

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique
Réf :



جامعة بiskra
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية
المرجع:

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de
Magister en : Génie mécanique
Option : Système thermique et maîtrise d'énergie

**Etude de faisabilité d'un climatiseur solaire
adapté à la région de Biskra.**

Présenté par :

Mohamed Ali DJEBIRET

Soutenu publiquement le 16/12/2012

Devant le jury composé de :

Mabrouk HECINI	Professeur	Président	Université de Biskra
Adel BENCHABANE	Maître de Conférences 'A'	Rapporteur	Université de Biskra
Noureddine MOUMMI	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Abdelhafid BRIMA	Maître de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra

A la mémoire de mon grand père Khalifa Djebiret et ma grande mère Zohra Maanani.

A mon père, ma mère, mon unique frère et mes deux sœurs.

A ma grande famille et spécialement mes tantes Samira, Rabiha et ma grande mère, mes oncles, mes cousins Mohamed Saïd, Mohamed Adel, Ahmed, Slami, Mohamed Amine, Moaz Mondhir et mes cousines Lilia, Khaiera, Djoumana, Fairouz, Ikram.

Sommaire

SOMMAIRE	II
REMERCIEMENTS	V
NOMENCLATURE	VI
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES TABLES	X
INTRODUCTION GENERALE	1
1 ENJEUX ENERGETIQUES	2
1.1 <i>Consommation mondiale d'énergie</i>	2
1.2 <i>Energie et pollution du climat</i>	2
1.2.1 Exemple de la Chine	4
1.2.2 Exemple de l'Europe	4
2 SOURCES LIMITEES ET ENERGIES RENOUVELABLES	5
3 GISEMENT SOLAIRE EN ALGERIE	6
3.1 <i>Besoins de la climatisation</i>	7
4 OBJECTIFS ET ORGANISATION DU MEMOIRE	8
5 BIBLIOGRAPHIE	10
CHAPITRE 1: PRODUCTION DU FROID SOLAIRE	11
1 TECHNIQUES BASEES SUR LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE	12
1.1 <i>Systèmes à compression de vapeur</i>	13
1.2 <i>Systèmes à effet Peltier</i>	13
2 TECHNIQUES BASEES SUR LA CONVERSION THERMIQUE	14
2.1 <i>Capteurs solaires</i>	14
2.1.1 Capteurs solaires plans	14
2.1.2 Capteurs solaires plans à air	16
2.1.3 Capteurs solaires sous vide	16
2.2 <i>Processus thermomécanique</i>	17
2.3 <i>Cycle de Rankine (compression)</i>	20
2.4 <i>Cycle à jet de vapeur</i>	20
2.5 <i>Processus de sorption</i>	20
2.5.1 Absorption	22

2.5.1.1	Système fermé à simple effet	22
2.5.1.2	Système fermé à double effet	23
2.5.1.3	Systèmes ouverts	25
2.5.2	Adsorption	26
2.5.2.1	Adsorption physique (physisorption)	27
2.5.2.2	Adsorption chimique (chimisorption)	27
2.5.2.3	Systèmes ouverts	28
3	PRODUCTION DU FROID SOLAIRE ABORDABLE	29
4	CONCLUSION	30
5	BIBLIOGRAPHIE	31
 CHAPITRE 2 : TECHNOLOGIES DU FROID SOLAIRE PAR SORPTION		33
1	TECHNOLOGIES DE REFRIGERATION SOLAIRE PAR SORPTION	33
1.1	<i>Absorption</i>	33
1.2	<i>Adsorption</i>	36
2	DIFFERENTES APPLICATIONS DES SYSTEMES DE FROID SOLAIRE PAR SORPTION	39
2.1	<i>Congélation et fabrication de la glace</i>	39
2.2	<i>Réfrigération</i>	40
2.3	<i>Climatisation</i>	41
2.3.1	Tendance en Europe	42
2.3.2	Tendance en Chine	43
3	RECAPITULATION	44
4	BIBLIOGRAPHIE	45
 CHAPITRE 3 : CHOIX DE LA TECHNOLOGIE DE RAFRAICHISSEMENT SOLAIRE ADAPTEE A NOS BESOINS		48
1	CLIMATISATION ET RAFRAICHISSEMENT	48
2	CONDUIRE UN PROJET DE RAFRAICHISSEMENT SOLAIRE	48
2.1	<i>Etude de faisabilité</i>	49
2.2	<i>Choix de la technologie</i>	49
3	APERÇU SUR LES SYSTEMES INSTALLEES	51
4	EXEMPLES DE PROTOTYPES ET D'INSTALLATIONS COMMERCIALES	54
4.1	<i>Rafraichissement solaires par absorption</i>	55
4.1.1	Machines et installations commerciales	55
4.1.2	Prototypes	57
4.2	<i>Rafraichissement solaires par adsorption</i>	58
4.2.1	Machines et installations commerciales	58
4.2.2	Prototypes	60
5	CONCLUSION	60
6	BIBLIOGRAPHIE	61

CHAPITRE 4 : ETUDE PRELIMINAIRE D'UNE INSTALLATION DE	DE
RAFRAICHISSEMENT SOLAIRE A ADSORPTION DANS LE SITE DE BISKRA	65
1 ESTIMATION DES BESOINS EN FROID	65
2 DESCRIPTION DE LA TECHNOLOGIE DE RAFRAICHISSEMENT SELECTIONNEE	66
2.1 <i>Conception des composantes du système solaire</i>	66
2.2 <i>Refroidisseur à adsorption</i>	66
2.2.1 L'adsorbeur	67
2.2.2 Condenseur	68
2.2.3 Evaporateur	68
2.2.4 Vannes électropneumatiques	69
2.2.5 Vannes électromagnétiques	69
2.3 <i>Principe de fonctionnement</i>	69
2.4 <i>Processus du cycle à adsorption</i>	72
2.5 <i>Essai expérimental sous des conditions réelles</i>	73
3 PRE-DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTES DE L'INSTALLATION DANS LE SITE DE BISKRA	75
3.1 <i>Besoin d'eau chaude pour le refroidisseur d'adsorption</i>	75
3.2 <i>Calcul de la surface de captation</i>	75
3.3 <i>Dimensionnement du local de l'installation</i>	76
4 VALIDATION DE LA DEMARCHE DE CALCUL	78
5 ESTIMATION DU COUT DE L'INSTALLATION	78
5.1 <i>Capteur solaire plan</i>	78
5.2 <i>Ballon solaire de stockage d'eau</i>	79
5.3 <i>Refroidisseur solaire à adsorption</i>	79
5.4 <i>Ventilo convecteur</i>	80
5.5 <i>Pompes et réservoir de stockage d'eau</i>	81
6 DISCUSSION	82
7 BIBLIOGRAPHIE	83
CONCLUSION GENERALE	84

Remerciements

Avant tout j'adresse mes remerciements à Monsieur Adel BENCHABANE, Maître de conférences à l'Université de Biskra, de m'avoir proposé ce sujet. L'intérêt qu'il a porté à mon travail et la confiance qu'il m'a constamment témoignée ont été pour moi très motivants afin d'accomplir ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent à Monsieur Mabrouk HECINI, Professeur à l'Universitaire de Biskra, qui a bien voulu accepter de présider le jury de la soutenance. Je remercie Messieurs Nourddine MOUMMI, Professeur à l'Université de, Biskra et Abdelhafid brima, Maître de conférences à l'Université de Biskra, qui m'ont fait l'honneur de participer au jury.

Je remercie également tout les enseignants de département de génie mécanique de l'Université de Biskra.

Je tiens très sincèrement à remercier Messieurs Mohamed AFRID et Rachid ALEMMI, Professeurs à l'Université de Constantine de m'avoir soutenu et encouragé pour faire le Magister.

En fin, Je remercie tous mes très chers amis de Biskra, de Souk Naamane et de Constantine qui ont participé de près ou de loin à l'aboutissement de ce mémoire.

Nomenclature

- tep** : tonne équivalent pétrole
- TJ** : unité de calcul térajoule
- T_B** : température relative de base extérieur (c°)
- T_M** : température ambiante (c°)
- T_H** : température de la source de chaleur (c°)
- T_L** : température de la source froide (c°)
- I_p** : irradiation directe des rayons du soleil (W/m²)
- A_s** : surface superficielle solaires (m²)
- Φ_B** : humidité relative de base extérieure
- Q_e** : puissance frigorifique (W)
- Q_s** : quantité de chaleur reçue par le capteur (W)
- Q_g** : quantité de chaleur reçue par le générateur (W)
- Q_a** : quantité de chaleur de sorption vers le milieu ambiant (W)
- W_{ele}** : travail électrique (W)
- E_{CEN}** : énergie d'eau chaude nécessaire (kWh)
- PSD** : puissance solaire disponible (Wh/m²)
- η_{sol-pow}** : rendement d'un panneau solaire (-)
- η_{pow-cool}** : rendement du système frigorifique (-)
- COP** : coefficient de performance (-)
- C_P** : capacité calorifique (J/kg/c°)
- ρ** : masse volumique (kg/l)
- C_i** : coefficient d'inclinaison des capteurs (-)
- C_o** : coefficient d'orientation des capteurs (-)
- C_c** : coefficient de correction du fluide caloporteur (-)

Liste des figures

- Figure 0.1 Contexte énergétique actuel dans le monde (Mostefa-Kara 2005).
- Figure 0.2 Evolution de la production mondial des énergies fossiles et la concentration du CO_2 dans l'atmosphère (Mostefa-Kara 2005).
- Figure 0.3 Potentiel solaire au tour du monde (Mostefa-Kara 2005).
- Figure 0.4 Schéma des Zones climatiques de l'Algérie (Berdja et al. 2007).
- Figure 1.1 Schéma des différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire.
- Figure 1.2 Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque dans un circuit fermé avec une charge quelconque (Kim and Infante Ferreira 2008).
- Figure 1.3 Schéma d'un système frigorifique solaire à compression employant des panneaux photovoltaïque (Kim and Infante Ferreira 2008).
- Figure 1.4 Capteur solaire thermique plan (André and Thomas 2008).
- Figure 1.5 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire thermique plan (André and Thomas 2008).
- Figure 1.6 Capteur solaire thermique sous vide (André and Thomas 2008).
- Figure 1.7 Schéma d'un processus de réfrigération solaire thermomécanique (Kim and Infante Ferreira 2008).
- Figure 1.8 Cycle de Carnot d'un système solaire thermomécanique (diagramme T-S).
- Figure 1.9 Système de réfrigération par sorption (Kim and Infante Ferreira 2008).
- Figure 1.10 Illustration d'un système de réfrigération par absorption à simple effet (Kim and Infante Ferreira 2008).
- Figure 1.11 Illustration d'un système de réfrigération par absorption à double effet (Kim and Infante Ferreira 2008).
- Figure 1.12 Système de rafraîchissement par dessiccation liquide liée à une source thermique de capteurs solaires (Kim and Infante Ferreira 2008).
- Figure 1.13 Schématisation du phénomène d'adsorption (Chekirou 2008).

- Figure 1.14 Rafrachissement par dessiccation solide liée à une source thermique solaire (Kim and Infante Ferreira 2008).
- Figure 1.15 Performance et coût des différents systèmes de production du froid solaire.
- Figure 2.1 Schéma d'un refroidisseur à absorption (Fan et al. 2007).
- Figure 2.2 COP en fonction de la température de générateur pour des réfrigérateurs à absorption à 1, 2 et 3 effet (Fan et al. 2007).
- Figure 2.3 Schéma d'un réfrigérateur solaire à adsorption (Fan et al. 2007).
- Figure 2.4 Réfrigérateur à adsorption de deux lits (Fan et al. 2007).
- Figure 3.1 Arbre de décision pour le choix de la technologie de rafraîchissement solaire (Delorme et al. 2005).
- Figure 3.2 Nombre total des systèmes de chauffage et de refroidissement solaires installés dans différents pays et classés dans les systèmes de petite ou grande échelle. «Autres pays» comprennent : Arménie, Australie, Belgique, Danemark, Egypte, Japon, le Kosovo, le Lichtenstein, Malte, Mexique, Pays-Bas, Singapour, Afrique du Sud, Suisse, Syrie, Turquie, Royaume-Uni, Emirats Arabes Unis et aux USA (Sparber et al. 2009).
- Figure 3.3 Utilisation du chauffage solaire à petite échelle et les installations de refroidissement. («Autres services» comprennent: les écoles, les salles de spectacle, hôtels) (Sparber et al. 2009).
- Figure 3.4 Utilisation du chauffage solaire à grande échelle et les installations de refroidissement. («Autres services» comprennent: les hôpitaux, les cantines, centre sportif) (Sparber, Napolitano et al. 2009).
- Figure 3.5 Puissance frigorifique des refroidisseurs à sorption assisté par l'énergie solaire installés dans différents pays du monde. «Autres pays» comprennent la puissance de refroidissement installé en Australie, Belgique, Danemark, Egypte, au Kosovo, le Lichtenstein, Malte, Mexique, Pays-Bas, Singapour, Suisse, Syrie, Turquie, Royaume-Uni, Emirats Arabes Unis et dans une usine américaine (Sparber et al. 2009).
- Figure 3.6 Pourcentage d'utilisation de différentes technologies pour les refroidisseurs à sorption dans les systèmes à grande échelle (Sparber et al. 2009).
- Figure 3.7 Pourcentage d'utilisation de différentes technologies pour les refroidisseurs à sorption dans les 156 systèmes à petite échelle (Sparber et al. 2009).
- Figure 4.1 Schématisation du local étudié pour l'installation de climatiseur solaire.
- Figure 4.2 Schéma d'un exemple de système solaire de climatisation (Zhai et al. 2008)
- Figure 4.3 Photo du refroidisseur à adsorption (Zhai et al. 2008).

Liste des figures

- Figure 4.4 Schéma du refroidisseur et de ses composantes (Wang et al. 2003).
- Figure 4.5 Section transversale de l'adsorbeur (Wang et al. 2003).
- Figure 4.6 Schématisation d'un système solaire avec un refroidisseur de deux lits adsorbants [(Wang et al. 2003), (Zhai et al. 2008)].
- Figure 4.7 Système solaire durant l'étape de la désorption dans l'adsorbeur 1 et l'adsorption dans l'adsorbeur 2.
- Figure 4.8 Système solaire durant l'étape de la désorption dans l'adsorbeur 2 et l'adsorption dans l'adsorbeur 1.
- Figure 4.9 Diagramme P-T pour le cycle de base idéal, cycles idéal et pratique d'un refroidisseur à adsorption (Zhai and Wang 2009).
- Figure 4.10 Variations de la température ambiante et l'intensité de rayonnement solaire d'une journée de test à Shanghai (Zhai and Wang 2009).
- Figure 4.11 Variations des températures de l'eau à l'intérieur du réservoir de stockage durant le fonctionnement de la machine (Zhai and Wang 2009)
- Figure 4.12 Variation de la température d'entrée et de sortie d'eau chaude, de refroidissement et refroidie durant le fonctionnement du système (Zhai and Wang 2009).
- Figure 4.13 Schéma simplifié pour l'installation du système de climatisation solaire.
- Figure 4.14 Illustration de l'installation des capteurs solaires plans sur la toiture du local.
- Figure 4.15 Illustration du local contenant le refroidisseur et les réservoirs de stockage de l'eau chaude et froide.
- Figure 4.16 Schéma d'un capteur solaire plan.
- Figure 4.17 Photo d'un ballon solaire de stockage de l'eau chaude.
- Figure 4.18 Photo d'un refroidisseur solaire à adsorption (Uli 8-11 septembre 2008).
- Figure 4.19 Photos de pompes d'eau.

Liste des tables

- Table 0.1 Comparaison des caractéristiques des énergies renouvelables et fossiles.
- Table 0.2 Potentiel solaire en Algérie (Khelil 2007).
- Table 0.3 Conditions de bases extérieures du calcul des installations de climatisation en Algérie (Berdja et al. 2007).
- Table 1.1 Synthèse des études de réfrigération solaire à absorption.
- Table 2.1 Comparaison entre les couples d'absorption de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ et de $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ (Fan, Luo et al. 2007).
- Table 2.2 Les avantages et les inconvénients des deux systèmes de sorption : adsorption et absorption (Fan et al. 2007).
- Table 3.1 Performances d'une sélection de machines et d'installations de rafraîchissement solaires commerciales basées sur la technique d'absorption [(Jakob 2009), (2008), (2008)].
- Table 3.2 Performances d'une sélection d'installations de rafraîchissement solaire commerciales basées sur la technique d'absorption (Delorme et al. 2005).
- Table 3.3 Performances d'une sélection de la littérature de prototypes de rafraîchissement solaires basées sur la technique d'absorption.
- Table 3.4 Performances d'une sélection de machines et d'installations de rafraîchissement solaires commerciales basées sur la technique d'adsorption [(Wiemken 2008), (Jakob 2009), (2008), (2008)].
- Table 3.5 Performances d'une sélection d'installations de rafraîchissement solaire commerciales basées sur la technique d'absorption (Delorme et al. 2005).
- Table 3.6 Performances d'une sélection de la littérature de prototypes de rafraîchissement solaires basées sur la technique d'absorption.
- Table 4.1 Puissance du climatiseur par rapport à la surface traitable.
- Table 4.2 Performances du refroidisseur d'adsorption de Zhai and Wang (2009).
- Table 4.3 Détails des pompes d'eau proposées pour le système solaire.
- Table 4.4 Comparaison entre les consommations électriques des systèmes de climatisation classique et solaire à adsorption.

Introduction générale

La première crise pétrolière du début des années **1970** a totalement modifié le rapport des pays occidentaux avec l'énergie, abondante et bon marché, est devenue un bien rare et cher. Les efforts ont été concentrés, d'une part sur la baisse du coût de l'énergie, et d'autre part sur la réduction de la consommation énergétique. Il est important de rappeler le contexte énergétique général et actuel au monde 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. La figure 0.1 représente ce contexte en relation avec la croissance démographique donc la surconsommation des énergies fossiles [(Vitte 2007), (Mostefa-Kara 2005)].

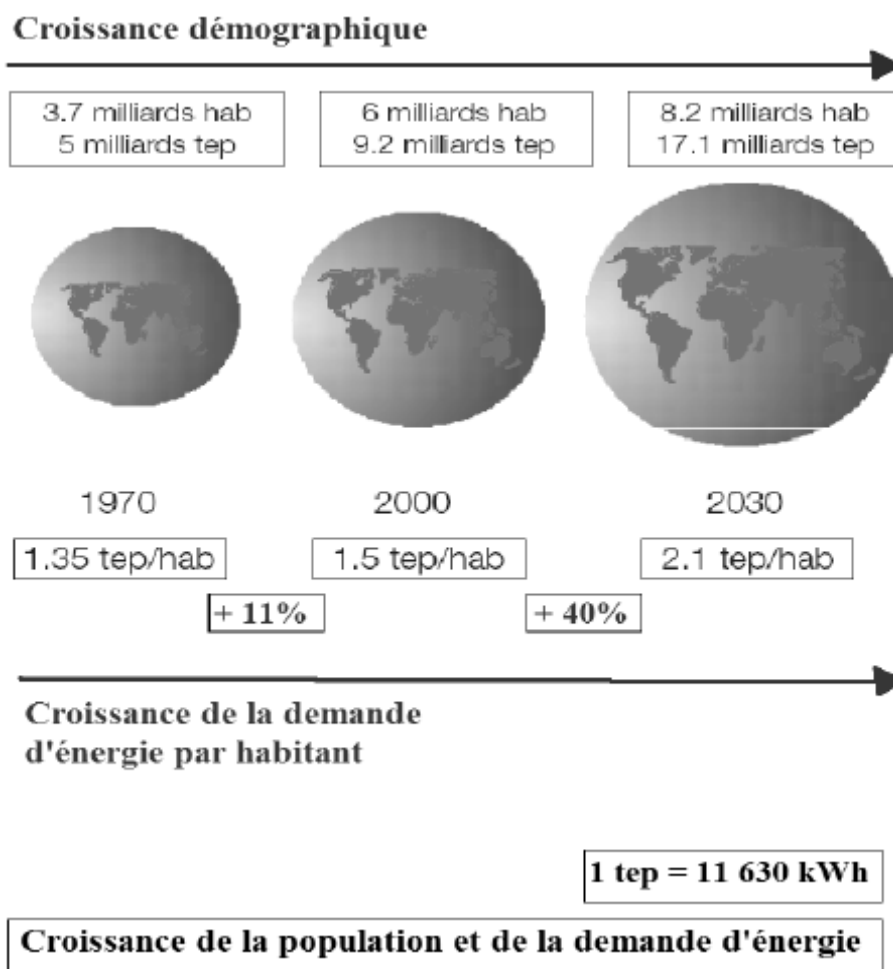


Figure 0.1 : Contexte énergétique actuel dans le monde (Mostefa-Kara 2005).

1 Enjeux énergétiques

1.1 Consommation mondiale d'énergie

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. La raréfaction des ressources mondiales en énergie fossile, bien que la date de la fin du pétrole ne soit pas l'objet d'un consensus, est un phénomène qui va nécessairement favoriser la hausse du coût de l'énergie (Vitte 2007).

La réfrigération traditionnels cycles sont entraînés par l'électricité, ce qui augmente fortement la consommation de l'électricité et l'énergie fossile. L'Institut International du Froid à **Paris** a estimé qu'environ **15%** de toute l'électricité produite dans l'ensemble monde est utilisé pour les procédés de conditionnement d'air de réfrigération et de divers types, et la consommation d'énergie pour les systèmes de climatisation a été récemment estimée à **45%** de l'ensemble des ménages et les bâtiments commerciaux. En outre, le pic de la demande d'électricité pendant l'été est renforcé par la propagation de la climatisation appareils (Fan et al. 2007).

1.2 Energie et pollution du climat

La consommation d'énergies fossiles est une des principales sources de la dégradation de l'environnement. L'usage massif de ces combustibles a déjà commencé à dérégler l'effet de serre, ce dérèglement menace déjà notre climat.

Les gaz qui augmentent l'effet de serre (**CO₂**, **NO_x**, **SO₂**) sont principalement issus de la combustion des carburants fossiles et de l'activité industrielle. Les oxydes de soufre (**SO₂**) et les oxydes d'azote (**NO_x**) sont principalement originaires des combustibles des usines et des automobiles. Ils acidifient les nuages et retombent sous forme de pluies acides qui affectent gravement les écosystèmes et qui polluent l'atmosphère. La figure 0.2 montre l'évolution de la production mondial des énergies fossiles ainsi que la concentration du **CO₂** dans l'atmosphère.

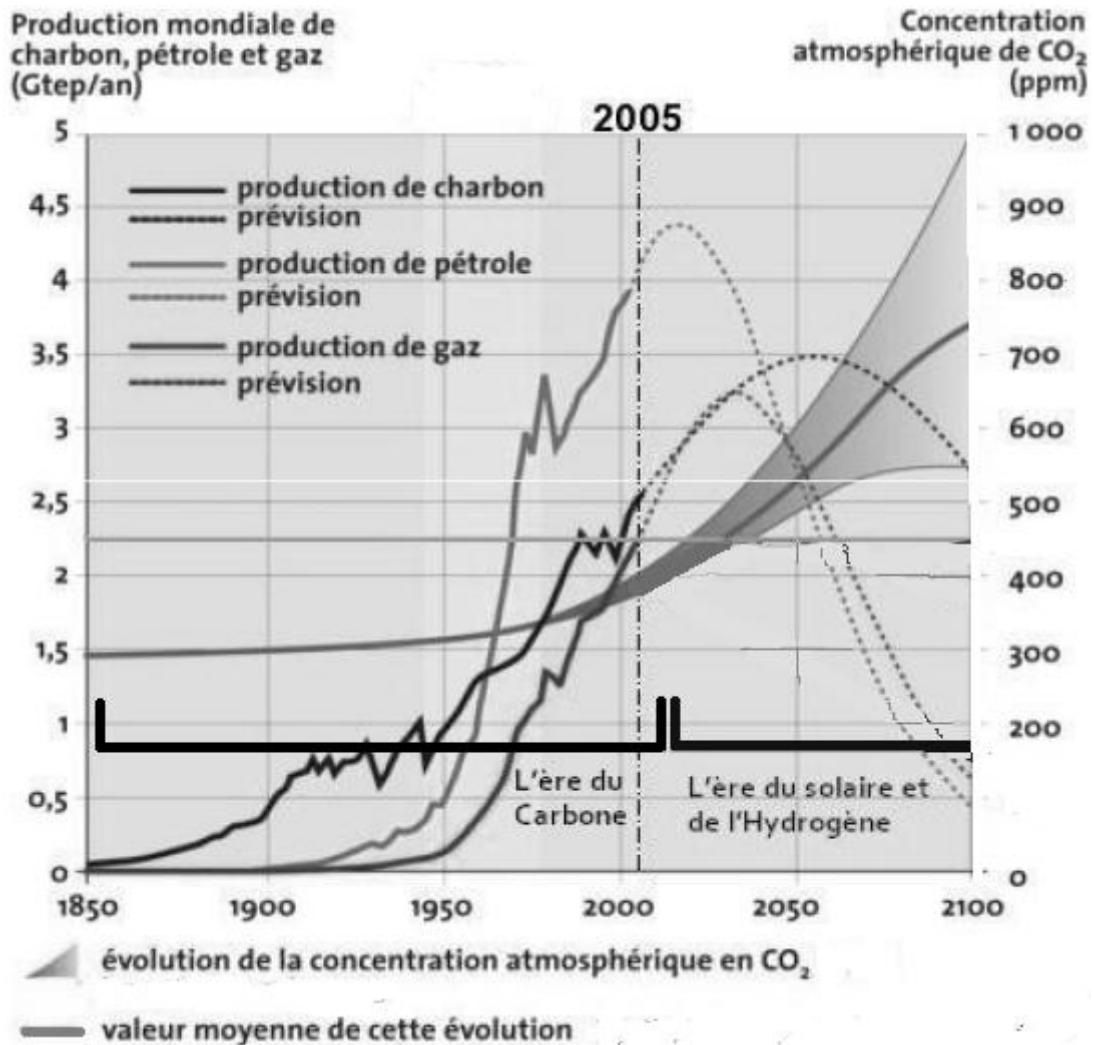


Figure 0.2 : Evolution de la production mondiale des énergies fossiles et la concentration du CO₂ dans l'atmosphère (Mostefa-Kara 2005).

Par ailleurs, les déchets nucléaires issus de la production d'énergie atomique représentent un risque sans précédent pour les générations à venir, certains restant en activité pendant des milliers d'années. De plus, la déforestation à des fins de production d'énergie est une des principales causes de la désertification des sols. Des grandes famines qui en résultent déjà, l'accroissement démographique rend extrêmement préoccupante la perte de terres productives au profit du désert (Vitte 2007).

Notre étude bibliographique a montré que les pays les plus touchés par ces deux facteurs (les gaz à effet de serre et la raréfaction des ressources en énergie fossile) sont les pays les plus développés. A titre indicatif, nous avons choisi de donner ci-dessous un aperçu de la situation de la **Chine** et de l'**Europe**. Ce choix est motivé par i) l'abondance des références

bibliographiques pour ces deux cas, ii) pour le fait que la **Chine** pourrait devenir le plus grand émetteur mondial de gaz à effet de serre d'ici **2020** et iii) puisque l'**Europe**, si proche de notre territoire, entretient avec l'Algérie des relations énergétiques importantes.

1.2.1 Exemple de la Chine

Le développement rapide de la Chine est aujourd'hui confronté d'une part à l'importation croissante de pétrole pour le transport et l'industriel ; et d'autre part aux graves défis de l'environnement tels que les coûts élevés de traitement de la pollution atmosphérique. Actuellement, la consommation d'énergie dans les bâtiments se compose principalement d'eau chaude sanitaire, systèmes de chauffage et de climatisation, qui représente environ **25-30%** de la consommation totale d'énergie en Chine. Bien que cette proportion soit inférieure à **40%** des pays développés comme l'Europe. Les spécialistes estiment que cette proportion sera remarquablement plus élevée avec le développement économique rapide de la Chine, car la plupart des systèmes d'énergie du bâtiment consomme de l'électricité et du gaz (Zhai and Wang 2008).

En **2006**, la consommation totale d'énergie atteint **2,46** milliards de **tec** (tonne d'équivalent de charbon). En conséquence, les émissions de **CO₂** ont augmenté à environ **2,7** milliards de tonnes. La consommation d'électricité augmente progressivement en raison de l'utilisation généralisée des climatiseurs. En **2006**, la vente de climatiseurs domestiques était d'environ **24,5** millions. Il a été signalé que **87,2%** des familles dans les villes de la Chine possédait au moins un climatiseur en **2006**, comparativement à seulement **35,8%** en **2001** (Wang and Zhai 2010).

1.2.2 Exemple de l'Europe

La consommation d'énergie dans les bâtiments commerciaux et résidentiels représente environ **40%** du budget énergétique de l'Europe. Les conditions défavorables en plain air en milieu urbain et le prix réduit des unités de climatisation dans les bâtiments ont provoqué une augmentation significative de la demande de climatisation dans les bâtiments. Le nombre d'installation des systèmes de climatisation en Europe, avec une capacité de refroidissement de plus de **12KW**, a augmenté d'un facteur de **5** au cours des **20** dernières années. Le total espace climatisé passé de **30** millions de **m²** en **1980**, à plus de **150** millions de **m²** en **2000**. La consommation d'énergie annuelle de climatiseurs individuels a été de **6 TJ** en **1990**, **40 TJ** en **1996** et **160 TJ** en **2010** (**1 TJ=10¹² J**). La demande en croissance rapide pour le conditionnement de l'air a imposé une augmentation

significative de demande d'énergie primaire. Le résultant des émissions de **CO₂** dans l'**UE** devraient augmenter par un facteur de **20** par rapport à **1990** à **2010** [(Balaras et al. 2007)]. D'après l'analyse présentée ci-dessus sur les deux exemples de la Chine et de l'Europe, nous estimons que notre pays est aussi concerné vue la croissance du parque national du bâtiment durant la dernière décennie.. En effet, la maîtrise de l'énergie est un des problèmes majeurs auxquels notre société va devoir faire face dans les décennies à venir. Actuellement, la consommation d'énergie en Algérie dans le domaine du froid et du bâtiment représente un pourcentage important. Les leviers qui permettront de modifier durablement cet état de fait, dans les domaines du bâtiment et du froid industriel, se trouvent à la fois dans une meilleure maitrise des besoins de consommation, dans l'utilisation des systèmes plus efficaces et dans une plus large utilisation des énergies renouvelables (Berdja et al. 2007).

2 Sources limitées et énergies renouvelables

Seule l'utilisation de toutes les formes d'énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, bois et biomasse) et une augmentation de l'efficacité énergétique permettront d'éviter de dévaster définitivement notre planète pour nos seuls besoins immédiats (tableau 0.1).

Nous nous intéressons dans ce document à une forme précise d'énergie renouvelable abondante en Algérie. Il s'agit de l'énergie solaire dont son développement sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et au mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront) mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejets polluants (fumées contrent du **CO₂** et des **NO_x** par les centrales thermiques) ; pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires), possibilité de limitation de l'emploi des CFC (production du froid solaire) (Mayor and Dind 2003).

L'énergie solaire doit être fondée sur l'intégration de capteurs solaires dans les bâtiments. Les façades des bâtiments peut être couvertes de capteurs solaires, et donc de devenir multifonctionnelles. En outre, les capteurs solaires peuvent être utilisés pour améliorer l'apparence de la façade lors de l'examen esthétique compatibilité.

Energies renouvelables	Renouvelables	Variables	Décentralisées	Diffuse	Gratuites
Energies fossiles	Epuisables	Disponibles spatialement et temporellement	Centralisées	A forte densité énergétique	Payantes

Tableau 0.1 : Comparaison des caractéristiques des énergies renouvelables et fossiles.

L'énergie solaire a des applications dans un nombre considérable, de domaine de la vie humaine par exemple, pour la production de l'électricité, le réchauffage et pour la production du froid. Pour ce dernier on trouve que l'utilisation du froid à un grand espace par exemple le domaine agro-alimentaire, la conservation du produit pharmaceutique, et le secteur de la climatisation. L'application commerciale de l'énergie solaire pour la climatisation est relativement nouvelle. Pourquoi retarder donc notre mise en marche vers un équilibre aussi vital? (Fan et al. 2007).

3 Gisement solaire en Algérie

Le Sahara représente environ **87%** de la surface globale de l'**Algérie**, ce qui représente la majeure partie du territoire Algérien, situé entre les latitudes **20 ° N** et **34 ° N**. Ainsi, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires parmi les plus élevés dépassant les **2000** heures annuellement et peut atteindre les **3900** heures (Belgaid 2011) (voir la figure 0.3 et le tableau 0.2). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de **1m²** est de l'ordre de **5KWh** sur la majeure partie du territoire national, soit près de **1700KWh/m²/an** au Nord et **2263KWh/m²/an** au Sud du pays.

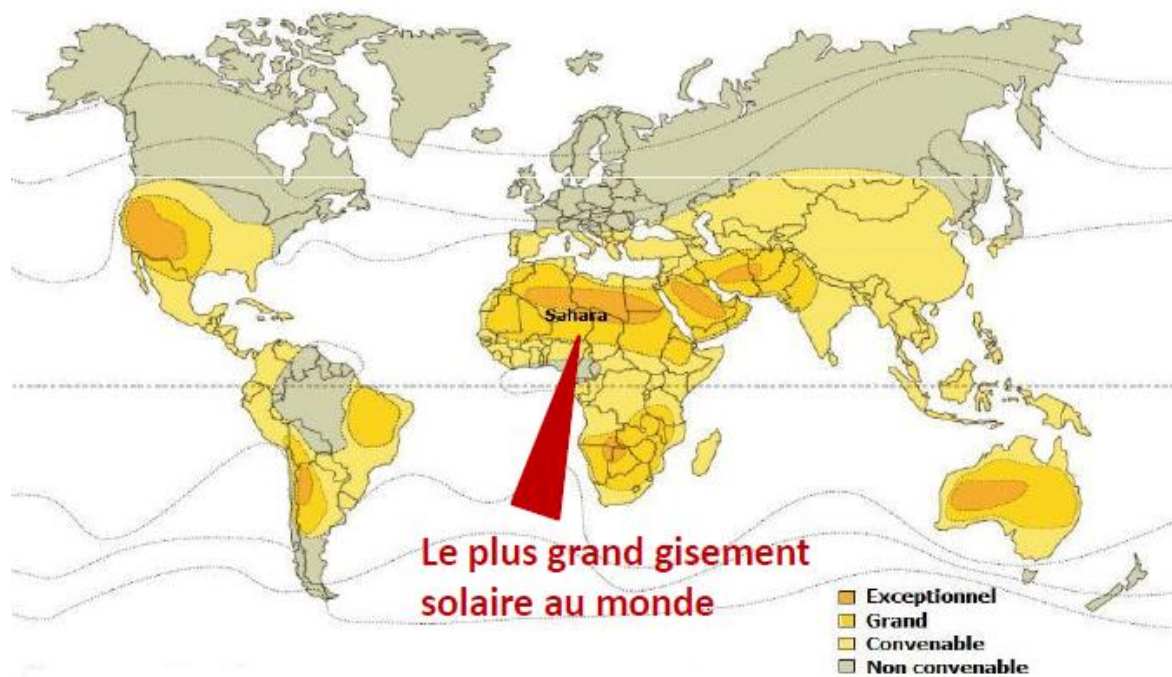


Figure0.3 : Potentiel solaire au tour du monde (Mostefa-Kara 2005).

Aires	Littoral	Hautes plateaux	Sahara
Surface %	4	10	36
Temps d'ensoleillement	2650	3000	3500
Energie reçue (Kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 0.2 : Potentiel solaire en Algérie (Khelil 2007).

3.1 Besoins de la climatisation

Au-delà du 39^{ème} degré de l'altitude, la climatisation n'a plus d'importance. La situation de l'Algérie (l'altitude 36° N) signifie que le climat générale qui y règne et qui s'étale sur une importante période de l'année est chaud et variant entre humide et sec. Cette situation rend pratiquement impossible de maintenir la température intérieure des habitations à un niveau compatible avec l'exercice des activités humaines. Il est donc souhaitable de climatiser les habitations dans les régions où la température quotidienne moyenne dépasse le seuil de confort. C'est le cas des différentes zones climatiques en Algérie. La figure 0.4 représente les quatre zones climatiques plus sous zone dont la région de Chlef. La température quotidienne pendant les séquences chaudes dépasse pour la majorité de ces régions les 30°C. Le tableau 0.3 donne quelques valeurs de bases utilisées pour le dimensionnement des systèmes de climatisation.

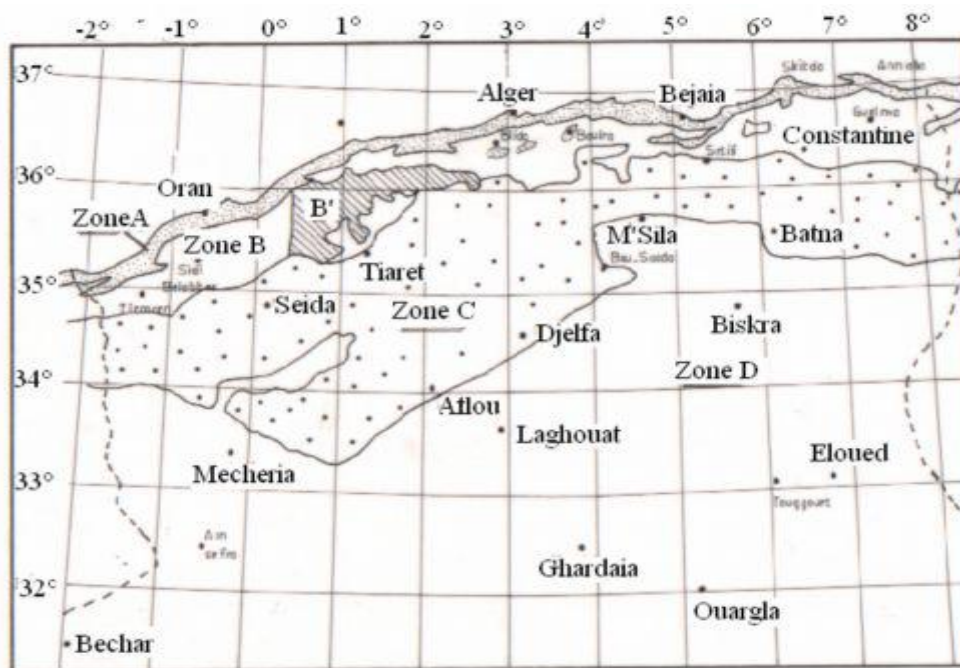


Figure 0.4 : Schéma des Zones climatiques de l'Algérie (Berdja et al. 2007).

Zones climatiques	Conditions de base : été		
	Température t_B en °C	Ecart Diurne en °C	Humidité relative Φ_B %
<u>Zone A</u>			
<500m	34	9	44
500m à 1000m	33.5	10	40
>1000m	30.5	9	47
<u>Zone B</u>			
<500m	38	15	30
500m à 1000m	37	15	28
>1000m	35	14	28
<u>Sous zone B'</u>			
Entièrement >500m	41	18	41
<u>Zone C</u>			
500m à 1000m	39.5	20	18
>1000m	36	18	22
<u>Zone D</u>			
<500m	45	20	11
500m à 1000m	42	18	13
>1000m	37.5	16	17

Tableau 0.3 : Conditions de bases extérieures du calcul des installations de climatisation en Algérie (Berdja et al. 2007).

T_B , Φ_B : Température et humidité relative de base extérieures.

4 Objectifs et organisation du mémoire

Contrairement à une idée répandue, l'énergie solaire n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergies conventionnelles. En effet, de nombreuses installations solaires sont aujourd'hui à l'arrêt faute d'avoir un budget pour la maintenance des équipements. Toutefois ; sans être totalement gratuite, l'énergie solaire présente des coûts de fonctionnement réduits, et offre dans certains cas une alternative économiquement rentable, par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Dans ce contexte, la présente étude vient pour répondre à un certain nombre de questions liées : i) au choix de la technologie de climatisation solaire, de sa complexité et de son fonctionnement dans la région de Biskra et ii) au coût d'investissement de départ et surtout de sa maintenance. Ainsi, la suite de ce manuscrit est

subdivisée en quatre chapitres suivie par une conclusion générale. Nous donnons ci-dessous un aperçu sur le contenu de ces chapitres :

- Le premier chapitre présente une revue bibliographique descriptive des différentes technologies disponibles pour produire le froid solaire. Ce travail de synthèse bibliographique permettra de comparer entre les performances et les coûts d'investissement des différentes technologies et de présélectionner les technologies qui semblent être meilleures.
- Le deuxième chapitre présente une synthèse de la littérature sur les technologies de réfrigération solaire par sorption, présélectionnées dans le premier chapitre. Nous exposerons ces technologies recommandées pour les différentes applications de froid, à savoir : la réfrigération, la climatisation et la production de la glace. Ainsi, les avantages et les inconvénients des technologies d'adsorption et d'absorption seront également présentés afin de pouvoir sélectionner par la suite une de ces deux technologies.
- Le troisième chapitre s'intéresse exclusivement à la climatisation solaire. Tout d'abord, nous passerons en revue les systèmes de climatisation solaire à sorption installés et testés dans le monde. Nous mettrons l'accent sur des exemples de prototypes ou d'installations déjà commercialisées basées sur les phénomènes d'absorption ou d'adsorption. A la fin du chapitre, nous expliciterons un système qui répond à nos besoins en commentant le choix ainsi adopté.
- Le quatrième chapitre présente une description détaillée d'un système de climatisation solaire à adsorption en vue de l'installer dans la région de Biskra. D'une part, nous expliciterons le fonctionnement de toutes les composantes de l'installation et de son essai expérimental réalisé en Chine ; d'autre part, nous présenterons une étude préliminaire d'un éventuel test de cette installation dans la région de Biskra. Un calcul détaillé sera également proposé pour estimer : le besoin d'eau chaude, la surface de captation, les dimensions du local d'installation et le coût de toute l'installation. Ainsi, une discussion et une comparaison avec un système classique similaire sera également présenté afin de pouvoir donner nos recommandations sur le gain au niveau de la consommation électrique et de la rentabilité du système.

- La conclusion générale présente une récapitulation des conclusions établies de la présente étude. Nous donnerons notamment nos propres recommandations et présenterons les perspectives envisagées.

5 Bibliographie

- Balaras, C., G. Grossman, H. Henning, C. Infante Ferreira, E. Podesser, L. Wang, E. Wiemken, "Solar air conditioning in Europe--an overview." *Renewable and sustainable energy reviews* **11**(2): 299-314 (2007).
- Belgaid, B., "Building thermal performance in Saharan climate." *International Journal of Energy and Environment* **2**(2): 261-266 (2011).
- Berdja, M., A. Benhabiel, B. Abbad, A. Noui, S. Chikh, K. Daoud, L. Ouferr, *Climatisation solaire en Algérie*. ICRE'07 University of Bejaia (2007).
- Fan, Y., L. Luo, B. Souyri, "Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **11**(8): 1758-1775 (2007).
- Khelil, C., *Guide des Energies Renouvelables*, République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Energie et des Mines (2007).
- Mayor, J., P. Dind, "Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption transportable." (2003).
- Mostefa-Kara, K., *L'Algérie et l'Afrique face au défi climatique et énergétique*, L'Agence Nationale des Changements Climatiques Membre Principal du GIEC (2005).
- Vitte, T., "Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment: Proposition d'une stratégie de régulation du système", *Université de Savoie*, pp (2007).
- Wang, R. Z., X. Q. Zhai, "Development of solar thermal technologies in China." *Energy* **35**(11): 4407-4416 (2010).
- Zhai, X., R. Wang, "Experiences on solar heating and cooling in China." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12**(4): 1110-1128 (2008).

Chapitre 1: Production du froid solaire

Nous présentons dans ce chapitre une revue bibliographique sur les différentes technologies disponibles pour produire le froid solaire notamment les techniques photovoltaïques et thermiques. A la fin du chapitre, nous présentons une comparaison entre les performances et les coûts d'investissement de ces technologies en sélectionnant la technologie qui semble être meilleure pour convertir l'énergie solaire en énergie frigorifique.

Il existe plusieurs voies d'utilisation de l'énergie solaire pour produire le froid. On peut les répertorier dans deux types de procédés principaux : i) le premier est basé sur l'emploi de l'électricité en utilisant des panneaux photovoltaïques, ii) le deuxième est basé sur l'emploi des panneaux photo-thermiques. Les techniques utilisées sont listées dans la figure 1.1 en donnant chaque fois une référence clé pour chaque technologie.

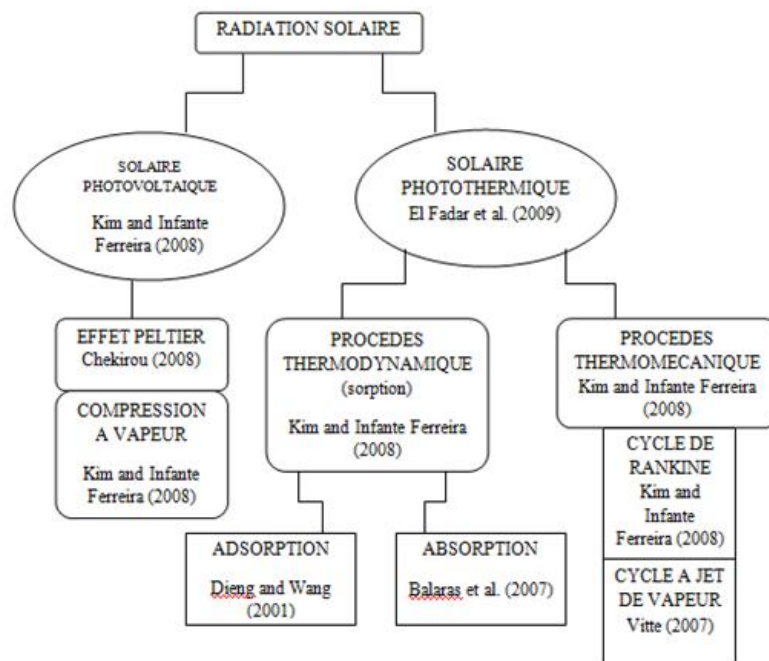


Figure 1.1 : Schéma des différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire.

1 Techniques basées sur la conversion photovoltaïque

Les technologies de production de froid solaire peuvent être des systèmes frigorifiques qui sont basés sur l'utilisation de l'électricité. Dans ces cas là, l'énergie solaire est transformée en énergie électrique grâce à des capteurs solaires photovoltaïques qui sont essentiellement des semi-conducteurs dont le rendement et le coût varient selon le matériel et les méthodes de fabrication. La plupart des cellules solaires commerciales disponibles sur le marché sont fabriquées à partir de silicium. La figure 1.2 représente un schéma d'un panneau solaire photovoltaïque dans un circuit fermé avec une charge quelconque de puissance W (Kim and Infante Ferreira 2008).

Le rendement d'un panneau solaire est défini par le rapport de la puissance W en (watt) par rapport au produit de la surface superficielle solaire A_S en (m^2) avec l'irradiation directe des rayons du soleil I_p en (W/m^2), l'équation 1.1 suivante représente ce rapport (Kim and Infante Ferreira 2008).

$$\eta_{Sol-Pow} = \frac{W}{I_p * A_s} = \frac{W}{Q_s} \quad (1.1)$$

Bien que des rendements remarquablement élevés ont été enregistrés dans des laboratoires, le plus grand rendement de panneaux vendus sur le marché est d'environ **15%** pour un midi solaire. Avec ce faible rendement en doit signalé également qu'un panneau solaire est relativement cher avec un prix variant remarquablement dans le marché (Kim and Infante Ferreira 2008).

On trouve deux types de systèmes de réfrigération solaire basés sur l'emploi des panneaux photovoltaïques : i) Systèmes à compression de vapeur et ii) Systèmes à effet Peltier.

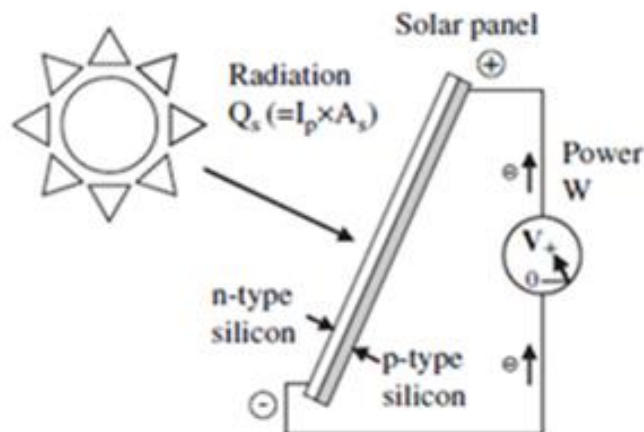


Figure 1.2 : Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque dans un circuit fermé avec une charge quelconque (Kim and Infante Ferreira 2008).

1.1 Systèmes à compression de vapeur

La figure 1.3 montre la composition d'un système de compression pour produire du froid (Kim and Infante Ferreira 2008).

Le rendement est le rapport entre le gain par rapport à la dépense. Si le compresseur mécanique du système a consommé le travail W , pour produire la puissance frigorifique Q_e , le rendement du système est donc défini par l'équation 1.2 :

$$\eta_{Pow-Cool} = \frac{Q_e}{W} \quad (1.2)$$

La combinaison des équations 1.1 et 1.2 donne le rendement global, du système de refroidissement solaire électrique (Kim and Infante Ferreira 2008) :

$$\eta_{Sol-Cool} = \eta_{Sol-Pow} * \eta_{Pow-Cool} = \frac{Q_e}{Q_s} \quad (1.3)$$

Le coefficient de performance **COP** de refroidissement des machines à compression de vapeur varie entre **1.1** à **3.3** pour une différence de température d'évaporation entre **-5°** et **15°**, et de température de condensation entre **45°** et **61°** (Kim and Infante Ferreira 2008).

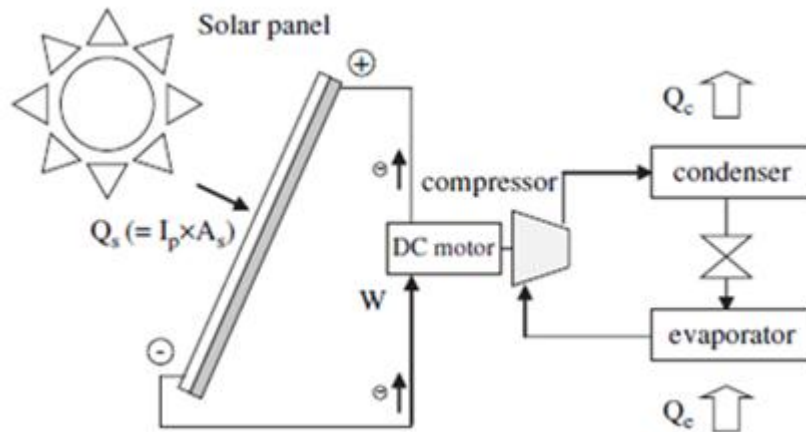


Figure 1.3 : Schéma d'un système frigorifique solaire à compression employant des panneaux photovoltaïques (Kim and Infante Ferreira 2008).

1.2 Systèmes à effet Peltier

Le français **jeans Charles Peltier** (1785-1845) découvrit, en **1834**, un phénomène physique de déplacement de la chaleur en présence d'un courant électrique parcourant deux différents matériaux (matériaux conducteurs ou semi-conducteur) en contact. Ce phénomène ne permet pas d'avoir une forte puissance frigorifique et a un faible rendement, utilisé notamment à bord des véhicules spatiaux et dans les petits réfrigérateurs de laboratoires (Chekirou 2008).

Plusieurs défis sont exposés à la commercialisation de ce type de système : i) la batterie électrique (stockage) est coûteuse et volumineuse, ii) la puissance demandée par le compresseur nécessite une grande surface de capteurs, iii) le prix d'un panneau solaire photovoltaïque devrait être encore baissé en concurrence avec d'autres technologies de froid solaire, par exemple, en Allemagne le prix d'un panneau solaire varie entre 3€ et 7€ par W_p (Peak watt). $1W_p$ représente la production de 1W pour un rayonnement solaire de $1kW/m^2$ (Kim and Infante Ferreira 2008).

2 Techniques basées sur la conversion thermique

Les systèmes solaires thermiques utilisent la chaleur solaire plutôt que l'électricité solaire pour produire le froid. Dans ces systèmes, les capteurs solaires utilisés sont généralement de types capteurs plans. De même, on peut trouver dans la littérature d'autres formes de capteurs tels que la forme cylindro-parabolique par exemple (El Fadar et al. 2009). Nous résumons dans ce qui suit les capteurs solaires dont on aura besoin dans les techniques de production de froid solaire par conversion thermique.

2.1 Capteurs solaires

Il existe tout une gamme de capteurs solaires qui permettent de répondre à différentes nécessités. Dans notre cas, il faut choisir le type de capteur qui donne le niveau de température exigé pour le fonctionnement de l'installation. Bien que, plus le niveau de température est élevé, plus les technologies mises en œuvre sont évoluées et plus le coût de production est élevé.

2.1.1 Capteurs solaires plans

Ce type de capteur se présente sous forme de boîtes de différentes dimensions. Les surfaces mises en œuvre vont de quelques mètres carrés pour les chauffe-eau solaires individuels à plusieurs centaines de mètres carrés pour les installations collectives. La figure 1.4 schématise un capteur solaire plan type (André and Thomas 2008).

Pour améliorer le rendement des capteurs, les absorbeurs sont recouverts d'un revêtement sélectif. Ces revêtements sont de couleur noire afin d'absorber le rayonnement solaire au maximum (coefficient d'absorption proche de 1) et leur état de surface est tel qu'ils piègent les rayonnements infrarouges qui sont émis lors de l'échauffement. Le coefficient d'émissivité est alors beaucoup plus faible que pour une peinture noire classique, et le rendement du capteur est nettement meilleur.

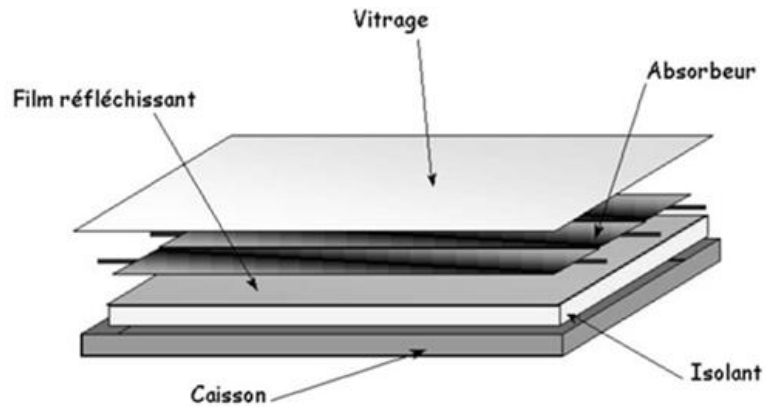


Figure 1.4 : Capteur solaire thermique plan (André and Thomas 2008).

Ainsi, le vitrage a pour fonction de laisser passer le maximum du rayonnement solaire et d'éviter les déperditions de chaleur vers l'extérieur lors de la montée en température de l'absorbeur. Le verre reste le matériau de prédilection. On utilise aussi des verres polis ou prismes qui réfléchissent moins les rayonnements dont les angles d'incidences sont supérieurs à 45° .

Pour comprendre mieux ce genre de collecteur, on a schématisé sur la figure 1.5 le fonctionnement d'un capteur solaire thermique plan. Une partie du rayonnement qui arrive sur le vitrage traverse celui-ci pour atteindre l'absorbeur. Ce dernier s'échauffe et transmet la chaleur au fluide caloporteur qui circule dans les tubes. Comme tout corps qui s'échauffe, l'absorbeur émet un rayonnement (en grande partie dans les infrarouges) qui est d'une part absorbé par le vitrage, d'autre part réfléchi par le film placé sur l'isolant. L'isolant a pour fonction de limiter les déperditions thermiques avec l'extérieur. En effet, le maximum d'énergie doit être transmis au fluide, il faut donc limiter les pertes avec l'environnement proche (André and Thomas 2008).

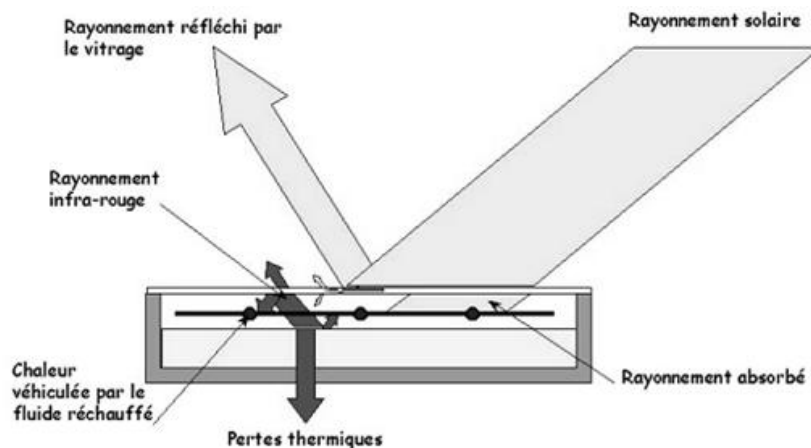


Figure 1.5 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire thermique plan (André and Thomas 2008).

Les capteurs plans ont un principe de fonctionnement basé sur une méthode simple de conversion de l'énergie solaire incidente, en énergie thermique directement utilisable. Par conséquent, leur domaine d'application est très restreint, ils présentent en outre un certain nombre d'inconvénient (comme les pertes de chaleur), ce qui a poussé les spécialistes et particulièrement les constructeurs à concevoir d'autres modèles de configuration plus rentables, qui utilisent le principe de concentration ou d'utiliser des tubes sous vides (Hamani, Moumami et al. 2007).

2.1.2 Capteurs solaires plans à air

Le principe de fonctionnement est le même que le précédent. Dans ce cas, on ne trouve pas de pompe de circulation mais des ventilateurs permettant de faire circuler l'air. Ces capteurs ne peuvent pas être utilisés pour produire de l'eau chaude sanitaire. Ils sont principalement utilisés pour des applications de chauffage ou de séchage. Ces capteurs peuvent être utilisés également, comme nous allons le voir, dans des installations de rafraîchissement par dessiccation (André and Thomas 2008).

Les principaux avantages de ces capteurs sont :

- simplicité de conception et de réalisation.
- l'absence de risque de gel en hiver.
- l'absence de surchauffe en été.

Les principaux inconvénients sont :

- 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 système de stockage adapté.

2.1.3 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 (figure1.6). Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur. De plus, l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

La conception de l'absorbeur et les tuyaux de circulation du fluide caloporteur sont comme un capteur plan. Le rendement est généralement meilleur que celui d'un capteur plan, surtout à des températures élevées (>60°C) (André and Thomas 2008).



Figure 1.6 : Capteur solaire thermique sous vide (André and Thomas 2008).

2.2 Processus thermomécanique

Dans un système de réfrigération solaire thermomécanique, le moteur mécanique thermique convertit la chaleur solaire à un travail mécanique qui à son tour entraine le compresseur mécanique de la réfrigération par compression de vapeur. Un schéma d'un tel système de refroidissement est montré sur la figure 1.7 (Kim and Infante Ferreira 2008).

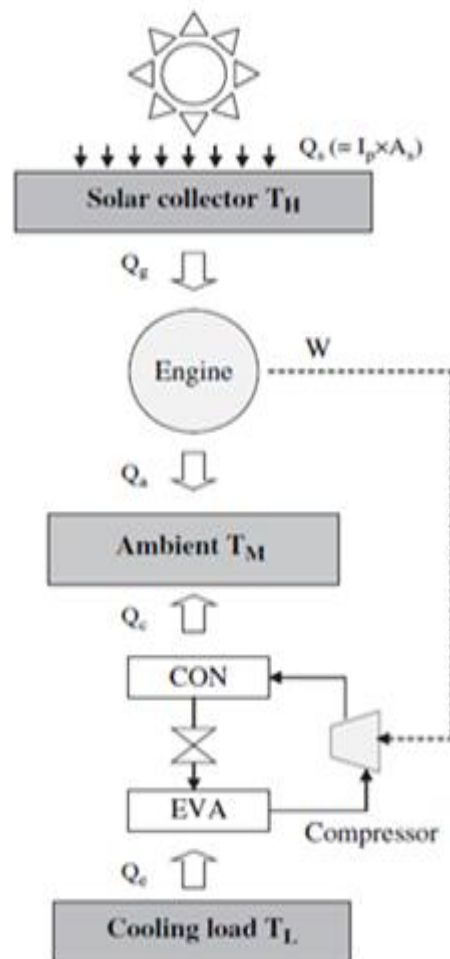


Figure 1.7 : Schéma d'un processus de réfrigération solaire thermomécanique (Kim and Infante Ferreira 2008).

Nous observons sur la figure que le capteur solaire reçoit d'abord le rayonnement solaire Q_s . Cette quantité d'énergie est donnée par la multiplication de la surface, exposée au rayonnement, par le rayonnement solaire perpendiculaire à la surface A_s :

$$\eta_{sol-heat} = \frac{Q_g}{I_p \cdot A_s} = \frac{Q_g}{Q_s} \quad (1.4)$$

Où le rendement $\eta_{sol-heat}$ est inférieur à 1 en raison des pertes thermique et optique et I_p représente le rayonnement thermique reçu par le capteur. Q_g est la quantité de chaleur fournie pour le moteur thermique à la température T_H .

Par ailleurs, un moteur thermique produit un travail mécanique, W et rejette la chaleur Q_a à la température ambiante T_M . Dans ce cas, le rendement du moteur, $\eta_{heat-pow}$ est défini par le rapport : travail produit sur la quantité de chaleur Q_g :

$$\eta_{heat-pow} = \frac{W}{Q_g} \quad (1.5)$$

Le travail mécanique W à son tour entraîne le compresseur du cycle frigorifique pour extraire la chaleur Q_e de l'enceinte frigorifique à la température T_L . La chaleur perdue Q_c , égale la somme de Q_e et de W , est rejetée vers le milieu ambiant à la température T_M . Le rendement du cycle frigorifique est donné donc par la même équation (1.2) ci dessus.

Le rendement global d'une climatisation solaire thermomécanique est donné par le produit des trois équations (1.2), (1.4) et (1.5) :

$$\eta_{sol-heat} \times \eta_{heat-pow} \times \eta_{pow-cool} = \frac{Q_e}{Q_s} \quad (1.6)$$

Le rendement maximal d'un moteur réel, ou d'un réfrigérateur, est limité par celui du cycle de Carnot pour les mêmes températures. Le cycle de Carnot se compose de deux transformations isothermes ($T=cte$) et deux autres adiabatiques ($Q=0$). La figure 1.8 représente le cycle de Carnot sous forme de diagramme entropique (T, S).

Le rendement d'un cycle de Carnot, relatif à un moteur, entre les mêmes températures T_M et T_H est définie d'après ce calcul :

$$Q_g = Q_{AB} = T_H \times (S_B - S_A) \quad (1.7)$$

$$Q_a = Q_{CD} = T_M \times (S_D - S_C) \quad (1.8)$$

La variation de l'énergie interne du cycle de Carnot est égale à la somme du travail et de la quantité de chaleur :

$$\Delta U = \delta W + \delta Q = 0 \quad (1.9)$$

$$W + Q_g + Q_a = 0 \quad (1.10)$$

$$|W| + |Q_g| - |Q_a| = 0 \quad (1.11)$$

$$W = -Q_g + Q_a \quad (1.12)$$

$$\eta_{heat-pow}^{id} = \frac{Q_a - Q_g}{Q_a} = \frac{T_M - T_H}{T_M} \quad (1.13)$$

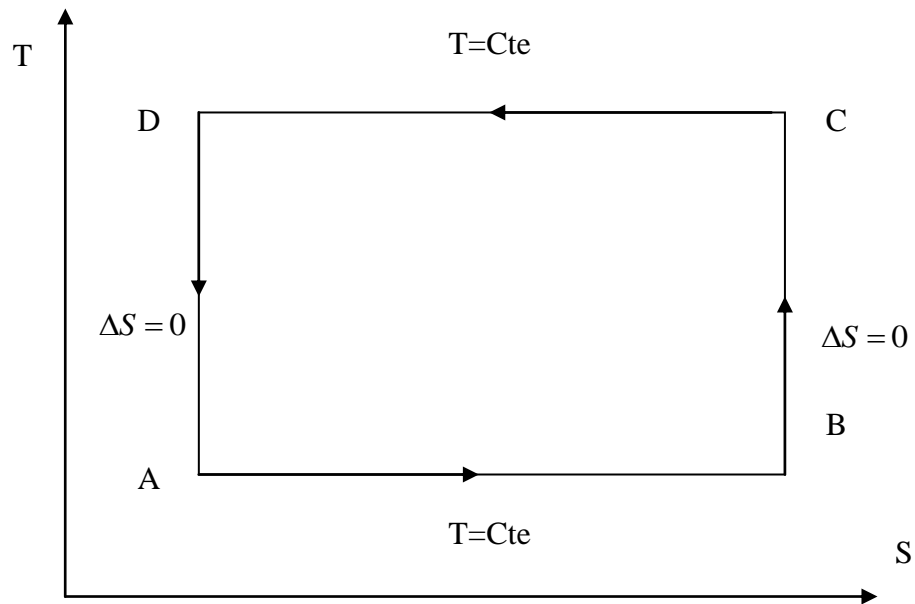


Figure 1.8 : Cycle de Carnot d'un système solaire thermomécanique (diagramme T-S).

De même façon on calcule le rendement du cycle inversé de Carnot, relatif à un réfrigérateur, entre T_M et T_L est :

$$\eta_{pow-cool}^{id} = \frac{T_L}{T_M - T_L} \quad (1.14)$$

Le produit des deux rendements de Carnot des équations (1.13) et (1.14) donne le rendement idéal de la machine frigorifique travaillant entre les trois températures :

$$\eta_{heat-cool}^{id} = \eta_{heat-pow}^{id} * \eta_{pow-cool}^{id} = \frac{T_L \times (T_H - T_M)}{T_H \times (T_M - T_L)} \quad (1.15)$$

Cette dernière expression donne une limite au rendement maximal réalisable avec n'importe qu'un climatiseur thermique réel travaillant dans les mêmes conditions de températures.

D'une part, dans un système solaire thermomécanique, le rendement du moteur thermique (capteur solaire) est d'un intérêt particulier surtout que la température de la source de chaleur T_H varie. D'autre part, la performance d'un moteur réel est souvent comparée à celle d'un cycle de Carnot qui travaille à la même température. Nous définissons dans ce cas le rapport des rendements réel et de Carnot appelé "rendement exergetique". Il s'agit d'estimer à quel point le fonctionnement d'une machine réelle se rapproche à une machine idéale (Kim and Infante Ferreira 2008).

2.3 Cycle de Rankine (compression)

Le cycle de Rankine est un cycle thermodynamique dont la source de chaleur externe est transmise à une boucle fermée qui contient un fluide. Ce dernier actionne une turbine produisant de l'électricité utilisée dans un cycle classique à compression. Ce cycle est très utilisé dans l'industrie. Il tient son nom de **William John Macquorn Rankine**.

Le système solaire Rankine a été étudié dans les années **1970** et **1980**. **Prigmore** et **Barber (1975)** ont conçu un réfrigérateur d'eau suivant un cycle de Rankine. Le réfrigérateur est basé sur le **R-113** pour fournir un couple rotatif sur un arbre de turbine avec un rendement de **11.5%** ou la température de l'eau de capteurs solaires est de **101.7°C**. Ainsi et pour un rendement de panneau solaire de **50%**, le passage des rayons de soleil au couple rotatif sera réalisé avec un rendement de **5.8%** (soit le produit 0.5×0.115) (Kim and Infante Ferreira 2008).

2.4 Cycle à jet de vapeur

La chaleur est utilisée pour produire un jet de vapeur à très grande vitesse. Ce jet provoque dans son entourage un vide puissant qui permet de vaporiser de l'eau à faible température dans l'évaporateur et de refroidir l'ambiance. La vapeur ainsi créée rejoint en suite le flux primaire "moteur" et est refroidie dans le condenseur (Vitte 2007). Cette technique est encore au stade de recherche notamment pour le cas du soleil comme source de chaleur..

2.5 Processus de sorption

La production de froid par sorption utilise l'attraction physique et chimique entre un couple de substances pour le but de produire le froid. Une sorption a une capacité unique de transformer l'énergie thermique directement en puissance de refroidissement. La substance à plus faible température d'ébullition est appelée le sorbat l'autre est appelée le sorbant. Le sorbat joue le rôle de fluide frigorigène (Kim and Infante Ferreira 2008).

La figure 1.9 montre un schéma d'un système fermé de sorption. Le processus de la sorption est désigné par l'absorbeur et le processus de désorption est désigné par la composante "générateur". Nous appelons ainsi l'ensemble de ces deux composantes un lit d'adsorbant. Le générateur reçoit la chaleur Q_g du panneau solaire pour générer le sorbat. Ce dernier a été auparavant absorbé en tant que fluide frigorigène dans l'absorbeur. La vapeur réfrigérante, produite dans le processus de génération se condense dans le condenseur Q_c . Dans l'évaporateur, le réfrigérant liquéfié dans le condenseur s'évapore en absorbant la quantité de chaleur Q_e de l'espace à refroidir. Par la suite, le sorbat, initialement généré dans le générateur, est absorbé comme vapeur frigorigène, sortant de l'évaporateur, en rejetant la quantité de chaleur de sorption Q_a vers le milieu ambiant (Kim and Infante Ferreira 2008).

Dans les machines électriques par sorption, le rendement de refroidissement est souvent défini par l'équation 1.16 :

$$\eta_{heat-cool} = \frac{Q_e}{Q_g + W_{el}} \quad (1.16)$$

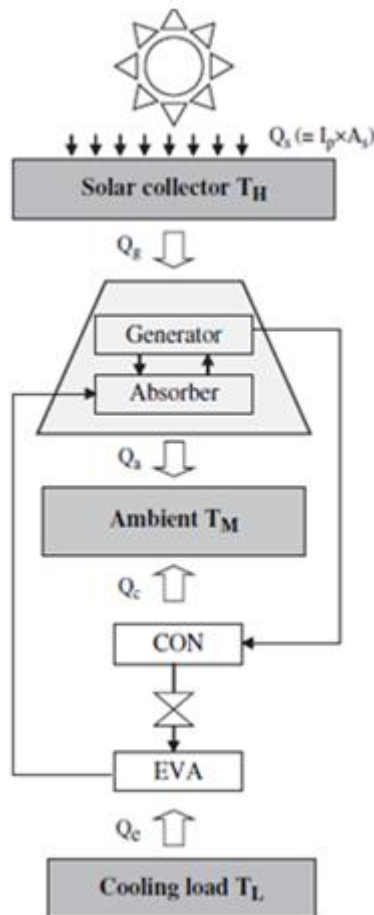


Figure 1.9 : Système de réfrigération par sorption (Kim and Infante Ferreira 2008).

Où W_{el} est le travail électrique. Ce rendement, également appelée **COP**, et souvent comparé au rendement idéal dans l'équation 1.15 pour estimer l'écart entre ce système et celui idéal. Donc l'efficacité de l'équation 1.15 est de mesuré comment l'efficacité du système s'écarte de l'efficacité idéale (Kim and Infante Ferreira 2008).

Nous pouvons résumer le phénomène de sorption en deux processus principaux (Kim and Infante Ferreira 2008) :

i) La sorption à cycle fermé suivant un processus d'adsorption ou d'absorption. L'absorption se réfère à un processus de sorption, où un sorbant liquide ou solide absorbe les molécules du fluide frigorigène dans son intérieur avec des changements physiques et/ou chimiques dans le processus. Adsorption, d'autre part, implique un sorbant solide qui attire molécules de réfrigérant sur sa surface par une force physique ou chimique et ne modifie pas sa forme dans le processus.

ii) Système à dessiccation (DEC) se réfère à un processus de sorption où un sorbant, c'est-à-dire un déshydratant, absorbe l'humidité de l'air humide. Ce processus est employé dans les cycles de sorption ouverts, qui sont classés soit en liquide ou solide selon le cycle dessicatif en fonction de la déshydratation utilisée.

2.5.1 Absorption

2.5.1.1 Système fermé à simple effet

Le refroidissement par absorption dans le cas de sorption à cycle fermé, entraînent une pompe à chaleur. Dans sa plus simple expression, on trouve le système de refroidissement par absorption à simple effet qui est représenté sur la figure 1.10. Ce système d'absorption utilise un fluide frigorigène en expansion d'un condenseur à un évaporateur à travers un gaz d'une manière semblable au système de compression de vapeur. Un seconde fluide (absorbant) est utilisé pour absorber la vapeur de réfrigérant de l'évaporateur à basse pression, et le rejetée dans le condenseur à haute pression. Une variété de fluides de travail a été proposée, les deux paires les plus courants absorbant-réfrigérant sont **LiBr-eau** et **eau-ammoniac** (Balaras et al. 2007).

Le système d'absorption simple effet utilise des capteurs plans à tubes sous vide et travaille à des températures de **55°C** jusqu'à **100°C**, et de **COP** autour de **0.7** pour **LiBr-eau** et à **0.6** pour l'**ammoniac-eau**. Donc nécessiterait une surface de capteurs solaires assez grands pour fournir la chaleur nécessaires à leur fonctionnement, et d'autre côté le prix de ces capteurs solaires varie considérablement dans ces conditions de températures.

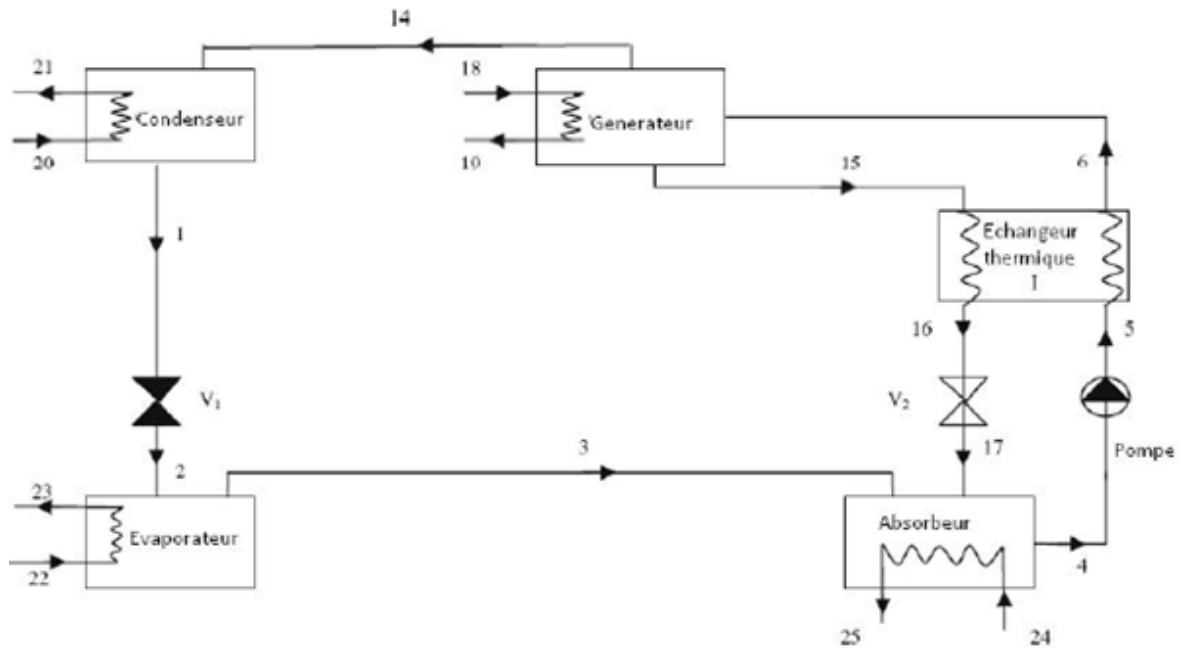


Figure 1.10 : Illustration d'un système de réfrigération par absorption à simple effet (Kim and Infante Ferreira 2008).

Pour donner un ordre de grandeur sur le coût, nous signalons que les capteurs à tube sous vide à **40%** de rendement a une fourchette de coûts de l'ordre de **600-700€ /m²** [(Balaras et al. 2007), (Kim and Infante Ferreira 2008)].

2.5.1.2 Système fermé à double effet

La surface de capteurs peut être réduite en employant des systèmes d'amélioration du **COP**. Ces systèmes sont appelés des systèmes d'absorption à double effet, et leur principe est d'utiliser la chaleur rejetée par le condenseur à des absorbeurs puissance supplémentaire, ce qui d'environ doubler ou tripler la quantité de réfrigérant extrait de la solution sans avoir besoin de supplémentaire de chaleur solaire. La figure 1.11 montre le système de réfrigération par absorption à double effet (Balaras et al. 2007).

Ces systèmes fonctionnent avec des capteurs à tubes sous vide ou des capteurs à concentration, ils sont capables de travailler de manière efficace à environ de **150°C** jusqu'à **180°C**, des refroidisseurs à double effet **LiBr-eau** avec **COP** environ de **1.2** et de refroidisseurs à double effet **ammoniac-eau** avec un **COP** autour **0.8** (Kim and Infante Ferreira 2008).

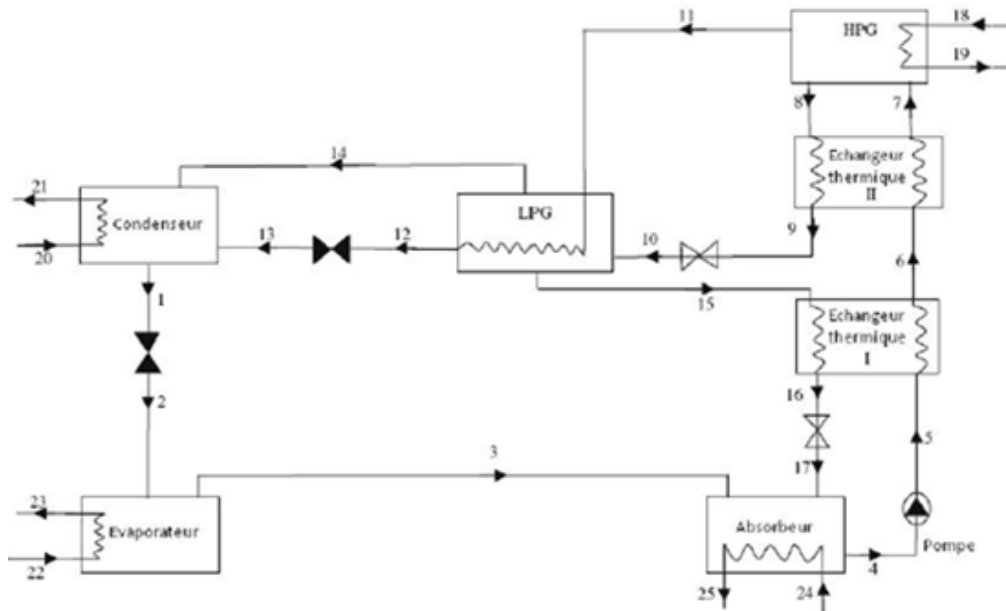


Figure 1.11 : Illustration d'un système de réfrigération par absorption à double effet (Kim and Infante Ferreira 2008).

En utilisant notamment le travail de synthèse de Kim and Infante Ferreira (2008), nous donnons dans le tableau 1.1 une récapitulation de quelques références d'étude liées à l'absorption de réfrigération solaire à simple et double effet.

	Références	Applications	$Q_e [KW]$	$A_z [m^2]$	$\eta_{ref-cool} [-]^d$
LiBr-H₂O à simple effet	(Lof and Tybout 1974)	Refroidissement/ Echauffement d'espace.			
	(Hattem and Data 1981)	Refroidissement d'espace.	4	36	0.11
	(Al-Karaghoul, Abood et al. 1991)	Refroidissement d'espace.	210	1577	0.31
	(Izquierdo, Rodriguez et al. 2005)	Refroidissement d'espace.	35	49.9	0.34
	(Kuhn, Harm et al. 2005)	Prototype de refroidisseur.	10	0.37	0.37
LiBr-H₂O à Double effet	(Lamp and Ziegler 1998)	Prototype solaire assisté par un système à combustion.			
	(Lokurlu and Muller 2005)	Refroidissement/ génération de vapeur à 144°C.	140	180	0.5-0.6
Ammoniac-H₂O	(Richter and Safarik 2005)	Refroidissement d'espace.	15		0.27
	(Jakob, Eicker et al. 2005)				
	(Gutiérrez 1988), (Kunze 2000)	Prototype diffusion-absorption	≤ 2.5		0.1-0.25

Tableau 1.1 : Synthèse des études de réfrigération solaire à absorption.

2.5.1.3 Systèmes ouverts

Le système de refroidissement par sorption ouvert est appelé aussi refroidissement déshydratant, ou à dessiccation (Dessicant Evaporative Cooling) DEC. Dans ce système de refroidissement à dessiccation liquide, le liquide déshydratant circule entre un absorbeur et un régénérateur de la même manière que dans un système fermé d'absorption. La différence principale est que l'équilibre de la température d'un liquide déshydratant n'est pas déterminé par la pression totale mais par la pression partielle de l'eau dans l'air humide dont la solution. La figure 1.12 montre un schéma d'un système de refroidissement à dessiccation liquide [(Kim and Infante Ferreira 2008), (Maalouf 2006)].

Dans le déshumidificateur de la figure 1.14, la solution saturée est pulvérisée au point A sur le serpentin de refroidissement au point B ; tandis que l'air ambiant (ou de retour au point 1) est injecté dans le flux. La solution absorbe l'humidité de l'air, et est en même temps refroidit par le serpentin de refroidissement. Le résultat de ce processus est :

- De l'air sec et frais au point 2.
- Une solution diluée au point C.

Dans le régénérateur, la solution pauvre de déshumidificateur est vaporisée sur le serpentin de chauffage au point E qui est relié à des capteurs solaires et l'air ambiant au point 4 est soufflé à travers la solution de flux. Une fois la solution est chauffée par le serpentin de chauffage, une partie de l'eau est extraite de la solution pauvre et transportée par l'air. La solution saturée est perçue au point F, l'air humide chaud est rejeté à l'air ambiant au point 5.

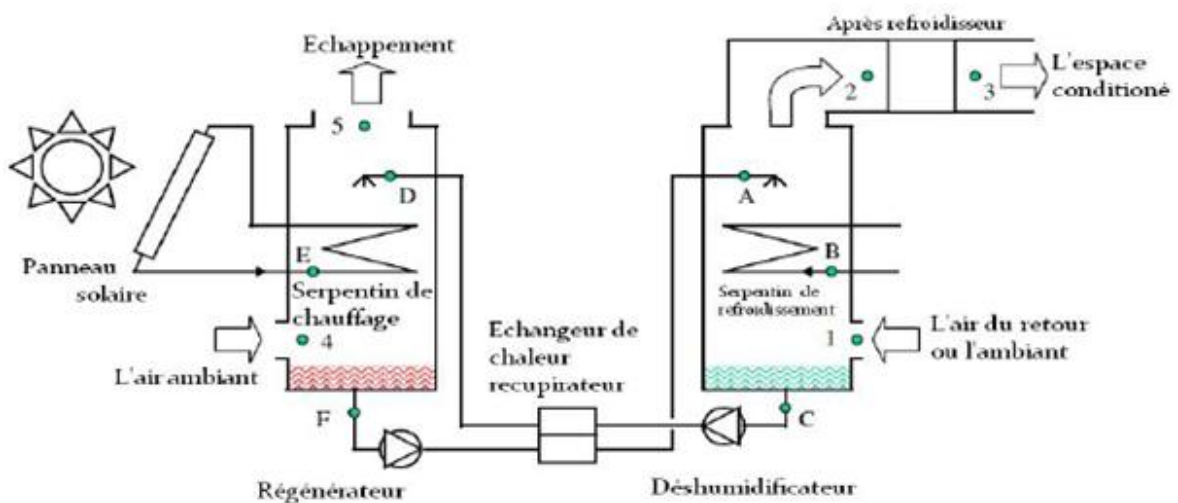


Figure 1.12 : Système de rafraîchissement par dessiccation liquide liée à une source thermique de capteurs solaires (Kim and Infante Ferreira 2008).

Un échangeur de chaleur de récupération préchauffe la fraîcheur de la solution pauvre du déshumidificateur en utilisant la chaleur perdue de la solution chaude concentrée du régénérateur, ce qui donne un **COP** meilleur (Kim and Infante Ferreira 2008).

Les capteurs solaires utilisés pour ces systèmes sont des capteurs solaires thermiques à air qui fonctionnent à des températures de **50°C** jusqu'à **80°C** (Balaras et al. 2007).

2.5.2 Adsorption

Fantana et **Schelle** ont découvert le phénomène d'adsorption en **1711**. Ce phénomène qui est montré sur la figure 1.13 rend compte de la fixation de molécules de gaz (espèce adsorbable ou adsorbat) sur la surface du solide (adsorbant). Cette fixation est traduite par l'augmentation de la concentration des molécules de ce gaz à la surface du solide par rapport à la quantité totale initiale du gaz, sans modifier le volume de l'adsorbant. Ce phénomène dépend quantitativement des propriétés physiques (porosité, surface spécifique) et chimique (acidité) et de la nature des molécules adsorbées. Au cours de l'adsorption, le gaz ne subit pas de transformation chimique, le solide conserve son intégrité physique et son architecture cristallographique, en particulier il n'y a pas de gonflement du solide. L'étude du phénomène d'adsorption montre que la nature de celle-ci varie selon les situations étudiées (Chekirou 2008).

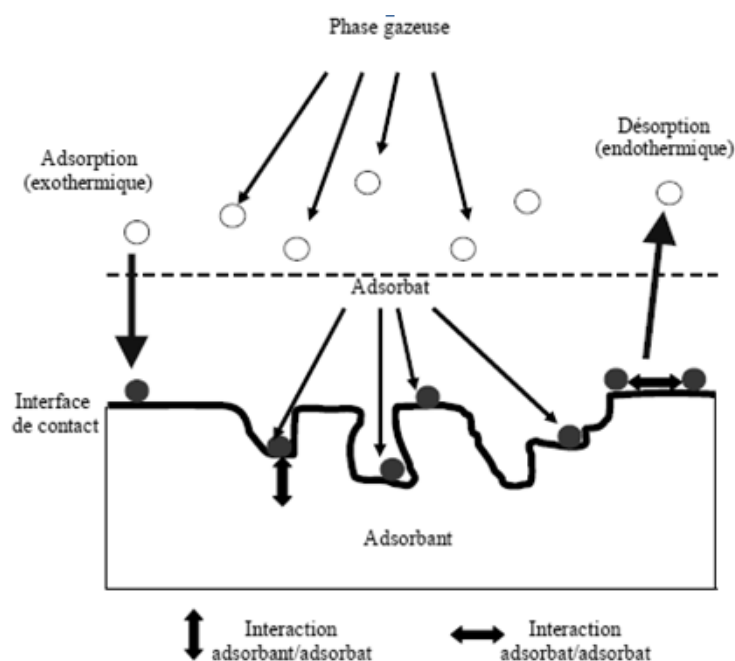


Figure 1.13 : Schématisation du phénomène d'adsorption (Chekirou 2008).

2.5.2.1 Adsorption physique (physisorption)

Dans le cas de l'adsorption physique, la fixation des molécules d'adsorbat sur la surface d'adsorbant se fait essentiellement par les forces de liaisons faibles du type Van Der Waals. Elle se produit sans modification de structure moléculaire, mettant en jeu une chaleur d'adsorption assez faible (de l'ordre de **5 à 25 KJ/mole**), parfaitement réversible et qui est en outre favorisée par une basse température.

Les adsorbants comme la zéolite, gel de silice, charbon actif et l'alumine sont des adsorbants physiques ayant des structures très poreuses de rapport surface-volume de l'ordre de plusieurs centaines qui peut sélectivement attraper les réfrigérants. Lorsqu'ils sont saturés, ils peuvent être régénérés simplement en étant chauffés. Si un adsorbant et un réfrigérant sont contenus dans la même enceinte, l'adsorbant va maintenir la pression en adsorbant le réfrigérant évaporé. Normalement on doit avoir une alternance quelque part pour régénérer le processus après la saturation de l'adsorbant. Pour cette raison, plusieurs lits d'adsorbant sont nécessaires pour un fonctionnement continu [(Chekirou 2008), (Kim and Infante Ferreira 2008)].

2.5.2.2 Adsorption chimique (chimisorption)

Dans le cas de l'adsorption chimique, le processus résulte d'une réaction chimique avec formation des liens chimiques entre les molécules d'adsorbat et la surface de l'adsorbant, donnant naissance à des forces de liaisons très importantes (c'est pourquoi le phénomène est appelé chimisorption). La chaleur d'adsorption mise en jeu est en général assez grande, dépassant les **80 KJ/mole**. Par conséquent, il est plus difficile à s'inverser et il faut appliquer donc plus d'énergie pour récupérer les molécules adsorbées par rapport au cas de l'adsorption physique [(Chekirou 2008), (Kim and Infante Ferreira 2008)].

Le produit chimique le plus couramment utilisé comme adsorbant dans les applications de réfrigération solaire est le chlorure de calcium (**CaCl₂**). Les systèmes d'adsorption (chimique ou physique) utilisent des capteurs solaires thermiques plans à tubes sous vide, et qui fonctionnent à des températures entre **85°C** jusqu'à **95°C** (Kim and Infante Ferreira 2008).

Le refroidissement par adsorption (physique ou chimique), dans le cas de sorption solide à cycle fermé, utilise des couples de travail principalement composés de charbon actif et de méthanol ou ammoniac et gel de silice-eau et aussi le chlorure de calcium et l'ammoniac (**CaCl₂-8NH₃**). La technologie d'adsorption solaire courante peut fournir une production de glace tous les jours de **4-7 Kg** par unité de mètres carrés de capteurs solaires avec un

COP de refroidissement entre **0.1** et **0.15**. Récemment, plusieurs machines de refroidissement à adsorption à faible capacité de gel de silice-eau ont été développées pour la climatisation solaire avec un **COP** varie de **0.2** à **0.6** et une température d'échauffement de **55°C** à **95°C**, car une machine d'adsorption de gel de silice a des capacités de refroidissement d'environ **75 kW** [(Kim and Infante Ferreira 2008), (Wang and Wang 2005), (Balaras et al. 2007)].

2.5.2.3 Systèmes ouverts

D'une autre part, le refroidissement par sorption solide à cycle ouvert est appelé aussi déshydratant solide. Il est très différent dans sa construction puisque on n'a pas de fluide déshydratant. La figure 1.14 montre un exemple de système de rafraîchissement solaire à déshydratant solide (Kim and Infante Ferreira 2008).

Le système dispose de deux plateaux tournant lentement et plusieurs autres composants entre les deux flux d'air et d'un espace conditionné. Le retour d'air de l'espace conditionné passe d'abord par un refroidisseur évaporatif et rentre dans l'échangeur thermique avec une diminution de température ($A \rightarrow B$). Il refroidit un segment de la roue d'échange de chaleur qui passe par ($B \rightarrow C$). L'air chaud et humide est aussi chauffé à une température élevée par la chaleur solaire dans le serpentin de chauffage ($C \rightarrow D$).

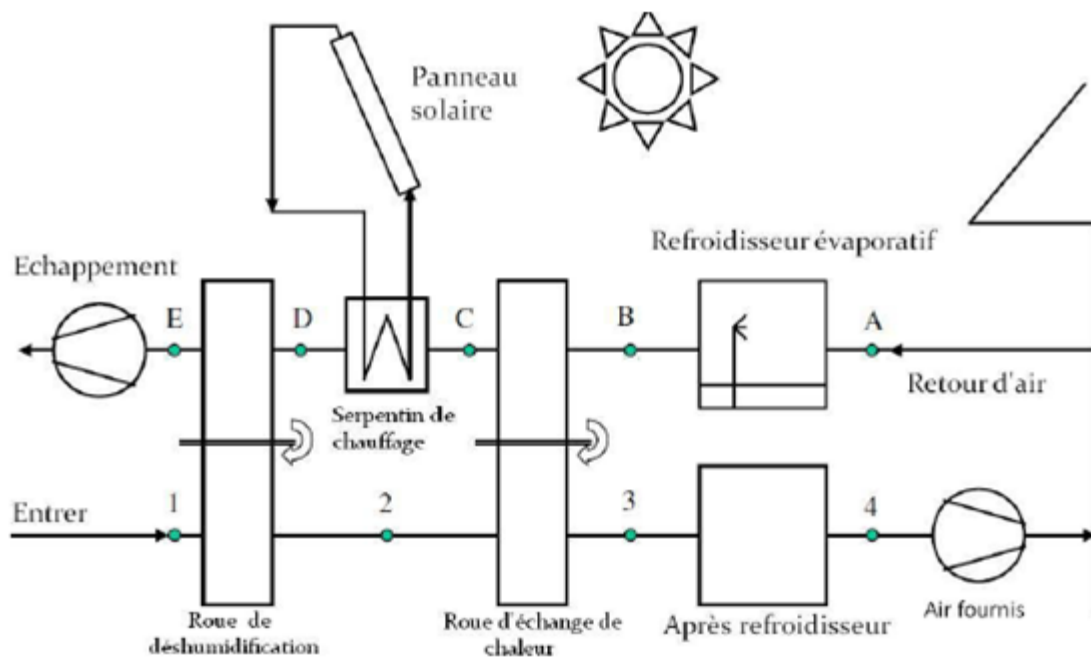


Figure 1.14 : Rafraîchissement par dessiccation solide liée à une source thermique solaire (Kim and Infante Ferreira 2008).

L'air chaud et humide gagne en fin la roue de déshydratant avant qu'il est rejeté à l'air ambiant ($D \rightarrow E$). D'autre côté, l'air ambiant pénètre dans la partie régénérée de la roue dessicatif ($1 \rightarrow 2$). L'air sec et chaud sort de la roue à la suite de la déshumidification. Cet air est refroidi par la roue d'échange de chaleur à une certaine température ($2 \rightarrow 3$). Selon le niveau de la température, il est alimenté directement à l'espace conditionné ou encore refroidit dans l'après refroidisseur ($3 \rightarrow 4$). Si par la suite, aucune étape de refroidisseur n'est suivie, tout l'effet de rafraîchissement et donc créé uniquement par la roue d'échange de chaleur, qui a été déjà refroidi par le retour d'air humide au point B de l'autre côté. La température T_3 ne peut pas être inférieur à T_B qui, à son tour, est en fonction de retour d'air climatisé au point A [(Kim and Infante Ferreira 2008), (Maalouf 2006)].

La plupart des systèmes déshydratant actuellement sur le marché utilise un matériau de sorption solide tels que le gel de silice, et emploient généralement un lit rotatifs transportant les matériaux absorbants, dénommé "roue déshydratante", car le déshydratant solide ne peut être distribué par pompage. La température de fonctionnement de cet système est entre 45°C jusqu'à 95°C , et un COP minimal de **0.5** et qui dépasse **1**, avec des capteurs solaires thermiques plans à air (Balaras et al. 2007).

3 Production du froid solaire abordable

Bien que plusieurs technologies de rafraîchissement ou de réfrigération solaires sont considérées comme matures, jusqu'à aujourd'hui, le total de la capacité de refroidissement des systèmes de climatisation solaire en **Europe** n'est que de **6MW** d'après **Nick-leptin (2005)**. Même si chaque technologie a ses propres aspects, positifs et négatifs, le coût initial élevé est un problème commun. Ajoutant à cela les différences de maturités techniques et commerciales. La figure 1.15 récapitule toutes les informations que nous avons vue plus haut, à propos des différentes technologies de production de froid solaire comparées en termes de performances et de coût initial (Kim and Infante Ferreira 2008).

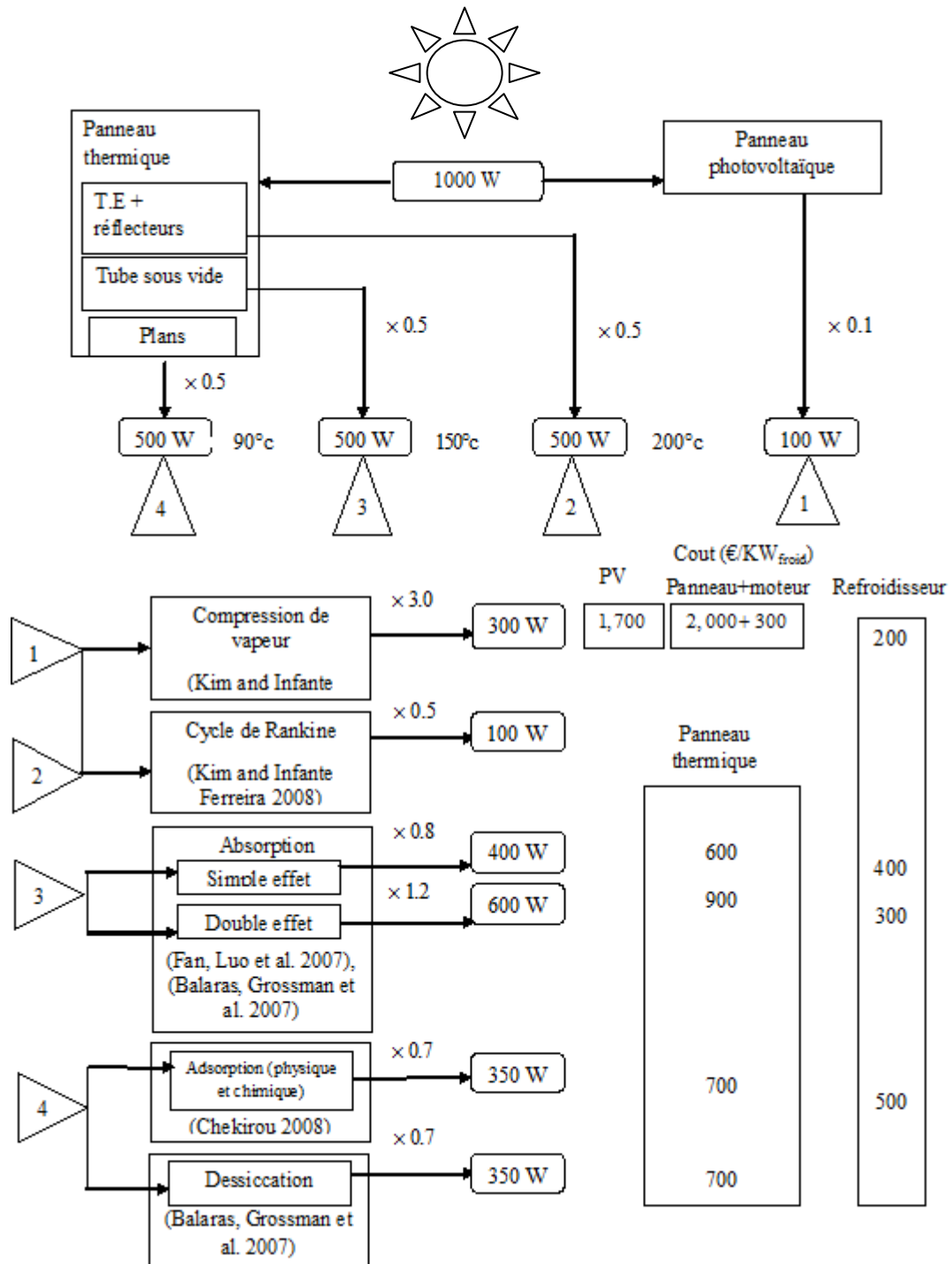


Figure 1.15 : Performance et coût des différents systèmes de production du froid solaire.

4 Conclusion

Nous avons étudié dans le présent chapitre une variété de technologies disponibles pour produire le froid solaire. L'étude dresse une liste des principales options de production de froid solaire et à la fin une récapitulation sur ces technologies avec leurs performances et coûts d'investissements requis.

D'après l'étude des technologies citée plus haut, nous concluons que les techniques de sorption semblent être la meilleure option, en comparaison avec les autres techniques thermomécanique et photovoltaïque de point de vue économique et performances. Par conséquent, nous avons choisi d'étudier la faisabilité d'une première installation local de climatisation solaire basée sur la technologie de sorption. Ceci fera l'objet du prochain chapitre qui sera consacré exclusivement à l'état de l'art des technologies de réfrigération solaire par sorption.

5 Bibliographie

- Al-Karaghoul, A., I. Abood, N. I. Al-Hamdani, "The solar energy research center building thermal performance evaluation during the summer season." *Energy Conversion and Management* **32**: 409-417 (1991).
- André, P., S. Thomas, *Les systèmes solaires thermiques*. Energie renouvelable, quelle technologie pour quel usage ?, Université de Liège, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement (2008).
- Balaras, C., G. Grossman, H. Henning, C. Infante Ferreira, E. Podesser, L. Wang, E. Wiemken, "Solar air conditioning in Europe--an overview." *Renewable and sustainable energy reviews* **11**(2): 299-314 (2007).
- Belgaid, B., "Building thermal performance in Saharan climate." *International Journal of Energy and Environment* **2**(2): 261-266 (2011).
- Berdja, M., A. Benhabib, B. Abbad, A. Noui, S. Chikh, K. Daoud, L. Oufar, *Climatisation solaire en Algérie*. ICRE'07 University of Bejaia (2007).
- Chekirou, W., "Etude et Analyse d'une machine frigorelique solaire à adsorption", *Université Mentouri*, Constantine, pp 197 (2008).
- El Fadar, A., M. Mimet, G. Pérez, "Study of an adsorption system powered by parabolic trough collector and coupled with a heat pipe." *Renewable Energy* **34**: 2271-2279 (2009).
- Fan, Y., L. Luo, B. Souyri, "Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **11**(8): 1758-1775 (2007).
- Gutiérrez, F., "Behavior of household absorption-diffusion refrigerator adapted to autonomous solar operation." *Solar Energy* **40**: 17-23 (1988).
- Hamani, N., A. Moumni, N. Moumni, A. Saadi, Z. Mokhtari, "Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra." *Revue des Energies Renouvelables* **10**(2): 215-224 (2007).
- Hattem, D. V., P. A. Data, "Description of an active solar cooling system, using a LiBr-H₂O absorption machine." *Energy and Building* **3**: 169-196 (1981).

- Izquierdo, M. A., P. Rodriguez, G. Maidment, J. Missenden, A. Lecuona, R. Tozer, "A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid." *International Journal of Refrigeration* **8**: 859-871 (2005).
- Jakob, U., U. Eicker, A. H. Taki, M. J. Cook, *Development of an optimized solar driven diffusion-absorption cooling machine*. Proceeding of ISES Solar World Congress 2003, Goteborg, Sweden (2005).
- Khelil, C., *Guide des Energies Renouvelables*, République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Energie et des Mines (2007).
- Kim, D. S., C. A. Infante Ferreira, "Solar refrigeration options - a state-of-the-art review." *International Journal of Refrigeration* **31**(1): 3-15 (2008).
- Kuhn, A., M. Harm, P. Kohlenbach, S. Petersen, C. Schweigler, F. Ziegler, "Betriebsverhalten einer 10 kW Absorptionskälteanlage für solare Kühlung." *KI Luft- und Kältetechnik* **7**: 263-266 (2005).
- Kunze, G., "Efficient solar cooling with an improved ammonia-absorption system." *Renewable Energy World* **3**: 111-112 (2000).
- Lamp, P., F. Ziegler, "European research on solar-assisted air conditioning." *International Journal of Refrigeration* **21**: 89-99 (1998).
- Lof, G. O. G., R. A. Tybout, "The design and cost of optimized systems for residential heating and cooling by solar energy." *Solar Energy* **16**: 9-18 (1974).
- Lokurlu, A., G. Muller, *Experiences with the worldwide first solar cooling system based on trough collectors combined with double effect absorption chillers*. Proceedings of International Conference solar Air-conditioning, Staffelstien, Germany. (2005).
- Maalouf, C., "Etude du potentiel de rafraichissement d'un système évaporatif à désorption avec régénération solaire", *Rochelle*, pp 1-220 (2006).
- Mostefa-Kara, K., *L'Algérie et l'Afrique face au défi climatique et énergétique*, L'Agence Nationale des Changements Climatiques Membre Principal du GIEC (2005).
- Richter, L., M. Safarik, *Solar cooling with ammonia water absorption chillers*. Proceedings of International Conference solar Air conditioning, Bad Staffelstein, Germany (2005).
- Vitte, T., "Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment: Proposition d'une stratégie de régulation du système", *Université de Savoie*, pp (2007).
- Wang, R., L. Wang, "Adsorption refrigeration-green cooling driven by low grade thermal energy." *Chinese Science Bulletin* **50**(3): 193-204 (2005).

Chapitre 2 : Technologies du froid solaire par sorption

D'une part, le processus d'adsorption fixe le gaz (espèce adsorbable ou adsorbat) sur la surface du solide (adsorbant) au moyen de l'augmentation de la concentration des molécules de ce gaz, à la surface du solide par rapport à la quantité totale initiale du gaz, sans modifier le volume de l'adsorbant. D'autre part, l'absorption est le processus par lequel la matière est transférée d'une phase à l'autre, par l'intermédiaire d'un liquide pour former une solution. En général, les principales différences entre l'absorption et l'adsorption sont situés dans la nature du matériau absorbant et de la durée du cycle de sorption, ce qui est nettement long pour l'adsorption [(Chekirou 2008), (Balaras et al. 2007), (Kim and Infante Ferreira 2008)].

Dans ce chapitre nous présentons l'état de l'art des technologies de réfrigération solaire par sorption. Nous proposerons notamment la technologie recommandée pour les applications de climatisation et de production de la glace. Ainsi, nous citerons les avantages et les inconvénients des technologies d'adsorption et d'absorption.

1 Technologies de réfrigération solaire par sorption

1.1 Absorption

Comme déjà dit dans le premier chapitre, le phénomène d'absorption est le mélange d'un gaz dans un liquide, les deux fluides se présentant avec une forte affinité pour former une solution. Ce processus est réversible et dont on peut décrire le principe d'un système à simple effet travaillant avec le couple **H₂O-LiBr**. La figure 2.1 montre un refroidisseur à absorption (Fan et al. 2007), qui contient :

- Une pompe apporte la solution riche vers la zone à haute pression.
- Le mélange est chauffé dans le générateur par l'énergie solaire permettant ainsi la séparation du réfrigérant (**H₂O**) de l'absorbant (**LiBr** solution).
- La vapeur de réfrigérant (**H₂O**) est envoyée vers le cycle traditionnel : condenseur, détendeur et l'évaporateur. Le froid est produit par l'évaporation du fluide frigorigène dans l'évaporateur à basse pression.

- La solution pauvre (**LiBr**) retourne dans l'absorbeur en passant par une vanne de détente.
- La vapeur de réfrigérant est absorbée par la pauvre solution de l'absorbeur arrivé du générateur. Le cycle peut recommencer.

La majorité des systèmes d'absorption sont à un seul effet, d'un panneau plan à basse température. Les recherches récentes montrent qu'il existe également des systèmes à double effet (figure 1.11), sur le marché, avec des **COP** thermique de l'ordre de **1,0** à **1,2**, et à triple effet systèmes thermiques **COP** de **1,7**. La figure 2.2 montre l'amélioration du **COP** de générateur pour un réfrigérateur à absorption à simple, double et triple effet (Fan et al. 2007). Les systèmes d'absorption à multi effet exigent des températures plus élevées du générateur de chaleur, qui peut être obtenu à des prix très élevés avec des tubes de concentrations comme nous avons vu dans le chapitre précédent.

Après une comparaison économique, (Grossman 2002) a conclu que le coût total du système sera dominé par la partie solaire du système. (Sumathy and Li. 2002) ont également mis au point un nouveau modèle de réfrigérateur à absorption à double effet **H₂O-LiBr**. Les résultats des tests ont prouvé que le refroidisseur à double effet pourrait être conduit par l'eau chaude à basse température allant de **60** à **75°C**, qui peut être facilement assurée par de chauffe-eau solaires. Par rapport à un refroidisseur à simple effet, le refroidisseur à double effet pourrait atteindre à peu près le même **COP** total du système conventionnel avec une réduction des coûts d'environ **50%**.

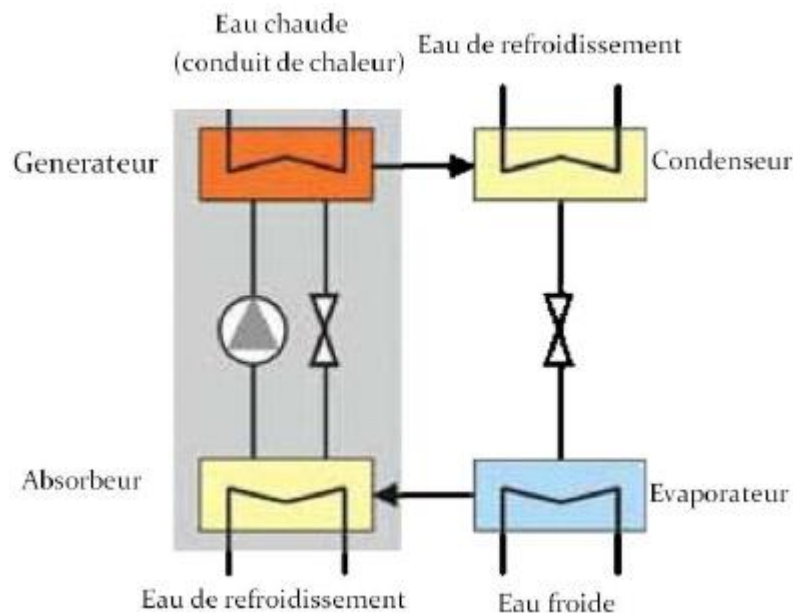


Figure 2.1 : Schéma d'un refroidisseur à absorption (Fan et al. 2007).

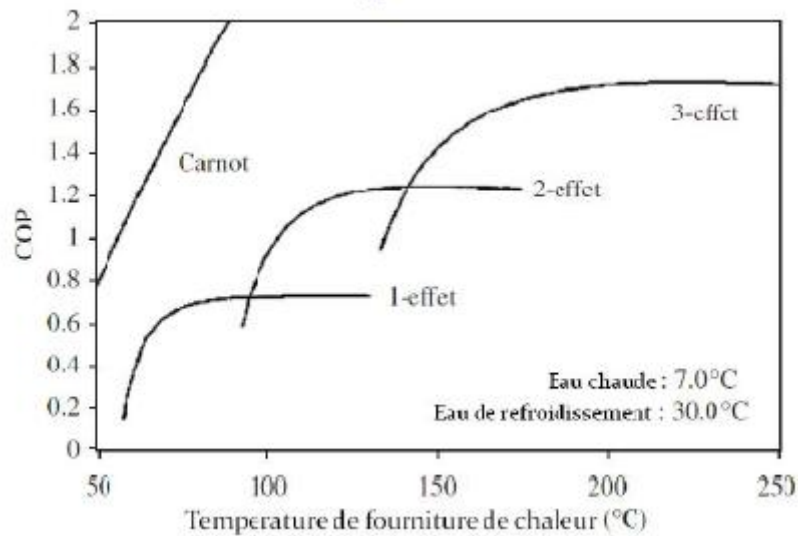


Figure 2.2 : COP en fonction de la température de générateur pour des réfrigérateurs à absorption à 1, 2 et 3 effet (Fan et al. 2007).

Les deux grandes paires de travail ont été utilisés dans les systèmes de froid solaire à absorption sont $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ et $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$. Le premier couple H_2O est un réfrigérant et LiBr est l'absorbant, alors que le NH_3 est le fluide réfrigérant et le H_2O est l'absorbant dans le deuxième cas. Chaque paire de travail a ses avantages et ses inconvénients comme le montre le tableau 2.1.

D'une manière générale, les systèmes à $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ sont souvent utilisés pour la réfrigération et dans les applications industrielles, tandis que les systèmes à $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ sont plus adaptés aux besoins de la climatisation (Fan et al. 2007).

A noter que d'autres couples de travail ont également été étudiés. Au **Danemark**, (Woscoe-schmidt 1979) a développé un système solaire de production frigorifique à

Couple de travail	Avantages	Inconvénients
$\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$	Evaporation à la température en dessous de 0°C .	Toxique et dangereux pour la santé (ammoniac). Besoin d'une colonne pour l'opération de redresseur à haute pression.
$\text{H}_2\text{O-LiBr}$	Bon COP. Basse pression de fonctionnement. Respectueux de l'environnement. Grande chaleur latente de vaporisation.	Le risque de congélation, donc un dispositif anti-cristallisation est nécessaire relativement cher (LiBr)

Tableau 2.1 : Comparaison entre les couples d'absorption de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ et de $\text{H}_2\text{O-LiBr}$ (Fan, Luo et al. 2007).

absorption solide avec $\text{NH}_3\text{-CaCl}_2$ et SrCl_2 comme couple de travail. L'étude expérimentale a montré un **COP** global de **0.10**, correspondant à une production de glace de **6 kg/ m²** de surface de capteurs solaires. Des travaux similaires ont également été faits par (Erhard and Hahne 1997) dans une machine de climatisation solaire pour démonstration, avec NH_3 et SrCl_2 comme couple de travail. (Bansal et al. 1997) ont exposé un travail réalisé sur une unité de **1,5 kWh / jour** en utilisant NH_3 comme réfrigérant et **IMPEX (80 % SrCl_2 et 20% de Graphite)** comme absorbant. Le **COP** maximale théorique globale de l'unité est de **0.143** dépendant des conditions climatiques.

Au Mexique, une étude théorique a été réalisée par (Rivera and Rivera 2003) sur un système de réfrigération intermittent à absorption. Le système lié à un concentrateur parabolique est exploité avec un mélange LiNO_3 . Les résultats ont montré la possibilité de produire jusqu'à **11.8 kg** de la glace et avoir un **COP** thermiques compris entre **0.15** et **0.4**, avec des températures de génération et de condensation de journées typiques.

1.2 Adsorption

Comme nous l'avons déjà vue dans le premier chapitre, l'adsorption est un phénomène résultant de l'interaction entre un solide (Adsorbant) et un gaz (fluide frigorigène), basé sur un processus de réaction physique ou chimique.

Une Machine frigorifique à adsorption utilise le phénomène d'adsorption physique entre le fluide frigorigène et un adsorbant solide. Les molécules du fluide frigorigène sont fixées à la surface d'adsorbant via des connexions du type Van der Waals [(Critoph 1999), (Fan et al. 2007)]. Il est généralement composé d'un générateur, un condenseur, un détendeur et un évaporateur. Le générateur se compose d'une plaque contenant l'adsorbant, chauffé généralement par énergie solaire, pour la désorption des fluides frigorigènes. Un exemple de structure de ce type de système est illustré sur la figure 2.3.

Le cycle d'adsorption, dans le cas d'un lit d'adsorbant fixe, peut être utilisé sans aucune pièce mobile. L'utilisation de lit fixe implique : un fonctionnement sans bruit, une simplicité mécanique, une haute fiabilité et une très longue durée de vie. Les lits fixes peuvent également être utilisés dans le fonctionnement de cycles intermittent avec un changement dans les lits d'adsorbants entre l'adsorption et la désorption, ce qui diminue le **COP** du système. Par conséquent lorsqu'un débit constant de la vapeur, qui gagne l'évaporateur, est nécessaire pour assurer un refroidissement continu, deux ou plusieurs lits d'adsorbant doivent être mise en service dans le cycle [(Critoph 1999), (Fan et al. 2007)].

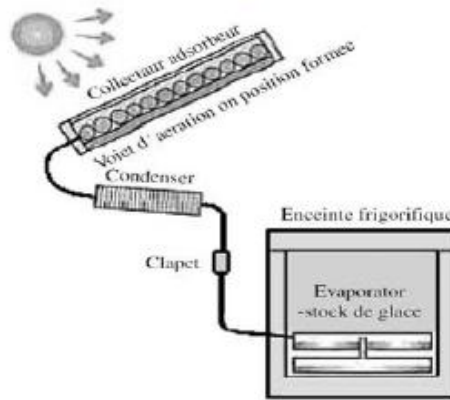


Figure 2.3 : Schéma d'un réfrigérateur solaire à adsorption (Fan et al. 2007).

La figure 2.4 montre un système de réfrigération à adsorption continue de deux lits avec récupération de chaleur. Lorsque l'adsorbant 1 est refroidi et relié à l'évaporateur pour obtenir l'adsorption de réfrigération dans l'évaporateur, et l'adsorbant 2 est chauffée et il est relié au condenseur pour obtenir : chauffage, désorption, condensation et enfin le réfrigérant liquide condensé gagne l'évaporateur par une valve intermédiaire de contrôle de flux [(Wang 2000), (Fan, Luo et al. 2007)].

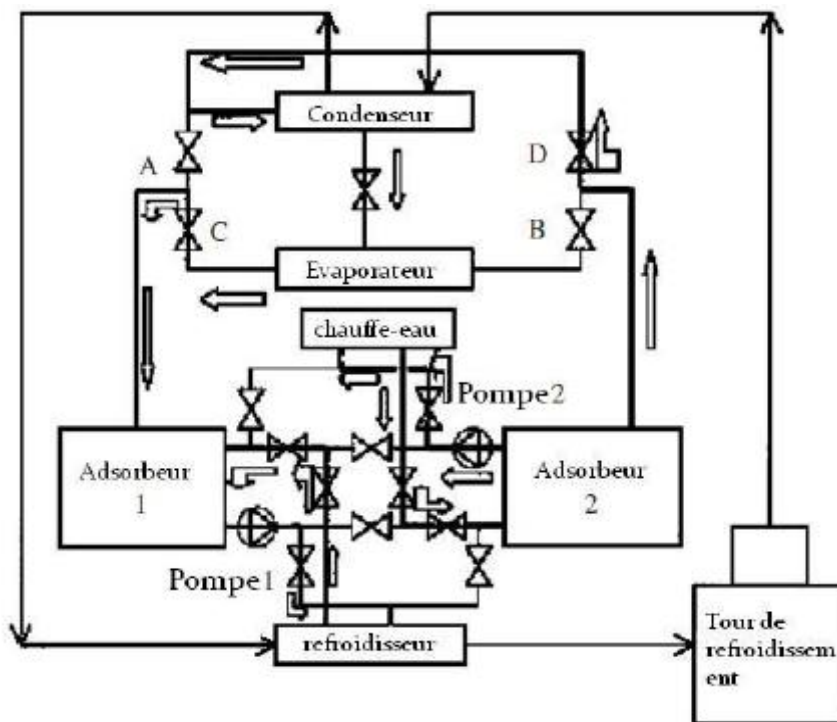


Figure 2.4 : Réfrigérateur à adsorption de deux lits (Fan et al. 2007).

Dans les systèmes de réfrigération alimentés par l'énergie solaire ou encore dans des systèmes de récupération de la chaleur, le charbon actif, gel de silice et la zéolite sont les plus utilisés comme adsorbants, tandis que l'eau, le méthanol, l'éthanol ou l'ammoniac sont les plus largement utilisés comme adsorbants (Fan et al. 2007).

Afin de choisir le meilleur couple de travail pour une utilisation spécifique, (Luo and Feidt 1992) et (Luo and Tondeur 2000) ont testé et comparé **15** adsorbants (12 types de charbon actif et 3 types de zéolite), **4** adsorbants (méthanol, éthanol, l'ammoniac, l'eau) dans les mêmes conditions, avec le **COP** du cycle de même critère. Les résultats montrent que le méthanol/charbon actif PICASOLV est le meilleur parmi toutes les couples de travail étudiés. Un **COP** de cycle de **0.55** peut être atteint à l'évaporation et la condensation des températures de **-5** et **30°C**, respectivement. Récemment, (Anyanwu and Ogueke 2005) ont comparé thermodynamiquement les différents systèmes en utilisant les couples : charbon actif/méthanol, charbon actif/ammoniac et zéolite/eau. Ils ont conclu que le zéolite/eau est le meilleur couple pour la climatisation et que le charbon actif/ammoniac est préféré pour l'application de congélation, la réfrigération et que la conservation des aliments. Le maximum possible du **COP** solaire net est de 0.3 et 0.19 et 0.16 pour le zéolite/eau, charbon actif/ ammoniac et le charbon actif/méthanol, respectivement pour un capteur solaire conventionnel

De point de vue pratique, aucun de ces couples de travail n'est parfait. La limitation principale de ces cycles réside dans les caractéristiques faibles de transfert de masse et de chaleur des lits d'adsorbant. Les adsorbants, comme le charbon actif, zéolites ou le gel de silice ont une faible conductivité thermique et de mauvaises porosités (Fan et al. 2007). Ainsi, le faible **COP** thermique est due aussi, d'après (Anyanwu 2003), au pertes liées au volume important de l'ensemble capteur /générateur /adsorbeur. Pour améliorer le **COP**, (Munyebevu 1994) produit le charbon actif à partir des disques monolithique logés dans un tube à l'intérieur des ailettes pour améliorer à la fois sa conductivité thermique et le contact thermique avec des éléments métalliques. (Li and Wang 2002) ont analysé en détails les effets des paramètres du capteur et les effets paramétriques de l'environnement sur les performances du réfrigérateur solaire à adsorption. Les auteurs n'ont conclu que le transfert de chaleur et de la conductivité thermique du lit d'adsorbant pourrait être amélioré par l'ajout de la densité d'emballage de l'adsorbant, l'adoption de la double couverture en verre, l'utilisation du matériau sélectif de couverture ainsi que l'utilisation de transfert de chaleur par les ailettes.

Il existe une autre façon efficace pour améliorer le transfert de chaleur dans le matériau, il s'agit de l'utilisation de l'adsorbant consolidé. En effet, Un certain nombre de technologies de l'adsorbant consolidés ont été discutés par Wang et al. (2005). Ces auteurs ont conclu que les matériaux adsorbants consolidés ont des très bonnes propriétés de transfert de chaleur, qui offrent de nouvelles possibilités pour les machines à adsorption compactes (Wang et al. 2005)

2 Différentes applications des systèmes de froid solaire par sorption

En fonction de la température du froid demandée, les applications des systèmes solaires par sorption peuvent être classées en trois catégories :

- i. La congélation ($< 0^{\circ}\text{C}$) pour la fabrication de la glace ou de buts de congélation.
- ii. La réfrigération ($0- 8^{\circ}\text{C}$) pour les produits alimentaire et le stockage des produits pharmaceutiques.
- iii. La climatisation ($8- 15^{\circ}\text{C}$) des espaces.

Ainsi, nous présentons dans ce qui suit le développement de chacune de ces applications relatif aux systèmes de froid solaire par sorption.

2.1 Congélation et fabrication de la glace

Les systèmes de congélation ont besoin de température inférieure à 0°C , comme la production de la glace et le stockage à congélation. Dans ce cas, des refroidisseurs à absorption ou à adsorption peuvent être utilisés. Nous citons ici quelques réalisations typiques en se basant sur le travail de (Dieng and Wang 2001) et (Fan et al. 2007) :

(Critoph 1994) a construit un petit réfrigérateur solaire à adsorption. Le panneau est de 1.4m^2 de surface et contient 17Kg de charbon actif. L'enceinte frigorifique est éloignée du capteur, étant lié à celui-ci par un tuyau flexible en acier. Il est possible de produire jusqu'à 4Kg de glace par jour.

(Sumathy and Zhongfu 1999) ont réalisé et testé un congélateur solaire à adsorption solide du couple charbon actif-méthanol, en utilisant un capteur plan d'une surface exposée de 0.92m^2 . Ce système pourrait produire de la glace d'environ $4-5\text{Kg/jour}$ avec COP solaire d'environ $0.1-0.12$.

(Khattab 2004) a développé un module de réfrigération solaire à adsorption solide avec le couple charbon (de type domestique local) et le méthanol. Le modèle se compose d'un tube de verre modifié ayant un générateur (lit de sorption) à une extrémité, un condenseur et un évaporateur combiné à l'autre extrémité et un simple arrangement du réflecteur pour

échauffer le générateur. Les résultats des testes indiquent que, la production de la glace quotidienne est de **6.9** et **9.4Kg/m²** et le COP solaire net de **0.136** et **0.159** pour un climat froid et chaud, respectivement.

Par ailleurs, un grand nombre de travaux de recherche sur la réfrigération par adsorption ont été réalisés à l'Université **Jiao Tong de Shanghai** depuis **1993**. Plusieurs prototypes de machines de production de la glace par adsorption ont été développés et testés au cours de ces dernières années (Fan et al. 2007). (Li, Wang et al. 2001) ont construit un réfrigérateur de congélation à adsorption solide avec du charbon actif-méthanol comme couple de travail. Les résultats expérimentaux ont montré que le **COP** thermique est d'environ **0.45** et le **COP** solaire est d'environ **0.12-0.14** avec environ de **5-6Kg** de glace produite par **m²** du capteur. Après quelques améliorations un congélateur solaire sans valve a été construit par (Li et al. 2004). Il n'y a pas de réservoirs dans ce dernier système, ni de valve de raccordement ou valve d'étranglement, et la structure du système est très simple. Les résultats expérimentaux ont montré que **6.0-7.0 Kg** de glace peuvent être obtenues lorsque l'énergie du rayonnement est d'environ **17-20Mj/m²**. Dans ces conditions le **COP** solaire de ce système est d'environ de **0.13** à **0.15**. Le système peut produire **4.0Kg** de glace et le **COP** solaire est d'environ **0.12** lorsque l'énergie d'insolation totale est d'environ **16-18Mj/m²**.

(Dieng and Wang 2001) ajoutent qu'une unité de démonstration d'un réfrigérateur a d'abord été commercialisée par (Tchernev 1978) en utilisant le couple zéolithe-eau pour la réfrigération et le couple charbon actif-méthanol pour la production de glace. Un nouveau système hybride de chauffe-eau à énergie solaire est fabriqué pour production de glace d'adsorption à l'aide du couple charbon actif-méthanol, a été étudiée par (Wang 2000). Le système d'adsorption est avec **2 m²** de capteurs solaires et travaille à **60 kg** d'eau de **90°C** pour produire **10 kg** de glace par jour. En Chine, (Li, Wang et al. 1980) ont construit une machine à glace solaire avec le couple ammoniac et d'eau. La surface de capteurs exposés est de **1.5 m²** pour produire **6.8** à **8 kg** de glace par jour.

2.2 Réfrigération

Un système de réfrigération est utilisé pour le stockage du produit alimentaire, pharmaceutique notamment les vaccins. Nous citons dans la suite de ce paragraphe quelques travaux sur les réfrigérateurs solaires à sorption :

Des systèmes de refroidissement par sorption à basse température (**80-90°C**), disponible commercialement pour la climatisation, ont été modifiés en Inde pour le stockage de froid

des produits agricoles à des températures de **2-4°C**. Ces systèmes utilisent le Méthanol-gel de silice comme couple de travail. Les calculs et les résultats d'essais ont montré que le **COP** était d'environ **0.3** lors de l'utilisation du système d'eau réfrigérée à une température de **-2°C**, la température d'échauffement d'eau de **85°C** et la température de condensation de **30°C** (Fan et al. 2007).

(Lemmini and Errougani 2005) ont construit et testé un réfrigérateur solaire à adsorption en utilisant le couple AC35-méthanol à **Rabat** au **Maroc**. Le système se compose d'un capteur plan, un condenseur et d'une chambre froide à évaporateur. Des résultats expérimentaux ont montré que l'unité peut produire le froid, même pour les jours pluvieux et nuageux. Le **COP** solaire varie entre **0.05** et **0.08** pour une irradiation entre **12000** et **27000kJ/m²**, pour tous les jours la température ambiante moyenne entre **14** et **18°C** et la plus basse température atteinte par l'évaporateur entre **-5** et **8°C**.

(Mayor and Dind 2003) ont développés un prototype de réfrigérateur solaire à adsorption autonome utilisant le couple silice gel-eau. D'un volume utile de réfrigération de près de **100 litres**, la surface du capto-adsorbent est de **1 m²**. L'énergie stockée sous forme de glace dans l'évaporateur permet de couvrir 3 jours de fonctionnement en absence de soleil.

(Mhiri and El Gollu 1996) ont étudiés un réfrigérateur solaire à adsorption, d'une surface de captation de **4 m²**, en vue de la réalisation d'un réfrigérateur industriel. C'est une machine qui utilise le couple charbon actif AC35- méthanol. Les résultats montrent qu'avec un rendement de captation compris entre **0.5** et **0.6**, il est possible d'obtenir un **COP** solaire élevé : compris entre **0.14** et **0.2**.

2.3 Climatisation

Un système de climatisation est utilisé pour contrôler la température et l'humidité à l'intérieur de locaux pour le confort thermique pour les gens. L'augmentation de la demande de cette application est élevée dans les lieux du grand potentiel d'habitant notamment dans les grandes villes. Les systèmes de réfrigération solaire par sorption sont adaptés à la climatisation en raison du faible coût de l'installation et de la grande capacité du froid produit. Les premières expériences de la climatisation ont été enregistrées en **1848** par **Faraday** qui a observé l'effet de refroidissement obtenu par l'adsorption d'ammoniac et chlorure d'argent. En **1920** le dioxyde de soufre avec le gel de silice ont été utilisés pour la climatisation de voitures de chemin de fer aux **Etats-Unis**. En **1976**, environ **500** systèmes de climatisation solaire ont été installés dans les **Etats-Unis**, dont la plupart étaient des systèmes d'absorption utilisant **LiBr** [(Fan et al. 2007), (Dieng and Wang

2001)]. Au **Japon**, un système de refroidissement et de chauffage avec panneau plan et machine frigorifique à absorption a été installé par (Nakahara et al. 1977).

(Syeda, Izquierdo et al. 2005) ont étudié un système de refroidissement solaire pour des maisons à **Madrid**. Le système se compose d'un capteur plan avec une surface **49.9 m²**, refroidisseur à absorption à simple effet (**H₂O-LiBr**) d'une capacité de refroidissement nominale de **35kW**. Cette machine fonctionne avec des températures de génération et d'absorption de **57-67°C** et de **32-36°C**, respectivement. La mesure maximale instantanée du **COP** moyen, quotidien et par périodes, est de **0.42** et **0.34**, respectivement (Fan et al. 2007).

(Argiriou et al. 2005) ont développé aussi un prototype d'une pompe à chaleur à absorption à un étage. Il travaille avec le couple **H₂O-LiBr** de basse capacité (**10kW**), convenable pour les applications résidentielles et les petits bâtiments.

2.3.1 Tendances en Europe

En **Europe**, la plus grande attention a été accordée à la recherche et l'application des systèmes de climatisation solaire par sorption. L'Agence Internationale de l'Energie (**AIE**) a mis en place le programme "Solar Heating and Cooling" en **1977**, qui est toujours actif (**2009**). La tâche **25** "Solar Assisted Air Conditioning of Buildings", qui a pris fin en **2004**, concentré sur l'utilisation de l'énergie solaire pour la climatisation des Bâtiments. L'objectif principal de la tâche a été d'améliorer les conditions de l'entrée sur le marché pour les climatiseurs assistée par l'énergie solaire, principalement les systèmes d'absorption et d'adsorption. Un groupe de chercheurs de cinq pays de l'**Europe** a examiné et analysé plus de **50** systèmes de refroidissement à énergie solaire et des projets dans différentes zones climatiques. Comme le projet européen appelé **SACE** (solaire climatisation en Europe), l'objectif principal de ce projet était d'effectuer une étude sur l'état de l'art des technologies respectueuses de l'environnement pour la climatisation des bâtiments en **Europe**, en mettant l'accent sur la climatisation en été. Une étude technico-économique a été réalisée pour différentes technologies (absorption, adsorption) avec différents type de capteurs solaires thermiques. Sur la base des projets évalués en vertu de la **SACE** les systèmes d'absorption à simple effet avoir un **COP** thermique dans la gamme de **0.5** au **0.73**, et pour les systèmes d'absorption à double effet peut atteindre **1.3**, lorsque la température est suffisamment élevée pour ces deux systèmes dans la gamme **60** jusqu'à **165°C**. Les autres systèmes d'adsorption ont plus faible **COP** thermique, avec une moyenne de **0.59**, ces systèmes d'adsorption fonctionnent à une température inférieure en

comparaison avec les systèmes d'absorption car leur gamme est entre **52.5** jusqu'à **82°C** [(Balaras et al. 2007), (Fan et al. 2007)].

2.3.2 *Tendance en Chine*

En **Chine**, les systèmes solaires par sorption ont été étudiés intensivement au cours des dernières années. L'institut de la **Cryogénie** à l'université de **Jiao Tang** à **Shanghai** a développé et testé différents prototypes principalement des climatiseurs d'air pour les bus et les trains. Les systèmes sont tous des systèmes à absorption alimentés par l'énergie solaire ou la chaleur d'échappement des engins, avec le charbon actif- ammoniac ou zéolite- eau comme couple de travail. Il a été rapporté dans la littérature qu'une moyenne de puissance de réfrigération continue de **4.1kW** a été obtenue c'est-à-dire la cabine de conduite d'un train devient plus confortable. Dans le neuvième plan quinquennal du projet de recherche (Durée **1995-2000**), à grande échelle système solaire d'absorption pour la climatisation entraînée par l'utilisation des capteurs solaires à tubes a été construit en **Rushan**, province de **Shandong**. La capacité de refroidissement de ce système est d'environ **100 kW**, avec une moyenne de **COP** de **0,57** en **6 h** fonctionnement efficace. Un autre système d'absorption solaire de l'air conditionné avec la même capacité de refroidissement entraînée cette fois par des capteurs solaires plans a été construit à **Jiangmen**, province du **Guangdong**. Les résultats expérimentaux montrent que la moyenne de **COP** est de **0,4**. En **2004**, l'université de **Jiao Tong** à **Shanghai** a inventé un refroidisseur de gel de silice-eau approprié au système de climatisation à énergie solaire [(Zhai and Wang 2008), (Fan et al. 2007)].

Récemment, une attention plus particulière a été portée à l'élaboration de systèmes combinés de refroidissement et de chauffage solaire dans le but de faire usage de tous les types d'énergies de manière rationnelle. Tous ces travaux présentent leurs recommandations positives pour l'élaboration du système de réfrigération solaire par sorption (Fan et al. 2007).

(Liu and Wang 2004) ont étudié un nouveau système solaire à absorption à double effet **H₂O-LiBr** avec le gaz naturel pour la climatisation, le chauffage des locaux et l'eau chaude domestique. Les résultats de la simulation ont montré que ce type de système est réalisable est économique.

Afin de surmonter le caractère intermittent du cycle à adsorption solaire à un seul lit un nouveau modèle de cycle combiné d'un système de réfrigération solaire à adsorption-éjection a été établi par (Li et al. 2002). L'estimation du **COP** thermique est d'environ **0.4** sous les conditions de fonctionnement suivantes : température de condensation 40°C,

température d'évaporation 10°C, la température de régénération de 120°C et la température de désorption 200°C, en utilisant zéolite-13X-eau comme couple de travail (Fan et al. 2007).

3 Récapitulation

Dans ce chapitre, un détail bibliographique sur les technologies de sorption (adsorption-absorption) a été établi en consultant une littérature très riche et en se basant sur les synthèses de plusieurs articles scientifiques comme les travaux de (Fan, et al. 2007), (Dieng and Wang 2001), et (Zhai and Wang 2008). Nous résumons dans le tableau 2.2 les avantages et les inconvénients de ces deux types de systèmes.

Nous en concluons que les technologies examinées pour produire le froid solaire par sorption sont intéressantes pour en servir aux besoins de réfrigération, de climatisation et de la production de glace. Comme ces technologies de sorption peuvent surtout répliquer à la protection de l'environnement et au besoin énergétique.

Dans le prochain chapitre, nous allons procéder au choix de la technologie solaire de rafraîchissement solaire (absorption/adsorption) adaptée à nos besoins

Système	Avantages	Inconvénients
Absorption	Seule une partie mobile (pompe) avec la possibilité de ne pas utiliser aucune pièce mobile. Un petit système à température relativement faible coté générateur de chaleur.	Bas COP. Il ne peut pas atteindre une température d'évaporation très faible. Le système est assez compliqué.
Adsorption	Pas de partie mobile (exception la valve). Basse température de fonctionnement peut être réalisée. COP thermique est très élevé par rapport à d'autres systèmes qui utilisent la chaleur.	Poids lourd et une mauvaise conductivité thermique de l'adsorbant. Pour de grande capacité, il peut causer des problèmes à long terme. L'exigence de basse pression de fonctionnement rend il difficile à parvenir à l'étanchéité à l'air. Très sensible à basse température en particulier la baisse de température pendant la nuit c'est un système intermittent.

Tableau 2.2 : Les avantages et les inconvénients des deux systèmes de sorption : adsorption et absorption (Fan et al. 2007).

4 Bibliographie

- Market available small-scale absorption and adsorption chillers up to a cooling capacity of 20 kW: pp1 (2008).
- Market available standardised Solar Cooling Kits in Europe: pp1 (2008).
- André, P., S. Thomas, *Les systèmes solaires thermiques*. Energie renouvelable, quelle technologie pour quel usage ?, Université de Liège, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement (2008).
- Anyanwu, E., N. Ogueke, "Thermodynamic design procedure for solid adsorption solar refrigerator." *Renewable energy* **30**(1): 81-96 (2005).
- Anyanwu, E. E., "Review of solid adsorption solar refrigerator I: An overview of the refrigeration cycle." *Energy and Management* **44**: 301-312 (2003).
- Argiriou, A. A., C. A. Balaras, S. Kontoyiannidis, E. Michel, "Numerical simulation and performance assessment of a low capacity solar assisted absorption heat pump coupled with a sub-floor system." *Solar Energy* **79**: 290-301 (2005).
- Balaras, C., G. Grossman, H. Henning, C. Infante Ferreira, E. Podesser, L. Wang, E. Wiemken, "Solar air conditioning in Europe--an overview." *Renewable and sustainable energy reviews* **11**(2): 299-314 (2007).
- Bansal, N. K., J. Blumenberg, H. J. Kavasch, T. Roettinger, "Performance testing and evaluation of solid absorption solar cooling unit." *Solar Energy* **61**: 127-140 (1997).
- Belgaid, B., "Building thermal performance in Saharan climate." *International Journal of Energy and Environment* **2**(2): 261-266 (2011).
- Berdja, M., A. Benhabib, B. Abbad, A. Noui, S. Chikh, K. Daoud, L. Ouferrach, *Climatisation solaire en Algérie*. ICRE'07 University of Bejaia (2007).
- Chekirou, W., "Etude et Analyse d'une machine frigorelique solaire à adsorption", *Université Mentouri*, Constantine, pp 197 (2008).
- Critoph, R. E., "An ammonia carbon solar refrigerator for vaccine cooling." *Renewable Energy* **5**: 502-508 (1994).
- Critoph, R. E., "Rapid cycling solar/biomass powered adsorption refrigeration system." *Renewable Energy* **16**: 673-678 (1999).
- Delorme, M., R. Six, S. Berthaud, D. Mugnier, J.-Y. Quinette, N. Richler, F. Heunemann, E. Wiemken, H.-M. Henning, T. Tsoutsos, E. Korma, G. Dall'ò, P. Fragnito, L. Piterà, P. Oliveira, J. Barroso, J. R. López, S. Torre Enciso, *La climatisation solaire*. Lyon (2005).
- Dieng, A. O., R. Z. Wang, "Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and air-conditioning purposes and recent developments in solar technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **5**(4): 313-342 (2001).
- El Fadar, A., M. Mimet, G. Pérez, "Study of an adsorption system powered by parabolic trough collector and coupled with a heat pipe." *Renewable Energy* **34**: 2271-2279 (2009).
- Erhard, A., E. Hahne, "Test and simulation of a solar-powered absorption cooling machine." *Solar Energy* **59**: 155-162 (1997).

- Fan, Y., L. Luo, B. Souyri, "Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **11**(8): 1758-1775 (2007).
- Grossman, G., "Solare-powered systems for cooling, dehumidification and air conditioning." *solar Energy* **72**: 53-62 (2002).
- Hamani, N., A. Moumimi, N. Moumimi, A. Saadi, Z. Mokhtari, "Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra." *Revue des Energies Renouvelables* **10**(2): 215-224 (2007).
- Jakob, U., *Recent developments of small-scale solar or waste heat driven cooling kits for air-conditioning and refrigeration*. SolarNext AG, Germany (2009).
- Khattab, N. M., "A novel solar-powered adsorption refrigeration module." *Applied Thermal Engineering* **24**: 2747-2760 (2004).
- Khelil, C., *Guide des Energies Renouvelables*, République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Energie et des Mines (2007).
- Kim, D. S., C. A. Infante Ferreira, "Solar refrigeration options - a state-of-the-art review." *International Journal of Refrigeration* **31**(1): 3-15 (2008).
- Le Pierrés, N., "Procédé solaire de production de froid basse température (-28°C) par sorption Solide-Gaz", *Perpignan*, pp 1-208 (2005).
- Lemmini, F., A. Errougani, "Building and experimentation of a solar powered adsorption refrigerator." *Renewable Energy* **30**: 1989-2003 (2005).
- Li, C. H., R. Z. Wang, Y. Z. Lu, "Investigation of novel combined cycle of solar powered adsorption-ejection refrigeration system." *Renewable Energy* **26**: 611-622 (2002).
- Li, M., C. J. Sun, R. Z. Wang, D. Cai, "Development of no valve solar ice maker." *Applied Thermal Engineering* **24**: 865-872 (2004).
- Li, M., R. Wang, A. Dieng, "Experimental study on dynamic performance analysis of a flatplate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker." *Renewable Energy* **27**: 11-21 (2001).
- Li, M., R. Z. Wang, "A study of the effects of collector and environment parameters on the performance of a solar powered solid adsorption refrigerator." *Renewable Energy* **27**: 369-382 (2002).
- Li, S., J. Wang, C. Shen, "An intermittent solar refrigerator with 1.5 m² flat plate collector." *Acta Energiæ Solaris Sinica* **1**: 79-86 (1980).
- Liu, Y., R. Z. Wang, "Performance prediction of a solar/gas driving double effect LiBr-H₂O adsorption system." *Renewable Energy* **29**: 1677-1695 (2004).
- Luo, L., M. Feidt, "Thermodynamics of adsorption cycles: A theoretical study." *Heat transfer Engineering* **13**: 19-31 (1992).
- Luo, L., D. Tondeur, "Transient thermal study of an adsorption refrigerating machine." *Adsorption* **6**: 93-104 (2000).
- Maalouf, C., "Etude du potentiel de rafraîchissement d'un système évaporatif à désorption avec régénération solaire", *Rochelle*, pp 1-220 (2006).
- Mayor, J., P. Dind, "Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption transportable." (2003).
- Mhiri, F., S. El Golli, "Etude d'un réfrigérateur solaire adsorption solide avec le couple charbon actif-méthanol." *Revue Générale de Thermique* **35**(412): 269-277 (1996).

- Mostefa-Kara, K., *L'Algérie et l'Afrique face au défi climatique et énergétique*, L'Agence Nationale des Changements Climatiques Membre Principal du GIEC (2005).
- Munyebyu, E., Heat transfer in monolithic charcoals for use in adsorption refrigeration systems. University of Warwick (1994).
- Nakahara, N., Y. Miyakawa, M. Yamamoto, "Experimental study on house cooling and heating with solar energy using flat plate collector." *Solar Energy* **19**: 657-662 (1977).
- Rivera, C. O., W. Rivera, "Modeling of an intermittent solar absorption refrigeration system operating with ammonia-lithium nitrate mixture." *Solar Energy Materials and Solar Cells* **76**: 417-427 (2003).
- Sparber, W., A. Napolitano, G. Eckert, A. Preisler, State of the art on existing solar heating and cooling systems. Bolzano, Italy, Institute for Renewable Energy, EURAC Research of Bolzano, Italy: 1-19 (2009).
- Sumathy, K., Z. C. , H. a. Z. F. Li., "Solar absorption cooling with low grade heat source- A strategy of development in south China." *solar Energy* **72**: 155-165 (2002).
- Sumathy, K., L. Zhongfu, "Experiments with solar-powered adsorption ice-maker." *Renewable Energy* **16**: 704-707 (1999).
- Syeda, A., M. Izquierdo, G. Rodriguez, J. Missenden, A. Lecuona, R. Tozer, "A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid." *International Journal of Refrigeration* **28**: 859-871 (2005).
- Tchernev, D. I., "Solar energy application of natural zeolites, in natural zeolite: occurrence, properties and use." *Oxford: Pergamon Press*: 479 (1978).
- Vitte, T., "Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment: Proposition d'une stratégie de régulation du système", *Université de Savoie*, pp (2007).
- Wang, R., "Adsorption refrigeration research in Shanghai Jiao Tong University." *Renewable sustainable energy* **5**: 1-37 (2000).
- Wang, R., L. Wang, "Adsorption refrigeration-green cooling driven by low grade thermal energy." *Chinese Science Bulletin* **50**(3): 193-204 (2005).
- Wang, R. Z., "An energy efficient hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice-maker." *Solar Energy* **68**(2): 95-189 (2000).
- Wang, R. Z., X. Q. Zhai, "Development of solar thermal technologies in China." *Energy* **35**(11): 4407-4416 (2010).
- Wang, S. G., R. Z. Wang, X. R. Li, "Research and development of consolidated adsorbent for adsorption systems." *Renewable Energy* **30**: 1425-1441 (2005).
- Wiemken, E., Catalogue de bonnes pratiques pour les installations de climatisation/chauffage solaires: 1- 46 (2008).
- Woscoe-schmidt, P., "A solar-powered solid-absorption refrigeration system." *International journal of Refrigeration* **2**: 75-84 (1979).
- Zhai, X., R. Wang, "Experiences on solar heating and cooling in China." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12**(4): 1110-1128 (2008).
- Zhai, X. Q., R. Z. Wang, "A review for absorption and adsorption solar cooling systems in China." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**: 1523-1531 (2009).

Chapitre 3 : Choix de la technologie de rafraîchissement solaire adaptée à nos besoins

Afin de sélectionner la bonne technique de rafraîchissement solaire adaptée à la région de Biskra, nous présentons dans ce chapitre un travail de synthèse réalisé pour balayer les différents systèmes de rafraîchissement solaire à sorption installés dans le monde. Beaucoup de tables de synthèse seront présentées sur des exemples de machines et installations à sorption (absorption/adsorption) commerciales ou encore prototypes.

1 Climatisation et rafraîchissement

En génie climatique, le terme de climatisation fait référence à une installation qui garantit une valeur de consigne pour la température (et dans certains cas le taux d'humidité). Une installation de rafraîchissement solaire permet d'abaisser le niveau de température mais la valeur de consigne ne peut pas toujours être garantie (la nuit par exemple, ou lors d'une période chaude mais sans soleil). Il est cependant possible de garantir une valeur de consigne, lorsque cela est nécessaire, mais en ajoutant une énergie d'appoint. On utilisera donc le terme de rafraîchissement solaire pour une installation autonome, et climatisation solaire lorsqu'un appoint est utilisé (Delorme et al. 2005).

2 Conduire un projet de rafraîchissement solaire

Le rafraîchissement solaire est une technologie récente et en développement, comparée à d'autres champs d'application de l'énergie solaire. La plupart des installations sont donc des opérations de démonstration, et un effort conséquent doit être fourni pour la réalisation de chaque nouveau projet. Différentes solutions techniques sont possibles, en fonction du type de bâtiment, de son utilisation, de l'existence ou non d'installations techniques, des conditions climatiques.

Dans le suivant paragraphe, on présente une méthodologie permettant de faire un choix entre les différentes technologies et la nécessité d'une étude de faisabilité (Delorme et al. 2005).

2.1 Etude de faisabilité

Le choix d'une technologie de rafraîchissement solaire et la conception du système nécessitent plus que la simple considération du point de fonctionnement nominal, parce que la fluctuation des apports solaires entraîne un fonctionnement quasi permanent des composants en charge partielle.

De plus, les conditions de fonctionnement particulières pour des dispositifs tels que les groupes à absorption ou les systèmes à dessiccation ne sont pas encore assez connus de la plupart des concepteurs et installateurs. Il est difficile aujourd'hui de trouver un outil facile d'emploi qui permette un choix simple et rapide de la technologie de rafraîchissement solaire la plus adaptée et du dimensionnement du système. Pour cette raison, une étude de faisabilité, est fortement recommandée au début de tel projet.

L'étude peut comporter les étapes suivantes :

- détermination des besoins en froid et en chauffage (par exemple au moyen de simulations).
- sélection de la technologie de rafraîchissement solaire la plus adaptée et plan d'implantation.
- pré-dimensionnement des composants, c'est-à-dire taille du champ de capteurs et des dispositifs de stockage de chaleur et/ou de froid.
- analyse des stratégies de contrôle.
- simulation dynamique des performances des systèmes en fonction des différentes stratégies.
- calcul des rendements et des valeurs d'exploitation comme le COP du système de refroidissement, la fraction solaire, le rendement net des capteurs.
- calcul des consommations (électricité, eau, gaz).
- estimation des chiffres-clés financiers et des économies d'énergie primaire.

Dans tous les cas, l'étude de faisabilité est un outil indispensable pour aider le maître d'ouvrage dans sa prise de décision concernant son projet de rafraîchissement solaire (Delorme, Six et al. 2005).

2.2 Choix de la technologie

La figure 3.1 présente les principales questions à se poser au moment du choix de la technologie de rafraîchissement solaire appropriée.

DEC: Système à dessiccation.

CTA: Centrale de Traitement d'Air.

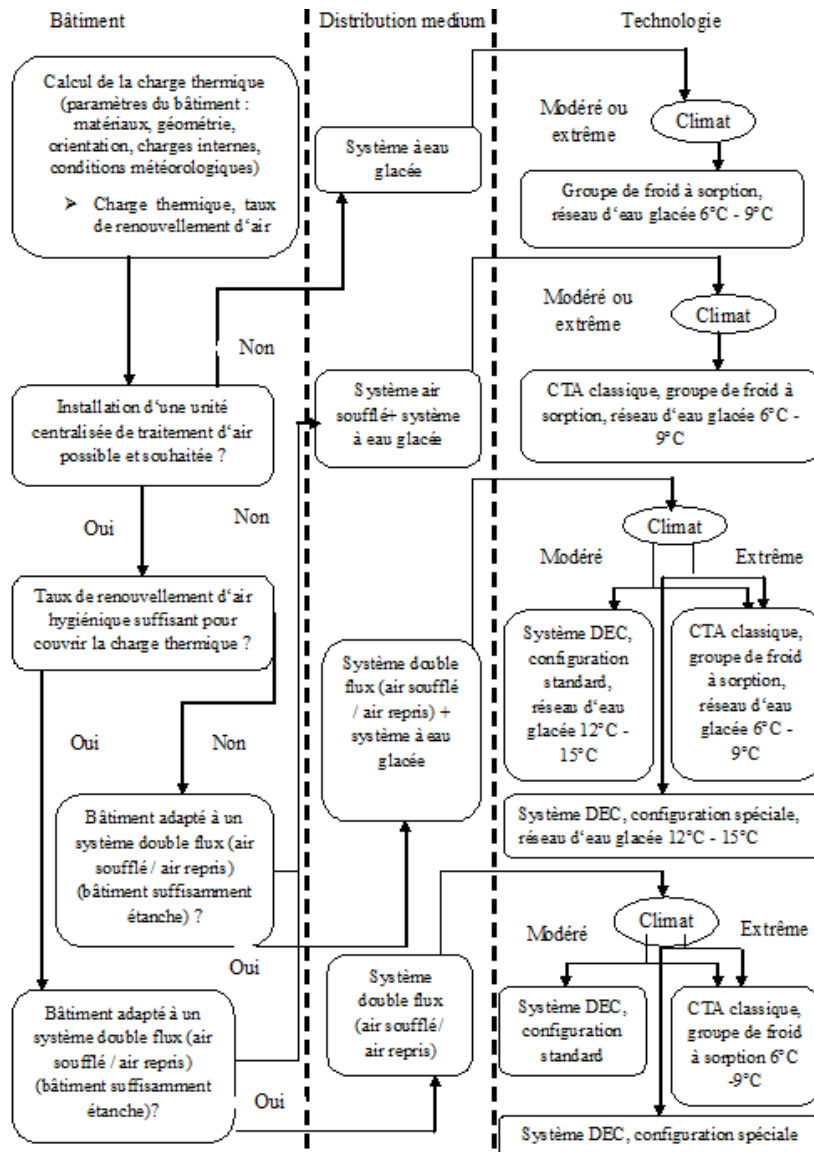


Figure 3.1 : Arbre de décision pour le choix de la technologie de rafraîchissement solaire (Delorme et al. 2005).

Ce schéma part de l'hypothèse du contrôle de la température et de l'humidité intérieure. Le point de départ est toujours le calcul, au cas par cas, des besoins en froid. Selon ces besoins et les attentes des utilisateurs, on optera pour un système à air, à eau ou mixte (air et eau), pour extraire chaleur et humidité du bâtiment.

La principale question sur le plan technique est : le taux de renouvellement d'air minimum qui garantit de bonnes conditions hygiéniques est-il suffisant pour couvrir les besoins en froid (chaleur sensible et chaleur latente) ? Ce sera typiquement le cas des pièces au taux d'occupation élevé, nécessitant un fort taux de renouvellement d'air, comme les salles de conférence. Dans tous les cas, un système double flux n'a de sens que dans un bâtiment relativement étanche, dont les infiltrations et fuites à travers l'enveloppe sont faibles.

Dans le cas des systèmes double flux, les deux technologies de rafraîchissement solaire, à savoir systèmes par dessiccation et groupes à sorption, peuvent être utilisées.

Dans tous les autres cas, seuls les groupes à sorption conviennent. La température minimale requise pour l'eau glacée dépend de la technique de déshumidification de l'air utilisée : technique classique, c'est-à-dire refroidissement au-dessous du point de rosée, ou procédé par dessiccation. Dans ce dernier cas, la température de l'eau glacée peut être plus élevée car elle n'a à couvrir que la charge sensible.

Dans les climats extrêmes, c'est-à-dire avec un niveau élevé d'humidité de l'air ambiant, les techniques par dessiccation nécessitent une configuration spéciale du système. Dans le cas où le système à dessiccation nécessite un groupe supplémentaire pour couvrir les pics de consommation, un groupe à compression électrique peut être utilisé pour des raisons économiques.

3 Aperçu sur les systèmes installés

Sparber et al. (2009) ont dénombré 113 systèmes de climatisation solaire de grande échelle et 163 systèmes à petite échelle installés dans le monde, y compris éventuellement les systèmes qui ne sont actuellement pas en opération. 254 installations sont situées en Europe, 13 en Asie, principalement en Chine et au Japon, 4 en Amérique (3 aux USA et 1 au Mexique), 3 en Australie et deux en Afrique (Egypte et Afrique du Sud).

La figure 3.2 montre la répartition du nombre d'installations dans le monde entier par pays, classés dans petite ou grande échelle (Sparber et al. 2009).

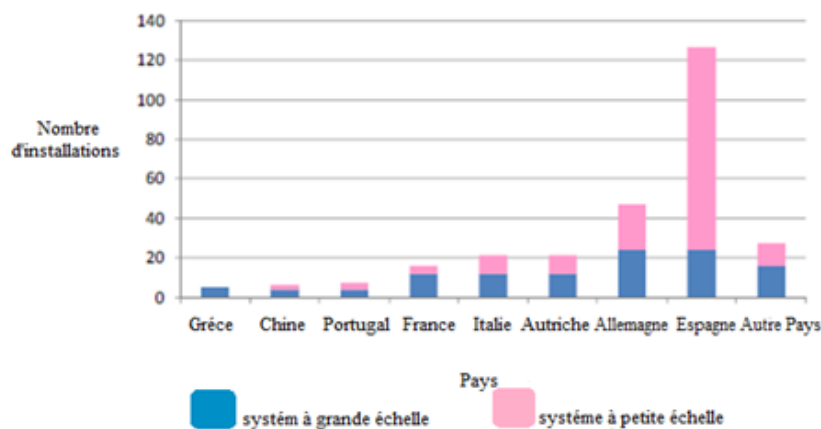


Figure 3.2: Nombre total des systèmes de chauffage et de refroidissement solaires installés dans différents pays et classés dans les systèmes de petite ou grande échelle. «Autres pays» comprennent : Arménie, Australie, Belgique, Danemark, Egypte, Japon, le Kosovo, le Lichtenstein, Malte, Mexique, Pays-Bas, Singapour, Afrique du Sud, Suisse, Syrie, Turquie, Royaume-Uni, Emirats Arabes Unis et aux USA (Sparber et al. 2009).

La figure 3.3 montre l'utilisation du chauffage solaire à petite échelle et les installations de refroidissement. («Autres services» comprennent: les écoles, les salles de spectacle, hôtels) (Sparber et al. 2009). La plupart des installations sont consacrées à des immeubles de bureaux comme dans la figure 3.3 et figure 3.4, mais 28% de l'ensemble des installations à petite échelle servent les bâtiments résidentiels.

La capacité de refroidissement global de refroidisseurs à sorption assisté par l'énergie solaire calculée de 268 systèmes sur les montants à 15,7 MW: 24,4% de celui-ci est installé en Espagne, 19,5% en Allemagne et 17,4% en Italie. 14,1 MW de capacité de refroidissement va aux systèmes à grande échelle et 1,6 MW pour les systèmes à petite échelle. La figure 3.5 représente la puissance frigorifique des refroidisseurs à sorption (Sparber et al. 2009).

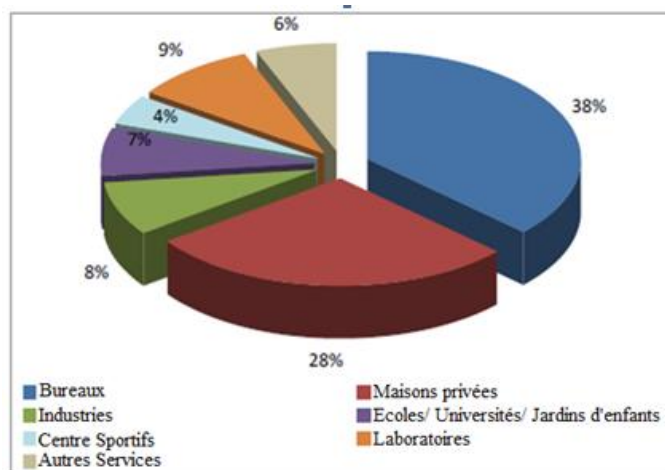


Figure 3.3 : Utilisation du chauffage solaire à petite échelle et les installations de refroidissement. («Autres services» comprennent: les écoles, les salles de spectacle, hôtels) (Sparber et al. 2009).

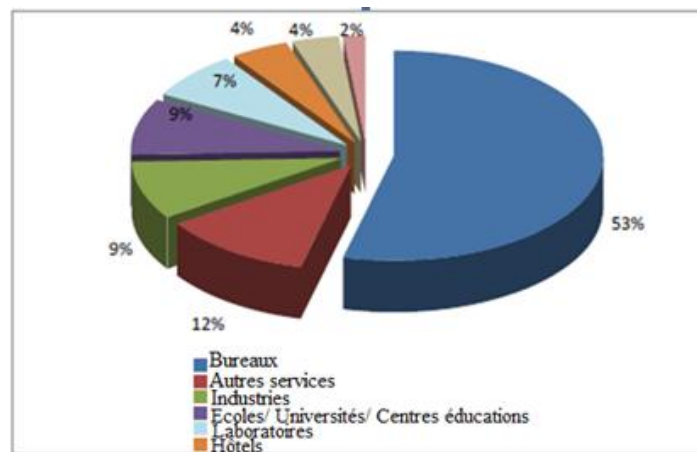


Figure 3.4: Utilisation du chauffage solaire à grande échelle et les installations de refroidissement. («Autres services» comprennent: les hôpitaux, les cantines, centre sportif) (Sparber, Napolitano et al. 2009).

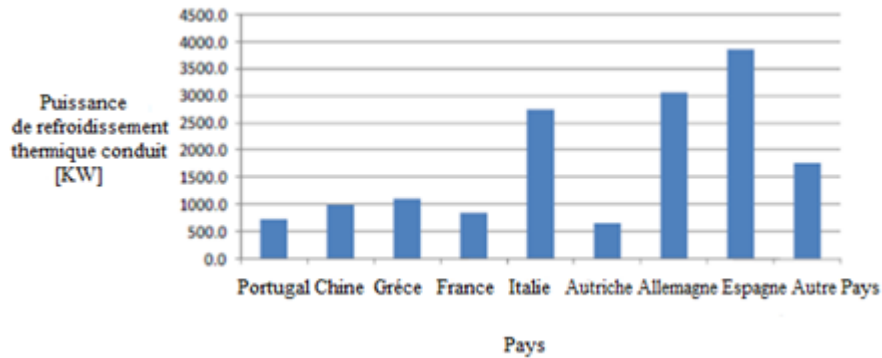


Figure 3.5 : Puissance frigorifique des refroidisseurs à sorption assisté par l'énergie solaire installés dans différents pays du monde. «Autres pays» comprennent la puissance de refroidissement installé en Australie, Belgique, Danemark, Egypte, au Kosovo, le Lichtenstein, Malte, Mexique, Pays-Bas, Singapour, Suisse, Syrie, Turquie, Royaume-Uni, Emirats Arabes Unis et dans une usine américaine (Sparber et al. 2009).

Dans 269 installations, la technologie des refroidisseurs à sorption plus utilisé est basée sur le principe d'absorption tandis que les systèmes DEC sont utilisés uniquement dans les grandes applications. Les deux figures 3.6 et 3.7 représentent le pourcentage de différentes technologies pour les refroidisseurs à sorption pour les systèmes grands et petites échelles respectivement (Sparber et al. 2009).

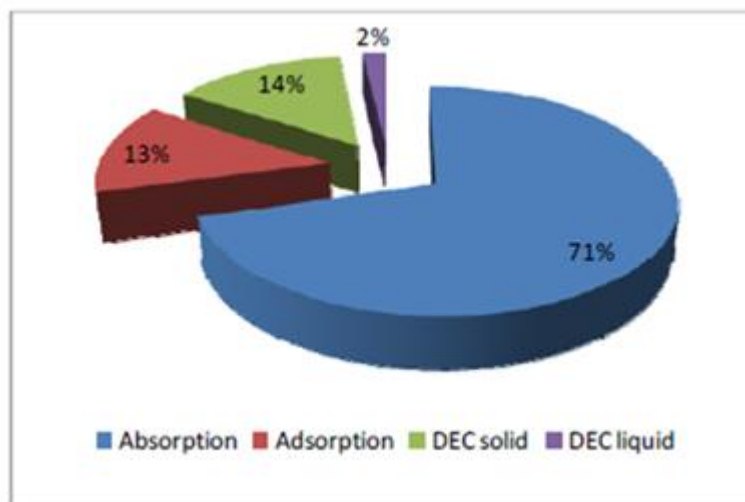


Figure 3.6 : Pourcentage d'utilisation de différentes technologies pour les refroidisseurs à sorption dans les systèmes à grande échelle (Sparber et al. 2009).

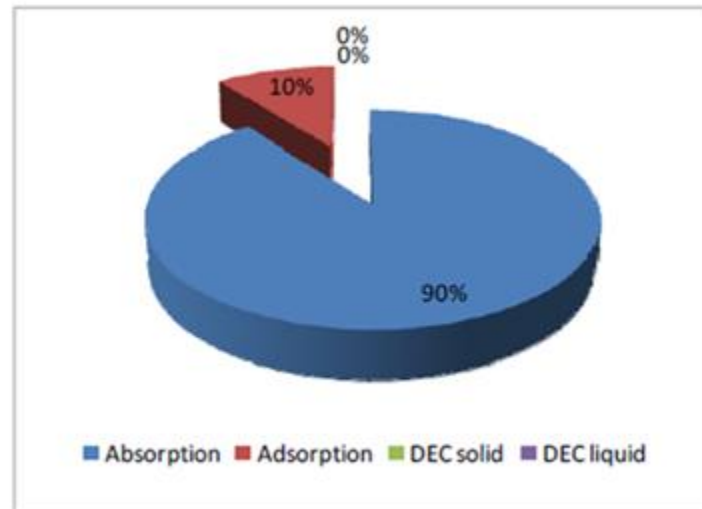


Figure 3.7: Pourcentage d'utilisation de différentes technologies pour les refroidisseurs à sorption dans les 156 systèmes à petite échelle (Sparber et al. 2009).

Dans environ 105 des systèmes de refroidissement solaire à petite échelle basé sur l'absorption, les refroidisseurs fabriqués par **Rotartica** avec 4,5 kW sont présents dans 50% des installations, tandis que **Sorthech** est le seul fabricant fournissant des refroidisseurs d'adsorption.

Pour les systèmes à grande échelle, il n'existe pas de données sur les fabricants et les capacités de refroidissement nominales installées sont tellement différentes dans les installations existantes qu'il n'est pas possible de reconnaître les fabricants spécial, sauf 18 installation à grande échelle sont probablement équipés de refroidisseurs **Yazaki** avec une puissance de 35 kW (Sparber et al. 2009).

4 Exemples de prototypes et d'installations commerciales

Comme on vient de voir, plusieurs prototypes et installations commerciales utilisant le phénomène de sorption ont été réalisés à travers le monde, chaque fois avec des modifications pour améliorer leurs performances. La classification de ces prototypes réalisés, des machines et installations commercialisées peuvent se faire par rapport au phénomène lui-même (absorption ou adsorption).

Nous citerons ci-dessous une classification que nous avons réalisée en tenant compte notamment aux constructeurs, couple de travail, capacité de refroidissement, Températures de fonctionnement, COP, dimensions et poids de la machine, surface de capteurs solaires, et coût d'investissement.

4.1 Rafraîchissement solaires par absorption

4.1.1 Machines et installations commerciales

Compagnie, Pays	Yazaki, Japan	EAW, Germany	Climatewel 1, Sweden	Solution Solartechnik GmbH, Austria	SolarNext, Germany	SolarNext, Germany	Yazaki, Japan	Rotartica, Spain
Nom de la machine	chillii® WFC 18	Wegracal SE15	Climatewel 110	Eisbär EAW SE 50	chillii ACC50	Chillii PSC12	WFC-600	Solar 045
Couple de travail	H ₂ O/LiBr	H ₂ O/LiBr	H ₂ O/LiCl	H ₂ O/LiBr	ammoniac /H ₂ O	NH ₃ /H ₂ O	H ₂ O/LiBr	H ₂ O/LiBr
Capacité de refroidissement [KW]	17.5	15	10	54	50	12	100	4.5
Température d'eau chaud [°c]	88 / 83	90 / 80	83 / -	- / -	115 / 105	85 / 78	75	90 / 85
Température de refroidissement [°c]	31 / 35	30 / 35	30 / -	- / -	30 / 25	24 / 29	- / -	30 / 35
Température d'eau froide [°c]	12.5 / 7	17 / 11	- / 15	- / -	10 / 5	12 / 6	9	13 / 10
COP	0.70	0.71	0.68	0.75	0.55	0.62	0.45	0.67
Dimensions (L×D×H) (m×m×m)	0.60 x 0.80 x 1.77	1.75 x 0.76 x 1.75	1.20 x 0.80 x 1.60	-	2.35 x 1.65 x 2.63	0.80 x 0.60 x 2.20	-	1.09 x 0.76 x 1.15
Poids [KG]	420	660	875	-	1600	350	-	290
Surface de capteur[m ²]	-	-	-	221	-	-	500	-
Auxiliaire source (électricité) [W]	72	-	-	-	3000	300	-	-

Tableau 3.1 : Performances d'une sélection de machines et d'installations de rafraîchissement solaires commerciales basées sur la technique d'absorption [(Jakob 2009), (2008) , (2008)].

Equipement, pays et en service depuis	Institut Espagnol Diversification et l'Economie d'Energie. Ministère de l'industrie et du commerce. France, 2003	La province de Trente (Italie), Italie, 2004	Union européenne et ADEME, France, 2003	EDF, l'ADEME et l'Union européenne, France, 2003	GICB - Groupement Inter producteurs Collioure Banyuls - France, 1991
Bâtiment	Bureau et Magasins	Centre d'innovation	Bureaux, laboratoires	Bureaux	Cave viticole
Capacité de refroidissement [KW]	170	108	35	35	52
Surface de capteur [m ²]	1626	265	116	100	215
Température d'eau chaude [°c]	55 – 45	–	–	–	–
Température d'eau froide [°c]	12 – 07	–	–	–	–
Composante de système	2 Pompe à chaleur électriques et groupe de froid électrique	–	une machine de production de froid à absorption, 2 champs de capteurs solaires sous vide, un stockage d'eau chaude tampon et un stockage d'eau froide.	une machine à absorption, plusieurs pompes de circulation, une tour de refroidissement ouverte et un système de régulation.	une citerne de stockage tampon, un groupe à absorption indirecte à simple effet, plusieurs pompes circulantes, une tour aéroréfrigérante à circuit ouvert et trois unités de conditionnement d'air
Ballon de stockage de chaleur [L]	30000	–	300	–	1000
Coût d'investissement [€]	900000	540000	151000	159 700	294 500

Tableau 3.2 : Performances d'une sélection d'installations de rafraîchissement solaire commerciales basées sur la technique d'absorption (Delorme et al. 2005).

4.1.2 *Prototypes*

(Fan, Luo et al. 2007), (Le Pierrés 2005)						
Producteur, Pays	Yeung et al, Hong Kong	Syeda et al, Espagne	Assilzadeh et al, Malaisie	Best et Ortega, Mexique	(Mendes and Collares-Pereira 1999)	(Balaras and Kontoyiannidis 2001)
Année de réalisation	1992	2005	2005	1999	1999	2001
Couple de travail	H ₂ O/LiBr	H ₂ O/LiBr	H ₂ O/LiBr	H ₂ O/LiBr	NH ₃ /H ₂ O	H ₂ O/LiBr
Surface de capteur [m ²]	38.2	49.9	35	–	–	35
Capacité de refroidissement [KW]	4.7	35	3.5	–	5	8.7
Température de fonctionnement [°c]	–	57 – 67	–	70 – 90	–	–
COP	0.08	0.42 – 0.32	–	0.53 – 0.73	0.55	0.85
Réservoir de stockage d'eau chaude [m ³]	2.75	–	–	–	–	–

Tableau 3.3 : Performances d'une sélection de la littérature de prototypes de rafraichissement solaires basées sur la technique d'absorption.

4.2 Rafraîchissement solaires par adsorption

4.2.1 Machines et installations commerciales

Compagnie, Pays	SorTech, Germany	SorTech, Germany	SJTU, China	InvenSor, Germany	Solution Solartechnik GmbH, Austria	SorTech, Germany	Nishiyodo, Germany
Nom de la machine	chillii® STC8	chillii® STC15	SWAC-10	chillii® ISC10	SOLACS 08	Chillii ACS 05	NAK 20/70
Couple de travail	H ₂ O/Silica gel	H ₂ O/Silica gel	H ₂ O/Silica gel	H ₂ O/Zéolite	H ₂ O/Silica gel	H ₂ O/ glycol	H ₂ O/glycol
Capacité de refroidissement [KW]	7.5	15	10	10	7.5	5.5	70
Température d'eau chaud [°c]	75 / 68	75 / 69	85 / 79	95 / 87	- / -	- / -	- / -
Température de refroidissement [°c]	32 / 27	32 / 27	36 / 30	38 / 32	- / -	- / -	- / -
Température d'eau froide [°c]	18 / 15	18 / 15	15 / 10	18 / 15	- / -	- / -	- / -
COP	0.56	0.56	0.39	0.50	0.56	0.57	0.42
Dimensions (L×D×H) (m×m×m)	0.79 x 1.06 x 0.94	0.79 x 1.34 x 1.39	1.80 x 1.20 x 1.40	0.65×1.30 ×1.65	-	-	-
Poids [KG]	260	510	1600	370	-	-	-
Surface de capteur [m²]	34	68	-	46	32	22	-
Auxiliaire source (électrique) [W]	20	30	-	-	-	-	-

Tableau 3.4 : Performances d'une sélection de machines et d'installations de rafraîchissement solaires commerciales basées sur la technique d'adsorption [(Wiemken 2008), (Jakob 2009), (2008), (2008)].

Équipement, pays et en service depuis	le Ministère Fédéral de l'Économie et du Travail et la société Sulzer Infra. Allemagne, 1999	le Programme National Opérationnel pour l'Énergie (Ministère Grec du Développement). Grèce, 1999
Bâtiment	Laboratoire	Entrepôts de l'entreprise de cosmétiques Sarantis
Capacité de refroidissement [KW]	70	700
Surface de capteur [m ²]	230	2700
Température d'eau chaude [°C]	–	70 – 75
Température d'eau froide [°C]	–	10 – 8
Composante de système	Deux systèmes de ventilation et des échangeurs thermiques doubles flux et Un ballon de stockage d'eau chaude et un autre pour l'eau froide.	deux groupes à adsorption, trois groupes de froids électriques classiques, des brûleurs fioul.
Ballon de stockage de chaleur [L]	6000	–
Coût d'investissement [€]	352 000	1 305 943
COP	0.60	0.60

Tableau 3.5 : Performances d'une sélection d'installations de rafraîchissement solaire commerciales basées sur la technique d'absorption (Delorme et al. 2005).

4.2.2 Prototypes

(Zhai and Wang 2009)				
Producteur, Pays	(Zhai, Wang et al. 2008), Shanghai	(Wang, Wu et al. 2003), Shanghai	Saha et al,	Liu et al,
Année de réalisation	2008	2003	2001	2005
Couple de travail	H ₂ O/Silica gel	Méthanol/charbon actif	H ₂ O/Silica gel	H ₂ O/Silica gel
Surface de capteur [m ²]	150	–	–	–
Capacité de refroidissement [KW]	8.5	2	3.2	3.56
Température de fonctionnement [°C]	60 – 95	–	40 – 95	85
COP	0.35	0.239	0.36	0.26
Réservoir de stockage d'eau chaude [m ³]	2.5	–	–	–

Tableau 3.6 : Performances d'une sélection de la littérature de prototypes de rafraîchissement solaires basées sur la technique d'absorption.

5 Conclusion

Nous avons données dans ce chapitre, un détail statistique sur les machines, installations et prototypes testées à travers le monde. Des exemples de machines et installations commercialisés et de prototypes réalisés ont été cités. Nous en concluons que les systèmes de climatisation (ou de rafraîchissement) solaire basés sur le phénomène d'absorption sont les plus utilisés dans le monde. Les machines à base du phénomène d'adsorption sont moins utilisées mais qui sont classées comme deuxième technologie de choix pour les faibles et les grandes puissances frigorifiques.

Par ailleurs, il faut signaler que notre équipe à l'Université de Biskra compte se lancer dans le domaine de la recherche expérimentale sur les machines de production du froid solaire. Ceci nous a poussé à choisir les systèmes d'adsorption qui présentent, en comparaison avec

le système d'absorption, les avantages techniques suivantes : i) la simplicité de conception, de réalisation et de fonctionnement, ii) la machine demande moins de maintenance puisque elle ne présente pas de partie mobile, iii) possibilité de travailler avec des capteurs fabriqués localement puisque la machine travail à des basses températures de fonctionnement, iv) le besoin d'auxiliaire source d'énergie pour le système d'adsorption est négligeable, v) problème de la mauvaise conductivité thermique de l'adsorbant sera probablement résolu très prochainement puisque beaucoup de travaux de recherche actuelles traitent des nouveaux couples d'adsorption.

Par conséquent, nous présenterons dans le prochain chapitre une étude préliminaire de dimensionnement d'une installation de rafraîchissement solaire dans le site de Biskra basée sur le phénomène d'adsorption.

6 Bibliographie

- Market available small-scale absorption and adsorption chillers up to a cooling capacity of 20 kW: pp1 (2008).
- Market available standardised Solar Cooling Kits in Europe: pp1 (2008).
- André, P., S. Thomas, *Les systèmes solaires thermiques*. Energie renouvelable, quelle technologie pour quel usage ?, Université de Liège, Département des Sciences et Gestion de l'Environnement (2008).
- Anyanwu, E., N. Ogueke, "Thermodynamic design procedure for solid adsorption solar refrigerator." *Renewable energy* **30**(1): 81-96 (2005).
- Anyanwu, E. E., "Review of solid adsorption solar refrigerator I: An overview of the refrigeration cycle." *Energy and Management* **44**: 301-312 (2003).
- Argiriou, A. A., C. A. Balaras, S. Kontoyiannidis, E. Michel, "Numerical simulation and performance assessment of a low capacity solar assisted absorption heat pump coupled with a sub-floor system." *Solar Energy* **79**: 290-301 (2005).
- Balaras, C., G. Grossman, H. Henning, C. Infante Ferreira, E. Podesser, L. Wang, E. Wiemken, "Solar air conditioning in Europe--an overview." *Renewable and sustainable energy reviews* **11**(2): 299-314 (2007).
- Bansal, N. K., J. Blumenberg, H. J. Kavasch, T. Roettinger, "Performance testing and evaluation of solid adsorption solar cooling unit." *Solar Energy* **61**: 127-140 (1997).
- Belgaid, B., "Building thermal performance in Saharan climate." *International Journal of Energy and Environment* **2**(2): 261-266 (2011).
- Berdja, M., A. Benhabib, B. Abbad, A. Noui, S. Chikh, K. Daoud, L. Oufar, *Climatisation solaire en Algérie*. ICRE'07 University of Bejaia (2007).
- Capderou, M., Aspect énergétique. *Atlas solaire de l'Algérie*. **Tome 2**: 11 (1985).
- Chekirou, W., "Etude et Analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption", *Université Mentouri*, Constantine, pp 197 (2008).

- Critoph, R. E., "An ammonia carbon solar refrigerator for vaccine cooling." *Renewable Energy* **5**: 502-508 (1994).
- Critoph, R. E., "Rapid cycling solar/biomass powered adsorption refrigeration system." *Renewable Energy* **16**: 673-678 (1999).
- Delorme, M., R. Six, S. Berthaud, D. Mugnier, J.-Y. Quinette, N. Richler, F. Heunemann, E. Wiemken, H.-M. Henning, T. Tsoutsos, E. Korma, G. Dall'ò, P. Fragnito, L. Piterà, P. Oliveira, J. Barroso, J. R. López, S. Torre Enciso, *La climatisation solaire*. Lyon (2005).
- Dieng, A. O., R. Z. Wang, "Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and air-conditioning purposes and recent developments in solar technology." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **5**(4): 313-342 (2001).
- El Fadar, A., M. Mimet, G. Pérez, "Study of an adsorption systeme powered by parabolic trough collector and coupled with a heat pipe." *Renewable Energy* **34**: 2271-2279 (2009).
- Erhard, A., E. Hahne, "Test and simulation of a solar-powered absorption cooling machine." *Solar Energy* **59**: 155-162 (1997).
- Fan, Y., L. Luo, B. Souyri, "Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **11**(8): 1758-1775 (2007).
- Grossman, G., "Solare-powered systems for cooling, dehumidification and air conditioning." *solar Energy* **72**: 53-62 (2002).
- Hamani, N., A. Moummi, N. Moummi, A. Saadi, Z. Mokhtari, "Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra." *Revue des Energies Renouvelables* **10**(2): 215-224 (2007).
- Jakob, U., *Recent developments of small-scale solar or waste heat driven cooling kits for air-conditioning and refrigeration*. SolarNext AG, Germany (2009).
- Kharchi, R., B. Benyoucef, M. Belhamel, "Système solaire combiné estimation des besoins énergétiques." *Revue des Energies Renouvelables*: 109-114 (2007).
- Khattab, N. M., "A novel solar-powered adsorption refrigeration module." *Applied Thermal Engineering* **24**: 2747-2760 (2004).
- Khelil, C., *Guide des Energies Renouvelables*, République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Energie et des Mines (2007).
- Kim, D. S., C. A. Infante Ferreira, "Solar refrigeration options - a state-of-the-art review." *International Journal of Refrigeration* **31**(1): 3-15 (2008).
- Le Pierrés, N., "Procédé solaire de production de froid basse température (-28°C) par sorption Solide-Gaz", *Perpignan*, pp 1-208 (2005).
- Lemmini, F., A. Errougani, "Building and experimentation of a solar powered adsorption refrigerator." *Renewable Energy* **30**: 1989-2003 (2005).
- Li, C. H., R. Z. Wang, Y. Z. Lu, "Investigation of novel combined cycle of solar powered adsorption-ejection refrigeration system." *Renewable Energy* **26**: 611-622 (2002).
- Li, M., C. J. Sun, R. Z. Wang, D. Cai, "Development of no valve solar ice maker." *Applied Thermal Engineering* **24**: 865-872 (2004).

- Li, M., R. Wang, A. Dieng, "Experimental study on dynamic performance analysis of a flatplate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker." *Renewable Energy* **27**: 11-21 (2001).
- Li, M., R. Z. Wang, "A study of the effects of collector and environment parameters on the performance of a solar powered solid adsorption refrigerator." *Renewable Energy* **27**: 369-382 (2002).
- Li, S., J. Wang, C. Shen, "An intermittent solar refrigerator with 1.5 m² flat plate collector." *Acta Energetica Solaris Sinica* **1**: 79-86 (1980).
- Liu, Y., R. Z. Wang, "Performance prediction of a solar/gas driving double effect LiBr-H₂O adsorption system." *Renewable Energy* **29**: 1677-1695 (2004).
- Luo, L., M. Feidt, "Thermodynamics of adsorption cycles: A theoretical study." *Heat transfer Engineering* **13**: 19-31 (1992).
- Luo, L., D. Tondeur, "Transient thermal study of an adsorption refrigerating machine." *Adsorption* **6**: 93-104 (2000).
- Maalouf, C., "Etude du potentiel de rafraîchissement d'un système évaporatif à désorption avec régénération solaire", *Rochelle*, pp 1-220 (2006).
- Mayor, J., P. Dind, "Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption transportable." (2003).
- Mhiri, F., S. El Golli, "Etude d'un réfrigérateur solaire adsorption solide avec le couple charbon actif-méthanol." *Revue Générale de Thermique* **35**(412): 269-277 (1996).
- Mostefa-Kara, K., *L'Algérie et l'Afrique face au défi climatique et énergétique*, L'Agence Nationale des Changements Climatiques Membre Principal du GIEC (2005).
- Munyebvu, E., Heat transfer in monolithic charcoals for use in adsorption refrigeration systems. University of Warwick (1994).
- Nakahara, N., Y. Miyakawa, M. Yamamoto, "Experimental study on house cooling and heating with solar energy using flat plate collector." *Solar Energy* **19**: 657-662 (1977).
- Rivera, C. O., W. Rivera, "Modeling of an intermittent solar absorption refrigeration system operating with ammonia-lithium nitrate mixture." *Solar Energy Materials and Solar Cells* **76**: 417-427 (2003).
- Sparber, W., A. Napolitano, G. Eckert, A. Preisler, State of the art on existing solar heating and cooling systems. Bolzano, Italy, Institute for Renewable Energy, EURAC Research of Bolzano, Italy: 1-19 (2009).
- Sumathy, K., Z. C. , H. a. Z. F. Li., "Solar absorption cooling with low grade heat source- A strategy of development in south China." *solar Energy* **72**: 155-165 (2002).
- Sumathy, K., L. Zhongfu, "Experiments with solar-powered adsorption ice-maker." *Renewable Energy* **16**: 704-707 (1999).
- Syeda, A., M. Izquierdo, G. Rodriguez, J. Missenden, A. Lecuona, R. Tozer, "A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid." *International Journal of Refrigeration* **28**: 859-871 (2005).
- Tchernev, D. I., "Solar energy application of natural zeolites, in natural zeolite: occurrence, properties and use." *Oxford: Pergamon Press*: 479 (1978).

- Vitte, T., "Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment: Proposition d'une stratégie de régulation du système", *Université de Savoie*, pp (2007).
- Wang, L. W., J. Y. Wu, R. Z. Wang, Y. X. Xu, S. G. Wang, "Experimental study of a solidified activated carbon-methanol adsorption ice maker." *Applied Thermal Engineering* **23**: 1453-1462 (2003).
- Wang, R., "Adsorption refrigeration research in Shanghai Jiao Tong University." *Renewable sustainable energy* **5**: 1-37 (2000).
- Wang, R., L. Wang, "Adsorption refrigeration-green cooling driven by low grade thermal energy." *Chinese Science Bulletin* **50**(3): 193-204 (2005).
- Wang, R. Z., "An energy efficient hybrid system of solar powered water heater and adsorption ice-maker." *Solar Energy* **68**(2): 95-189 (2000).
- Wang, R. Z., X. Q. Zhai, "Development of solar thermal technologies in China." *Energy* **35**(11): 4407-4416 (2010).
- Wang, S. G., R. Z. Wang, X. R. Li, "Research and development of consolidated adsorbent for adsorption systems." *Renewable Energy* **30**: 1425-1441 (2005).
- Wiemken, E., *Catalogue de bonnes pratiques pour les installations de climatisation/chauffage solaires*: 1- 46 (2008).
- Woscoe-schmidt, P., "A solar-powered solid-absorption refrigeration system." *International journal of Refrigeration* **2**: 75-84 (1979).
- Zhai, X., R. Wang, "Experiences on solar heating and cooling in China." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **12**(4): 1110-1128 (2008).
- Zhai, X. Q., R. Z. Wang, "Experimental investigation and theoretical analysis of the solar adsorption cooling system in a green building." *Applied Thermal Engineering* **29**: 17-27 (2009).
- Zhai, X. Q., R. Z. Wang, "A review for absorption and adsorption solar cooling systems in China." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**: 1523-1531 (2009).
- Zhai, X. Q., R. Z. Wang, J. Y. Wu, Y. J. Dai, Q. Ma, "Design and performance of a solar-powered air-conditioning system in a green building." *Applied Energy* **85**: 297-311 (2008).

Chapitre 4 : Etude préliminaire d'une installation de rafraîchissement solaire à adsorption dans le site de Biskra

Après une présentation des besoins en froid pour un espace local, nous présentons, dans ce chapitre, une description détaillée de la technologie solaire sélectionnée dans le chapitre précédent (technique à adsorption). Un pré-dimensionnement des composantes de l'installation est ainsi présenté suivi par une validation de la démarche de calcul suivis. Nous présentons également une estimation du coût d'investissement de l'installation en discutant son éventuelle installation dans la région de Biskra.

1 Estimation des besoins en froid

Le calcul du bilan thermique de climatisation ou de conditionnement d'air permet de déterminer la puissance de l'installation qui pourra répondre aux critères demandés. Ainsi, le calcul précis d'un bilan thermique de climatisation est long et compliqué, car plusieurs facteurs entrent en jeu notamment : i) le fait que les charges extérieures varient tout au long d'une journée, ii) la qualité de l'isolation thermique du local.

Le tableau 4.1 donne un ordre de grandeur de l'équivalence de la puissance du climatiseur par rapport à la surface que ce dernier est capable de refroidir.

Le local à conditionné est considéré relativement bien isolée thermiquement, avec un nombre raisonnable d'ouvertures vitrées et d'une surface de 80 m² et de 3 m de hauteur. La figure 4.1 si dessous présente une schématisation de cette surface qui peut être un magasin ordinaire. D'après le tableau 4.1 la puissance du climatiseur correspond est de 30000 BTU (l'équivalent de 8.5 kWh).

Puissance (en BTU)	Surface traitable (m ²)
7000	7 à 15
9000	15 à 25
12000	25 à 35
18000	35 à 50
24000	50 à 70
30000	70 à 80

Tableau 4.1 : Puissance du climatiseur par rapport à la surface traitable.

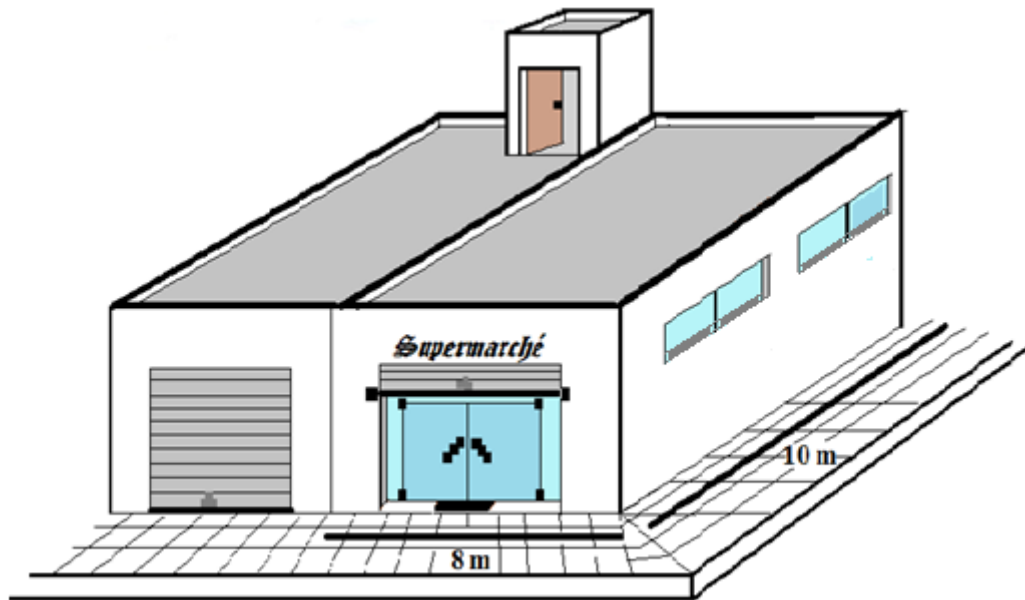


Figure 4.1 : Schématisation du local étudié pour l'installation de climatiseur solaire.

Comme nous l'avons avancé plus haut, la technologie de production du froid solaire sélectionnée est basée sur le phénomène d'adsorption. Pour avoir une idée de ce que c'est, nous présentons dans la section suivante une description détaillée de telle technologie de rafraîchissement et de son essai en Chine puisque aucune installation n'a été testée en Algérie. Élément principal

2 Description de la technologie de rafraîchissement sélectionnée

2.1 Conception des composantes du système solaire

La figure 4.2 présente un schéma d'un exemple de système solaire de climatisation à adsorption. Ce système se compose de deux refroidisseurs à adsorption, une tour de refroidissement, des ventilo-convecteurs à l'intérieur de la chambre de climatisation et de quatre pompes de circulation (pompe 1 pour le champ de capteurs solaire, pompe 2 pour l'eau chaude, pompe 3 pour l'eau de refroidissement et la pompe 4 pour l'eau refroidie). Un réservoir d'eau de stockage de chaleur de 2.5 m^3 de volume.

2.2 Refroidisseur à adsorption

Nous présentons dans la figure 4.3 une photo d'un exemple de refroidisseur de 2.5m de longueur, 1.5m de largeur et 2m d'hauteur (Zhai et al. 2008). Nous montrons ci-dessous les composantes de base de ce refroidisseur :

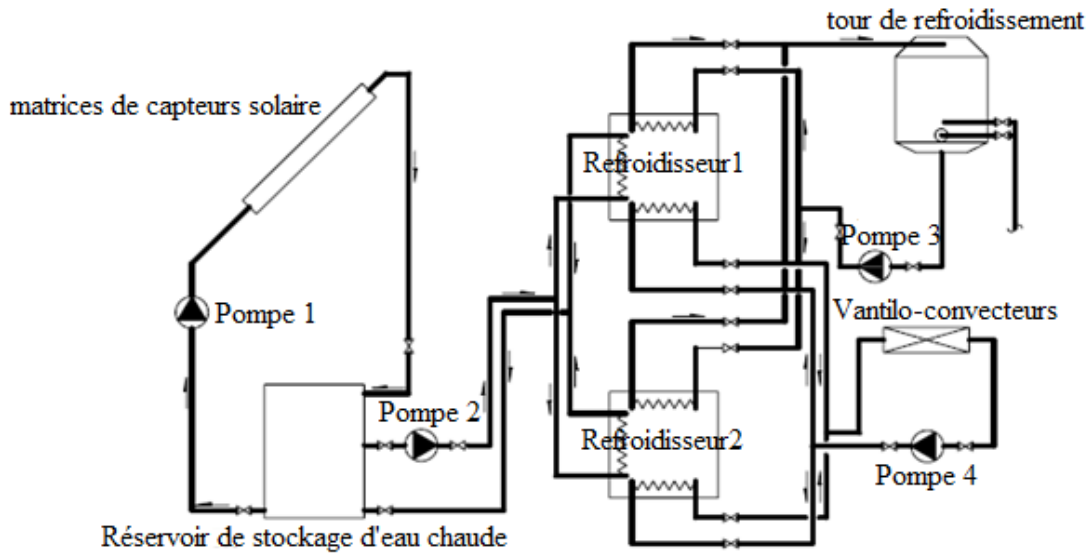


Figure 4.2 : Schéma d'un exemple de système solaire de climatisation (Zhai et al. 2008).

2.2.1 L'adsorbeur

C'est un élément essentiel de la machine, contient l'adsorbant qui est le charbon actif dans ce cas (figures 4.3 et 4.4). L'effet de la désorption de l'adsorbat joue le rôle d'un compresseur dans un système de climatisation classique à compression de vapeur.

La structure de la section de chaque adsorbeur est montrée dans la Figure 4.5. Il existe trois blocs de charbon actif AC35 solidifié à la section d'adsorption. Deux nageoires de 0,15 m d'épaisseur sont conservées aux deux côtés d'un bloc de charbon actif qui est solidifié d'épaisseur de 10 mm. La surface de transfert de chaleur des ailettes est de 25 m². Le rapport entre la capacité thermique de l'adsorbant et la capacité thermique de métal est de 0,84. Chaque adsorbeur contient du charbon actif AC35 de 60 kg (Wang et al. 2003).



Figure 4.3 : Photo du refroidisseur à adsorption (Zhai et al. 2008).

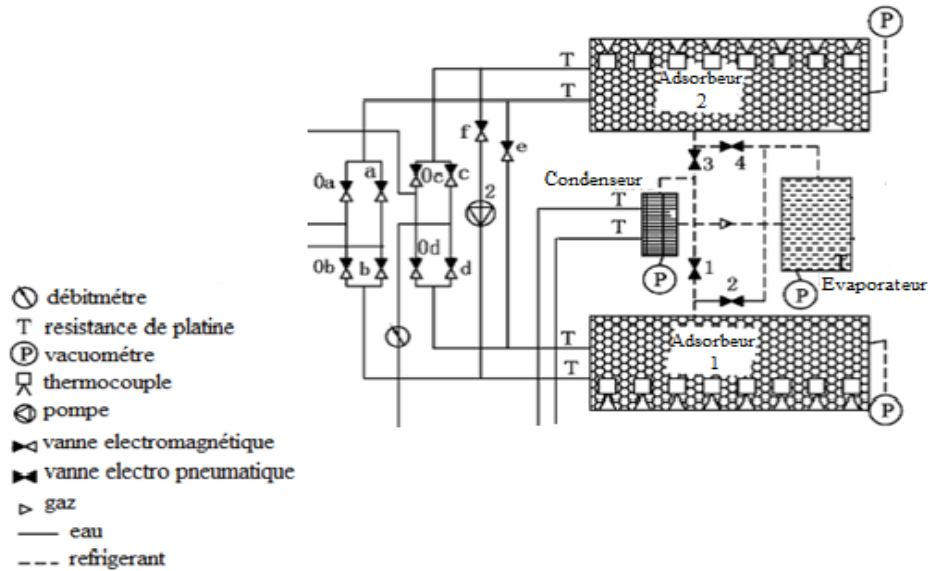


Figure 4.4 : Schéma du refroidisseur et de ses composants (Wang et al. 2003).

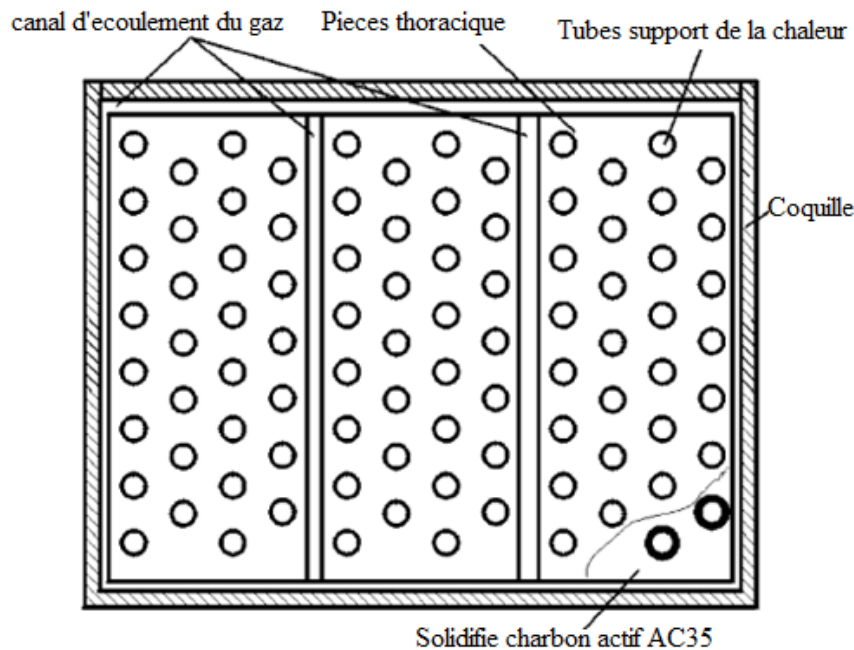


Figure 4.5 : Section transversale de l'adsorbent (Wang et al. 2003).

2.2.2 Condenseur

Un échangeur de chaleur servant à condenser l'adsorbant désorbés dans l'adsorbent.

2.2.3 Evaporateur

Un échangeur de chaleur qui présente la partie utile du climatiseur. Il contient l'adsorbant sous forme liquide ou solide. L'évaporateur peut avoir la forme d'un disque comme celui de Wang, et al. 2003, de matière d'acier inoxydable et d'environ 380 mm de diamètre et de 13 mm d'épaisseur.

2.2.4 Vannes électropneumatiques

Ce sont, tout simplement, des vannes d'arrêt électrique de faible consommation électrique car le déplacement du tiroir du distributeur est assuré par le fluide comprimé, mais celui-ci est admis par l'intermédiaire d'une mini-électrovanne à clapet.

Notre refroidisseur nécessite quatre vannes électropneumatiques entre les deux lits adsorbants et le condenseur et l'évaporateur (Wang et al. 2003).

2.2.5 Vannes électromagnétiques

Est un dispositif pour le shunt réfrigérant ou la commande "Marche/Arrêt" dans les réfrigérateurs, les congélateurs, les climatiseurs, les déshumidificateurs et les fabricants de glace. Elle est principalement employée pour l'ajustement de dégivrage et le contrôle de flux réfrigérant dans le système de réfrigération, en plus de l'écoulement automatique de canalisation ouvert et étroit.

Notre refroidisseur nécessite 10 électrovannes magnétiques positionnées entre les deux adsorbants et le réservoir de stockage d'eau chaude et la source de l'eau fraîche de refroidissement (Wang et al. 2003).

2.3 Principe de fonctionnement

Le plus important dans le système est de comprendre le principe de fonctionnement du refroidisseur pour l'accorder correctement aux autres composantes du système solaire. La figure 4.6 représente le système solaire d'adsorption avec un refroidisseur de deux lits.

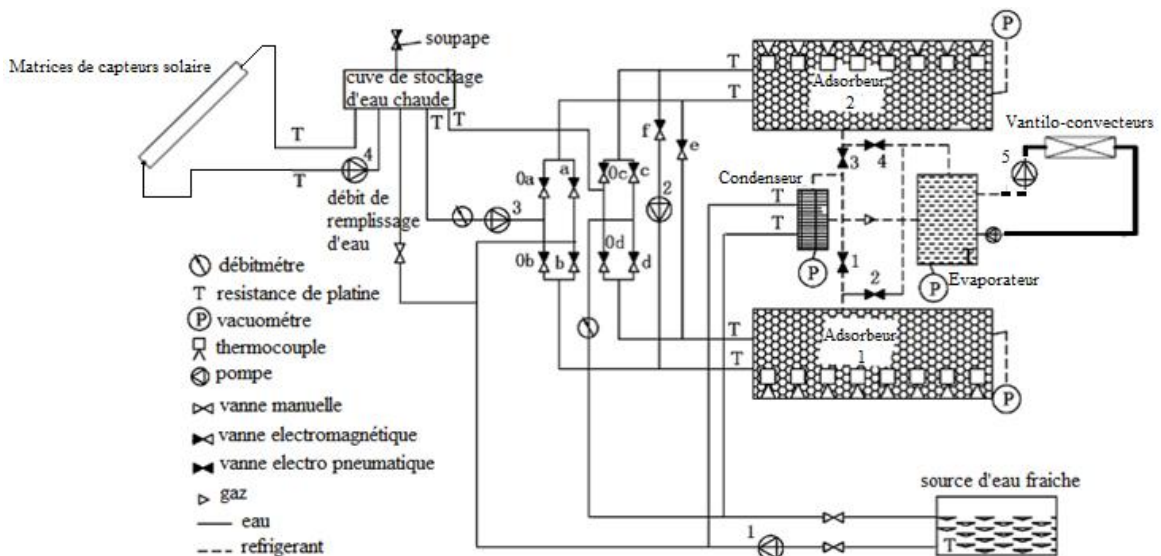


Figure 4.6 : Schématisation d'un système solaire avec un refroidisseur de deux lits adsorbants [(Wang et al. 2003), (Zhai et al. 2008)].

Il y'a un évaporateur et un condenseur dans le refroidisseur à deux lits adsorbants. L'eau de refroidissement de l'adsorbant est en provenance du réservoir d'eau fraîche. Le fluide caloporteur des deux adsorbants est relié à la cuve de stockage d'eau chaude et le réservoir d'eau de refroidissement, correspondant respectivement à l'interrupteur de désorption et adsorption.

L'eau refroidie produite par le refroidisseur d'adsorption est pompée (pompe 5) au ventilo-convecteurs à l'intérieur de la chambre à climatiser. Les processus de travail pour le refroidisseur sont contrôlés par des électrovannes et des pompes. Par exemple :

- Les vannes électromagnétiques : 0a, 0b, a, b, 0d, 0c, c, d, les électro pneumatiques : 1, 2, 3, 4 et la pompe 3 sont désactivés durant l'étape de récupération de la chaleur.
- Les vannes électropneumatiques : 1, 3 doit être ouverte durant l'étape de récupération de la masse d'adsorbat.
- Les vannes électromagnétiques : 0a, 0c, b, d, e, f et les vannes électro pneumatiques : 2, 3 et la pompe 2 sont désactivés quand l'adsorbant 1 se désorbe, et au même temps l'adsorbant 2 adsorbe. La figure 4.7 présente le cas de l'adsorbant 1 désorbe et l'adsorbant 2 adsorbe.
- Les vannes électromagnétiques : 0b, 0d, a, c, e, f et les soupapes électro pneumatiques : 1, 4 et la pompe 2 sont désactivés quand l'adsorbant 1 adsorbe, et au même temps l'adsorbant 2 désorbe. La figure 4.8 présente le cas de l'adsorbant 1 adsorbe et l'adsorbant 2 désorbe.

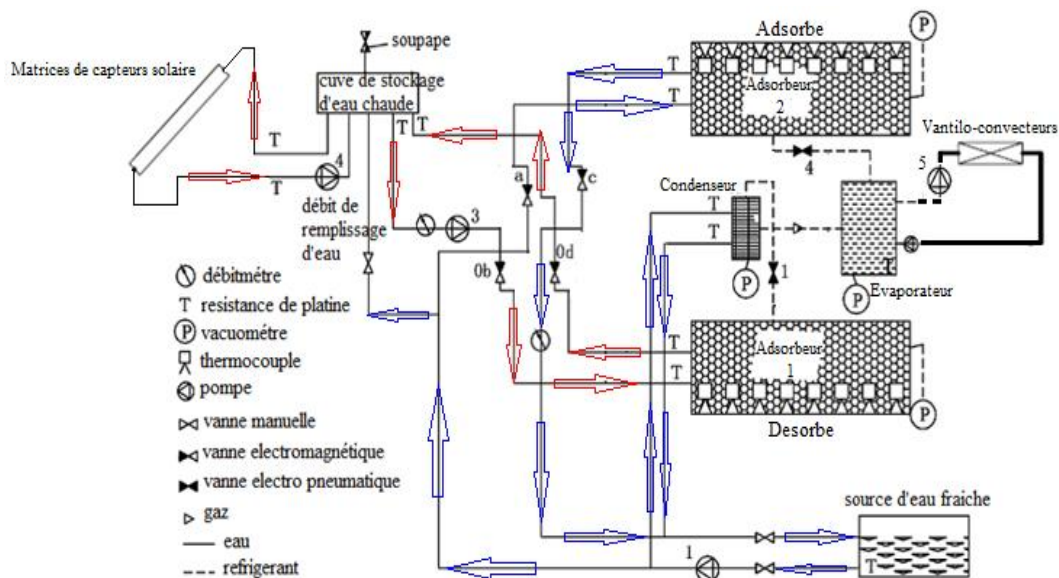


Figure 4.7 : Système solaire durant l'étape de la désorption dans l'adsorbant 1 et l'adsorption dans l'adsorbant 2.

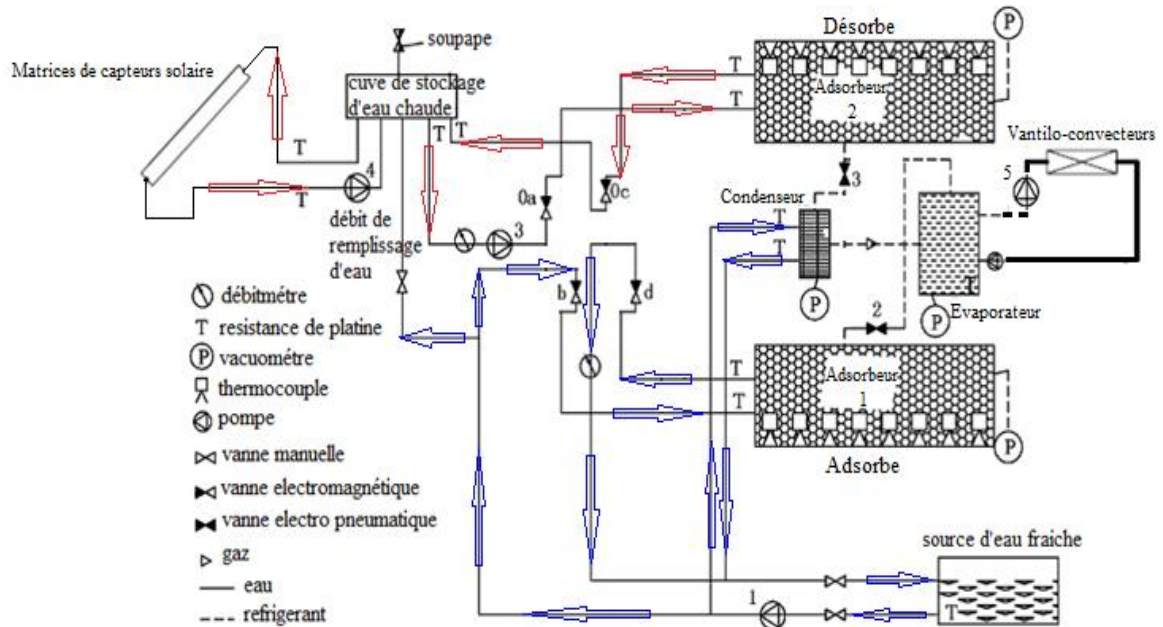


Figure 4.8 : Système solaire durant l'étape de la désorption dans l'adsorbteur 2 et l'adsorption dans l'adsorbteur 1.

Le processus du cycle de refroidisseur d'adsorption est la suivante : le temps de chauffage/refroidissement est de 900 sec, le temps de récupération de masse est de 180 sec et le temps de récupération de chaleur est de 60 sec. La valeur nominale de la capacité de refroidissement est de 8,5 kW lorsque la température de l'eau chaude est de 85°C. Les autres performances du groupe de refroidissement sont données dans le tableau 4.2.

Performance du groupe de refroidissement	Performance	Unité
Sortie de réfrigération	8.5	kW
La température de sortie d'eau glacée	10	°C
Débit d'eau glacée	1.5	t/h
La température d'admission d'eau de refroidissement	32	°C
Débit d'eau de refroidissement	2.5	t/h
La température d'admission de l'eau chaude	85	°C
Débit d'eau chaude	1.8	t/h
La pression de travail du système d'eau réfrigérée	0.6	MPa
La pression de travail du système de refroidissement de l'eau	0.6	MPa
La pression de travail du système d'eau chaude	0.6	MPa
Poids en service	1.5	T
Alimentation	2U-220 V-50 Hz	

Tableau 4.2 : Performances du refroidisseur d'adsorption de Zhai and Wang (2009).

2.4 Processus du cycle à adsorption

Le processus du cycle du groupe de refroidissement à adsorption et de couple de travail charbon actif AC35/ Méthanol est différent d'un groupe de refroidissement classique, en particulier dans le processus d'adsorption/désorption. La figure 4.9 montre un diagramme P-T d'un cycle de base idéal et pratique du refroidisseur à adsorption (Zhai and Wang 2009).

Le processus de cycle de : A-B-C-D-E-F-A est le cycle idéal. Chaque processus présente le phénomène suivant :

- Le processus (A-B) et (D-E) sont à la fois les processus de récupération de chaleur.
- Le processus (B-C) et (E-F) représentent que le refroidisseur travaille en chauffage / refroidissement et en désorption / adsorption.
- Le processus (C-D) et (F-A) sont à la fois des récupérations de masse.

Dans le cycle pratique, le refroidisseur décrit plus haut suit les points: A-B-n-C-q-D-E-m-F-q'-A, plutôt que le cycle idéal A-B-C-D-E-F-A, parce que les capacités d'échange thermique de tout les échangeurs de chaleur sont finies (Zhai and Wang 2009).

La pression et la température de l'adsorbeur sont toujours en évolution dans le processus de cycle complet. Dans le processus de récupération de masse, la température de l'adsorbeur ne change pas en proportion directe avec la pression dans l'adsorbeur. Même ainsi, la zone de travail du refroidisseur dans le diagramme P-T est encore largement amplifiée par rapport avec le processus du cycle de base idéal : B-C-E-F-B. dans le cycle de pratique, le processus de désorption se produit dans le : A-B-n-C-q-D et le processus d'adsorption se produit dans le processus de : D-E-m-F-q'-A (Zhai and Wang 2009).

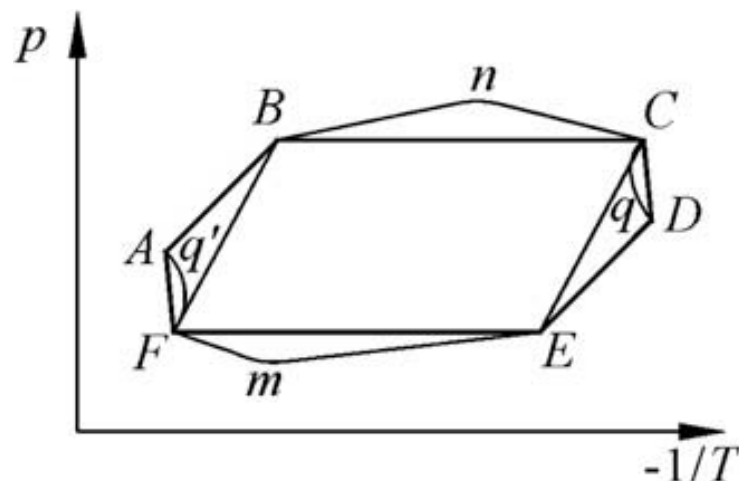


Figure 4.9 : Diagramme P-T pour le cycle de base idéal, cycles idéal et pratique d'un refroidisseur à adsorption (Zhai and Wang 2009).

2.5 Essai expérimental sous des conditions réelles

Les résultats expérimentaux dans des conditions météorologiques de à **Shanghai** ont été choisis par Zhai and Wang (2009) pour analyser les performances du système de climatisation solaire. La figure 4.10 montre les variations de la température ambiante et l'intensité de rayonnement solaire pendant les heures d'exploitation. Le rayonnement solaire journalier est de $20,4 \text{ MJ/m}^2$ et la température ambiante moyenne est de $31,7^\circ\text{C}$. Le réservoir d'eau de stockage de chaleur a été spécialement conçu pour être le lien entre la circulation de l'eau dans les capteurs solaires et la circulation d'eau chaude dans la machine à adsorption. L'eau chaude provenant du champ de capteurs solaires alimente la partie supérieure du réservoir d'eau, et l'eau de retour de la machines à adsorption coulait au fond. En outre, l'eau chaude pour les machines à adsorption provient de la partie supérieure du réservoir d'eau (Zhai and Wang 2009).

Quatre résistances de platine ont été fixées à l'entrée et la sortie des capteurs solaires, au milieu et en haut du réservoir de stockage d'eau chaude. La figure 4.11 montre les variations de températures de l'eau à l'intérieur du réservoir de stockage durant le fonctionnement du climatiseur.

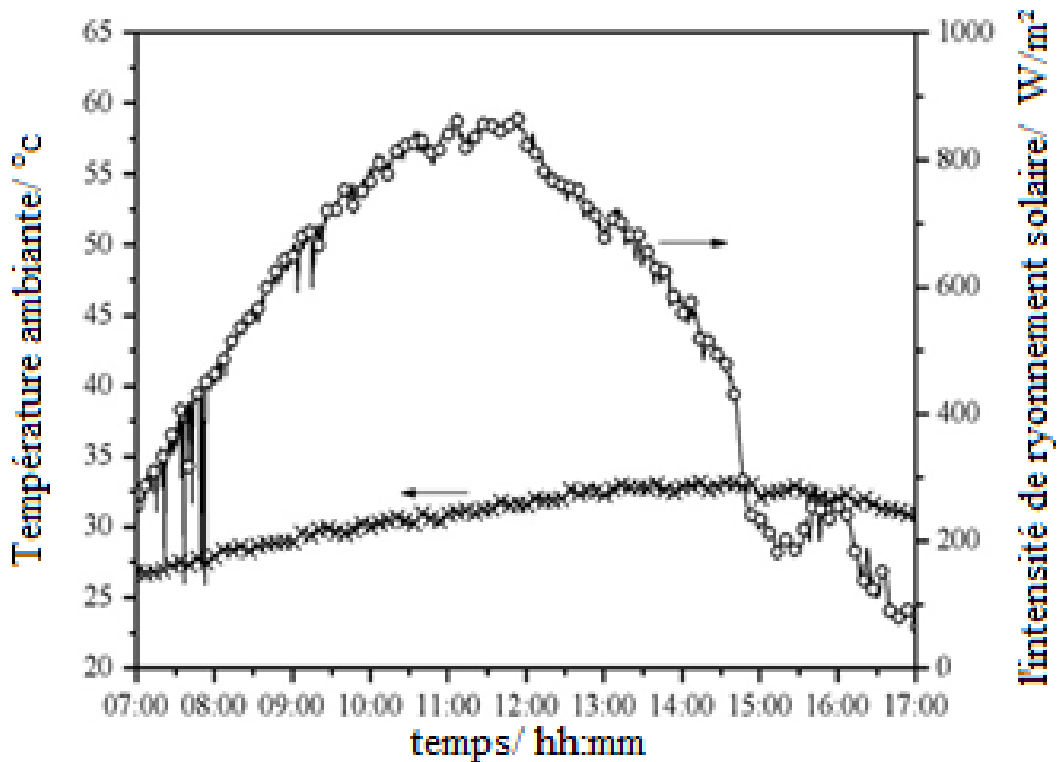


Figure 4.10 : Variations de la température ambiante et l'intensité de rayonnement solaire d'une journée de test à Shanghai (Zhai and Wang 2009).

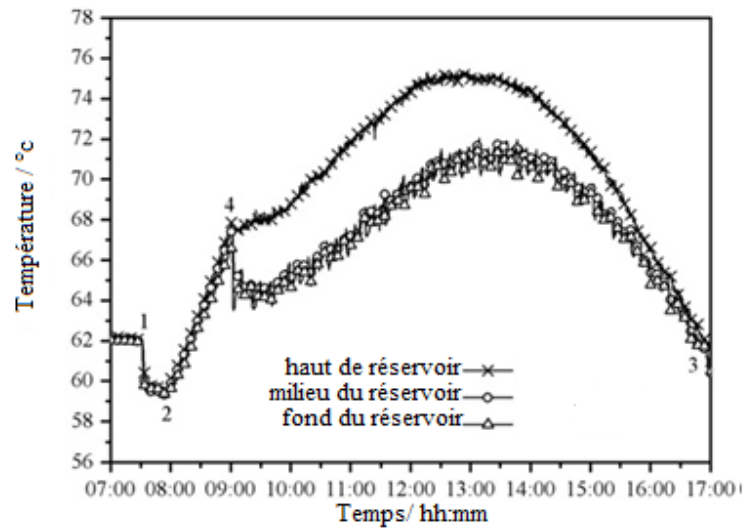


Figure 4.11 : Variations des températures de l'eau à l'intérieur du réservoir de stockage durant le fonctionnement de la machine (Zhai and Wang 2009).

La figure 4.12 montre les variations de la température d'entrée et de sortie de l'eau chaude ($T_{EC, \text{entrée}}$; $T_{EC, \text{sortie}}$), de l'eau de refroidissement ($T_{ER, \text{entrée}}$; $T_{ER, \text{sortie}}$) et de l'eau refroidie ($T_{EG, \text{entrée}}$; $T_{EG, \text{sortie}}$) durant le fonctionnement du système. Nous remarquons que la température moyenne de l'eau chaude est de 70.2°C avec une valeur maximale de 75.6°C à 13h00. La température moyenne de sortie de l'eau refroidie est de 18.5°C (différence de température entre l'entrée et de sortie de 3.5°C), qui a été adaptée pour le mode de fonctionnement à sec du système de climatisation (Zhai and Wang 2009).

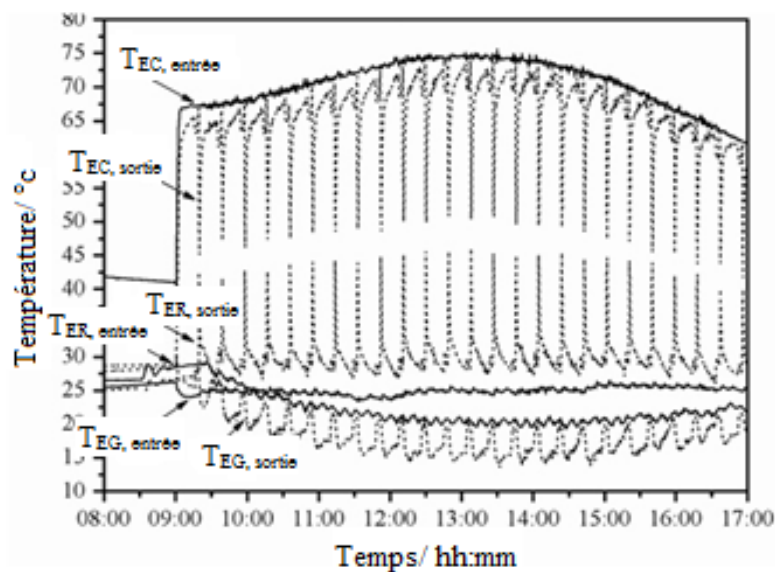


Figure 4.12 : Variation de la température d'entrée et de sortie d'eau chaude, de refroidissement et refroidie durant le fonctionnement du système (Zhai and Wang 2009).

3 Pré-dimensionnement des composantes de l'installation dans le site de Biskra

Dans la première section, le besoin du froid pour le rafraîchissement du local installé dans le site de Biskra (figure 4.1) est estimé autour de 8.5 kWh. Ainsi, nous avons vu dans la deuxième section que le refroidisseur de Zhai and Wang (2009) produit une énergie frigorifique du même ordre (8.5kW) comme nous l'avons reproduit sur le tableau 4.2. Par conséquent, nous utiliserons dans tout ce qui suit les performances du tableau 4.2 pour les calculs.

3.1 Besoin d'eau chaude pour le refroidisseur d'adsorption

Pour calculer la quantité d'énergie nécessaire à la production d'eau chaude utilisée par le refroidisseur du système de climatisation solaire à adsorption, il faut d'abord connaître le volume d'eau chaude nécessaire pour un bon fonctionnement du système. D'après la description précédente des composantes de système (tableau 4.2), le débit d'eau chaude est de 1,8 t/h. Pour un fonctionnement de 9 h jusqu'à 17 h, nos besoins d'eau s'estime à 14400 litres, alors la quantité d'énergie nécessaire E_{ECN} utilisée par le refroidisseur d'adsorption est donnée par (Kharchi et al. 2007) :

$$E_{ECN} = \rho C_p V (T_{EEC} - T_{SEC}) \quad (4.1)$$

Où C_p est la capacité calorifique de l'eau (4200 J/kg/°C), ρ sa masse volumique (1 kg/l), et T_{EEC} T_{SEC} températures d'entrée et de sortie de l'eau chaude. Les températures d'entrée et de sortie d'eau chaude sont 70°C et 50°C respectivement (Zhai and Wang 2009).

Le besoin d'eau chaude pour le refroidisseur d'adsorption sera : **$E_{ECN} = 336 \text{ kWh}$** .

3.2 Calcul de la surface de captation

Le tableau 4.2 montre que le niveau de température de l'eau chaude est relativement faible (85°C), par conséquent les capteurs solaires plans seront utilisés comme pour absorber le rayonnement solaire.

Pour estimer la surface de captation du rayonnement solaire nécessaire pour le fonctionnement de la machine de Zhai and Wang (2009) dans le site de Biskra, nous aurons besoin des valeurs des coefficients suivants :

E : énergie solaire reçue en kWh/m².jour.

C_i : coefficient d'inclinaison des capteurs.

C_o : coefficient d'orientation des capteurs.

C_c : coefficient de correction du fluide caloporteur.

η : Rendement du capteur solaire.

$$PSD = E \times \eta \times C_i \times C_o \times C_c \quad (4.2)$$

Les valeurs des coefficients sont des valeurs génériques:

$C_i = 0.999$; $C_o = 1$ (sud) ; $C_c = 1$ (Kharchi et al. 2007).

$\eta = 0.65$ pour un capteur plan, avec le rayonnement solaire journalier E de $7500 \text{ Wh/m}^2/\text{jour}$ à Biskra (Capderou 1985).

$$PSD = 4870 \text{ Wh/m}^2/\text{jour}$$

Donc on trouve que la surface de captation nécessaire est :

$$S = \frac{E_{ECN}}{PSD}$$

Donc, la surface de captation du rayonnement solaire nécessaire pour le fonctionnement de la machine de Zhai and Wang (2009) dans le site de Biskra est **S = 69 m²**.

3.3 Dimensionnement du local de l'installation

Pour dimensionner le local de l'installation il faut avoir les grandeurs de chaque élément de se système, qui se compose principalement :

- du refroidisseur avec une surface occupé près de 4 m^2 .
- un réservoir de stockage de l'eau chaude d'une surface de 1 m^2 .
- un système pour rafraichir l'eau de refroidissement (tour de refroidissement) de 1 m^2 .

En plus des pompes d'eau et les tubes de raccordement, la figure 4.13 représente un schéma simplifié pour le système voulu installer.

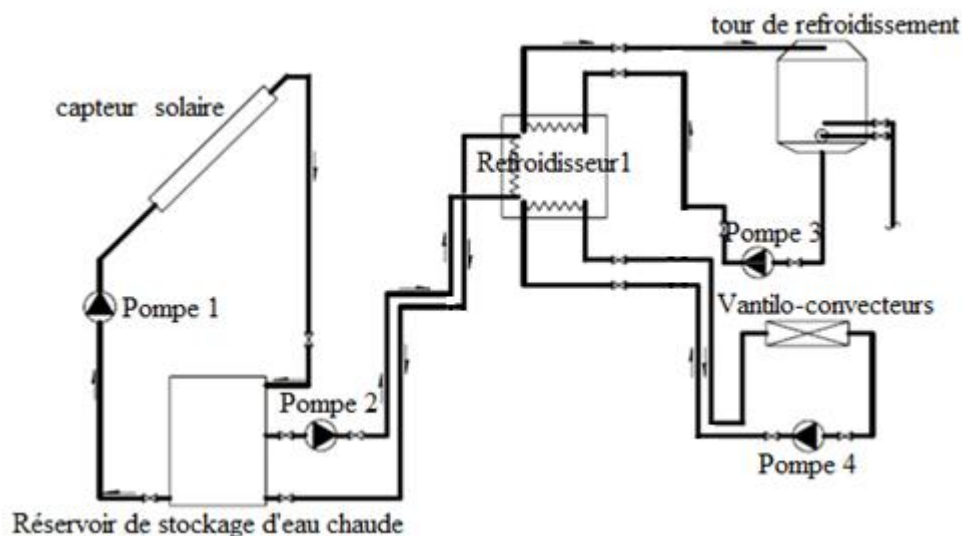


Figure 4.13 : Schéma simplifié pour l'installation du système de climatisation solaire.

Donc pour cette installation il faudra un local d'une surface de près de **10 m²**. Les figures 4.14 et 4.15 présentent une illustration de l'installation des capteurs solaires plans et une illustration du local contenant le refroidisseur et les réservoirs de stockage de l'eau.

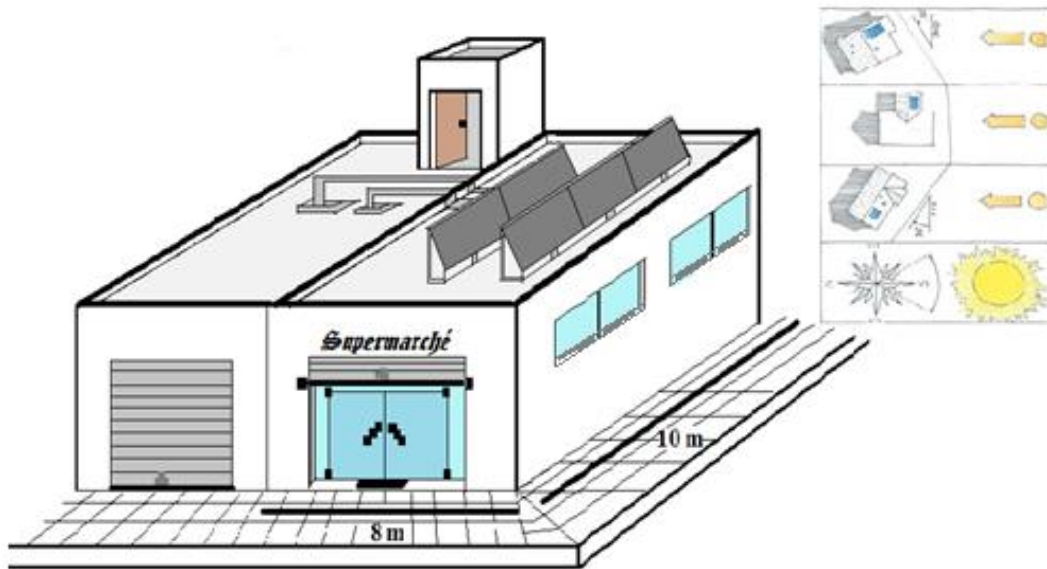


Figure 4.14 : Illustration de l'installation des capteurs solaires plans sur la toiture du local.

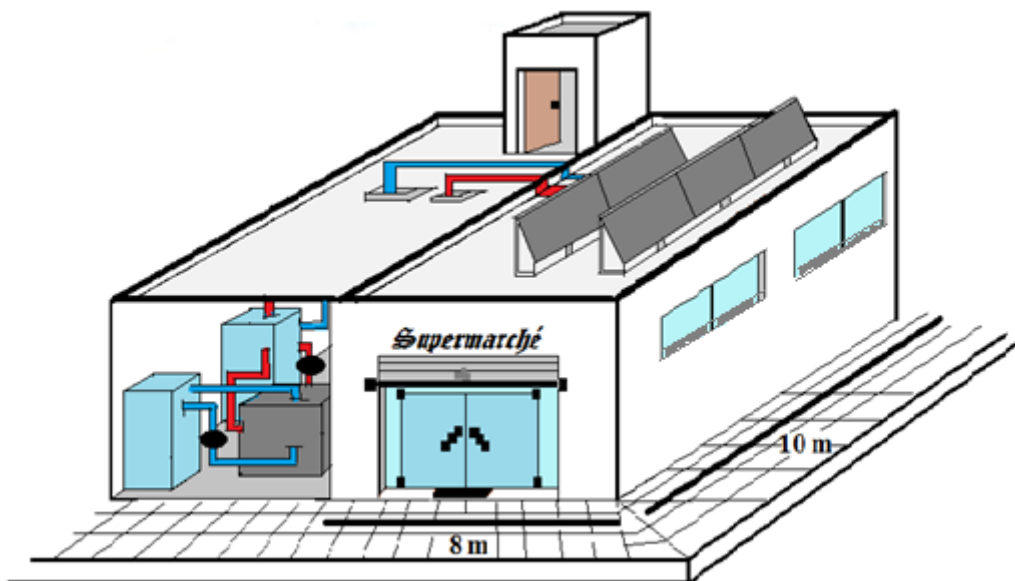


Figure 4.15 : Illustration du local contenant le refroidisseur et les réservoirs de stockage de l'eau chaude et froide.

4 Validation de la démarche de calcul

Pour valider la démarche de calcul précédente, nous allons refaire le même calcul sur l'installation testée dans le site de Shanghai avec une surface de captation de 150 m² de capteurs plans sous vide. Nous notons ici que ces essais ont été réalisés par Zhai and Wang (2009) en utilisant une installation à deux refroidisseurs décrits dans le tableau 4.2.

Le rayonnement solaire journalier est de 20.4MJ/m² avec une température ambiante moyenne de 31.7°C dans la région de Shanghai (Zhai and Wang 2009).

Donc pour une opération de 8h (9h jusqu'à 17h) on a besoin d'une quantité d'énergie E_{ECN} . En utilisant l'équation précédant (4.1), on trouve :

$$E_{ECN} = 336 \text{ kWh pour le refroidisseur.}$$

Le système installé à Shanghai a utilisé deux refroidisseur donc : $E_{ECN} = 672 \text{ kWh}$

Pour calculé la puissance solaire disponible à Shanghai, nous allons prendre le rayonnement solaire journalier de cette région avec un rendement du capteur sous vide égale à $\eta = 0.8$:

Nous avons trouvé une puissance solaire disponible : $PSD = 4440 \text{ Wh/m}^2/\text{jour}$,

Ainsi, nous avons trouvé que la surface de captation nécessaire est $S = 151 \text{ m}^2$, pratiquement égale à la surface installée réellement à Shanghai ce qui a permet de tester la validation de la démarche ci-dessus.

5 Estimation du coût de l'installation

5.1 Capteur solaire plan

Le capteur est en aluminium anodisé et la face inférieure est fermée avec une feuille d'aluminium. Les pertes de thermique sont réduites grâce à l'utilisation de laine de verre qui présente des hautes propriétés isolantes thermiques. La figure 4.16 schématise ce type de capteur. La superficie de ce capteur est de 2.7 m² avec un prix en dinar Algérien autour de 57 567 DA. Ce prix de capteur solaire plan a été proposé par un fournisseur français (site Web : www.twenga.fr).

Pour notre installation la superficie nécessaire de captation est de $S = 69\text{m}^2$, environ 25 capteurs plans de coût total de **1 439 175 DA**.



Figure 4.16 : Schéma d'un capteur solaire plan.

5.2 Ballon solaire de stockage d'eau

La figure 4.17 présente le schéma du ballon solaire. Les caractéristiques pour ce Ballon solaire :

- Capacité : 1000 litres.
- Matériau : Tôle d'acier ou acier inox.
- Pression maximale de fonctionnement : 8 bars.
- Pression maximale testée : 15 bars.
- Température maximale de fonctionnement : 95°C.
- Mousse de polyuréthane d'épaisseur 50 mm - densité 40 kg/m³ pour l'isolation thermique.

Le ballon solaire utilise une partie électrique de l'ordre de 1.5 kW, avec un prix en dinar Algérien de **210 243 DA**. Ce prix est proposé par un fournisseur français (site Web : www.twenga.fr).

5.3 Refroidisseur solaire à adsorption

Nous n'avons pas pu avoir le prix du refroidisseur mais vu les éléments qu'il contient, nous estimons que son prix en dinar Algérien est autours du **400 000 DA**. La figure 4.18 montre un refroidisseur solaire à adsorption [(Uli 8-11 september 2008)].



Figure 4.17 : Photo d'un ballon solaire de stockage de l'eau chaude.



Figure 4.18 : Photo d'un refroidisseur solaire à adsorption (Uli 8-11 september 2008).

5.4 Ventilateur convecteur

Émetteur de froid raccordé à un circuit d'eau rafraîchi par le refroidisseur. L'eau froide produite par le refroidisseur à adsorption circule dans un réseau de canalisations isolées qui alimentent les ventilateurs-convecteurs de la chambre de climatisation.

Les caractéristiques du ventilo-convecteur :

- Possibilité de commande locale.
- Ailettes motorisées avec télécommande pour la diffusion verticale de l'air.
- Groupe de ventilation tangentiel à 3 vitesses.
- Fonctionnement extrêmement silencieux.

Le prix de cette ventilo convecteur en dinar Algérien : **51 206 DA**. Prix obtenu par un fournisseur français sur le site Web : www.twenga.fr.

5.5 Pompes et réservoir de stockage d'eau

Le système de climatisation solaire décrit ci-dessus contient 4 pompes à eau. Le tableau 4.3 représente les positions des 4 pompes dans le système avec de brefs détails et leur prix.

Le prix total des 4 pompes utilisées en dinar Algérien est de **130 316 DA**.

La figure 4.19 et la figure 4.20 présente les deux types des pompes d'eau et le réservoir d'eau proposée pour le système solaire. Le prix et les détails des pompes et réservoir d'eau sur les sites web : www.twenga.fr, www.Alibaba.com (fournisseurs français et chinois).

Pompe	Position dans le système	Brefs Détails	Prix en DA
1 2	Ballon solaire/Capteur solaire Ballon solaire/Refroidisseur	Consommation : 240W, Débit : 2000 l/h, Température de l'eau maxi : 75°C à100°C	59390×2
3 4	Tour de refroidissement/Refroidisseur Ventilo-convecteur/Refroidisseur	Consommation : 55W Débit max : 2800 l/h	5768×2

Tableau 4.3 : Détails des pompes d'eau proposées pour le système solaire.



Figure 4.19 : Photos de pompes d'eau.

6 Discussion

D'après l'estimation des coûts des éléments de l'installation ci-dessous, nous trouvons que le prix du système est estimé dans les environs de **2 200 000 DA**. En effet, le coût spécifique total des systèmes de refroidissement solaires installés en Europe (sans inclure les frais d'installation et d'investissement du réseau de distribution du froid) est dans la fourchette de 3000 à 4500 €/kW pour l'année 2008 (Uli 8-11 september 2008). Ceci correspond à la fourchette de près de 1 741 000 à 2 612 000DA ce qui montre que notre estimation est raisonnable.

Pour une première réaction, le prix de ces éléments de l'installation semble être élevé pour la commercialisation de ce dernier. Mais d'un autre côté, on trouve qu'on économise de l'électricité en comparaison avec un système de climatisation classique de compression de vapeur de même capacité frigorifique (**8.5 kW**). Par un simple calcul, et pour avoir une idée sur la consommation électrique des deux systèmes, nous supposons un fonctionnement typique des deux systèmes dans la région de Biskra : c'est-à-dire **16 h/Jour** pendant la période chaude de l'année (près de 5 mois), donc un total d'heures de fonctionnement de près de **2430 h/an**.

Le climatiseur à compression de vapeur de capacité frigorifique demandée consomme une puissance électrique de **4 kW/h**. Par contre, le système de climatisation solaire à adsorption correspondant consomme une puissance électrique d'environ **1.7 kW/h**.

Le tableau 4.4 compare entre les consommations électriques des deux systèmes de climatisation pour un fonctionnement de 2430 h/an. Nous remarquons que le système de climatisation solaire économise **5589 kWh** d'électricité par an, ce qui correspond à **167 670 DA/an**. Ainsi, la durée d'amortissement de l'investissement dans une installation de climatisation solaire par sorption est de $(2\,200\,000 / 167\,670)$ 13 ans.

	Climatiseur à classique	Climatiseur solaire
Consommation électrique (kWh)	$P = 2430 \times 4$ $P = 9720$	$P = 2430 \times 1.7$ $P = 4131$
Coût de consommation électrique (DA)	$PRIX = 9720 \times 30$ $PRIX = 291\,600$	$PRIX = 4131 \times 30$ $PRIX = 123\,930$

Tableau 4.4 : Comparaison entre les consommations électriques des systèmes de climatisation classique et solaire à adsorption.

7 Bibliographie

- Capderou, M., Aspect énergétique. *Atlas solaire de l'Algerie*. **Tome 2**: 11 (1985).
- Kharchi, R., B. Benyoucef, M. Belhamel, "Système solaire combiné estimation des besoins énergétiques." *Revue des Energies Renouvelables*: 109-114 (2007).
- Uli, J., *Development and investigation of a compact silica gel/eau adsorption chiller integrated in solar cooling systems*. VII Minsk International Seminar "Heat Pipes, Heat Pumps, Refrigerators, Power Sources", Minsk, Belarus. (8-11 september 2008).
- Wang, L. W., J. Y. Wu, R. Z. Wang, Y. X. Xu, S. G. Wang, "Experimental study of a solidified activated carbon-methanol adsorption ice maker." *Applied Thermal Engineering* **23**: 1453-1462 (2003).
- Zhai, X. Q., R. Z. Wang, "Experimental investigation and theoretical analysis of the solar adsorption cooling system in a green building." *Applied Thermal Engineering* **29**: 17-27 (2009).
- Zhai, X. Q., R. Z. Wang, J. Y. Wu, Y. J. Dai, Q. Ma, "Design and performance of a solar-powered air-conditioning system in a green building." *Applied Energy* **85**: 297-311 (2008).

Conclusion générale

Ce travail présente une étude de faisabilité d'une installation de rafraîchissement solaire dans la région de Biskra. Le sujet est traité pour la première fois au niveau de l'Université de Biskra et a comme objectifs de :

1. Dresser l'état de l'art des technologies de production du froid solaire (climatisation et réfrigération) en mettant en évidence l'aspect technico-économique des différentes technologies.
2. Comparer entre les performances et les coûts d'investissement des différentes technologies et pré-sélectionner les meilleures techniques.
3. Etudier la faisabilité technico-économique d'un climatiseur solaire dans la région de Biskra par une description détaillée d'une future installation.

Une littérature très riche a été consultée et analysée durant la rédaction de ce mémoire. Nous résumons les principales conclusions comme suit :

Nous avons étudié une variété de technologies disponibles dans la littérature pour produire le froid solaire. Il a été établi que les technologies utilisant le phénomène de sorption semblent être les meilleurs de points de vue économique et performances. Cette première conclusion nous a encouragés à consacrer une partie bibliographique exclusivement sur les technologies de réfrigération solaire par sorption. En plus des avantages environnementaux, nous avons conclu que les technologies de sorption (adsorption/absorption) présentent une alternative intéressante pour en servir aux besoins de climatisation, de réfrigération et de production de la glace.

Après avoir passé en revue les systèmes de climatisation installés à travers le monde (commerciaux ou prototypes), nous avons conclu que les systèmes d'absorption sont plus utilisés pour la climatisation. Malgré ceci, le système de climatisation adopté dans ce travail est un prototype de climatisation solaire par adsorption. Ce choix est motivé par la volonté de notre équipe (Université de Biskra) de se lancer dans le domaine de la recherche expérimentale sur les machines de production du froid solaire. Ceci nous a poussé à choisir les systèmes d'adsorption qui présentent, en comparaison avec le système d'absorption, les avantages techniques suivantes : i) la simplicité de conception, de réalisation et de

fonctionnement, ii) la machine demande moins de maintenance puisque elle ne présente pas de partie mobile, iii) possibilité de travailler avec des capteurs fabriqués localement puisque la machine travaille à des basses températures de fonctionnement, iv) le besoin d'une source d'énergie pour le système d'adsorption est négligeable, v) le problème de la mauvaise conductivité thermique de l'adsorbant sera probablement résolu très prochainement puisque beaucoup de travaux de recherche actuels traitent des nouveaux couples d'adsorption.

Par ailleurs, une partie de ce mémoire a été consacrée à une description détaillée d'un système de climatisation solaire à adsorption en vue de son installation dans la région de Biskra. Nous avons proposé une méthode de calcul très simple, appliquée sur un exemple de local, pour estimer le besoin d'eau chaude, la surface de captation et les dimensions du local à climatiser. Nous avons trouvé que pour un local de dimensions de **80m² x 3m**, bien isolé avec un nombre raisonnable d'ouvertures vitrées, la surface de captation sera autour de **70m²**. Nous avons trouvé que toute l'installation de climatisation coûtera dans les environs des **2 200 000 DA** et pourra économiser plus que la moitié de la consommation électrique par rapport à un système à compression classique de la même puissance frigorifique (**8.5 kW**).

Comme perspectives, nous recommandons vivement le montage d'une installation expérimentale de climatisation solaire à adsorption au niveau de l'Université de Biskra pour la maîtrise technologique de ce genre de système.

Etude de faisabilité d'un climatiseur solaire adapté à la région de Biskra.

Résumé : Ce travail présente une étude de faisabilité d'une installation de climatisation solaire dans la région de Biskra. Le sujet est traité pour la première fois au niveau de l'Université de Biskra et a comme objectifs de : i) Dresser l'état de l'art des technologies de production du froid solaire (climatisation et réfrigération) en mettant en évidence l'aspect technico-économique des différentes technologies. ii) Comparer entre les performances et les coûts d'investissement des différentes technologies et pré-sélectionner les meilleures techniques. iii) Etudier la faisabilité technico-économique d'un climatiseur solaire dans la région de Biskra par une description détaillée d'une future installation. Une littérature très riche a été consultée et analysée afin de décrire en détail un système de climatisation solaire à adsorption en vue de son installation dans la région. Nous avons proposé une méthode de calcul très simple, pour estimer le besoin d'eau chaude, la surface de captation et les dimensions d'un local à climatiser de 80m² x 3m. Des détails sur le coût d'une telle installation par rapport à un système à compression classique de la même puissance frigorifique son également explicités dans le document.

دراسة جدوى تركيب مكيف هواء يشغل بالطاقة الشمسية في منطقة بسكرة.

ملخص: يطرح هذا العمل دراسة جدوى لنظام تكييف الهواء بالطاقة الشمسية في منطقة بسكرة. تمثل هذه المذكرة اول دراسة لهذا الموضوع في جامعة بسكرة . تتمثل أهداف هذا البحث فيما يلي: أ) إعداد حوصلة لتكنولوجيات التبريد الشمسي (تكييف الهواء والتبريد)، و تسليط الضوء على الجوانب الفنية والاقتصادية لهذه التكنولوجيات. ب) المقارنة بين تكاليف الأداء والاستثمار لمختلفة التقنيات لتحديد أفضلها. ج) دراسة الجدوى الفنية والاقتصادية لأجهزة تكييف الهواء بالطاقة الشمسية في منطقة بسكرة و إعطاء وصفا مفصلا لتركيب هذه الأجهزة في المستقبل. بعد تحليل كم هائل من المنشورات العلمية و المعلومات التقنية تم التوصل إلى وصف تفصيلي لنظام تبريد بالإمتزاز يشغل بالطاقة الشمسية لتركيبه في المنطقة ذات الحجم 80m² x 3m. كما إقترحنا طريقة حسابية بسيطة لتقدير الحاجة إلى المياه الساخنة، مساحة الملتقطات و تفاصيل عن تكلفة منشأة من هذا القبيل بالمقارنة مع نظام الضغط التقليدية ذو قدرة تبريد مماثلة.