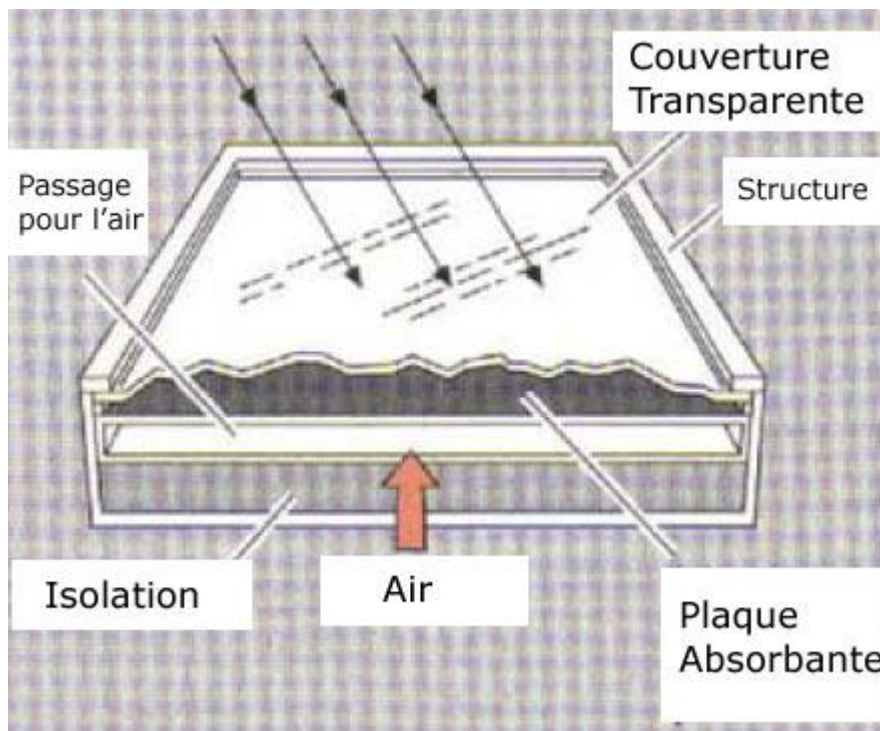


Figure II.12 Vue générale d'un capteur solaire à air [24]

II.6.2.1 Les principaux avantages des capteurs solaires à air

- L'absence de risque de gel en hiver.
- L'absence de surchauffe en été.
- Leur simplicité.

II.6.2.2 Les principaux inconvénients

- La consommation électrique des ventilateurs qui est plus importante que celle des pompes pour des capteurs liquides.
- L'efficacité d'un tel capteur est moins bonne que celle d'un capteur à eau.
- Il n'existe pas de stockage adapté.

II.6.3 Les capteurs solaires sous-vide

Un capteur solaire sous-vide est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique.

Dans les capteurs solaires sous-vide, les tubes sont mis sous-vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur, et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection.

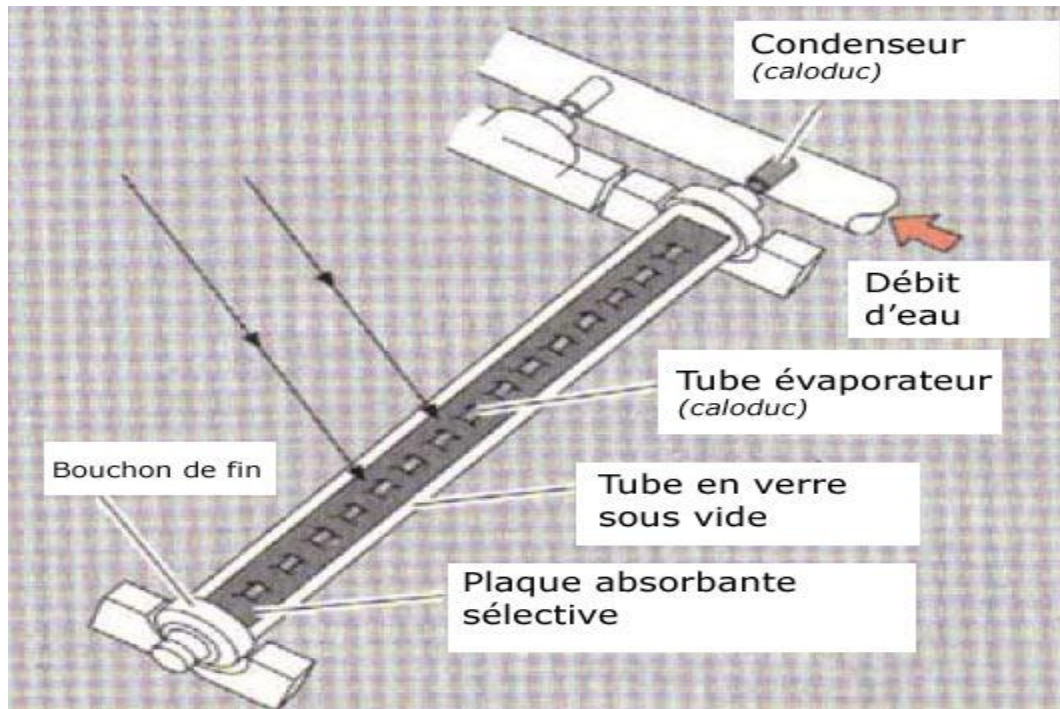


Figure II.13 Capteur à tube sous vide [24]

Il existe 4 familles de capteurs à tubes sous vide. Chacune d'entre elles possède un fonctionnement technique spécifique :

- Le capteur à tube sous vide à circulation directe
- Le capteur à tube sous vide à Caloduc
- Le capteur à tube sous vide à effet Thermos
- Le capteur à tube sous vide "Schott"

II.6.3.1 Avantage des capteurs solaires à tubes sous vide

- Réduction de surface de 25%,
- Pas d'inertie,
- Autolimitation de température, pour une installation pérenne,
- Orientation maximale plein sud, le tube pivote sur son axe,
- Peu de prise au vent,
- Garantie de fonctionnement même en cas de destruction accidentelle d'un tube,
- Facilité d'installation,

- Faible poids de chaque composant,
- Pas de contrainte mécanique sur les tubes,

II.6.3.2 Performance des capteurs solaires sous-vide

Le rendement de capteurs sous-vide est généralement meilleur que celui d'un capteur plan, surtout à des températures élevées ($>60^{\circ}\text{C}$). Mais attention, les surfaces utiles d'un capteur à tubes sous vide et d'un capteur plan sont difficilement comparables.

II.6.4 Les capteurs solaires à concentration

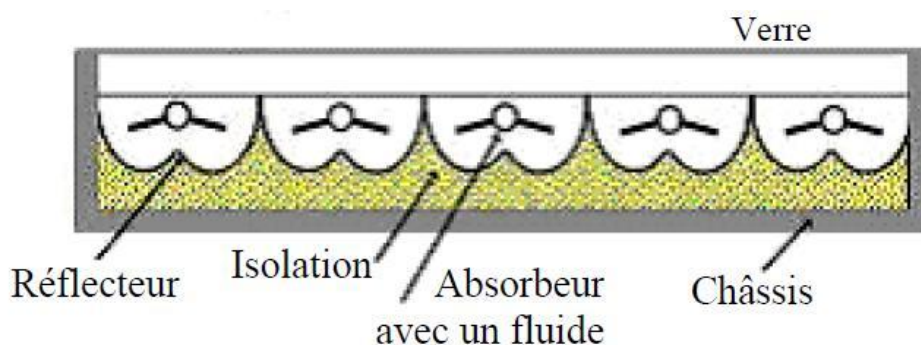


Figure II.14 Vue générale d'un C.S à concentration [24]

Ces capteurs sont de même type que les capteurs plans, mais ils concernent les rayons de soleil sur les absorbeurs à l'aide de réflecteur disposé en son face. Ces capteurs sont très efficaces lorsque l'ensoleillement est très fort, mais ils perdent rapidement son efficacité lors des ensoleillements moindres.

Les centrales thermiques solaires permettent de produire de l'électricité en transformant l'énergie solaire en énergie mécanique puis en énergie électrique (turbine).

II.7 Étude technico-économique [29]

II.7.1 Méthodologie de l'évaluation comparative pour les systèmes climatisation solaire

Un système de refroidissement solaire se compose de trois blocs principaux : le champ solaire, l'équipement de refroidissement et le stockage.

Le choix de l'application de refroidissement solaire la plus appropriée n'est pas une tâche simple. Par conséquent on désigne deux index pour ranger des technologies de refroidissement solaires : le coût de génération de froid et l'efficacité globale.

II.7.2 Evaluation technique des systèmes de climatisation solaire

Les combinaisons possibles des technologies de refroidissement solaire sont présentées dans la figure II.15. Comme on le voit, les principaux éléments constitutifs d'un système de refroidissement solaire sont, le champ solaire, les équipements de refroidissement et les équipements de stockage. Dans la figure II.15 chaque technologie de captation de solaire est combinée avec la meilleure technologie de refroidissement qui pourrait s'interfacer avec elle en se basant sur les températures de fonctionnement.

II.7.2.1. Capteurs solaires photovoltaïques

L'efficacité des capteurs solaires est évaluée en fonction de leur type.

Les capteurs plans (CP) et capteurs à tubes sous vide (CT) disposent d'un espace important favorisant des pertes thermiques à la zone d'ouverture et leur performance est fortement affectée par les variations des conditions ambiantes. Les cellules photovoltaïques (PV) sont aussi affectées par les conditions ambiantes.

Tous les chiffres de performance nécessaires pour la simulation des capteurs solaires sont basés sur les données des fabricants et des données de test standard

II.7.2.1.1 Évaluation des performances des capteurs plans et les capteurs à tubes sous vide

Le rendement thermique des CP et des CT déterminé en utilisant la relation suivante [29]:

$$\eta = A * (I_t * IAM * \eta_0 - c * (T_a - T_\infty) - C_2 * (T_a - T_\infty)^2) \quad (\text{II.16})$$

L'irradiation solaire sur la surface inclinée du collecteur doit être évaluée pour chaque heure de l'année. Différents modèles sont disponibles pour estimer l'irradiation totale sur une surface inclinée, nous utilisons le modèle de Hay Davies [1] notée par l'équation (II.17) ci-dessous:

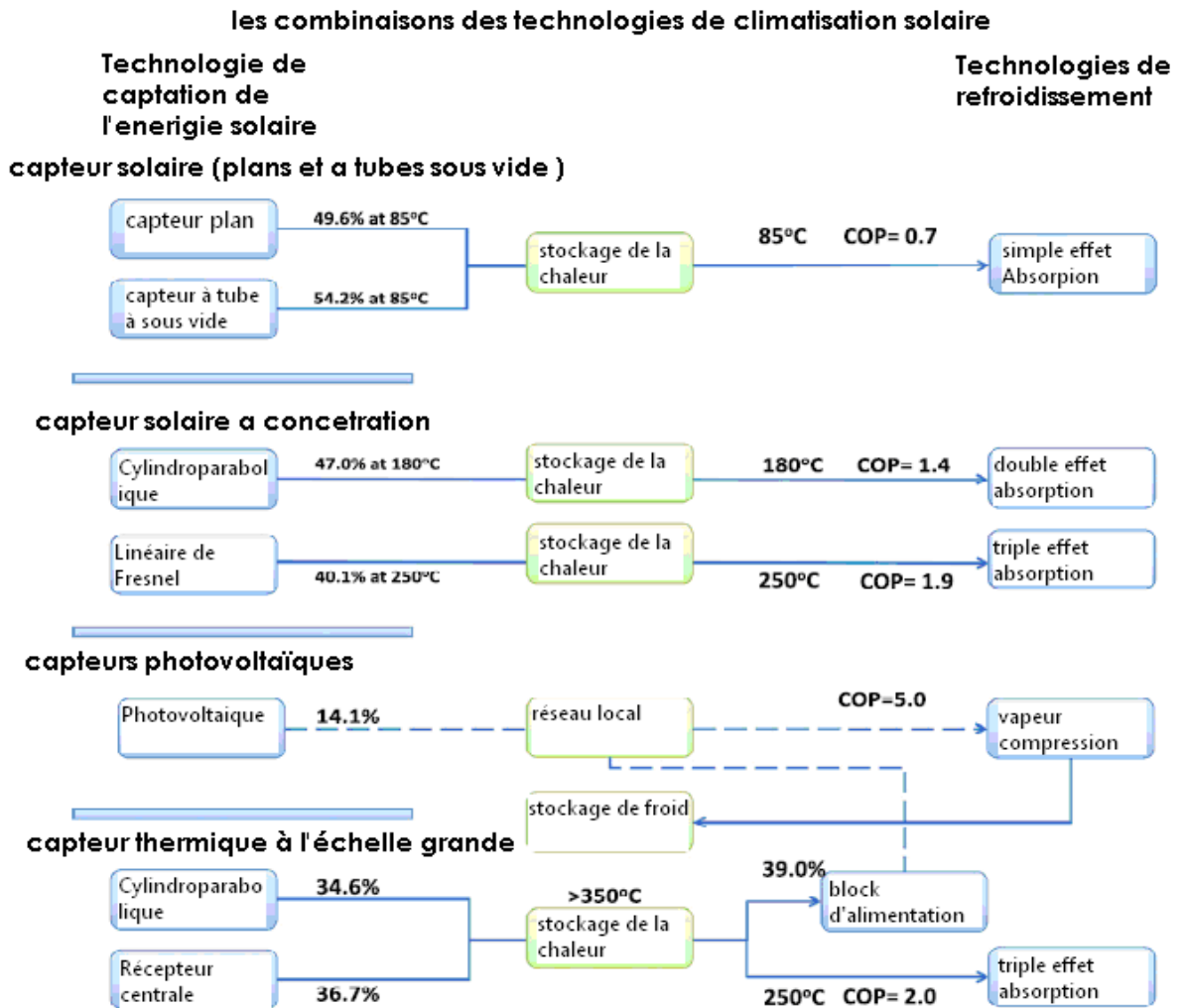


Figure II.15 : Les combinaisons des technologies solaires possibles [29].

$$I_t = (I_b + I_b A)R_b + I_b(1 - Ai) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II.17})$$

R_b est proposé par l'équation:

$$R_b = \frac{\cos \varnothing}{\cos \varnothing_z} \quad (\text{II.18})$$

Où \varnothing est l'angle d'incidence de l'irradiation du faisceau sur la surface inclinée et \varnothing_z est l'angle zénithal solaire.

I.7.2.1.2. Evaluation des performances des cellules photovoltaïques

Performance des cellules photovoltaïques est affectée par la température de la cellule. Le rendement de conversion se trouve en évaluant les deux équations

suivantes, la première équation représente la variation du rendement des cellules avec la température de la cellule, et la deuxième équation est utilisée pour évaluer la température de la cellule:

$$\eta = \dot{\eta}(1 - \beta(T_{cell} - T_{STC})) \quad (II.19)$$

$$T_{cell} = T_a + \frac{\tau\alpha_0 * IAM * I_t - I_t * \eta}{2 * h_0} \quad (II.20)$$

T_{STC} : est la température à des conditions d'essai normalisées =25 c°.

T_{cell} : est la température des cellules.

II.7.3 Équipement de refroidissement

Analogues à la filière solaire, les performances des équipements de refroidissement sont affectées par les conditions ambiantes. La variation du COP avec la température ambiante est considérée comme le principal facteur.

Dans les climats secs où la principale source d'eau est le dessalement c'est un avantage majeur. Il convient toutefois de noter que le refroidissement de l'air n'est pas nécessairement la meilleure technologie de rejet de chaleur en particulier pour les applications solaires de refroidissement. Une enquête approfondie doit être effectuée avant de décider de la méthode de rejet de chaleur. Cela devrait représenter le coût réel de l'eau associé à des tours de refroidissement humides, d'une part et l'amélioration potentielle de l'efficacité d'autre part.

II.7.3.1 L'énergie auxiliaire de la machine

Un autre facteur important pris en compte pour l'équipement de refroidissement est la puissance électrique auxiliaire nécessaire pour faire fonctionner les machines à absorption. L'énergie est principalement consommée par les ventilateurs de la tour refroidissement par voie sèche. Évidemment, cette demande d'énergie varie en fonction de la technologie de la machine et la performance du condenseur refroidi par air, l'énergie auxiliaire nécessaire par le refroidisseur est estimée par l'équation. (II.21). L'équation estime la quantité d'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner la tour refroidissement par voie sèche. Ce pouvoir est lié à la quantité de

chaleur rejetée par le refroidisseur et l'efficacité de la tour de refroidissement à différentes températures ambiantes.

$$P_{electric} = (\eta_{fluide_{refroidisseur}} \left(1 + \frac{1}{COP}\right) * (0.04681 * DTI - 0.04019)) \quad (II.21)$$

Nous supposons que chacune des configurations de refroidissement solaires comprend suffisamment de panneaux photovoltaïques pour produire de l'énergie auxiliaire nécessaire. Par conséquent mettant toutes les configurations sur un pied d'égalité puisque les besoins en énergie auxiliaire est différent. En d'autres termes, nous supposons que la quantité annuelle d'énergie auxiliaire est de 100% prise en charge par des cellules photovoltaïques connectés au réseau, dont le cop est inclus dans le coût final du système; cette hypothèse renforce l'autonomie du système que nous sommes idéalement cibler ainsi que de faire une comparaison équitable entre toutes les configurations de refroidissement solaire.

Dans le dimensionnement de la zone auxiliaire, il est supposé que la production totale d'électricité à partir du champ travers l'année est égale à la demande totale d'électricité, ce qui implique la quantité négligeable de stockage saisonnier dans la grille uniquement pour l'alimentation auxiliaire.

II.7.4 Evaluation comparative des technologies de réfrigération solaire

Le coût élevé de l'utilisation de l'énergie solaire a toujours été le principal obstacle à un large déploiement des technologies solaires. En moyenne, l'investissement de capitaux, Capex représente plus de 85% du coût de la production du froid, CCG. Les contributions des composants principaux du coût en capital sont représentées dans la figure (II.16).

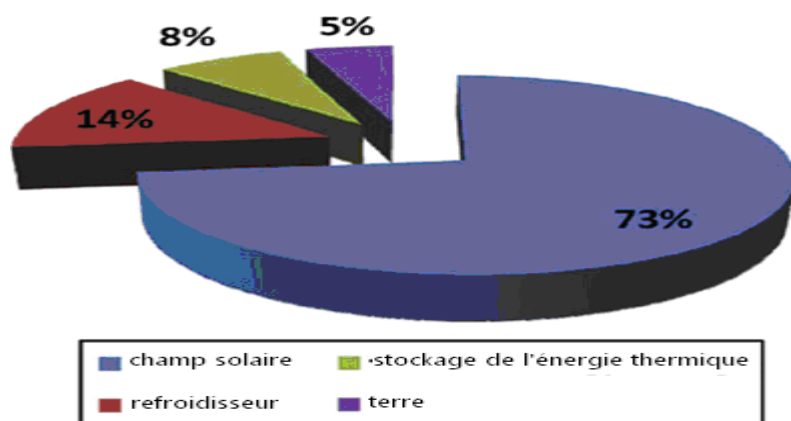


Figure II.16 Moyenne des Capex panne, (coût du terrain considéré est du désert d'Abu Dhabi) [29].

L'efficacité globale est le rapport entre la puissance de refroidissement et l'entrée solaire incidente sur la superficie totale des terres consommées par le champ solaire. Ainsi OE prend en compte à la fois la performance de l'ensemble du système ainsi que l'utilisation des terres. L'efficacité globale représente donc la quantité de refroidissement que chaque technologie produit par chaque mètre carré de terrain, et non de capteur. Ainsi OE représente les facteurs des différents types de capteurs solaires. Figure II.17 représente l'efficacité globale de toutes les technologies de refroidissement considéré.

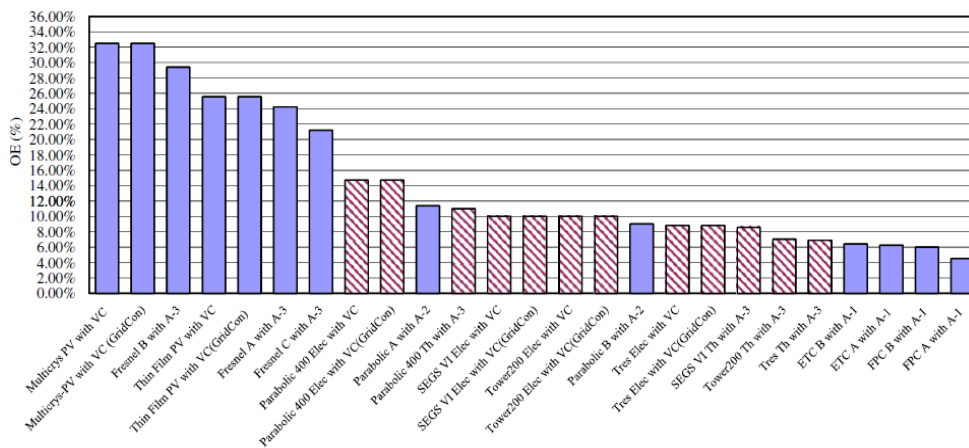


Figure II.17 Annuelle moyenne d'efficacité globale (barres hachurées représentent des options à grande échelle, où: Tres, SEGS VI, Tour Est 200, et 400 paraboliques sont les noms de ces installations) [29].

II.8 Conclusion

Dans ce chapitre, une recherche bibliographique concernant les technologies de réfrigération solaire a été présentée.

Jusqu'à aujourd'hui, le plus gros problème avec la climatisation solaire électrique est le prix élevé du panneau solaire électrique. Si un panneau solaire électrique de 10% d'efficacité est combiné avec une machine à compression de vapeur de COP=3, le rendement global sera de 30%. En supposant que le prix unitaire du panneau solaire électrique est 5 €/W, le panneau solaire électrique coûterait à lui seul 1667 € pour produire 333 W d'électricité et ce pour une capacité frigorifique de 1 kW.

Pour des capteurs solaires moins chers travaillant aux alentours de 90 °C, une machine à absorption à eau/bromure de lithium ou une machine à absorption ammoniac-eau avec un COP entre 0,6 et 0,8 peuvent être envisagées. Le prix d'un capteur solaire varie considérablement dans cette gamme de température. Le prix d'un capteur de 50% d'efficacité à 90 °C varie entre 300 et 600 €/m².

La réfrigération solaire permet d'économiser certainement une quantité substantielle de la consommation d'énergie primaire. Cela réduit la production de dioxyde de carbone et les pics de consommation d'électricité en été, qui est un avantage important pour l'environnement et l'économie nationale. Mais quand il s'agit de bénéfice financier, la situation n'est pas aussi encourageante.

À cet égard, le soutien politique et financier du gouvernement joue un rôle important pour la promotion des technologies solaires de réfrigération dans le secteur privé.

III.1 Introduction

La simulation d'un système de rafraîchissement solaire nécessite l'intégration de nombreux composants de type thermique, solaire ou encore thermodynamique. Le plus intéressant est la suppression de la mise en place de prototypes et de supports expérimentaux de testes coûteux.

Dans ce chapitre, on va étudier une simulation dynamique d'un système de rafraîchissement solaire intégrée à une maison, cette simulation sert à trouver des solutions économiquement tenant compte de la hausse des prix et l'épuisement des énergies fossiles et pour cela on a choisi deux installations de climatisation solaire, la première est une machine à compression de vapeur couplée avec un capteur solaire photovoltaïque et la deuxième c'est une machine à absorption couplée avec un capteur solaire sous-vide.

III.2 Description du TRNSYS

TRNSYS est un logiciel développé par le laboratoire « solarenergy » de l'université de WISCONSIN Madison. C'est un outil de simulation en régime dynamique multi zones, structuré de manière modulaire, ce qui assure au programme une grande flexibilité et facilité par l'insertion des sous-programmes.

Ce logiciel permet d'intégrer toutes les caractéristiques du bâtiment (emplacement, matériaux de construction utilisés, architecture globale...) afin de déterminer la consommation en énergie, le confort thermique, l'hygrométrie,...mais aussi des systèmes de chauffage/climatisation afin de réaliser des simulations thermiques dynamiques.

Ce programme est basé sur une approche modulaire qui permet de décomposer un problème complexe en sous problèmes plus simples.

Ce logiciel informatique, se caractérise par ses trois fonctions qui se résument comme suit :

- Les entrées (inputs):

Elles concernent toutes les informations à introduire et à stocker selon l'ergonomie du logiciel dans des bibliothèques que le concepteur peut utiliser. Ces entrées englobent l'environnement physique (climat, site), le bâtiment (l'enveloppe), les apports internes (occupants...) et les équipements « ventilation, chauffage, climatisation... »

- Le traitement des données : se fait en fonction d'un modèle de représentation du bâtiment et la demande de l'utilisateur.
- Les sorties (outputs): sont les ensembles des résultats qui peuvent être fournis par le logiciel à l'issue d'une exécution.

III.2.1 Utilisation du logiciel TRNSYS

Pour simuler le comportement thermique d'un bâtiment, il est nécessaire de disposer au moins trois composants. Le premier est relatif les données climatiques météorologiques, le second pour le calcul de l'ensoleillement de la paroi et le troisième traite les échanges de chaleur dans le bâtiment.

Ces trois composants nécessaires au lancement de la simulation sont identifiés dans TRNSYS par METONORM (fichier météo), le fichier TRNSYS STUDIO SIMULATION (interface graphique permettant de créer le modèle) et le fichier TRNBUILD (description du bâtiment).

III.2.1.1 METENORM

METEONORM permet de disposer pour TRNSYS, de données climatiques fiables et reconnues internationalement pour plus de 100 localisations en France au pas horaire et sur une année moyenne ou extrême. Si on ne dispose pas d'une station météorologique, METENORM peut calculer par interpolation entre différentes stations les conditions climatiques d'un lieu.

III.2.1.2 TRNSYS Simulation Studio

Simulation studio est l'interface d'accueil de TRNSYS permettant de développer des applications de simulation. Un projet de simulation consiste à choisir un ensemble de modules et à décrire ensuite les interactions entre ceux-ci.

Chaque module représente un sous programme et agit comme une boîte (qu'il est cependant possible d'ouvrir). On introduit pour chaque sous programme les différents paramètres, les variables d'entrée et de sortie.

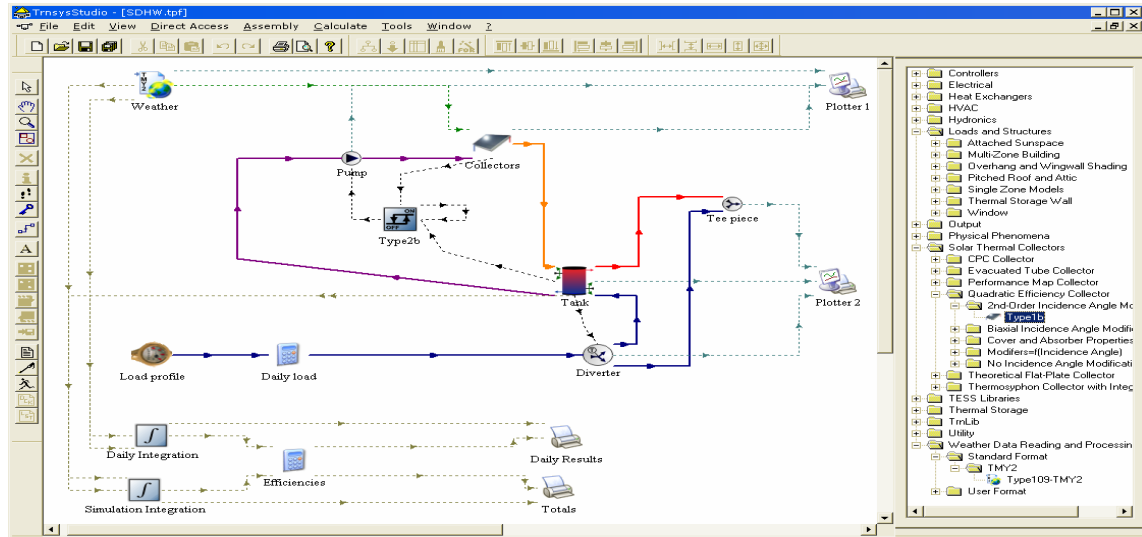


Figure III.1 TRNSYS simulation studio

III.2.1.3 TRNBuild

« TRNBuild » est un outil permettant d'introduire les caractéristiques d'un bâtiment multizone nécessaire à la simulation thermique de celui-ci. Ses propriétés sont introduites dans « TRNSYS simulation studio » via le module « type 56 » ainsi l'utilisateur décrit chaque zone thermique alternativement (les matériaux utilisés pour la construction des murs).

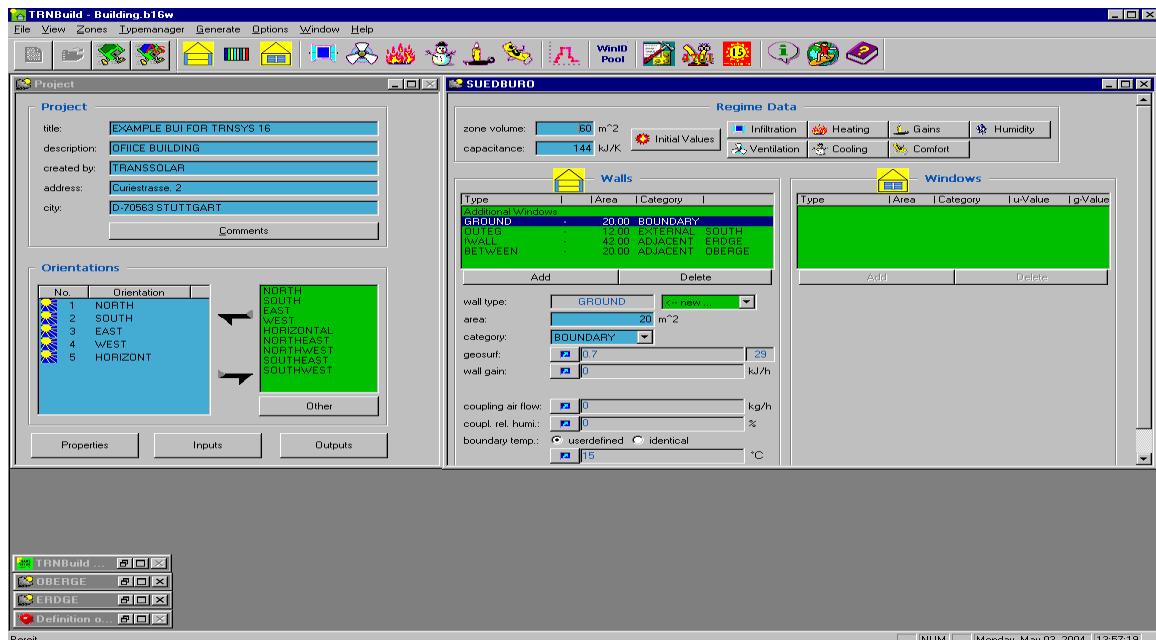


Figure III.2 L'installation de projet et la fenêtre de zones.

III.2.2 Les avantages du logiciel TRNSYS

Grâce à son approche modulaire, TRNSYS est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).

L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine. Une vaste documentation sur les sous-programmes y compris des explications, les usages usuels et les équations de base.

Une définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation.

III.3 Présentation de la maison

Dans notre étude, on a choisi une maison qui se compose d'un seul niveau de 80m² pour un volume de 240 m³, cette maison se trouve à Tlemcen située au nord-ouest de l'Algérie.

Le climat de Tlemcen de type méditerranéen, est caractérisé par deux saison :
- Une saison humide : qui s'étend d'Octobre à Mai avec des précipitations irrégulières et irrégulièrement réparties sur le territoire de la ville dans l'espace et dans le temps.

La température moyenne pour cette saison oscille généralement autour de 10° avec une température minimale absolue pouvant aller jusqu'à moins 6°.

- Une saison sèche : elle va du mois de Juin au mois de Septembre. La température moyenne de cette saison oscille autour de 26° avec un maximum pouvant atteindre 40°. La température moyenne annuelle est de 18°.

La figure III.3 présente une coupe de la maison :



Figure III.3 Coupe de la maison

III.3.1 Dimensionnement de la maison

La figure III.4 présente le plan de la maison utilisé dans notre simulation qui nous permet de calculer le volume et la capacité de chaque zone et qui sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

	Volume de zone (m ³)	Capacité(kj/kg)
Zone A (chambre)	36	43.2
Zone B (garage)	36	43.2
Zone C (w.c)	3	3.6
Zone D (s.d.b)	24	28.8
Zone E (hall)	36	43.2
Zone F(cuisine)	45	54
Zone G (séjour)	45	54

Tableau III.1 Les dimensions de la maison

Plancher	Béton_c600	0.100	0.79	0.88	600	1.499
	Mortier	0.03	4.15	0.84	2000	1.499
	Carrelage	0.03	6.14	0.7	2300	1.499

Tableau III.2 Les différents matériaux de composition de la maison

III.4 Simulation TRNSYS

Dans cette partie, on va simuler deux types d'installations de climatisation solaire à l'aide du logiciel TRNSYS :

La première utilise des capteurs photovoltaïques (qui transforment la lumière de l'énergie solaire « les photons » en électricité) et la deuxième utilise des capteurs thermiques sous-vides (transforme le rayonnement solaire en énergie thermique).

Avec cette étude, on va faire une comparaison technico-économique entre ces deux systèmes on variant la surface des capteurs utilisés pour voir la variation de la consommation de l'énergie utilisée durant une année.

III.4.1 La climatisation solaire thermique

La figure III.3 présente l'installation de la climatisation solaire thermique dans le logiciel TRNSYS simulation studio. Cette figure nous montre le principe de fonctionnement du système thermique qui consiste à collecter l'énergie solaire grâce à des capteurs thermiques sous-vide. Cette énergie est ensuite stockée dans un ballon de stockage et puis pompée à l'aide d'une pompe vers la machine à absorption passant par un chauffage auxiliaire qui permet d'ajouter la chaleur au fluide pendant le fonctionnement de cet appareil. Finalement, la machine à absorption produit l'eau glacée nécessaire pour la climatisation de la maison.

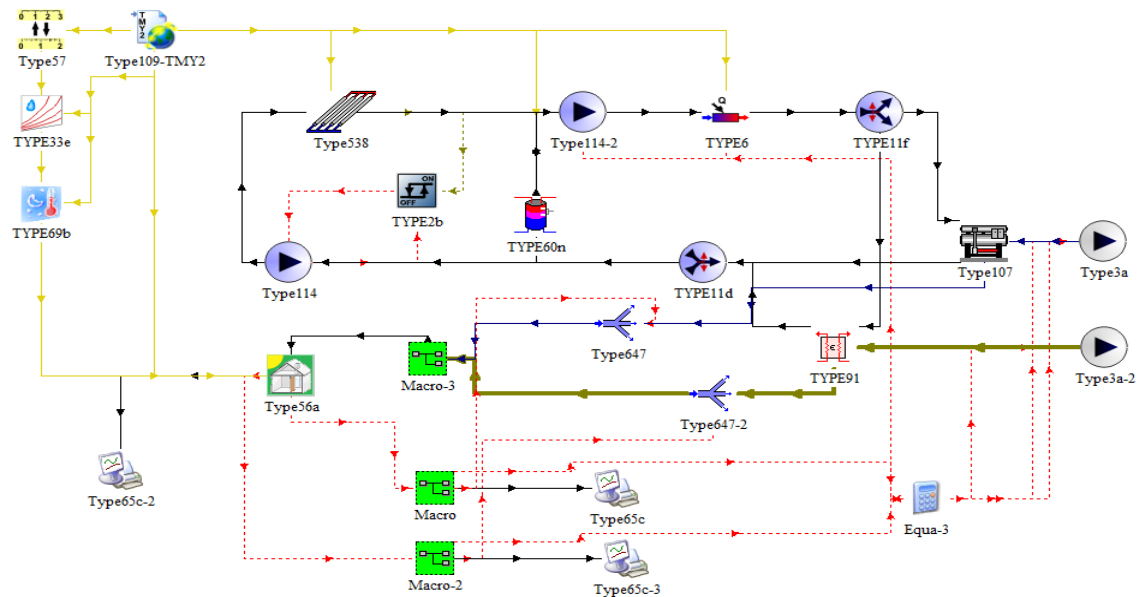


Figure III.5 Les composants de l'installation thermique

III.4.1.1 Description du rôle des composants de l'installation

III.4.1.1.1 Conditions météorologiques

Afin de conditionner le rayonnement solaire incident en analogie avec notre climat de la ville de Tlemcen, on utilise le « TYPE 109-TMY2 » représenté dans la figure III.5, ceci est utilisé pour calculer le rayonnement solaire sur le plan des capteurs solaires.

III.4.1.1.2 Système solaire

Quatre composants sont déjà ajoutés dans le système solaire : capteur solaire sous-vide, la pompe, ballon de stockage et le chauffage auxiliaire. Les composants sélectionnés sont les suivants :

1. Capteur solaire

Ce composant de « TYPE 538 » est un capteur solaire thermique sous-vide qui consiste à collecter l'énergie du soleil et la transformée en énergie thermique à l'aide du fluide caloporteur (transportant l'énergie).

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

Surfaces du champ [m ²]	60
Efficacité du capteur	0.78
Inclinaison du capteur [°]	40
Nombre en série	1

Tableau III.3 Paramètres du capteur solaire sous-vide

1. Ballon de stockage

Ce composant définit par le « TYPE 60n », il permet de stocker le fluide caloporteur à haute température.

2. Pompe

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

3. Chauffage auxiliaire

Ce composant de « TYPE 6 », il permet de d'ajouter la chaleur au fluide pendant la durée de fonctionnement de ce climatiseur.

III.4.1.1.3 Machine à absorption

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

III.4.1.1.4 construction de la maison

Ce composant définit par le « TYPE56 » modélise le comportement thermique d'un bâtiment multizones ayant jusqu'à 25 zones thermiques.

En raison de la complexité d'une construction multizone les paramètres de type 56 ne sont pas définis directement dans le fichier d'entrée TRNSYS. Au lieu de cela, deux fichiers sont attribués contenant le nécessaire l'information, la description de l'immeuble (*. BLD) et la fonction de transfert ASHRAE pour les murs (*. TRN).

A partir de quelques données de base du projet, l'utilisateur décrit chaque zone thermique à son tour. Enfin, les résultats souhaités sont sélectionnés. Toutes les

données saisies sont enregistrés dans un fichier de renforcement dite (*. BUI), un fichier de texte ASCII lisible. Le fichier BUI est très pratique pour vérifier les données saisies dans TRNBUILD.

III.4.1.2 Les types TRNSYS

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

Types	Nom de composant
Type 109	Conditions météorologiques
Type 538	Capteur à tube sous-vide
Type 107	Machine à absorption à simple effet
Type 647	Vanne de dérivation
Type 60n	Ballon de stockage
Type 3a	Fan sans effets de l'humidité
Type 2b	régulateur
Type 114	pompe à vitesse constante
Type 11f	déviateur
Type 91	échangeur de chaleur à efficacité constante
Type 6	Chauffage auxiliaire
Type 56a	Bâtiment multizones et TRNBUILD

Tableau III.4. Les types TRNSYS

III.4.1.3 Résultats et interprétations

A l'aide de ce logiciel, on a fait une simulation et les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux (III.6, III.7, III.8, III.9). Le premier tableau donne la variation de l'énergie consommée par les deux pompes, le deuxième présente l'énergie perdue par le ballon de stockage, le troisième donne la variation de 'l'énergie du capteur, l'énergie auxiliaire et l'énergie totale' pendant une année, et le dernier tableau présente la variation de la fraction solaire.

L'illustration des résultats est représentée par

1) La variation de l'énergie des deux pompes

Mois	Energie consommé par la pompe 1	Energie consommé par la pompe 2
Janvier	6,30E+03	1,42E+04
Février	6,10E+03	1,14E+04
Mars	7,70E+03	7,58E+03
Avril	7,53E+03	4,39E+03
Mai	1,18E+04	8,66E+03
Juin	8,77E+03	7,91E+03
Juillet	1,19E+04	8,65E+03
Aout	1,18E+04	8,66E+03
Septembre	7,33E+03	7,90E+03
Octobre	4,75E+03	7,95E+03
Novembre	9,01E+03	6,35E+03
Décembre	1,42E+04	5,76E+03

Tableau III.5 La variation annuelle de l'énergie fournie par les deux pompes.

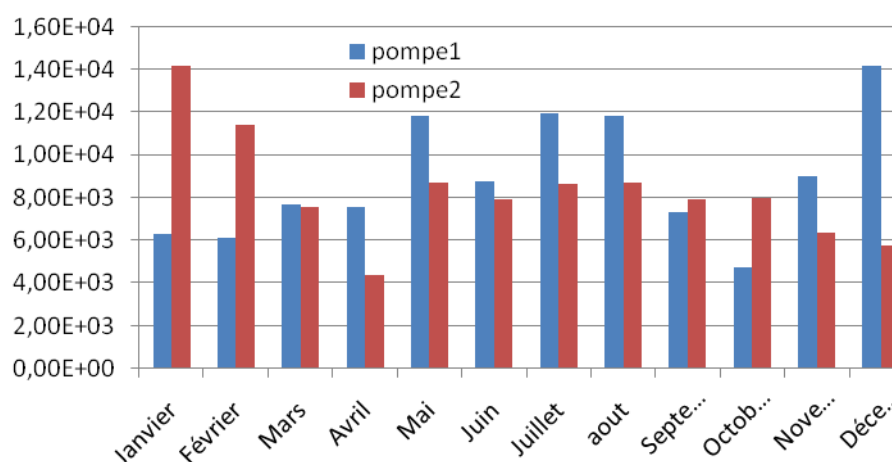


Figure III.6 la variation de l'énergie des deux pompes durant une année.

La pompe 1 de type 114 est destinée à pomper l'eau froide provenant de la machine vers le champ des capteurs, la pompe 2 de type 114-2 est chargée de pomper l'eau chaude du ballon de stockage vers la machine à absorption.

La figure III.6 illustre une comparaison entre l'énergie consommée par les deux pompes durant toute l'année. La consommation de l'énergie fournie par la pompe 1 est très importante dans la saison chaude notamment les mois de juin, juillet, août et décembre puisqu'on a une température élevée pendant cette saison alors on n'utilise pas l'énergie stockée dans le ballon de stockage donc la pompe 2 consomme moins d'énergie, et c'est inversement pour la saison froide.

2) La variation de l'énergie perdue par le ballon de stockage dans le système thermique

Mois	Energie perdue du ballon de stockage
Janvier	8,23E+04
Février	8,20E+04
Mars	1,38E+05
Avril	1,04E+05
Mai	1,00E+05
Juin	5,80E+04
Juillet	6,51E+04
Aout	1,00E+05
Septembre	1,07E+05
Octobre	1,56E+05
Novembre	9,65E+04
Décembre	5,61E+04

Tableau III.6 La variation annuelle de l'énergie perdue par le ballon de stockage dans le système thermique.

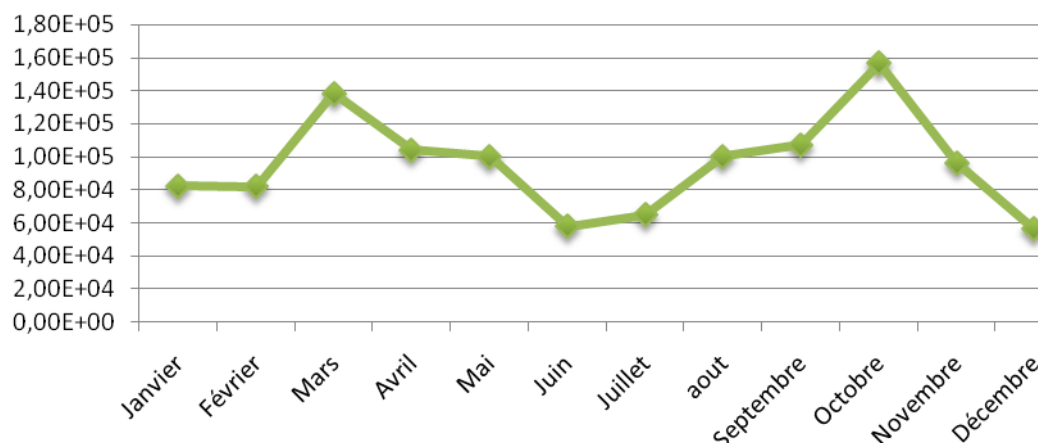


Figure III.7 La variation de l'énergie perdue par le ballon de stockage durant une année dans le système thermique.

La figure III.7 illustre la variation des déperditions calorifiques du ballon de stockage. Ces déperditions sont proportionnelles à la différence de température entre le ballon de stockage et l'ambiance. Cet écart est faible pendant la saison chaude notamment aux mois de juin et juillet, et important pendant les mois de septembre, octobre et mars.

3) La variation de l'énergie du capteur et l'énergie auxiliaire

Mois	Energie de capteur solaire	Energie auxiliaire
Janvier	1,09E+05	1,44E+05
Février	1,05E+05	1,13E+05
Mars	1,57E+05	6,90E+04
Avril	1,16E+05	3,65E+04
Mai	1,61E+05	1,33E+05
Juin	9,99E+04	1,03E+05
Juillet	1,21E+05	1,44E+05
Aout	1,61E+05	1,33E+05
Septembre	1,54E+05	6,56E+04
Octobre	1,92E+05	2,56E+04
Novembre	1,16E+05	8,80E+04
Décembre	7,84E+04	1,50E+05

Tableau III.7 la variation annuelle de l'énergie du capteur thermique et l'énergie auxiliaire

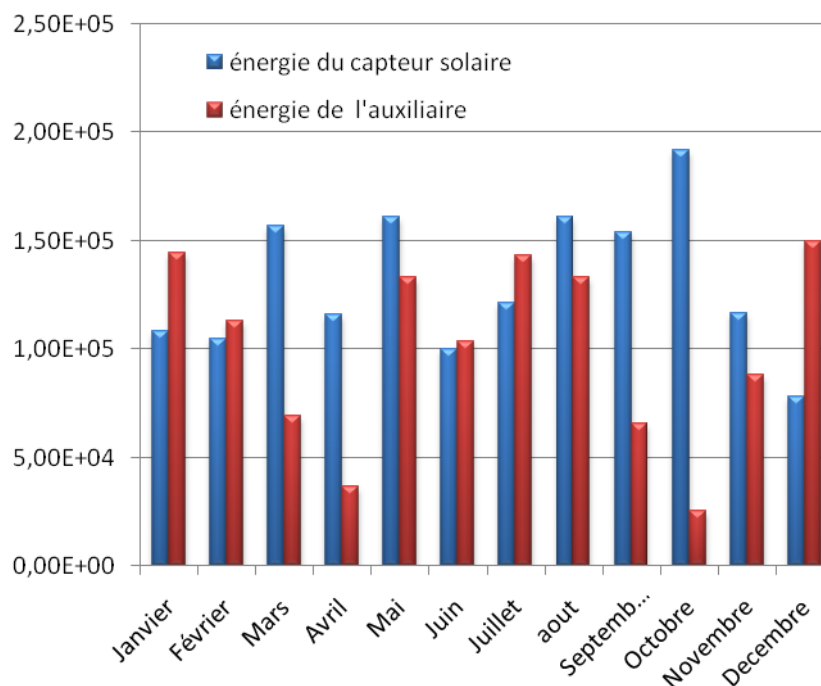


Figure III.8 la variation annuelle de l'énergie du capteur thermique et l'énergie auxiliaire

La figure III.8 montre la variation annuelle de l'énergie fournie par le capteur et l'énergie auxiliaire. L'énergie du capteur est plus importante pendant la saison chaude du fait qu'on a un bon ensoleillement et donc une diminution de l'énergie auxiliaire. Par contre pendant les mois de décembre et janvier l'appoint auxiliaire devient plus important à cause des besoins en chauffage. Ce constat est le même pour les mois de juin et juillet à cause des besoins importants en rafraichissement.

4) La variation de la fraction solaire thermique:

La fraction solaire est le rapport entre l'énergie du capteur solaire et l'énergie total

Mois	fraction solaire	mois	fraction solaire
Janvier	43%	Juillet	46%
Février	48%	août	55%
Mars	69%	Septembre	70%
Avril	76%	Octobre	88%
Mai	55%	Novembre	57%

Juin	49%	Décembre	34%
-------------	-----	-----------------	-----

Tableau III.8 La variation annuelle de la fraction solaire thermique

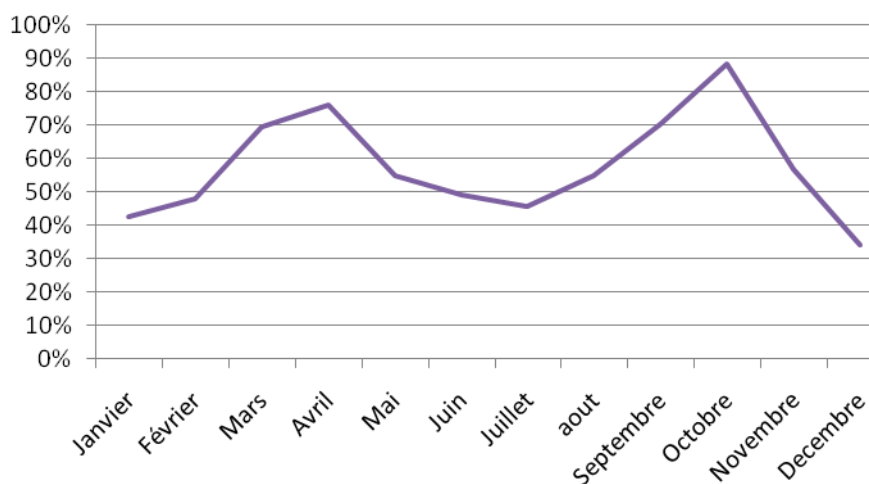


Figure III.9 La variation annuelle de la fraction solaire thermique.

La figure III.9 présente la variation annuelle de la fraction solaire. La diminution de la fraction pendant la période allant du mois de mai jusqu'au mois d'août est occasionnée par la demande en rafraîchissement. Elle augmente pendant la période de mars et avril d'une part et pendant les mois de septembre et octobre ; cela est dû aux températures modérées caractéristiques de ces périodes.

III.4.2 la climatisation solaire photovoltaïques

Nous savons que le prix de l'électricité sera de plus en plus élevé, les nouvelles technologies permettent de proposer une climatisation réversible hybride qui fonctionne au courant électrique et avec l'énergie solaire, c'est les systèmes solaires photovoltaïques.

III.4.2.1 Le principe photovoltaïque

La figure III.8 nous montre le principe de fonctionnement des capteurs photovoltaïques :

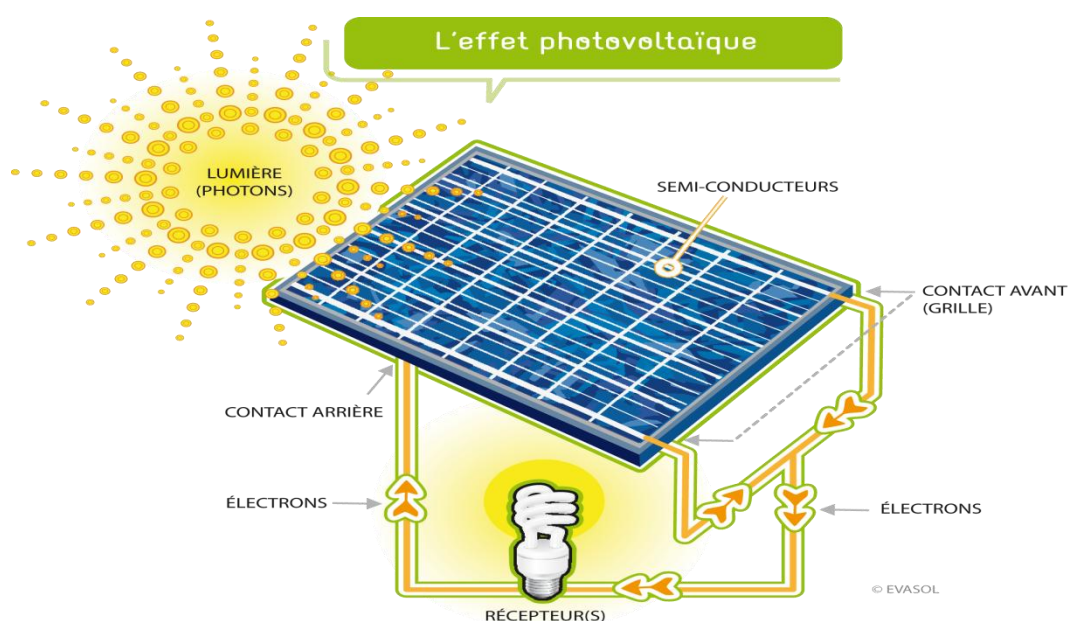


Figure III.10 Principe photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la **transformation de la lumière en électricité**. Ce phénomène physique est propre à certains matériaux dont le **silicium**, **matière première des panneaux photovoltaïques**.

En effet, la lumière produite par le soleil est composée de photons. Ces photons vont heurter la surface du panneau solaire et les électrons présents vont alors se mettre en mouvement dans une direction particulière permettant de **créer un courant électrique continu**.

Ce courant va ensuite être recueilli par des fils métalliques appelés «strings» qui vont transporter le courant de cellule en cellule. Le courant va ainsi s'additionner lors de son passage entre chaque cellule. Ce courant sera ensuite recueilli vers la **centrale photovoltaïque**.

III.4.2.2 L'installation du système photovoltaïque

La figure III. 10 présentes l'installation de la climatisation photovoltaïque dans logiciel TRNSYS simulation studio. Cette figure présente la production du froid a partir d'un système de climatisation classique qui utilise des capteurs photovoltaïque de 'type 94a' lié avec une batterie de stockage de 'type47a' où la lumière

transformée en énergie électrique qui alimente la machine à compression de vapeur ‘type62’ qui produit le froid nécessaire, ce système à nécessité de la continuité de fonctionnement et pour cela on utilise un chauffage auxiliaire ‘type6’ afin de produire du froid des ventilateurs de ‘type3a’ qui assurent le rafraichissement de la maison ‘type56a’.

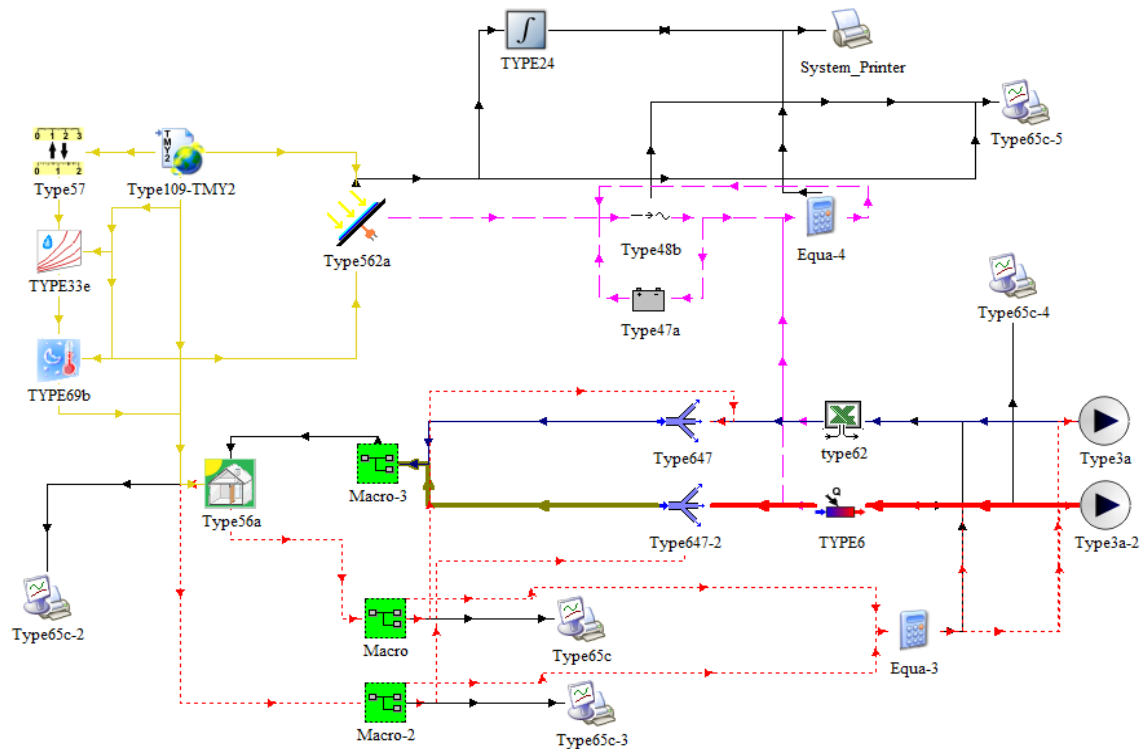


Figure III.11 l’installation photovoltaïque

III.4.2.3 Les composants de l’installation

Cette installation se compose d’un capteur photovoltaïque, une batterie de stockage, une machine à compression de vapeur et un chauffage auxiliaire.

1) Capteur photovoltaïque

Ce composant de TYPE 562a, il permet de transformer la lumière venant du soleil en électricité.

2) Batterie de stockage

La lumière n’étant pas permanente par nature, il est nécessaire, pour les installations autonomes, de stocker cette énergie pour toute utilisation nocturne ou par temps couvert. Ce modèle d’une batterie d’accumulateurs au plomb-acide fonctionne en conjonction

avec réseau de cellules solaires et de conditionnement de puissance composants. Il précise comment l'état de charge de la batterie varie au fil du temps, étant donné le taux de charge ou de décharge. Ce modèle ne calcule ni émettre des valeurs de courant ou de tension.

3) Machine à compression de vapeur

C'est mentionné dans le chapitre précédent.

4) Les ventilateurs

Sert à ventiler soit de l'air frais soit de l'air chaud produit par la machine frigorifique à la maison.

*Les autres composants (**Conditions météorologiques, construction de la maison, le chauffage auxiliaire**) sont expliqués précédemment.

III.4.2.4 Les types TRNSYS :

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

Types	Nom de composant
Type 109	Conditions météorologiques
Type 562a	capteur photovoltaïque simple Batterie
Type 47a	Vanne de dérivation
Type 647	appelant programme externe
Type 62	Fan sans effets de l'humidité
Type 3a	Chauffage auxiliaire
Type 6	
Type 56a	Le comportement thermique d'un bâtiment

Tableau III.9 les TYPES TRNSYS de l'installation photovoltaïque

III.4. 2.3 Résultats et interprétations :

1) Variation de l'énergie du capteur solaire photovoltaïque

Mois	Energie du capteur solaire photovoltaïque
Janvier	2,89E+06
Février	2,71E+06
Mars	3,70E+06
Avril	3,31E+06
Mai	3,54E+06
Juin	3,27E+06
Juillet	3,76E+06
Aout	4,32E+06
septembre	3,69E+06
Octobre	4,26E+06
Novembre	3,01E+06
Décembre	2,24E+06

Tableau III.10 Energie du capteur solaire photovoltaïque durant une année

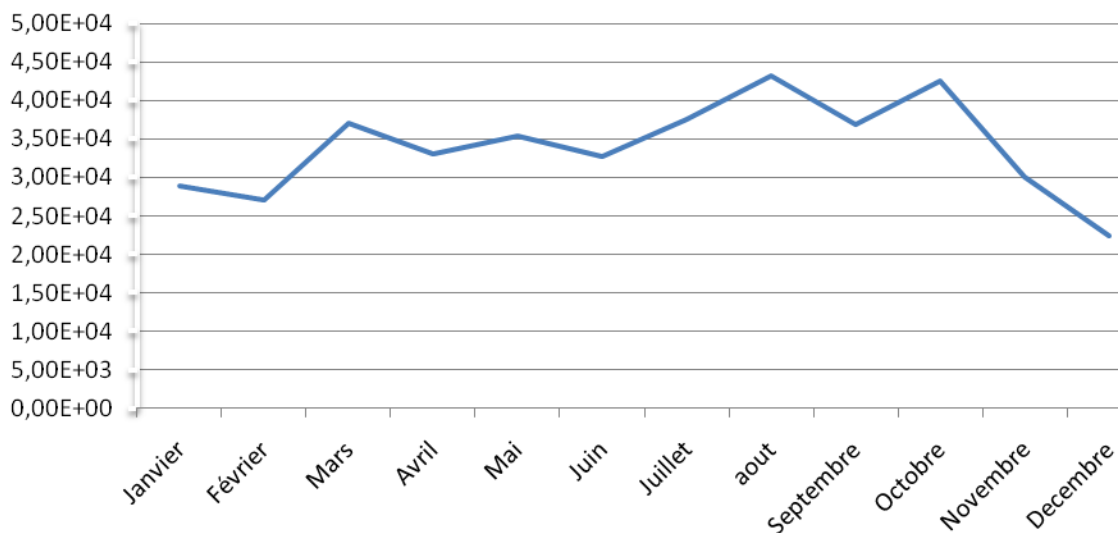


Figure III.12 Energie du capteur solaire photovoltaïque durant une année.

Le capteur solaire utilisé dans cette installation est un module photovoltaïque posé sur une toiture avec une inclinaison de 40 °. La figure III.12 illustre l'énergie captée par ce module.

L'inclinaison optimale du capteur dépend de la latitude sur laquelle se situe l'installation photovoltaïque. Plus on s'éloigne de l'inclinaison optimale d'été, moins l'installation produira en été cela explique pourquoi, la production est maximale durant les mois de mars et d'octobre.

2) Variation de l'énergie du capteur photovoltaïques et l'énergie auxiliaire :

D'après les résultats obtenus de la simulation (tableau III-11) on a tracé la courbe de la figure III-13 :

mois	Energie du capteur solaire photovoltaïque	Energie auxiliaire
janvier	2,89E+04	5,66E+05
Février	2,71E+04	4,79E+05
Mars	3,70E+04	3,33E+05
Avril	3,31E+04	1,99E+05
mai	3,54E+04	1,28E+05
juin	3,27E+04	2,18E+0
juillet	3,76E+04	3,05E+05
out	4,32E+04	2,99E+05
septembre	3,69E+04	1,84E+05
octobre	4,26E+04	1,20E+05
novembre	3,01E+04	3,94E+05
décembre	2,24E+04	5,71E+05

Tableau III.11 variation de l'énergie du capteur solaire photovoltaïque et l'énergie auxiliaire durant une année.

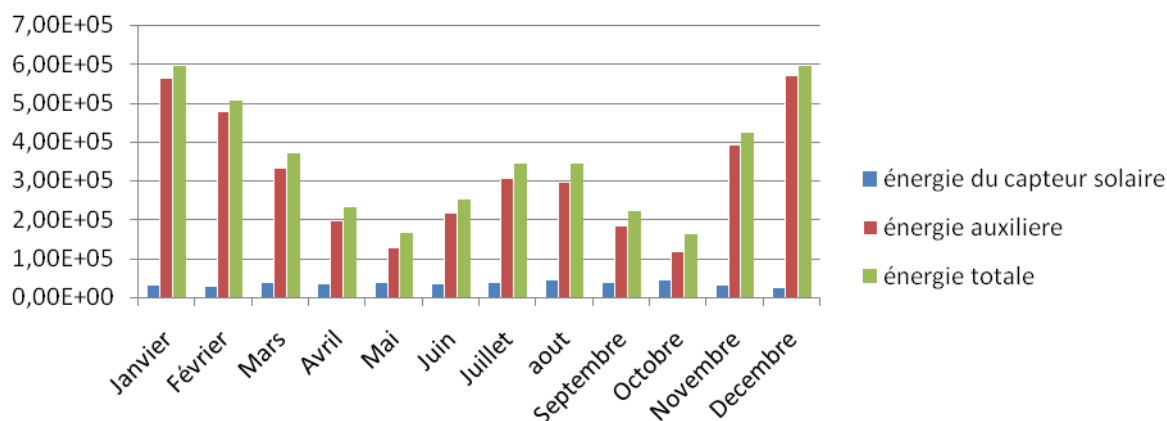


Figure III.13 variation annuelle de l'énergie du capteur solaire photovoltaïque et l'énergie auxiliaire.

La figure III.13 illustre une comparaison entre l'énergie reçue par le champ de capteurs photovoltaïques et l'énergie auxiliaire dépensée pour l'entraînement du système de climatisation. La contribution de l'énergie reçue par le champ de capteurs reste faible devant celle de l'auxiliaire et ce pratiquement pendant toute l'année. Il est à noter que cette contribution devient plus importante lorsqu'il s'agit du chauffage.

3) Variation de la fraction solaire dans le système photovoltaïque

mois	Fraction solaire
Janvier	0.05
Février	0.05
Mars	0.1
Avril	0.14
Mai	0.22
Juin	0.13
Juillet	0.11
août	0.13
septembre	0.17
Octobre	0.26
Novembre	0.07
Décembre	0.04

Tableau III.12 variation de la fraction solaire durant une année.

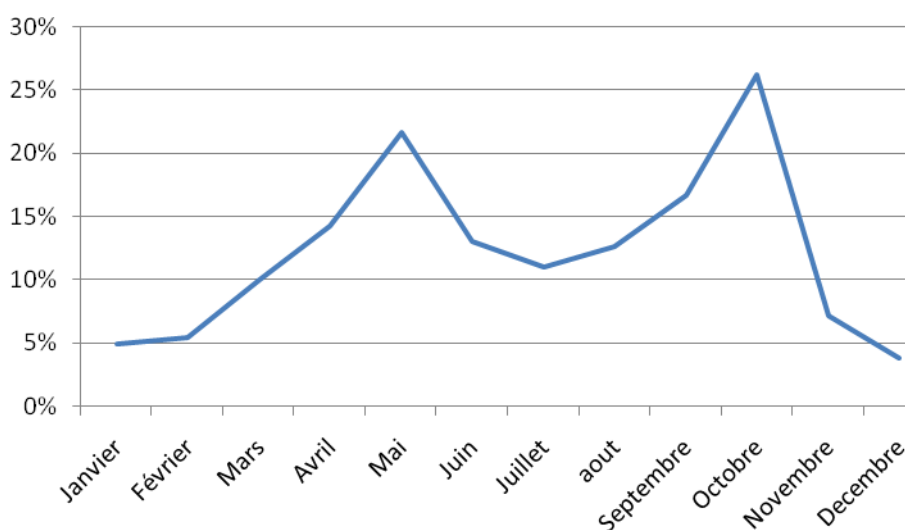


Figure III.14 variation de la fraction solaire durant une année.

La figure III.14 illustre la variation annuelle de la fraction solaire. Elle présente deux pics : le premier au niveau du mois de mai et le deuxième au mois d'octobre, du fait que l'écart entre la température de consigne et la température ambiante est très faible et que le capteur solaire ne peine pas à satisfaire les conditions de confort. Par contre la fraction solaire diminue considérablement lorsqu'il s'agit de réaliser des conditions de confort en été et en hiver.

III.4.3. Comparaison technico-économique entre le système thermique et le système photovoltaïque

1) Variation de l'énergie totale (solaire+auxiliaire) thermique et photovoltaïque

mois	Energie totale thermique	Energie totale photovoltaïque
Janvier	2,53E+07	5,95E+07
Février	2,18E+07	5,06E+07
Mars	2,26E+07	3,70E+07
Avril	1,53E+07	2,32E+07
Mai	2,94E+07	1,64E+07
Juin	2,03E+07	2,51E+07
Juillet	2,65E+07	3,43E+07
août	2,94E+07	3,42E+07
Septembre	2,19E+07	2,21E+07
Octobre	2,18E+07	1,62E+07
Novembre	2,04E+07	4,24E+07
Décembre	2,28E+07	5,94E+07

Tableau III.14 la variation annuelle de l'énergie totale.

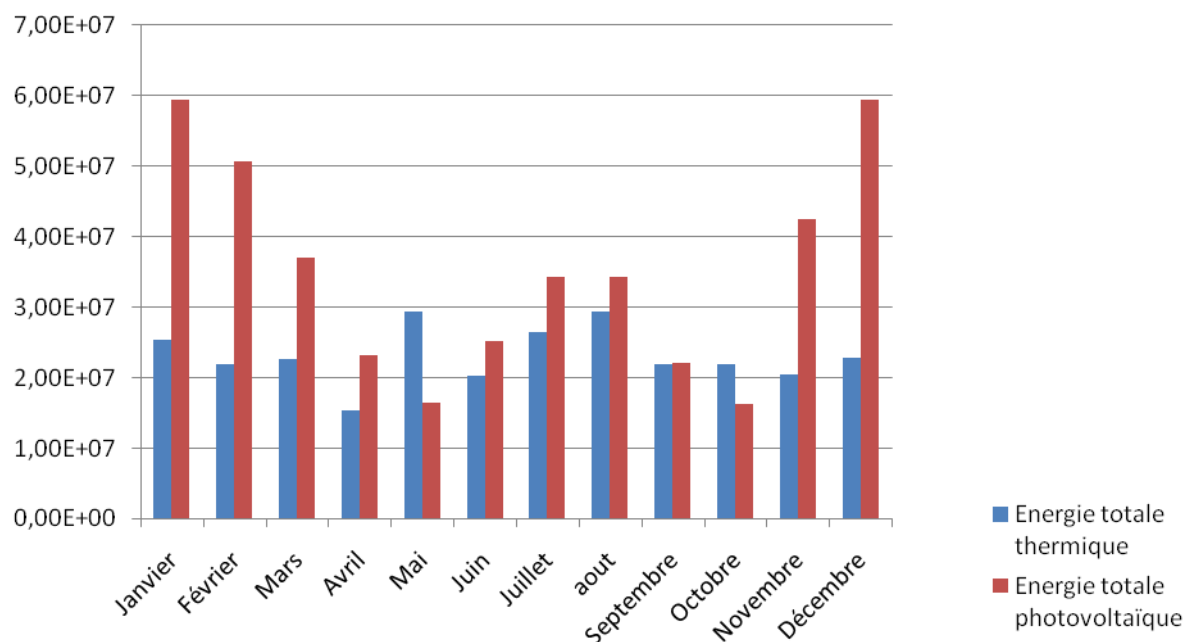


Figure III.15 la variation annuelle de l'énergie totale.

La figure III.15 montre la variation de l'énergie totale dans les deux systèmes, l'énergie consommée dans le système à compression mécanique couplé avec le capteur photovoltaïque est très importante par rapport au système à absorption couplé avec le capteur thermique pendant la saison chaude. Cette différence résulte du fait que les systèmes mécaniques sont énergétivores en matière de consommation. Il est donc compréhensible que le rendement de l'installation photovoltaïque diminue conformément à la dépendance de la fraction solaire annuelle. C'est pour cela que dans le cadre de la climatisation solaire, les systèmes à absorption motorisés à base de capteurs solaires thermiques sont plus privilégiés par rapport aux systèmes solaires électriques.

2) Variation de la fraction solaire

mois	fraction solaire photovoltaïque	fraction solaire thermique
Janvier	5%	43%
Février	5%	48%
Mars	10%	69%
Avril	14%	76%
Mai	22%	55%
Juin	13%	49%
Juillet	11%	46%
août	13%	55%
Septembre	17%	70%

Octobre	26%	88%
Novembre	7%	57%
Décembre	4%	34%

Tableau III.15 Variation de la fraction solaire

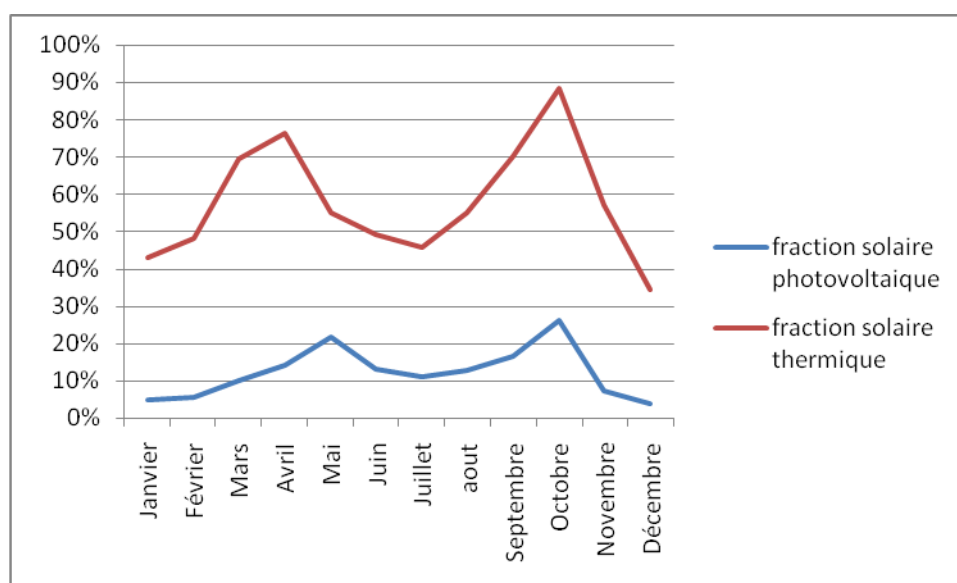


Figure III.16 Variation annuelle de la fraction solaire

La fraction du système thermique est très élevée par rapport au système photovoltaïque pendant toute l'année comme l'illustre la figure III.16. Ceci est dû à la technologie utilisée.

3) Variation de l'énergie auxiliaire du système thermique et photovoltaïque

Mois	Energie auxiliaire photovoltaïque	Energie auxiliaire thermique
Janvier	5,66E+05	1,44E+05
Février	4,79E+05	1,13E+05
Mars	3,33E+05	6,90E+04
Avril	1,99E+05	3,65E+04
Mai	1,28E+05	1,33E+05
Juin	2,18E+00	1,03E+05
Juillet	3,05E+05	1,44E+05
Out	2,99E+05	1,33E+05
Septembre	1,84E+05	6,56E+04

Octobre	1,20E+05	2,56E+04
Novembre	3,94E+05	8,80E+04
Décembre	5,17E+05	1,50E+05

Tableau III.16 la variation de l'énergie auxiliaire thermique et photovoltaïque

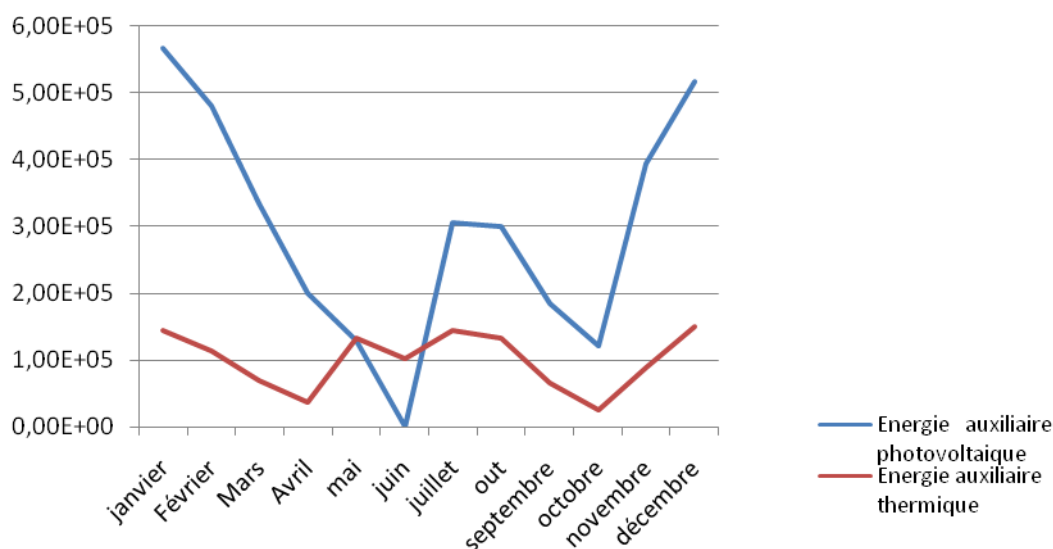


Figure III.17 la variation de l'énergie auxiliaire thermique et photovoltaïque

L'énergie auxiliaire du système thermique travaille presque en parallèle avec l'énergie du capteur thermique. Par contre, il y a un grand écart entre l'énergie auxiliaire du capteur photovoltaïque et celle du capteur thermique. Cet écart atteint des valeurs maximales pendant la saison froide suite aux besoins en matière de chauffage. Ces besoins sont satisfaits en dépit d'un appoint considérable pour une utilisation photovoltaïque. Cette figure montre aussi que dans le cadre de la climatisation solaire les systèmes thermiques sont de loin les plus adaptés.

mois	Energie du capteur PV	Energie du capteur solaire thermique
Janvier	2,89E+04	1,09E+05
Février	2,71E+04	1,05E+05
Mars	3,70E+04	1,57E+05
Avril	3,31E+04	1,16E+05
Mai	3,54E+04	1,61E+05

Juin	3,27E+04	9,99E+04
Juillet	3,76E+04	1,21E+05
Aout	4,32E+04	1,61E+05
Septembre	3,69E+04	1,54E+05
Octobre	4,26E+04	1,92E+05
Novembre	3,01E+04	1,16E+05
Décembre	2,24E+04	7,84E+04

4) Variation de l'énergie du capteur thermique et photovoltaïque

Tableau III.17 variation annuelle de l'énergie du capteur thermique et photovoltaïque

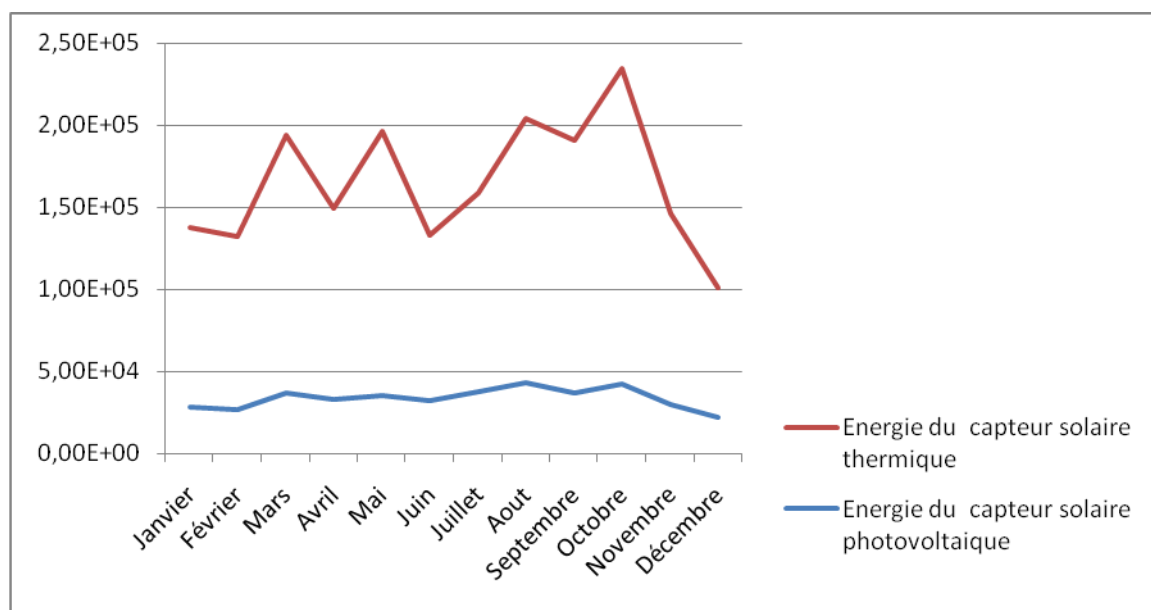


Figure III.18 variation annuelle de l'énergie du capteur thermique et photovoltaïque

La figure III.18 illustre une comparaison entre l'énergie captée par un champ de capteurs photovoltaïques et un autre thermique pour une surface de captation de 60 m². A cause des rendements des capteurs solaires thermiques (toutes technologies confondues) qui sont meilleurs par rapport aux rendements des capteurs photovoltaïques, l'énergie réalisée est en conséquence meilleure pour les systèmes thermiques que pour les systèmes photovoltaïques. Cette différence de rendement est accentuée par l'utilisation du compresseur mécanique qui influe négativement sur la performance du système.

Variation de l'énergie du capteur thermique et photovoltaïque en variant la surface

Surface du capteur	Energie du capteur solaire thermique	Energie de capteur solaire photovoltaïque
10	1,83E+04	5,90E+03
20	3,76E+04	1,18E+04
30	5,64E+04	1,77E+04
40	7,50E+04	2,36E+04
50	9,34E+04	2,95E+04
60	1,12E+05	3,54E+04
70	1,30E+05	4,13E+04
80	1,48E+05	4,72E+04
90	1,66E+05	5,31E+04
100	1,84E+05	5,90E+04

Tableau III.18 la variation de l'énergie des capteurs thermique et photovoltaïque

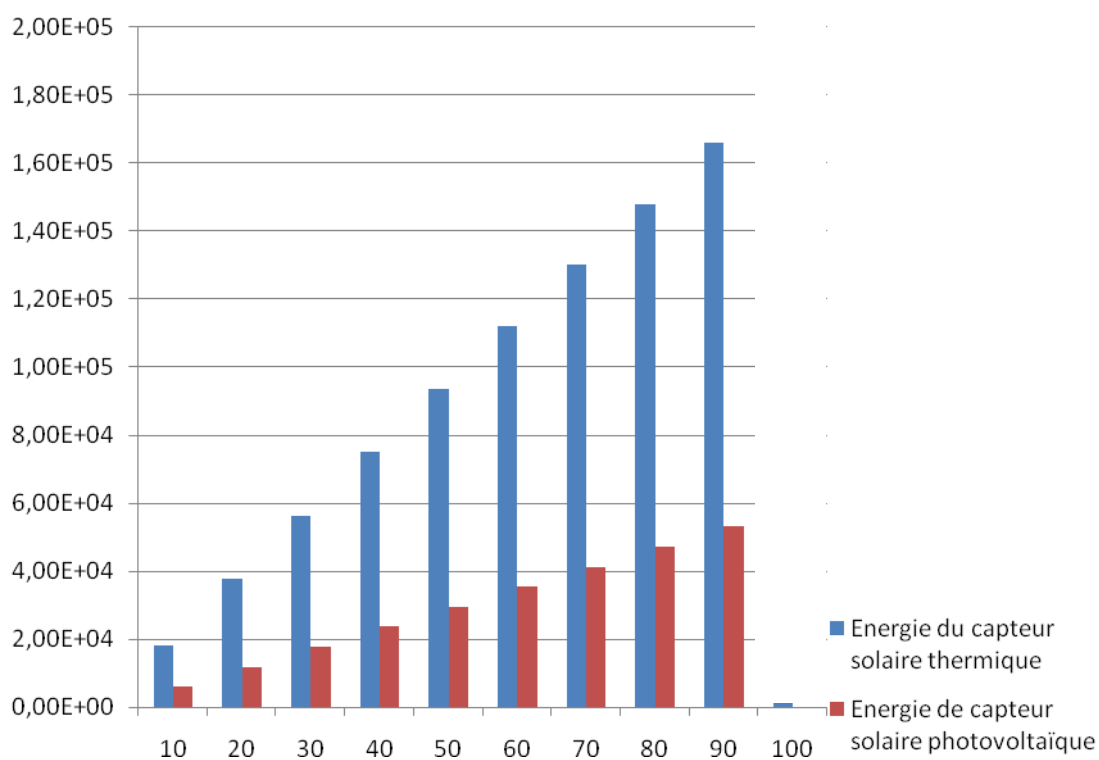


Figure III.19 la variation de l'énergie des capteurs thermique et photovoltaïque

La figure III.19 montre l'influence de la surface de captation sur les énergies captées respectivement par un champ de capteurs thermiques et un champ de capteurs photovoltaïques. Dans les deux cas, l'énergie des capteurs augmente proportionnellement avec l'augmentation de la surface. Par contre, pour une application donnée la surface de captation est un paramètre à optimiser, car le coût d'investissement primaire est essentiellement lié à cette surface.

Conclusion :

Une étude comparative des performances de deux installations solaires de climatisation a été présentée. La première utilise des capteurs photovoltaïques et un stockage électrique tandis que la deuxième utilise des capteurs solaires thermiques sous vide. La discussion des résultats montre que :

- La contribution de l'énergie reçue par le champ de capteurs photovoltaïques reste faible devant celle de l'énergie d'appoint et ce pratiquement pendant toute l'année. Il est à noter que cette contribution reste importante en cas de rafraîchissement que dans le cas de chauffage ;
- L'énergie consommée dans le système à compression mécanique couplé avec le capteur photovoltaïque est très importante par rapport au système à absorption couplé avec le capteur thermique pendant la saison chaude. Cette différence résulte du fait que les systèmes mécaniques sont énergétivores en matière de consommation. Il est donc compréhensible que le rendement de l'installation photovoltaïque diminue conformément à la dépendance de la fraction solaire annuelle ;
- L'énergie produite par le champ de capteurs thermiques excède de loin l'énergie fournie par le champ de capteurs photovoltaïques, donc le rendement de l'installation de climatisation couplée aux capteurs photovoltaïques reste faible à celui d'une installation thermique du fait de la présence du compresseur mécanique.

Discussion générale de la problématique

Il s'agit de comparer des différentes technologies de réfrigération solaire à donner des solutions compétitives et durable quand à la production du froid et de brièvement le statut commercial de ces différentes technologies.

Il n'y a nul doute que la réfrigération solaire soit une alternative durable à la réfrigération conventionnelle. Mais son utilisation et sa mise en oeuvre demeure encore faible.

Jusqu'à aujourd'hui, le plus gros problème avec la climatisation solaire électrique est le prix élevé du panneau solaire électrique. Si un panneau solaire électrique de 10% d'efficacité est combiné avec une machine à compression de vapeur de COP=3, le rendement global sera de 30%. En supposant que le prix unitaire du panneau solaire électrique est 5€/W, le panneau solaire électrique coûterait à lui seul 1667 € pour produire 333W d'électricité et ce pour une capacité frigorifique de 1 KW.

Pour des capteurs solaires moins chers travaillant aux alentours de 90°C, une machine à absorption à eau/bromure de lithium ou une machine à absorption ammoniac-eau avec un COP entre 0.6 et 0.8 peuvent être envisagées. Le prix d'un capteur solaire varie considérablement dans cette gamme de température. Le prix d'un capteur de 50% d'efficacité à 90°C varie entre 300 et 600€/m².

La climatisation par adsorption peut être compétitive dans les grands systèmes de climatisation. Mais pour les systèmes de petite ou moyenne taille, elle a tendance à être trop encombrante et coûteuse (Saman et al, 2004).

Quoiqu'un système frigorifique thermomécanique soit plus cher qu'un système thermoélectrique, sa capacité de produire de la puissance, de la chaleur et du froid en même temps fait tout son mérite.

A cet égard le soutien politique et financier du gouvernement joue un rôle important pour la promotion des technologies solaire de réfrigération dans le secteur privé.

Conclusion générale

La réfrigération solaire permet d'économiser certainement une quantité substantielle de la consommation d'énergie primaire. Cela réduit la production de dioxyde de carbone et les pics de consommation d'électricité en été, qui est un avantage important pour l'environnement et l'économie nationale. Mais quand il s'agit de bénéfice financier, la situation n'est pas aussi encourageante.

L'implantation d'un système de réfrigération solaire exige un bon planning, une assistance habile et un système de surveillance, à l'encontre des systèmes conventionnels faciles à implanter, ce qui fait sa cherté. Surtout, le coût des capteurs solaires ou des panneaux pourrait submerger le budget du projet tout entier. Par conséquent, un système de climatisation solaire se doit de fournir assez de profit afin de justifier tous les efforts supplémentaires et les investissements.

Les différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire ont été présentées. Elles sont évaluées et comparées entre elles (pour les trois technologies commercialement disponibles) ainsi qu'à des solutions classiques (non solaires) servant de référence. Il est montré qu'il existe une parfaite adéquation entre le gisement solaire et les besoins de rafraîchissement. C'est en effet au moment où l'irradiation solaire est maximale que les besoins de froid sont les plus importants donc des économies d'énergie primaire annuelles (climatisation et chauffage) allant jusqu'à 50 % peuvent être réalisées.

Une étude comparative des performances de deux installations de rafraîchissement solaire, la première utilise une machine à absorption couplée à des capteurs solaires sous-vide et la deuxième utilise une machine à compression mécanique couplée à des capteurs photovoltaïques.

Les résultats de cette comparaison montrent que l'énergie produite par le champ de capteurs thermiques excède de loin l'énergie fournie par le champ de capteurs photovoltaïques.

En ce qui concerne les perspectives futures de la R&D dans le cadre de la réfrigération solaire, il est mieux tentant de se concentrer sur les systèmes à sorption à faible température car le prix du capteur solaire tend à augmenter avec la température qu'il réalise.

Références bibliographiques :

- [1] M Rémi CHELAN, 'la climatisation solaire', mémoire de fin d'étude d'Ingénierie du bâtiment, Ecole Nationale d'Ingénieurs De Saint-Etienne, 2004
- [2] Patricia REINWALT 2012.
- [3] <http://www.negawatt.org/constats-et-enjeux-energetiques-actuels-pb12.html>
- [4] Agence international de l'énergie (AIE)
- [5] <http://www.energiepositive.info/fr/pourquoi/energies-fossiles.html>.
- [6] <http://portail.cder.dz/spip.php?article1724>
- [7] Wahiba Ben khada « Introduction des principales techniques de climatisation solaire dans l'Algérie » publié dans le centre de développement d'énergie renouvelable (consulté en mai 2013).
- [8] Henri NOIREL, « Equipement de confort climatisation », Créé avec la collaboration du GAMA et du GNFA (Groupement Amical d'enseignants des Matériels Automobiles) 2002.
- [9] Jérôme ADNOT, ARMINES, « Energie Efficiency and Certification of Central Air Conditioners », FINAL REPORT- APRIL 2003.
- [10] <http://www.astralys-solutions.com/nantes-energie-techniques-climatisation-solaire.html>
- [11] FELLAH. I, « Etude et conception d'un système de climatisation utilisant le rayonnement solaire », mémoire de fin d'étude.
- [12] <http://www.lepanneausolaire.net/principe-fonctionnement-climatisation-solaire/>
- [13] C .Hildbrand , J.Bony , M.Bunea, A. kleijer et S. Citherlet , « POTENTIEL DE LA CLIMATISATION SOLAIRE PAR ADSORPTION EN SUISSE », 2010.
- [14] ADEM Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Note de cadrage sur le contenu CO2 du kWh par usage en France, Angers, ADEME, 2005
- [15] HENNING H.M., Solar assisted air conditioning of buildings - an overview. Applied Thermal Engineering, 2007.
- [16] D.S Kima, C.A. Infante Ferreira, « Solar refrigeration options, a state of the art review, state of the Art » international journal of refrigeration 31 (2008).
- [17] DELORME Marc et al., Promoting solar air conditioning: Technical overview of active techniques, ALTENER Project Number 4.1030/Z/02-121/2002, 2002 [en ligne].
Disponible:http://raee.org/climatisationsolaire/doc/technical_overview_of_active_techniques.

[18] BALARAS C.A., GROSSMAN G., HENNING H.-M., FERREIRA C.A.I., PODESSER E., WANG L., WIEMKEN E. Solar air conditioning in Europe – an overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007

[19] TIERNEY M.J. Options for solar-assisted refrigeration—Trough collectors and double-effect chillers, *Renewable Energy*, 2007

[20] LOKURLU,05 MÜLLER G. Experiences with the worldwide first cooling system based on parabolic through collectos (SOLIPTM PTC 1800) combined with double effect chillers, in: 1st Internaional conference for solar air cooling, oct. 2005

[21] FAN Y., LUO L., SOUYRI B., Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2007

[22] NUNEZ T., MITTELBACH W., HENNING H.-M. Development of an adsorption chiller and heat pump for domestic heating and air-conditioning applications, *Applied Thermal Engeenering*, 2007

[23] Thibaut VITTE « Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment : Proposition d'une stratégie de régulation du système », thèse de L'institut national des sciences appliquées de Lyon

[24] PIETRUSCHKA D., EICKER U., HUBER M., SCHUMACHER J., Experimental performance analysis and modelling of liquid desiccant cooling systems for air conditioning in residential buildings, *International Journal of Refrigeration*, 2006

[25] Etude et conception d'un systeme de climatisation utilisant le rayonnement solaire *par* Guillaume Deguy LUMPUNGU MABEYA Université de Lubumbashi - Ingenieur Civil Electromecanicien 2004

[26] <http://www.vaugeois-chauffage.com/lecircuitfrigori/index.html>

[27] CHOUGUI MOHAMED LAMINE « SIMULATION ET ETUDE COMPAREE DE CYCLE A ABSORPTION (LiBr / H₂O) A USAGE DE FROID. CAS DE L'UNITE DE PRODUCTION DE DETERGENT HENKEL », UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE.

[28] http://www.solairethermique.guidenr.fr/L_capteur-solaire-thermique-plan.php

[29] Marwan Mokhtar, Muhammad Tauha Ali, Simon Bräuniger, Afshin Afshari, Sgouris Sgouridis, Peter Armstrong, Matteo Chiesa, “Systematic comprehensive techno-economic assessment of solar cooling technologies using location-specific climate data”, Institute of Science and Technology, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2010.

[30] Dong é- Seon KIM, solar absorption cooling, Master of mechanical Engineering, Korea University,2007

Remerciements

Merci DIEU de nous avoir donné la santé et la patience de réaliser ce modeste travail.

Nous tenons tout d'abord à remercier Mr ALIANE ABD EL NOUR, qui a bien voulu accepter de nous prendre en charge pour réaliser ce travail dont le mérite lui revient grâce à son aide à la fois matérielle et morale, ses conseils précieux et sa gratitude tout au long du travail.

Nous remercions sincèrement Mr GUENDOUBE.B pour son soutien, son implication, et sa patience.

Nous remercions vivement les membres de notre jury : M.KERBOUA.B, d'avoir accepté de présider le jury, M.BENRAMDANE.M et Mme BENSEDDIK,L pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents sur qui j'ai pu compter et me ressourcer d'affection et de bénédictions durant toute ma vie, que dieu me les garde.

*Mes chères sœurs : Hanene et son mari Mustafa,
Imene et son mari Abdeslem.*

*Mon fiancé Nabil qui n'a jamais cessé de
m'encourager.*

*Mes chers frères : Housseem, Boumedién et
sa femme Saliha.*

*Mes très chères nièces : Aya et Malek, que dieu les
protège.*

Tous mes amis(es).

LAMIA

Dédicaces

Avant tous je dis EL Hamdou Lillah qui m'a aidé à terminer ce travail, Je dédie ce modeste travail :

A Mes chers parents

Que je respecte beaucoup, car ils m'ont tous donné dans ma vie personnel et professionnel et je souhaite que je rembourse tous ces sacrifices,

A Mes chères sœurs Siham et Sara et mon frère Mohamed Amine, à ma cousine Nadia et asmaa ainsi que mes très chères amies Ahlem et Naima Merci pour votre encouragement et Merci pour tous.

A tous mes amis chacun par son nom,

A tous mes professeurs qui m'ont encadré tous au long de mon cursus universitaire.

Fatima Zahra