

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Génie mécanique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة الميكانيكية
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : Génie Mécanique

Intitulé

Etude et analyse des procédés solaire de production de froid par sorption en vue d'une réalisation d'un premier prototype à Biskra

Présentée par :

Hocine BENFATAH

Soutenue publiquement le 07 10 2020

Devant le jury composé de :

M ^r . Noureddine MOUMMI	Professeur	Président	Université de Biskra
M ^r . Adel BENCHABANE	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
M ^r . Houcine BENMOUSSA	Professeur	Examineur	Université de Batna 2
M ^r . Adel CHINE	Maitre de Conférences'A'	Examineur	Université de Msila

Remerciements

Je remercie avant tout DIEU Allah tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donnée afin de réaliser ce modeste travail.

A Monsieur Adel BENCHABANE, Professeur à l'Université de Biskra, qu'il soit remercié d'abord pour avoir accepté de diriger ce travail, ensuite pour les précieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens sincèrement à remercier Monsieur Noureddine MOUMMI, Professeur à l'Université de Biskra, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury de cette thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Monsieur Hocine BENMOUSSA, Professeur à l'Université de Batna 2, et à Monsieur Adel CHINE, Maître de conférences 'A' à l'Université de Msila, d'avoir acceptés d'examiner ce travail.

Parmi les enseignants du département de génie mécanique je tiens à remercier plus particulièrement le professeur Abdelhafid BRIMA pour leur aides et conseils.

Je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de réaliser cette recherche et m'ont fait bénéficier de leur aide, conseils et encouragements, et en particulier mes enseignants, amis et collègues du département de génie mécanique de l'université de Biskra, toutes les personnes que je ne peut citer qui m'ont aidé de près ou de loin, qu'ils trouvent tous ici, mes sincères remerciements et reconnaissances.

Je tiens à remercier mes proches. Merci et pardon à Ma mère, ma sœur, ma femme et mes enfants pour les moments difficiles.

RESUME

La consommation d'électricité productrice de froid ménager représente plus de tiers de la consommation totale dans un logement notamment dans les régions chaudes. Les systèmes de réfrigération conventionnels reposent sur des techniques à compression de vapeur nocives pour la couche d'ozone. Pour éviter de détruire notre planète et répondre aux besoins permanents de refroidissement, il est recommandé d'utiliser les énergies renouvelables et de se concentrer sur leur efficacité dans diverses installations. L'objectif de cette thèse est de contribuer à la réalisation d'un climatiseur solaire à adsorption dans la région de Biskra de Climat chaud et semi hybride par la présentation : (i) d'une étude bibliographique des différentes technologies de production de froid adaptées à la région de Biskra ; (ii) une étude de la faisabilité économique et écologique de cette technologie ; (iii) et par la proposition de certaines recommandations nécessaires pour la bonne exploitation de cette technologie qui n'est pas encore testée expérimentalement dans un climat similaire à celui de la région de Biskra. L'étude bibliographique montre que les technologies solaires pour le refroidissement par sorption sont parmi les options futures les plus importantes. Ceci s'applique à l'adsorption, l'absorption et la dessiccation. Les inconvénients et avantages de la plupart des technologies actuellement disponibles notamment le refroidissement par adsorption ont été énumérés en étudiant les couples de travail (adsorbant-adsorbat). La deuxième partie de cette thèse est consacrée à l'étude de faisabilité économique réalisée sur deux projets types pour un logement familial dans la région de Biskra, utilisant trois types de climatiseurs: (A) un système classique mono-split, (B) un système solaire à adsorption et (C) un système central classique à eau glacée. Parmi les résultats les plus importants obtenus de point de vue écologique, on constate que le système de climatiseur solaire (B) représente la meilleure option, que ce soit pour le Système (A) ou le Système (C). Quant de point de vue économique, et selon la politique actuelle de soutien de l'État à la facture d'électricité, on constate que le Système (A) représente la meilleure option en termes de coûts d'investissement totaux, de consommation d'électricité et de maintenance. De point de vue coût d'investissement et de protection de l'environnement, l'étude réalisée sur les deux projets a montré la faisabilité du climatiseur solaire syst(B) pour des conditions liées au coût de l'électricité ceci est uniquement dans le cas où l'état réoriente son soutien de coût de l'électricité du climatiseur mono-split syst(A) vers le soutien du coût d'investissement du climatiseur solaire syst(B) pour pouvoir remplacer le climatiseur mono-split syst(A) et centralisé à eau glacée syst(C).

Mots clés: climatisation mono-split, climatiseur centralisé à eau glacée, climatiseur solaire à adsorption, soutien de l'État, factures d'électricité.

المخلص

العنوان

دراسة وتحليل عمليات التبريد بالطاقة الشمسية عن طريق الإمتصاص لإنجاز أول نموذج ببسكرة

المخلص

يمثل استهلاك الطاقة الكهربائية الموجهة للتبريد المنزلي أكثر من ثلث الاستهلاك الكلي خاصة في المناطق الساخنة. تعتمد أنظمة التبريد التقليدية على تقنيات ضغط أبخرة مضرّة بطبقة الأوزون. وتجنباً لتدمير كوكبنا وللإستجابة للإحتياجات الدائمة للتبريد ينصح باستخدام الطاقات المتجددة والتركيز على كفاءتها في مختلف المنشآت. الهدف من هذه الدراسة المساهمة في إنجاز نموذج مكيف هواء شمسي يعمل بالإمتزاز (Climatiser solaire a adsorption) في منطقة بسكرة ذات المناخ الحار والشبه جاف وذلك من خلال: (1) دراسة ببيليوغرافية لمختلف تكنولوجيات التبريد الملائمة لمنطقة بسكرة ؛ (2) دراسة الجدوى الاقتصادية والإيكولوجية لتكنولوجيا تكييف الهواء بالإمتزاز الشمسي ؛ (3) إقتراح توصيات إستغلال تكنولوجيا الإمتزاز والتي لم تختبر تجريبياً في مناخ مماثل لمنطقة بسكرة. أظهرت الدراسة الببيليوغرافية أن التكنولوجيات الشمسية للتبريد بالإمتصاص (sorption) من بين أهم الخيارات المستقبلية. هذا ينطبق على الإمتزاز (adsorption) والإمتصاص (absorption) وبتجفيف الهواء (dessiccation). كما تم حصر سلبيات وإيجابيات جل التكنولوجيات المتوفرة حالياً مع التركيز على التبريد بالإمتزاز وذلك بدراسة ثنائيات العمل (ممتز- مازة) (adsorbat-adsorbant). الجزء الثاني من هذه الأطروحة يقوم بدراسة الجدوى الاقتصادية انجزت على مشروعين نموذجيين لسكن عائلي مفترض في منطقة بسكرة وذلك باستخدام ثلاثة أنواع من مكيفات الهواء: (A) نظام كلاسيكي أحادي التقسيم ، (B) نظام شمسي يعمل بالإمتزاز و (C) نظام كلاسيكي مركزي يعمل بالماء المبرد. من بين أهم النتائج المتحصل عليها من وجهة النظر الإيكولوجية تبين أن نظام مكيف الهواء الشمسي (B) يمثل الخيار الأفضل سواء بالنسبة للنظام (A) أو النظام (C) أما من وجهة النظر الإقتصادية وفي ظل السياسة الحالية لدعم الدولة لفاتورة الكهرباء تبين أن النظام (A) يمثل الخيار الأفضل من حيث إجمالي تكاليف الإستثمار واستهلاك الكهرباء والصيانة. بينما من وجهة نظر تكلفة الإستثمار وحماية البيئة ، أظهرت الدراسة التي أجريت على المشروعين جدوى نظام مكيف الهواء الشمسي (B) للظروف المتعلقة بتكلفة الكهرباء تكون فقط في حالة قيام الدولة بإعادة توجيه دعمها الكهربائي لنظام المكيف (A) نحو دعم التكلفة الإستثمارية لنظام مكيف الهواء الشمسي (B) ليكون قادراً على استبدال مكيف هواء أحادي التقسيم نظام (A) و المكيف المركزي بالماء المبرد نظام (C).

الكلمات المفتاحية: مكيف أحادي التقسيم، المكيف المركزي بالماء المبرد، مكيف بالإمتزاز الشمسي ، دعم الدولة ، فواتير الكهرباء.

TABLE DES MATIERES

Remerciement	I
Résumé.....	II
Table des matières.....	IV
Nomenclature.....	XI
Liste des figures.....	XIV
Liste des tableaux.....	XVI
Introduction générale.....	1

PARTIE 1 : Synthèse bibliographique

Chapitre I : Etat de l'art sur les technologies de production de froid

1. Différentes méthodes de production du froid.....	4
1.1 Mélanges réfrigérants.....	4
1.2 Détente d'un gaz parfait.....	4
1.3 Evaporation d'un liquide pur.....	4
1.4 Refroidissement thermoélectrique	4
2. Machines frigorifiques.....	5
2.1 Machines frigorifiques à compression mécanique.....	5
2.1.1 Machines frigorifiques à changement de phase.....	5
2.1.2 Machines frigorifiques à gaz.....	5
2.2 Machines frigorifiques à sorption.....	5
2.2.1 Machines frigorifiques à absorption.....	5
2.2.2 Machines à adsorption.....	6
2.2.3 Machines à dessiccation solide.....	7
3. Production du Froid Solaire.....	8
3.1 Refroidissement Solaire Electrique (Photovoltaïque)	8
3.2 Refroidissement Solaire Thermique.....	9

Table Des Matières

3.2.1 Refroidissement solaire par absorption.....	10
3.2.2 Refroidissement solaire par adsorption.....	12
3.2.3 Refroidissement Solaire Par Dessiccation.	12
4. Thermodynamique D'adsorption.....	16
4.1 Principe de l'adsorption.....	16
4.2 Types d'adsorption.....	16
4.2.1 Adsorption physique (physisorption)	16
4.2.2 Adsorption chimique (chimisorption)	16
4.3 Principe de fonctionnement du cycle idéal.....	16
4.4 Choix du couple adsorbant/adsorbat.....	18
5. Conclusions.....	20
6. Bibliographie.....	22

Chapitre II : Etat de l'art des techniques de rafraichissement de l'air

1. Partie 1 : Climatisation conventionnelle.....	26
1.1 Les systèmes à détente directe.....	26
1.1.1 Climatiseurs individuels.....	26
1.1.1.1 Les climatiseurs de fenêtre.....	26
1.1.1.2 Les climatiseurs mobiles.....	26
1.1.1.3 Les climatiseurs monoblocs.....	26
1.1.1.4 Les climatiseurs à éléments séparés.....	27
1.1.2 Les armoires de climatisation.....	27
1.2 Les systèmes tout air.....	28
1.2.1 Systèmes de climatisation à débit d'air constant.....	28
1.2.1.1 Centrales de traitement d'air uni-zone.....	28
1.2.1.2 Centrales de traitement d'air multizones.....	28
1.2.1.3 Les climatiseurs de toiture(ROOFTOP)	28
1.2.2 Systèmes de climatisation à débit d'air variable.....	29

Table Des Matières

1.2.2.1 Les centrales de traitement d'air à débit variable	
1.2.2.2 Installation à 2 conduits	
1.3 Les systèmes tout eau ventilo-convecteurs.....	29
1.4 Autres systèmes.....	29
1.4.1 Modules de traitement d'air(MTA)	30
1.4.2 Les pompes à chaleur.....	30
1.4.3 Les systèmes mixtes : les éjecto-convecteurs.....	31
1.4.4 Volume réfrigérant variable(VRV)	33
2. Partie 2 : Climatisation Solaire.....	33
2.1 Climatisation Solaire Electrique (Photovoltaïque)	31
2.1.1 Climatiseur solaire split DC.....	34
2.2 Climatisation Solaire Thermique.....	35
2.2.1 Refroidissement solaire par absorption.....	35
2.2.2 Refroidissement solaire à adsorption.....	36
2.2.3 Climatisation Solaire Par Dessiccation.	37
2.2.3.1 Climatisation Solaire Par Dessiccation solide	37
2.2.3.2 Climatisation Solaire Par Dessiccation liquide.....	39
2.3 Installations de climatisation solaire en Europe.....	40
3. Conclusion.....	41
4. Bibliographie.....	44

PARTIE 2 : La faisabilité du climatiseur solaire à adsorption dans la région de Biskra

Chapitre III : Faisabilité du climatiseur solaire à adsorption

1 Description du projet I.....	45
2 Hypothèses.....	48
3 Climatiseur mono-split sys(A).	49
3.1 Sélection des modèles disponibles dans le marché.....	49

Table Des Matières

3.2 Coût investissement.....	49
3.3 Consommation électrique.....	49
3.4 Coût Consommation électrique.....	49
4 Climatiseur solaire à adsorption syst(B)	51
4.1 Description du syst(B)	51
4.1.1 Refroidisseur par adsorption.....	51
4.1.2 Les adsorbants.....	51
4.1.3 Le condenseur.....	51
4.1.4 Evaporateur.....	52
4.1.5 Vannes de régulation.....	52
4.1.6 Tour de refroidissement.....	52
4.1.7 Capteur solaire plan.....	52
4.1.8 Réservoir de stockage d'eau chaude.....	53
4.1.9 Ventilateurs.....	53
4.1.10 Pompe de circulation.....	53
4.1.11 Réservoir d'eau froide.....	53
4.2 Principe de fonctionnement du syst(B).	53
4.2.1 Première phase.....	53
4.2.2 Deuxième phase.....	54
4.3 Sélection des modèles disponibles dans le marché.....	55
4.3.1 Refroidisseur a adsorption.....	55
4.3.2 Tour de refroidissement.....	55
4.3.3 Station de pompage.....	56
4.3.4 Connexion.....	56
4.3.5 Capteur solaire.....	56
4.3.5.1 Besoin d'eau chaude pour le refroidisseur d'adsorption.....	58
4.3.5.2 Estimation de la surface de captation.....	59

Table Des Matières

4.3.6 Réservoir du stockage d'eau chaude.....	61
4.3.7 Réservoir d'eau froide.....	61
4.3.8 Ventilateur-convecteur.....	62
4.3.9 Adoucisseur.....	62
4.4 Coût investissement.....	62
4.5 Consommation électrique.....	62
4.6 Coût Consommation électrique.....	63
5 Comparaison et discussions.....	65
6 La durée d'amortissement.....	66
7 Conclusion.....	68
8 Bibliographie.....	70
Chapitre IV : Recommandations sur l'usage du système solaire à adsorption	
1 Description du projet II.....	71
2 Etude du système de climatiseur mono-split syst(A)	73
2.1 Sélection du système de climatiseur mono-split système.....	73
2.2 Coût d'investissement du système de climatiseur mono-split système.....	73
2.3 Consommation électrique du système de climatiseur mono-split système.....	73
2.4 Coût de la consommation électrique du système de climatiseur mono-split système.....	74
2.5 Dégagement de la chaleur au niveau de condenseur du système de climatiseur mono-split...74	
2.6 La chaleur rejetée à l'extérieur par le système de climatiseur mono-split système.....	74
2.7 Emission des gaz CO2 par le système de climatiseur mono-split système	75
3 Etude du système de climatiseur solaire à adsorption.....	75
3.1 La sélection.....	75
3.1.1 Refroidisseur à adsorption, tour de refroidissement, Station de pompage et tubes de connexion.....	75
3.1.2 Le capteur solaire plan.....	76
3.1.3 Ballon solaire pour le stockage de la chaleur.....	76
3.1.4 Citerne à eau.....	76

Table Des Matières

3.1.5 Ventilateur-convecteur.....	76
3.1.6 Adoucisseur.....	76
3.2 Coût d'investissement.....	77
3.3 Consommation électrique.....	77
3.4 Coût de la consommation électrique.....	77
3.5 La chaleur rejetée à l'extérieur.....	77
3.6 Emission des gaz CO2.....	80
4 Etude du système de climatiseur centralisé à eau glacée.....	80
4.1 Sélection des composants.....	80
4.1.1 ventilateur-convecteur.....	80
4.1.2 Groupe eau glacée.....	81
4.1.3 Circulateur et adoucisseur.....	82
4.2 Coût investissement.....	82
4.3 Consommation électrique.....	82
4.4 Coût de consommation électrique.....	82
4.5 Dégagement de la chaleur au niveau du condenseur.....	81
4.6 La chaleur rejetée à l'extérieur.....	82
4.7 Emission des gaz CO2.....	83
5 Comparaison et discussions.....	83
5.1 Coût d'investissement.....	83
5.2 Consommation électrique.....	83
5.3 Coût de consommation électrique.....	83
5.4 Dégagement de chaleur au condenseur et au tour de refroidissement.....	84
5.5 La chaleur rejetée à l'extérieur.....	84
5.6 Emission des gaz CO2.....	84
5.7 Récapitulation.....	84
6 La durée d'amortissement.....	87

Table Des Matières

7 Conclusion.....	90
8 Bibliographie.....	92
Conclusion générale.....	93

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
$E_{CO_2}/E_{CO_2\text{ réf}}$	Emission CO ₂ / Emission CO ₂ réf	-
$Q_{cd}/Q_{cd\text{ réf}}$	chaleur dégagée cd/chaleur dégagée cd réf	-
$Q_{re}/Q_{re\text{ réf}}$	chaleur rejetée à extérieur/chaleur rejetée à extérieur réf	-
As	La surface superficielle du panneau solaire	m ²
$C_{c\text{ syst B}}$	Cout cumulé syst B	€
$C_{c.\text{syst A}}$	Cout cumulé système A	€
$C_{c.\text{syst C}}$	Cout cumulé système C	€
C_c	Coefficient de correction du fluide caloporteur (eau).	-
C_{ce}	Cout consommation électrique	€
$C_{ce\text{ réf}}$	Cout consommation électrique référence	€
$C_{ceréf}$	Cout Consommation électrique climatiseur de référence	€
C_e	Consommation électrique	KWh
$C_{eréf}$	Consommation électrique référence	KWh
C_i	Coefficient d'inclinaison des capteurs solaire.	-
C_i	Cout investissement	€
$C_{iréf}$	Cout investissement référence	€
$C_{iréf}$	Cout investissement climatiseur de référence	€
Clim réf PT AS	Climatiseur référence prix total avec soutien d'état	€
Clim réf PT SS	Climatiseur référence prix total sans soutien d'état	€
Clim solaire PT AS	Climatiseur solaire prix total avec soutien d'état	€
Clim solaire PT SS	Climatiseur solaire prix total sans soutien d'état	€
C_m	Cout de maintenance	€
C_o	Coefficient d'orientation des capteurs solaire.	-
C_p	Capacité calorifique de l'eau	KJ/kg/°c
E	Energie solaire reçue	KWh/jour.m ²
E_{CO_2}	Emission CO ₂	Kg

Nomenclature

EECN	Besoin énergétique nécessaire utilisé par le refroidisseur	KWh
EER	Energie absorbée évaporateur/Energie fournie compresseur	-
ENEC	Energie nécessaire à la production d'eau chaude	KWh
I_p	le rayonnement solaire perpendiculaire à la surface	W/m ²
m_{max}	la masse totale du réfrigérant adsorbée maximale	Kg
m_{min}	la masse totale du réfrigérant adsorbée minimale	Kg
P_c	Pression de condensation	Bar
P_e	Pression d'évaporation	Bar
Prix HT	Prix hors taxe	€
Prix TTC	Prix tous taxe comprise	€
PSD	Puissance solaire disponible	Wh/m ² jour
Q_c	la quantité de chaleur rejetée de condenseur à l'air ambiant	KJ
Q_{cd}	Chaleur dégagée au condenseur	KWh
Q_e	Puissance frigorifique	W
Q_{froid}	Energie absorbée à l'évaporateur	KWh
Q_g	la chaleur reçue par le générateur	KJ
q_m	Débit massique	Kg/h
Q_{re}	Chaleur rejetée à l'extérieur	KWh
$Q_{re\ ref}$	Chaleur rejetée à l'extérieur de référence	KWh
Q_s	la quantité de chaleur de sorption rejetée vers le milieu ambiant	KJ
q_v	Débit volumique	.m ³ /h
S	Surface de captation nécessaire	m ²
Syst A	Système climatiseur mono-split	
Syst B	Système Climatiseur centralisé à eau glacée	
Syst C	Système climatiseur solaire à adsorption	
t	Temps de fonctionnement par jour	h
T_{ads}	température d'adsorption	°C
T_B	Température Extérieure de base	°C
T_{des}	température de désorption	°C

Nomenclature

T_{EEC}	Température d'entrée eau chaude	°C
T_{SEC}	Température sortie eau chaude	°C
W	Travail mécanique produit par un moteur thermique	W
W_{cp}	Energie fournie au compresseur	KWh
x	Nombre des années	année
ρ	Masse volumique	Kg/l
φ	Latitude	°
φ_B	Humidité de base	%
η	Rendement du capteur solaire (dans notre cas est égale à 80%).	-
$\eta_{heat-cool}$	Le rendement d'une machine de réfrigération	

Liste des figures

Fig. N°	Titre	Page
Fig. 1.1	Schéma d'une machine frigorifique à compression mécanique	6
Fig. 1.2	Schéma d'une machine frigorifique à absorption	6
Fig. 1.3	Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque	8
Fig. 1.4	Système de réfrigération par sorption	9
Fig. 1.5	Schéma de fonctionnement d'une centrale d'air à roue déssicante	13
Fig. 1.6	Phénomène d'adsorption	17
Fig. 1.7	Représentation du cycle théorique à adsorption dans le diagramme de Clapeyron	17
Fig. 2.1	Climatiseur monobloc	27
Fig. 2.2	Centrale de traitement d'air	28
Fig. 2.3	Schéma de principe d'une installation à 2 conduits	30
Fig. 2.4	Schéma de principe d'un ventilo-convecteur	30
Fig. 2.5	Schéma de principe d'une pompe à chaleur air / air réversible	31
Fig. 2.6	Schéma de principe d'une pompe à chaleur réversible eau/air	32
Fig. 2.7	Schéma de principe d'une pompe à chaleur eau/eau réversible	32
Fig. 2.8	Vue d'ensemble d'une installation à éjecto-convecteurs	32
Fig. 2.9	Schéma de principe d'un climatiseur solaire électrique à compression de vapeur	35
Fig. 2.10	Refroidissement à dessiccation solide avec capteur solaire	39
Fig. 2.11	Refroidissement à dessiccation liquide avec capteur solaire	41
Fig. 2.12	Aperçu sur les systèmes installés en Europe	42
Fig. 2.13	Distribution des systèmes en termes de nombre de systèmes, la capacité de refroidissement et de surface de capteurs installée	42
Fig. 3.1	la localisation de Biskra	45
Fig. 3.2	Carte climatique de L'Algérie	46
Fig. 3.3	Vue en plan RDC	47
Fig. 3.4	Vue en plan premier étage	48
Fig. 3.5	Exemple d'un système de climatisation solaire par adsorption pour un refroidisseur ou plus	51
Fig. 3.6	Le refroidisseur et ses composants	52
Fig. 3.7	Schéma de système solaire à adsorption avec plus de détail sur le refroidisseur à deux lits	54
Fig. 3.8	Schéma de système solaire le cas de l'adsorbeur 1 désorbe et l'adsorbeur 2 adsorbe	54
Fig. 3.9	Schéma de système solaire le cas de l'adsorbeur 1 adsorbe et l'adsorbeur 2 désorbe	55
Fig. 3.10	Refroidisseur à adsorption ACS 08	57
Fig. 3.11	Tour de refroidissement RCS 08	57
Fig. 3.12	Station de pompage PCS 08	57
Fig. 3.13	Capteur Bt Collector	60

Liste des figures

Fig. 3.14	Réservoir de stockage d'eau chaude	61
Fig. 3.15	Récapitulatif de l'étude comparative pour syst(A) et (B).	65
Fig. 3.16	La durée d'amortissement pour système A et B sans et avec soutien.	67
Fig. 3.17	La durée d'amortissement pour système A et B (avec soutien initiale).	68
Fig.4.1	Vue en plan RDC	71
Fig.4.2	Vue en plan premier étage	72
Fig.4.3	Vue en perspective du syst(B) sans murs de cloison	72
Fig.4.4	Vue en perspective du syst(B)	72
Fig.4.5	Différents combustibles utilisés pour produire l'électricité	76
Fig.4.6	Récapitulatif de l'étude comparative	86
Fig.4.7	La durée d'amortissement pour les trois systèmes sans soutien	88
Fig.4.8	La durée d'amortissement pour le système A et B avec et sans soutien	89
Fig.4.9	La durée d'amortissement pour système A et B (moins investissement initiale)	89

Liste des tableaux

Tableau N°	Titre	Page
Tableau 1.1	Avantages et Inconvénients de NH ₃ -H ₂ O et H ₂ O-LiBr	10
Tableau 1.2	Vue d'ensemble des études de réfrigération solaire à adsorption	11
Tableau 1.3	caractéristiques principales de technologies de réfrigération solaires par sorption	13
Tableau 1.4	Performance des systèmes d'adsorption pour différentes applications	14
Tableau 2.1	différents types des climatiseurs conventionnels	27
Tableau 2.2	Différents types de climatisation solaire	33
Tableau 3.1	Données géographiques de Biskra	46
Tableau 3.2	Gisement solaire de l'Algérie	46
Tableau 3.3	Données climatiques de l'Algérie	47
Tableau 3.4	Récapitulation du bilan de climatisation	48
Tableau 3.5	Caractéristiques des modèles sélectionnés syst(A)	50
Tableau 3.6	Récapitulatif de la sélection du climatiseur mono-split syst(A)	50
Tableau 3.7	Récapitulatif de cout d'investissement HT du climatiseur syst A	50
Tableau 3.8	Caractéristiques du refroidisseur à adsorption ACS 08	56
Tableau 3.9	Caractéristiques du tour de refroidissement sélectionnée	58
Tableau3.10	Caractéristiques de la Station de pompage sélectionnée	59
Tableau3.11	Les caractéristiques du capteur solaire sélectionné	60
Tableau3.12	Les caractéristiques du réservoir de stockage d'eau chaude	61
Tableau3.13	Caractéristiques du Réservoir de stockage d'eau froide	62
Tableau3.14	Les données nécessaires à la sélection des ventilo-convecteurs	62
Tableau3.15	récapitulatif de la sélection des ventilo-convecteurs	63
Tableau3.16	Coûts d'investissement syst B HT	63
Tableau3.17	Consommation électrique syst B	64
Tableau3.18	Cout de Consommation électrique du climatiseur solaire à adsorption syst(B) (HT).	64
Tableau3.19	Cout de Consommation Electrique du climatiseur solaire à adsorption avec soutien d'état(HT).	64
Tableau3.20	Récapitulatif climatiseur solaire à adsorption syst(B)	65
Tableau3.21	cout investissement et cout Consommation électrique pour syst(A) et (B)	65
Tableau3.22	Récapitulatif de l'étude comparative pour syst(A) et (B)	65
Tableau 4.1	Récapitulation du bilan de climatisation	73
Tableau 4.2	Récapitulatif de la sélection du syst A	74
Tableau 4.3	Récapitulatif de cout d'investissement HT du syst A	75
Tableau 4.4	Les caractéristiques et plage de fonctionnement du refroidisseur à adsorption ACS 08	77
Tableau 4.5	Caractéristiques du circuit de Refroidisseur à adsorption ACS 08	78
Tableau 4.6	Dimensions du refroidisseur à adsorption ACS 08	78
Tableau 4.7	Caractéristiques des ventilo-convecteurs sélectionnés	79

Liste des tableaux

Tableau 4.8	Le cout des appareillages du syst(B).	79
Tableau 4.9	Consommation électrique du syst (B).	80
Tableau4.10	Les caractéristiques des ventilo-convecteurs sélectionnés pour le syst(C).	81
Tableau4.11	Caractéristiques du Groupe Eau Glacée Air/Eau R404A sélectionné	82
Tableau4.12	Sélection du circulateur et adoucisseur	82
Tableau4.13	Le Cout d'investissement du syst(C).	82
Tableau4.14	Consommation électrique du climatiseur syst C	83
Tableau4.15	Couts investissements pour les sys(A), syst(B) et syst(C).	84
Tableau4.16	Consommation électrique pour les sys(A), syst(B) et syst(C).	84
Tableau4.17	Cout consommation électrique sans soutien d'état pour les sys(A), syst(B) et syst(C).	84
Tableau4.18	Cout consommation électrique avec soutien d'état pour les trois systèmes A, B et C.	85
Tableau4.19	Dégagement de chaleur au condenseur et au tour de refroidissement	85
Tableau4.20	La chaleur journalière non capté pour les trois systèmes A, B et C.	85
Tableau4.21	La chaleur journalière rejetée à l'extérieur pour les trois systèmes A, B et C.	85
Tableau4.22	Emission des gaz CO2 pour les trois systèmes A, B et C.	86
Tableau4.23	Récapitulatif de l'étude comparative	86

Introduction

Actuellement, la production de froid dans l'habitat apparaît comme un enjeu énergétique majeur. Des études récentes montrent que la consommation d'électricité productrice de froid ménager est de l'ordre de tiers de la consommation totale dans un logement (Le Pierrès 2005). Ceci est dû principalement au fait que les systèmes de production de froid classique repose essentiellement sur des procédés frigorifiques à compression de vapeur, grands consommateurs de l'énergie électrique. De plus, la production actuelle de froid, et en particulier l'usage intensif des systèmes de climatisation, est responsable des forts pics de consommation électrique notamment en été. Ajoutant à cela le fait que la production classique de froid nécessite l'utilisation de fluides frigorigènes souvent nocifs pour la couche d'ozone ce qui contribue d'avantage à l'accroissement de l'effet de serre. Seule l'utilisation des énergies renouvelables et l'augmentation de l'efficacité énergétique des installations citées permettront d'éviter de ravager notre planète pour nos besoins immédiats.

Nous nous intéressons dans ce travail de thèse de doctorat à une forme précise d'énergie renouvelable abondante en Algérie. Il s'agit de l'énergie solaire, évaluée comme étant le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit: 169.000 TWh/an pour le solaire thermique (Mayor and Dind 2002)(Benfatah, Benchabane et al. 2011).

La présente thèse analyse principalement des procédés solaires de production de froid par sorption en vue de réaliser une première installation dans le site de Biskra, caractérisé par un climat chaud et semi aride. Ainsi, l'objectif de ce travail est de contribuer à la réalisation d'un climatiseur solaire à adsorption dans la région citée par la présentation : (i) d'une étude bibliographique des différentes technologies de production de froid adaptées à la région de Biskra ; (ii) une étude de la faisabilité économique et écologique de cette technologie ; (iii) et par la proposition de certaines recommandations nécessaires pour la bonne exploitation de cette technologie qui n'est pas encore testée dans un climat similaire c-à-d chaud et semi aride.

La méthodologie de la présente thèse est basée sur une étude comparative entre les différents systèmes de production de froid. Les climatiseurs étudiés sont des systèmes classiques mono-split, syst(A), solaires, syst(B) et centralisés à eau glacée syst(C). Cette étude comparative technico-économique est réalisée sur deux projets types (I et II) relatifs au site de Biskra. Une réflexion sur la faisabilité d'un système de climatisation solaire par rapport à son coût d'investissement, coût de

Introduction

consommation électrique, dégagement de chaleur et émission de CO₂ et surtout par rapport au soutien de l'état à la facturation de l'électricité.

Le présent manuscrit est articulé sur quatre chapitres :

La première partie, rédigée en deux chapitres, est consacrée à l'étude bibliographique. Le premier chapitre présente l'état de l'art sur les technologies de production de froid. Ainsi et pour aboutir aux objectifs liés au choix des technologies de froid et de climatisation adaptées à la région de Biskra, le chapitre expose d'abord les différentes méthodes de production du froid et les différentes machines frigorifiques avant de se focaliser sur la production du froid solaire. Ce chapitre explicite le principe et les types d'adsorption en s'intéressant au principe de fonctionnement du cycle idéal d'adsorption et les critères de choix du couple adsorbant/adsorbat. Des conclusions et perspectives sont données à la fin du chapitre permettant d'introduire le deuxième chapitre. Ce dernier synthétise l'état de l'art des techniques de rafraîchissement de l'air. Il est composé de deux parties, la première partie expose les types de la climatisation conventionnelle, tels que les systèmes à détente directe, les systèmes tout air, les systèmes tout eau et d'autres systèmes. La deuxième partie est consacrée aux différentes technologies de la climatisation solaire. Des discussions, conclusions et recommandations sont données sur l'importance économique et environnementale des systèmes de climatisation d'adsorption solaire.

La deuxième partie de ce manuscrit de thèse, constituée de deux chapitres 3 & 4, est réservée à la faisabilité du climatiseur solaire à adsorption dans la région de Biskra :

Le troisième chapitre présente une étude de faisabilité du climatiseur solaire à adsorption. Ce chapitre est consacré à un cas d'étude type (Projet I) simulé sur le site de Biskra. On commence d'abord par l'étude de l'installation de climatiseurs classiques mono-split appelés 'syst (A)'. Par la suite, l'étude s'intéresse à l'installation d'un climatiseur solaire à adsorption, syst (B), afin de pouvoir comparer entre les deux systèmes selon le coût d'investissement et le coût de consommation électrique. À l'issue de ce chapitre, une discussion est présentée sur le coût d'investissement du climatiseur solaire syst(B) par rapport au soutien actuel de l'état à la facturation de l'électricité.

Le quatrième chapitre est consacré au deuxième cas d'étude (Projet II) simulé également dans le site de Biskra. En se basant sur les mêmes hypothèses du troisième chapitre, et dans le but de choisir le climatiseur adéquat à la région citée, une étude de faisabilité du climatiseur solaire à adsorption syst(B) est présentée par rapport au climatiseur mono-split syst(A) et le climatiseur centralisé à eau glacée syst(C). Cette étude comparative est conduite sur ces systèmes en s'intéressant aux coût d'investissement, coût de consommation électrique, la chaleur rejetée à l'extérieur et l'émission des gaz CO₂. À l'issue du quatrième chapitre, l'auteur présente des recommandations sur l'usage du système solaire à adsorption dans le site étudié.

Introduction

A la fin de ce document, une récapitulation des conclusions établies de la présente étude est présentée dans une conclusion générale. Nous donnerons notamment nos propres recommandations et présenterons les perspectives envisagées.

Bibliographie

Benfatah, H., A. Benchabane, et al. (2011). *Rafraichissement Solaire en Algérie par des Procédés de Sorption*. Premier Séminaire Nationale de Génie Mécanique(SNGM01), Biskra.

Le Pierrès, N. (2005). *Procédé solaire de production de froid basse température (-28 C) par sorption solide-gaz*. Procède Matériaux et Energie Solaire, Université de Perpignan: 208.

Mayor, J. and P. Dind (2002). "Construction et test d'un réfrigérateur solaire à adsorption transportable." Final report. Switzerland: Office fédéral de l'énergie OFEN.: 26.

PARTIE 1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Etat de l'art sur les technologies de production de froid

Les différents accords environnementaux interdisent l'utilisation de fluides frigorigènes usuels, Il est donc pertinent de mener des recherches de nouvelles solutions de production du froid assurant une haute efficacité énergétique et un faible impact environnemental (Allab 2008).

Pour aboutir à cet objectif on a consacré ce chapitre pour étudier l'état de l'art sur les technologies de production de froid dans une vision de sélectionner les technologies de froid et de climatisation les plus adaptées à la région de Biskra. Pour cette raison, on donne d'abord les différentes méthodes de production du froid et les différentes machines frigorifiques avant d'entamer la Production du Froid Solaire et la Thermodynamique d'adsorption. Des conclusions et perspectives sont données à la fin du chapitre.

1. Différentes méthodes de production du froid

Nous avons quatre méthodes de production de froid par mélanges réfrigérants, par détente d'un gaz parfait, par évaporation d'un liquide pur et enfin par refroidissement thermoélectrique.

1.1 Mélanges réfrigérants

Le mélange réfrigérant est un mélange de deux substances qui permet d'obtenir une substance aqueuse où la température est en dessous de la température de congélation de l'eau. La dissolution de certains solides ou liquides dans un solvant absorbe une quantité de chaleur équivalente à sa chaleur latente de fusion(Chekirou 2008).

1.2 Détente d'un gaz parfait

Le gaz une fois détendu aura une pression moins forte, un volume plus important, et une température inférieure à celle de l'état du gaz non-détendu par conséquent le froid est produit par l'abaissement des températures d'un gaz soumis à une détente.

1.3 Evaporation d'un liquide pur

L'évaporation est un passage progressif de l'état liquide à l'état gazeux. Ce phénomène a pour effet d'absorber la chaleur et par conséquent produire le froid. L'évaporation d'un liquide est le procédé le plus utilisé pour la production du froid. Le milieu à refroidir cède une certaine quantité de chaleur correspondante à la chaleur latente d'évaporation du liquide.

1.4 Refroidissement thermoélectrique

Ce type de réfrigération repose sur l'effet Peltier. Ce procédé consiste à faire passer un courant dans un sens donné, dans une jonction, entre deux surfaces conductrices de nature différentes (métaux ou semi-conducteur). Il en résulte un refroidissement dans l'une des parties de la jonction. C'est un moyen très simple, de faible rendement, utilisé notamment à bord des véhicules spatiaux et dans les petits réfrigérateurs de laboratoires(Chekirou 2008).

2. Machines frigorifiques

On distingue deux grandes catégories des machines frigorifiques, i) Machines frigorifiques à compression mécanique qui utilisent le travail comme énergie, ii) Machines frigorifiques à énergie thermique qui nécessitent un apport de chaleur comme énergie (Chekirou 2008).

2.1 Machines frigorifiques à compression mécanique

Nous avons distingués deux types des machines frigorifiques à compression mécanique tels que machine frigorifique à changement de phase et machine frigorifique à gaz.

2.1.1 Machines frigorifiques à changement de phase

Elles sont les plus souvent rencontrées dans l'industrie et dans les utilisations domestiques. Le schéma de principe de ce type de machines est représenté par la figure 1.1. Cette description concerne le cas le plus simple, c'est-à-dire une machine mono-étagée (Chekirou 2008).

2.1.2 Machines frigorifiques à gaz

Dans ce type de machines, le froid est obtenu en utilisant la chaleur sensible du fluide frigorigène sans avoir un changement d'état, elles utilisent un cycle inverse soit de Joule soit de Stirling-Ericsson (Chekirou 2008).

Les machines à cycle de Joule dans le cas le plus simple comportent un compresseur entraîné par un moteur, il est souvent couplé à une turbine où on récupère une partie d'énergie résultante de la détente du fluide. Cette énergie est considérée comme auxiliaire pour l'entraînement du compresseur (Chekirou 2008).

Les inconvénients des machines à cycle de Joule par rapport aux machines à compression de vapeur, le rendement est plus faible et l'effet utile est produit à température variable. Donc, ces machines ne peuvent concurrencer les machines à vapeur condensable (Chekirou 2008). Les machines de Stirling sont caractérisées par un bon rendement, mais leur inconvénient majeur résulte de leur encombrement et leur cinématique compliquée, elles ne sont que peu utilisées (Chekirou 2008).

2.2 Machines frigorifiques à sorption

Le phénomène de sorption se répartit en deux processus principaux, i) La sorption en cycle fermé suivant un processus d'absorption ou d'adsorption et ii) La sorption en cycle ouvert appelée aussi "Système à dessiccation".

2.2.1 Machines frigorifiques à absorption

Le phénomène d'absorption est le mélange d'un gaz dans un liquide, les deux fluides présentent une forte affinité, pour former une solution. Ce processus est réversible (Le Pierrès 2005). Le schéma d'une machine frigorifique à absorption est représenté par la figure 1.2. Dans une machine frigorifique à absorption, la source de chaleur est utilisée pour séparer un constituant volatil d'une

solution. Ce constituant séparé sous phase vapeur est ensuite condensé, puis détendu. Le liquide passé par la détente s'évapore en absorbant la chaleur du milieu à refroidir.

2.2.2 Machines à adsorption

Dans cette machine on utilise un matériau solide (un adsorbant) au lieu d'une solution liquide, le compresseur de la machine à compression est remplacé par un adsorbeur ou un réacteur où se déroulent les réactions d'adsorption entre le fluide frigorigène et l'adsorbant. Le reste de la machine n'est pas trop modifié(Chekirou 2008). Il existe deux grandes catégories de systèmes d'adsorption: continue et intermittente, avec des systèmes intermittents étant plus appropriée pour l'utilisation de l'énergie solaire, car ils sont des systèmes de cycle quotidien. Une autre classification structurelle des systèmes d'adsorption concerne la nature de l'effet d'adsorption et en particulier il s'agit d'un phénomène physique ou chimique(Papadopoulos, Oxizidis et al. 2003).

Ce phénomène dépend quantitativement des propriétés physiques et chimique et de la nature des molécules adsorbées(Chekirou 2008).

La principale différence par rapport aux systèmes d'absorption est que deux ou plusieurs adsorbeurs sont nécessaires afin d'assurer un fonctionnement continu(Fong, Chow et al. 2009). Les refroidisseurs d'adsorption sont plus chers et leur disponibilité commerciale est encore limitée. En

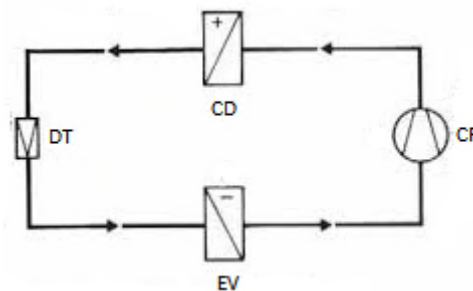


Fig. 1.1 : Schéma d'une machine frigorifique à compression mécanique (Chekirou 2008)

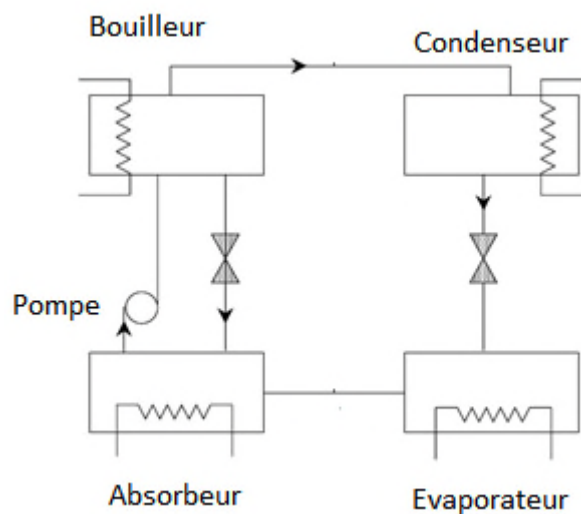


Fig. 1.2 : Schéma d'une machine frigorifique à absorption(Chekirou 2008).

principe, leur COP est inférieur à celui des machines à absorption, mais ils peuvent utiliser la chaleur à basse température, ils peuvent ainsi être entraînés par des capteurs solaires plus efficaces (Chekirou 2008). Refroidisseurs d'adsorption semblent être comparables à des refroidisseurs à absorption en termes de COP maximale réalisable. Mais leurs densités de puissance de refroidissement sont beaucoup plus faibles. La technologie d'adsorption peut être compétitive dans les grands systèmes de refroidissement solaire où sa faible densité de puissance n'est pas un problème. Pour les systèmes de refroidissement solaire petit ou moyen, il a tendance à être trop encombrant et coûteux (Lu, Wang et al. 2006). La surface spécifique moyenne pour les installations à adsorption est de 3,49 m²/kWf alors que pour l'absorption elle est de l'ordre de 2,77 m²/kWf (Tchernev and Emerson 1988). Les machines sont aussi plus volumineuses à cause de la faible conductivité thermique des adsorbants (Saha, Akisawa et al. 2001).

La simplicité du procédé, la large gamme de températures de chauffage et d'autres avantages tels que le fonctionnement silencieux pourrait conduire à un grand nombre de petites applications de climatisation assistée solaires. La recherche et le développement de nouveaux travaux sur les machines de petite taille d'adsorption est nécessaire afin de réduire leur volume et d'augmenter la densité de puissance (Fong, Chow et al. 2009).

2.2.3 Machines à dessiccation solide

Les systèmes ouverts les plus courants sont les systèmes de refroidissement à dessiccation avec une roue de déshumidification rotatif et un sorbant solide. La plupart des systèmes de dessiccation actuellement sur le marché utilisent un matériau de sorption solide tel que gel de silice. Etant donné que l'agent déshydratant solide ne peut pas être mis en circulation par pompage, ces systèmes utilisent généralement un lit rotatif portant le matériau sorbant, appelé «roue de dessiccation», pour permettre un fonctionnement continu (Balaras, Grossman et al. 2007).

Les avantages de ce type des machines sont donnés comme suit (Wang, Ge et al. 2009).

- Le coût de fonctionnement peut être considérablement réduit en raison de l'utilisation de l'énergie thermique.
- Le coût initial pour le système de refroidissement déshydratant peut également être réduit en comparaison avec d'autres systèmes de sorption.
- Ce système est très fiable et facile pour l'entretien.
- Le Système de refroidissement à déshydratant solide est une bonne alternative au système classique à compression de vapeur (VC) en raison de son économie d'énergie et les caractéristiques sans CFC.

Le principal inconvénient pourrait être la grande taille de la CTA (Wang, Ge et al. 2009).

3. Production du Froid Solaire

Le refroidissement solaire est envisagé comme le moyen durable à fournir de l'air conditionné et la réfrigération, puisque l'énergie solaire est considérée comme la source d'énergie primaire. Il est très important de réduire la consommation de combustibles fossiles et d'encourager une plus large utilisation de l'énergie solaire dans la réfrigération et la climatisation(Fong, Chow et al. 2009).

A partir du flux de l'énergie solaire il y a deux voies à suivre : Conversion électrique par cellules photovoltaïques PV ou Conversion thermique(Wang, Bao et al. 2009).

3.1 Refroidissement Solaire Electrique (Photovoltaïque)

Le système de réfrigération solaire électrique se compose principalement de panneaux photovoltaïques et un dispositif de réfrigération. Les cellules solaires sont essentiellement des semi-conducteurs. La plupart des cellules solaires commerciales disponibles sur le marché sont fabriqués à partir de silicium. Nous montrons sur la figure 1.3 un schéma d'un panneau solaire photovoltaïque formant un circuit fermé avec une charge quelconque de puissance W (Kim and Ferreira 2008).

Les systèmes les plus souvent envisagés sont les cycles thermodynamiques à compression mécanique de vapeur. Il existe plusieurs d'autres installations qui utilisent les panneaux photovoltaïques, tels que l'effet Peltier, cycle de Stirling, refroidissement thermo-acoustique et thermomagnétique. Mais ces derniers ont des faibles efficacités par rapport aux cycles à compression de vapeur. Pour cela, nous présentons dans ce chapitre juste l'exemple d'une installation à compression de vapeur qui fonctionne par l'électricité produite à partir de l'énergie solaire photovoltaïque(Rouag 2017).

Le plus grand avantage d'utiliser un panneau solaire pour la réfrigération est la simplicité de construction et l'importance du rendement global lorsqu'il est combiné avec un système de compression de vapeur classique(Kim and Ferreira 2008).

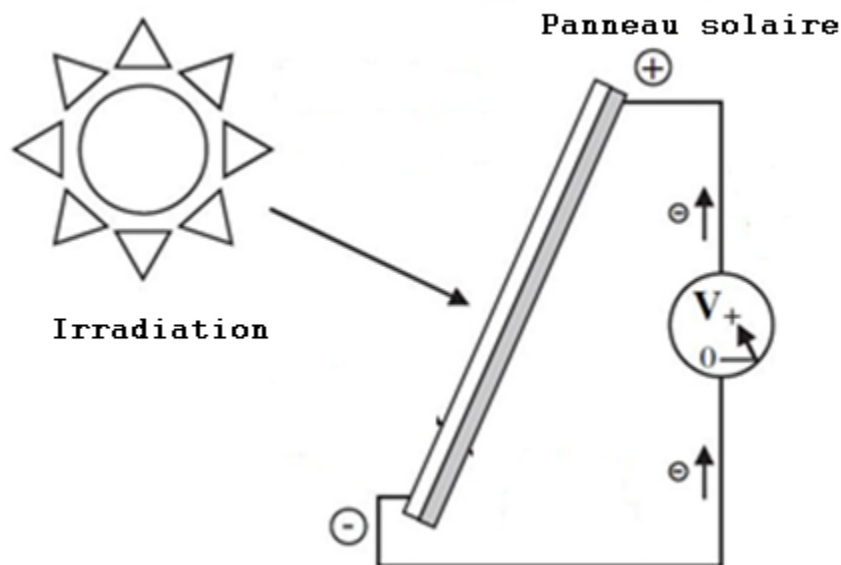


Fig. 1.3 : Schéma d'un panneau solaire photovoltaïque(Kim and Ferreira 2008)

Le plus grand rendement de panneaux vendus sur le marché est d'environ 15% pour un midi d'un jour clair (Fong, Chow et al. 2009). Mais en utilisation réelle, sur le terrain, les évaluations indiquent que le rendement moyen est de l'ordre de 10,3% (Rouag 2017).

L'efficacité du système en prenant en compte le rendement de l'onduleur est entre 25-32 % avec un fonctionnement sans stockage (Rouag 2017).

Les systèmes à compression de vapeur utilisent des fluides frigorigènes, contribuant ainsi d'une façon très importante à la dégradation de la couche d'ozone (Allab 2008). Pour ce raison, on essaye d'étudier le refroidissement solaire thermique.

3.2 Refroidissement Solaire Thermique

Les systèmes solaires thermiques utilisent la chaleur solaire plutôt que l'électricité solaire pour produire un effet de réfrigération (Kim and Ferreira 2008).

La figure 1.4 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 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 en rejetant la quantité de chaleur de condensation à l'air ambiant 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 Ferreira 2008; Fong, Chow et al. 2009).

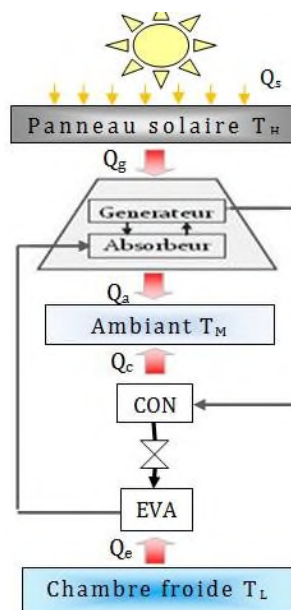


Fig.1.4 : Système de réfrigération par sorption (Kim and Ferreira 2008; Fong, Chow et al. 2009).

3.2.1 Refroidissement solaire par absorption

Deux grands systèmes de refroidissement solaire peuvent être relevés : cycle d'absorption bromure de lithium-eau et cycle d'absorption eau-ammoniac(Al-Alili, Hwang et al. 2014).

La majorité des systèmes d'absorption sont à simple effet, avec capteurs plans solaire à basse température.

Le système d'absorption à 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(Henning 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(Henning 2007; Kim and Ferreira 2008).

Le tableau 1.1 donne une comparaison entre les deux systèmes d'absorption NH₃-H₂O et H₂O-LiBr. On remarque que le premier couple NH₃-H₂O est préférable à la congélation et la réfrigération par contre le deuxième couple H₂O-LiBr à la climatisation, Le système optimal—est déterminé principalement par les performances technico-économiques en termes de coûts par unité produite d'énergie de refroidissement(Djebiret 2012).

Le tableau 1.2 résume les détails d'un certain nombre d'études reliées à la réfrigération d'absorption solaire(Kim and Ferreira 2008).

La technologie d'absorption actuelle peut fournir diverses machines frigorifiques d'absorption avec COP allant de 0,3 à 1,2. Le choix d'une machine de refroidissement par absorption dépend principalement de la performance du capteur solaire utilisé(Kim and Ferreira 2008).

Selon le tableau 1.2 on remarque les puissances frigorifiques Q_e varient de 2,5 à 210kw, le COP varie de 0.11 à 0.60 et a surface du panneau varie de 0.37 à 180m².

Couple de travail	avantages	Inconvénients
NH ₃ -H ₂ O	Température d'évaporation <0°C	Toxique et dangereux pour la santé (ammoniac)
H ₂ O-LiBr	Température d'évaporation >0°C COP élevé pressions de fonctionnement faibles Respectueux de l'environnement. Grande chaleur latente de vaporisation	Le risque de congélation, donc un dispositif anti-cristallisation est nécessaire Relativement coûteux (LiBr)

Tableau 1.1 : Avantages et Inconvénients de NH₃-H₂O et H₂O-LiBr (Fan, Luo et al. 2007).

Références	applications	Q_e [kW]	A_s [m ²]	$\eta_{\text{heat-cool}}$ [-] ^d
LiBr-H₂O à simple effet				
(Van Hattem and Data 1981).	Refroidissement d'espace	4	36 ^a	0,11
(Al-Karaghoul, Abood et al. 1991)	Refroidissement d'espace	210	1577 ^b	0,31
(Best and Ortega 1999)	Refroidissement d'espace	90	316 ^a	0,26-0,36
(Syed, Izquierdo et al. 2005)	Refroidissement d'espace	35	49,9 ^a	0,34
(Storkenmaier, Harm et al. 2003)	<i>Prototype de refroidisseur</i>	10	0,37	0,37
(Safarik, Richter et al. 2005)	<i>Prototype de refroidisseur</i>	16		0,40
LiBr-H₂O à double effet				
(Ishibashi 1979; 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 ^c	0,5-0,6
Ammoniac-H₂O				
(Gutiérrez 1988; Kunze 2000; Jakob, Eicker et al. 2003)	prototype diffusion – absorption	<2,5		0,1-0,25
(Shiran, Shitzer et al. 1982; McLinden and Klein 1983; Alvares and Trepp 1987; Best and Hernandez 1991)	Réfrigération / pompe à chaleur			
(SACE 2003)	Refroidissement de Vin	10	100 ^a	
(Richter and Safarik 2005)	Refroidissement d'espace	15		0,27

Tableau 1.2 : Vue d'ensemble des études de réfrigération solaire à absorption [travail de synthèse réalisé par (Kim and Ferreira 2008).

^a panneau plan. , ^b panneau a tube d'évacuation (N° de tube), ^c panneau creux (ouverture). ^d dans le cas contraire, une efficacité du panneau de 0,50 a été supposée.

3.2.2 Refroidissement solaire par adsorption

Une machine de réfrigération à adsorption utilise le phénomène d'adsorption physique entre le fluide frigorigène et un adsorbant solide; les molécules du réfrigérant viennent d'être fixé sur la surface de l'adsorbant par l'intermédiaire de liaisons de type Van der Waals(Allab 2008).

Les caractéristiques principales de technologies de réfrigération solaires par sorption sont données par le tableau 1.3, L'utilisation de lits fixes se traduit également par opération de cycle intermittent, avec lits d'adsorbant évolution entre les étapes d'adsorption et de désorption, Par conséquent, lorsque le flux constant de vapeur à partir de l'évaporateur est nécessaire pour assurer le refroidissement continu, deux ou plusieurs lits d'adsorbant doit être actionnés en opposition de phase(Allab 2008; Chekirou 2008).

Par rapport à l'absorption, les refroidisseurs d'adsorption sont plus chers et leur disponibilité commerciale est encore limitée. En principe, leur COP est inférieur à celui des machines à absorption, mais ils peuvent utiliser la chaleur à basse température, ils peuvent ainsi être entraînés par des capteurs solaires plus efficaces(Chekirou 2008).

Refroidisseurs d'adsorption semblent être comparables à des refroidisseurs à absorption en termes de COP maximale réalisable. Mais leurs densités de puissance de refroidissement sont beaucoup plus faibles. La technologie d'adsorption peut être compétitive dans les grands systèmes de refroidissement solaire où sa faible densité de puissance n'est pas un problème. Pour les systèmes de refroidissement solaire petit ou moyen, il a tendance à être trop encombrant et coûteux(Wang, Bao et al. 2009).

Le tableau 1.4 nous donne les performances des systèmes d'adsorption pour différentes application. La surface spécifique moyenne pour les installations à adsorption est de 3,49 m²/kWf alors que pour l'absorption elle est de l'ordre de 2,77 m²/kWf(Storckenmaier, Harm et al. 2003). Les machines sont elles aussi, plus volumineuses à cause de la faible conductivité thermique des adsorbants(Rouag 2017).

3.2.3 Refroidissement Solaire Par Dessiccation.

Les systèmes à dessiccation sont des systèmes ouverts utilisant l'eau, en contact direct avec l'air comme réfrigérant. Le cycle de rafraîchissement est une combinaison de rafraîchissement évaporatif avec une déshumidification par un matériau hygroscopique, qui peut être aussi bien liquide que solide(Kim and Ferreira 2008).

Le terme "ouvert" signifie que le réfrigérant est évacué du système après qu'il ait produit son effet refroidissant, et qu'une nouvelle quantité de réfrigérant doit être injectée, le tout dans une boucle ouverte. Seule l'eau peut être utilisée comme réfrigérant puisqu'elle est en contact direct avec l'air ambiant. Les systèmes disponibles utilisent de l'eau, comme déshydratant, qui absorbe un sorbant

comme le gel de silice, alumine activée, la zéolite, LiCl et LiBr (Kim and Ferreira 2008; Fong, Chow et al. 2009). La température de la source chaude nécessaire pour le fonctionnement du système est entre 45°C et 95°C. Le COP nominal des systèmes de dessiccation est de l'ordre de 0,5 à des valeurs supérieures à 1 (Rouag 2017).

L'application actuelle de ces systèmes reste faible et de l'ordre de 10 à 15% des installations existantes. Puisque le fonctionnement est basé sur le refroidissement évaporatif, il est évident que ces systèmes sont destinés aux climats secs et chauds (Rouag 2017).

	Technologi	couple	Nombre effet	COP	Application	°C	Disponibilité
Sorption	absorption	H ₂ O-LiBr	Un seul effet	0,5-0,75	AC	80-100	C
			Double effet	0,8-1,2	AC	100-160	C
		NH ₃ -H ₂ O	Un seul effet	0,5	AC-R	120-150	C
			Double effet	1,2-1,3	AC-R		C
adsorption	Gel silice/eau	Une étape	0,3-0,7	AC	60-90	C	
	Gel silice/eau	Deux étapes	0,35	AC	50-75	L	
	Adsorbent/ collecteur		0,1-0,5	R		C	

Tableau 1.3 : caractéristiques principales de technologies de réfrigération solaires par sorption (Papadopoulos, Oxizidis et al. 2003)

AC : conditionnement d'air ; L : laboratoire ; R : réfrigération ; C : commercial

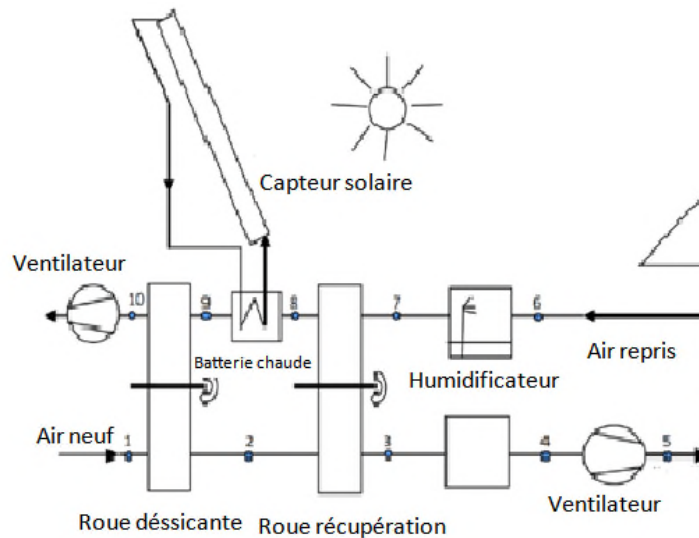


Fig.1.5 : Schéma de fonctionnement d'une centrale d'air à roue dessicante (Rouag 2017).

Chapitre I : Etat de l'art sur les technologies de production de froid

Application	Temp°de la source ou d'insolation	Couple de travail	COP	SCP ou production de glace	Année	Ref.
Fabrication de glace	105 °C	AC-NH3	0.10	35 W kg -1	1997	(Tamainot-Telto and Critoph 1997)
fabrication de glace	15.4°C	Gel de Silice– Eau	0.16a	2.05 MJ day	2004	(Hildbrand, Dind et al. 2004)
fabrication de glace	<120 °C	AC-methanol	0.18	27 W kg -1	2005	(Wang and Wang 2005)
fabrication de glace	115°C	AC+CaCl2– NH3	0.39	770 W kg -1c	2006	(Lu, Wang et al. 2006)
Eau glacée	55°C	Gel de Silice– Eau	0.36	3.2 kW Unit-1	2001	(Saha, Akisawa et al. 2001)
Eau glacée	100°C	AC-methanol	0.40	73.1 W kg -1	2001	(Wang, Wu et al. 2001)
Eau glacée	75 – 95°C	Gel de Silice– Eau	0.35- 0. 60	15.0 kW m-3	2004	(Nunez, Mittelbach et al. 2007)
Eau glacée	80- 95°C	Gel de Silice – Eau	0.30- 0. 60	20 W kg -1d	2004	(Wang and Wang 2005)
Eau glacée	80°C	Gel de Silice– Eau	0.33- 0. 50	91.7-171.8 W/ kg	2005	(Liu, Wang et al. 2005)
Conditionnement d'air	204°C	Zeolite– Eau	0.60- 1.60	36 -144 W kg -1	1998	(Tchernev and Emerson 1988)
Conditionnement d'air	100°C	AC-NH3	0.20	600 W kg -1	2003	(Tamainot-Telto and Critoph 2003)

Tableau 1.4 : Performance des systèmes d'adsorption pour différentes applications(Kim and Ferreira 2008).

a : une valeur moyenne obtenue au cours des 30 jours de fonctionnement continu.

c : Le SCP est basé sur la masse de CaCl_2 dans un lit d'adsorbant et seulement dans la durée de la phase d'adsorption, d : la température de génération 95°C .

La figure 1.5 montre un schéma de fonctionnement d'une centrale d'air à roue dessicante. Ces systèmes ont une double fonction : rafraîchissement et renouvellement d'air hygiénique. Par contre, dans les autres systèmes à cycle fermé, et pour des raisons sanitaires il faut assurer un apport de l'air neuf pris de l'extérieur dans le local (Rouag 2017).

Le principe de fonctionnement d'une centrale d'air à roue dessicante est donné comme suit : (Rouag 2017).

Phase 1-2 : L'air extérieur ou air pulsé (aussi appelé air de processus) est aspiré à travers d'un filtre, puis traverse la "roue dessicante" ou "roue à dessiccation". Cet échangeur rotatif contient un produit de sorption solide. Ce dernier absorbe la vapeur d'eau de l'air extérieur par adsorption. L'air extérieur est ainsi déshumidifié et en contrepartie voit sa température augmenter.

Phase 2-3 : L'air extérieur est alors refroidi par échange de chaleur avec l'air intérieur extrait ou l'air extrait. Cet échange se fait au travers d'un échangeur de chaleur rotatif (non hygroscopique).

Phase 3-5 : L'air pulsé peut encore être arrosé d'eau au travers d'un humidificateur. L'eau va absorber les calories restantes dans l'air avant que celui-ci soit propulsé dans le bâtiment à refroidir par un ventilateur. Cette alternative permet de refroidir l'air pulsé mais pas de le déshumidifier. Pour ce faire, il est alors nécessaire de remplacer cet humidificateur par une batterie froide.

Phase 6-7 : Pour augmenter l'échange de chaleur et donc le refroidissement de l'air pulsé, on rafraîchit au préalable l'air extrait en l'humidifiant jusqu'à la saturation. On abaisse ainsi le plus possible sa température, et on bénéficie au maximum du potentiel de refroidissement dans l'échangeur.

Phase 7-8 : En passant au travers de l'échangeur de chaleur, l'air extrait se voit donc réchauffé.

Phase 8-9 : Pour pouvoir fonctionner en continu, la roue dessicante doit être régénérée, c'est-à-dire qu'il doit déshumidifier le matériau adsorbant. Pour cela la portion de roue contenant l'humidité doit croiser le flux d'air extrait qui aura été préalablement réchauffé pour atteindre une température suffisante pour vaporiser les molécules d'eau retenues dans les pores de la roue.

Phase 9-10 : l'air chaud traverse et régénère la roue dessicante pour permettre lui de poursuivre le processus continu de déshumidification. Finalement, l'air rejeté, à l'aide d'un ventilateur, sort avec une température plus élevée et plus chargé en humidité que l'air extérieur (Rouag 2017).

4. Thermodynamique D'adsorption

4.1 Principe de l'adsorption

Ce phénomène dépend quantitativement des propriétés physiques adsorbant (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, Ce phénomène s'accompagne d'un dégagement de chaleur s'appelle chaleur isostérique d'adsorption(Allab 2008).

La figure 1.6 nous montre le phénomène d'adsorption. L'adsorption est le processus au cours duquel les molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé adsorbat ou réfrigérant, se fixent sur la surface d'un solide appelé un adsorbant.

4.2 Types d'adsorption

On distingue deux types d'adsorption qui diffèrent par leur nature de fixation et par les énergies mises en jeu.

4.2.1 Adsorption physique (*physisorption*)

Les forces d'adsorptions impliquées dans adsorbants physiques sont des forces intermoléculaires (van der Waals). Ils ne comportent pas de changement significatif dans les modèles orbitales électroniques des espèces concernées.

4.2.2 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 .La chaleur d'adsorption mise en jeu est en général assez grande, dépassant les 80 KJ/mole(Fischer and Labinov 2000).

4.3 Principe de fonctionnement du cycle idéal

La figure 1.7 montre Représentation du cycle théorique à adsorption dans le diagramme Clapeyron

Le trajet thermodynamique décrit par un couple adsorbant-réfrigérant lors d'un cycle est constitué de quatre phases.

Phase1 : Chauffage isostérique (AB)

Au début du cycle (point A), le mélange adsorbant/adsorbat est à sa température minimale T_a (température d'adsorption) et à la P_e (pression d'évaporation) ; à ce moment, l'adsorbant est isolé. Sous l'effet de chauffage, la pression et la température du mélange augmentent, tandis que la masse totale du réfrigérant adsorbée reste constante le long de la transformation (AB) et égale à m_{max} . Cette phase s'achève dès que la pression devient égale à celle qui règne dans le condenseur P_c (point B).

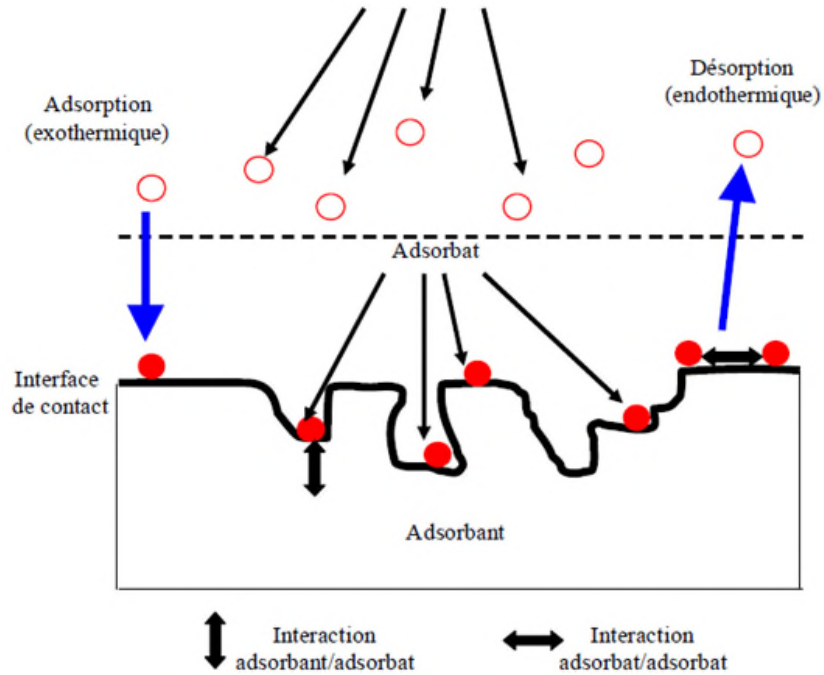


Fig.1.6 : Phénomène d'adsorption (Allab 2008)

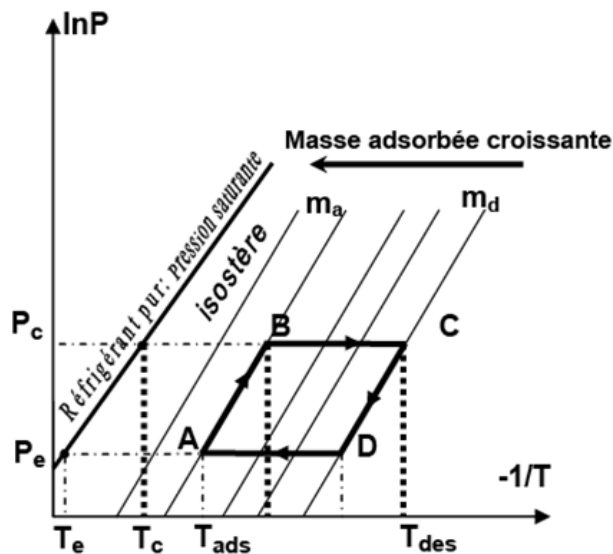


Fig. 1.7 : Représentation du cycle théorique à adsorption dans le diagramme de Clapeyron(Allab 2008).

La température atteinte est dite température seuil de désorption(Chekirou 2008). Cette période est équivalente à la "compression " dans le cycle de compression classique(Allab 2008).

Phase2: Echauffement : Désorption-condensation (BC)

L'adsorbent est mis en communication avec le condenseur et la désorption du frigorigène commence, qui se condense dans le condenseur par la suite. L'adsorbent est alors en haute pression et suit l'isobare imposée par le condenseur. Tout en continuant le chauffage, la température du mélange dans l'adsorbent augmente jusqu'à la température maximale T_g (température de régénération) au point C, fixée pour le cycle correspondant. Cette phase est équivalente à la "condensation " dans le cycle de compression classique(Allab 2008).

Phase3 : Refroidissement isostérique (CD)

Le refroidissement du mélange adsorbant/adsorbat commence au point C, où la température et la pression diminuent jusqu'à ce que la pression devienne égale à celle qui règne dans l'évaporateur. La température atteinte est dite température seuil d'adsorption (point D). La masse totale du fluide adsorbé reste constante dans cette phase et est égale à m_{\min} (Chekirou 2008). La température de l'adsorbant diminue ainsi que la pression selon l'isostère (CD). Cette période est équivalente à "la détente" dans le cycle de compression classique (Allab 2008).

Phase4 : Refroidissement : Adsorption -Evaporation (DA)

Cette phase est la phase motrice du cycle, pendant laquelle le froid est produit. Au point D, commence l'évaporation du réfrigérant en produisant le froid dans l'évaporateur. La vapeur produite s'adsorbe de nouveau dans l'adsorbeur, jusqu'à ce que la température du mélange adsorbant/adsorbat devienne minimale T_a , fixée pour le cycle correspondant. Durant la transformation (DA), le système suit l'isobare imposée par l'évaporateur, et qui correspond à la pression de saturation du réfrigérant à la température d'évaporation (Chekirou 2008). Cette période est équivalente à "l'évaporation" dans le cycle de compression classique (Allab 2008). À ce moment, la machine est prête pour un nouveau cycle.

4.4 Choix du couple adsorbant/adsorbat

Il est largement identifié que l'un des problèmes les plus significatifs dans la conception d'une machine frigorifique à adsorption est le choix du couple adsorbant/adsorbat approprié (Chekirou 2008). On essaye de donner au début les critères de choix de l'adsorbant, les critères de choix de l'adsorbat, les critères de choix du couple adsorbant/adsorbat ensuite donner les adsorbants, les adsorbats et les couples les plus couramment utilisés. Le choix de l'adsorbant est limité dans le domaine de la réfrigération solaire à adsorption par certains critères, citons : (Chekirou 2008).

- a. ils présentent une très grande surface spécifique.
- b. il a une grande capacité d'adsorption à la température ambiante et basse pression, mais une faible capacité d'adsorption à la température maximum du système et haute pression pour obtenir une grande quantité de production du froid ;
- c. Il possède une bonne conductivité thermique ;
- d. Il a une faible chaleur spécifique ;
- e. Il est chimiquement compatible avec l'adsorbat choisi et aille des pores de dimensions proches à celle des molécules de l'adsorbat ;
- f. Il est non toxique et non corrosif ;
- g. Il ne présente aucune détérioration avec le temps et l'usage ;
- h. Présentant un coût abordable ;
- i. Etant largement disponible.

Les considérations précédentes justifient donc le choix porté dans la majorité des travaux effectués jusqu'à maintenant, sur les adsorbants suivants: les zéolites, les charbons actifs, les gels de silice et les alumines activées, ...etc (Chekirou 2008).

L'adsorbant chimique le plus couramment utilisé dans les applications de climatisation solaire on trouve le chlorure de calcium (CaCl_2) (Fan, Luo et al. 2007).

Le choix de l'adsorbat est basé sur les critères suivants(Chekirou 2008).

- a. Il a une grande chaleur latente d'évaporation ;
- b. Il a une faible viscosité ;
- c. Il a une grande conductivité thermique ;
- d. Il est constitué de petites molécules facilement adsorbables ;
- e. Il a une chaleur spécifique la moins élevée possible ;
- f. la composition chimique est stable dans les conditions de fonctionnement
- g. compatible avec le matériau de construction de la machine ;
- h. N'ayant pas d'effet sur les denrées à conserver
- i. Non toxique ;
- j. être ininflammable et non explosif en mélange avec l'air ;
- k. Et sa pression doit être supérieure à la pression atmosphérique
- l. L'utilisation des adsorbats doivent être réalisées sans aucun effet négatif sur l'environnement.
- m. Présentant un coût abordable ; Etant largement disponible.

Jusqu'à maintenant, l'adsorbat qui réunit toutes ces conditions n'existe pas pratiquement. Néanmoins, il y a des adsorbats qui satisfont à un nombre élevé de ces conditions et ce en fonction des besoins spécifiques en froid. Les fluides frigorigènes les plus utilisés dans le domaine de la production de froid par sorption sont le méthanol, l'eau et l'ammoniac(Papadopoulos, Oxizidis et al. 2003; Chekirou 2008).

Les critères de choix du couple mis en jeu pour une application donnée sont(Papadopoulos, Oxizidis et al. 2003; Balaras, Grossman et al. 2007) :

- a. Les conditions d'équilibre du couple considéré ;
- b. La densité énergétique ;
- c. La stabilité chimique et mécanique
- d. La toxicité, la corrosivité, l'explosivité et l'inflammabilité ;
- e. le cout des composés ;
- f. L'impact environnemental ;
- g. La chaleur d'adsorption, la capacité d'adaptation à la température de conduite et à la pression de service souhaitée.

Les couples d'adsorption physique les plus étudiés sont du carbone activé(ou fibres de carbone activé)/méthanol, du carbone activé(ou fibres de carbone activé)/ammoniaque, gel de silice/eau et zéolithe/eau (Lof and Tybout 1974; Ward and Lof 1975).

Les résultats d'une comparaison de douze adsorbants dans les mêmes conditions montrent que le méthanol / charbon actif est le meilleur parmi tous les couples de travail étudiés(Ward and Lof 1975). Un COP de cycle de 0,55 pouvait être obtenue à des températures d'évaporation et de condensation de -5 et 30 ° C, respectivement(Ward and Lof 1975).

Anyanwu et Ogueke ont comparé thermodynamiquement les différents systèmes utilisant du charbon actif/méthanol, du charbon actif/ammoniac et zéolithe/eau. Il a été conclu que la zéolite/eau est la meilleure couple pour l'application de climatisation et le carbone activé/ammoniac est préféré pour la fabrication de la glace, pour la réfrigération et pour la conservation des aliments(Ward and Lof 1975).

Wang et al. a conclu que des matériaux adsorbants consolidés ont de très bonnes propriétés de transfert de chaleur, qui fournissent de nouvelles possibilités pour machines d'adsorption compact(Ward and Lof 1975).

Les couples d'adsorption chimique comprennent principalement: Chlorures de métaux / ammoniac, Hydrures métalliques / hydrogène et Oxydes métalliques / oxygène(Lof and Tybout 1974). Les principaux couples d'adsorbants composites sont gel de silice-chlorure/eau et chlorure-milieux poreux/ammoniaque(Lof and Tybout 1974).

5. Conclusions

L'augmentation de la charge électrique de pointe pendant les mois d'été et la coïncidence temporelle entre l'insolation et la demande de refroidissement font que l'énergie solaire semble la meilleure source pour produire le froid notamment de l'air frais. La recherche bibliographique conduite dans ce chapitre a montré que les technologies solaires de production du froid par sorption sont l'option en vigueur pour l'utilisation de l'énergie solaire. Cela s'applique à l'adsorption, l'absorption au refroidissement déshydratant.

Comparativement, les systèmes d'absorption sont surtout plus appropriés pour la climatisation avec le couple $H_2O-LiBr$ et avec le couple NH_3-H_2O pour la réfrigération et la congélation. Ainsi le système d'adsorption du couple charbon actif/méthanol est le meilleur parmi tous les couples étudiés dans la littérature, particulièrement pour la production de basses températures où on utilise aussi le couple charbon actif/ammoniac et le couple zéolite / eau pour la climatisation (Benfatah, Benchabane et al. 2011).

Pour le rafraîchissement solaire en Algérie, et à Biskra en particulier, nous recommandons d'utiliser le procédé à adsorption pour les raisons suivantes (Benfatah, Benchabane et al. 2011).

- La machine à adsorption utilise pour son fonctionnement des températures, relativement faibles (50 à 100°C) d'où la possibilité d'utiliser des capteurs plans à eau qui peuvent être fabriqués localement.
- La disponibilité des matériaux adsorbants (charbon actif, gel de silice, zéolithe..) et des fluides frigorigènes (eau, méthanol..).
- L'appareillage totalement statique (ou presque).
- La conception d'un tel système est très simple et peut être automatisée facilement.
- Le COP thermique élevé par rapport à d'autres systèmes qui utilisent la chaleur.

Ainsi, le chapitre suivant est consacré à l'étude d'un procédé à adsorption en utilisant le couple charbon actif/méthanol.

6. Bibliographie

- Al-Alili, A., Y. Hwang, et al. (2014). "Review of solar thermal air conditioning technologies." *International Journal of Refrigeration* 39: 4-22.
- Al-Karaghoul, A., I. Abood, et al. (1991). "The solar energy research center building thermal performance evaluation during the summer season." *Energy conversion and management* 32(5): 409-417.
- Allab, F. (2008). *Etude Et Conception d'un Dispositif de Réfrigération Magnétique Base Sur L'effet Magnétocalorique Geant*, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- Alvares, S. and C. Trepp (1987). "Simulation of a solar driven aqua-ammonia absorption refrigeration system Part 2: viability for milk cooling at remote Brazilian dairy farms." *International Journal of Refrigeration* 10(2): 70-76.
- Balaras, C. A., G. Grossman, et al. (2007). "Solar air conditioning in Europe-an overview." *Renewable and sustainable energy reviews* 11(2): 299-314.
- Benfatah, H., A. Benchabane, et al. (2011). *Rafraichissement Solaire en Algérie par des Procédés de Sorption*. Premier Séminaire Nationale de Génie Mécanique(SNGM01), Biskra.
- Best, R. and J. Hernandez (1991). "Experimental studies on the operating characteristics of an ammonia-water absorption system for solar cooling." *Chemical engineering research & design* 69(A2): 153-160.
- Best, R. and N. Ortega (1999). "Solar refrigeration and cooling." *Renewable Energy* 16(1): 685-690.
- Chekirou, W. (2008). *Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption*, Mentouri, Constantine: 187.
- Djebiret, M. A. (2012). *Etude de faisabilité d'un climatiseur solaire adapté à la région de Biskra*, Université Mohamed Khider de Biskra: 97.
- Fan, Y., L. Luo, et al. (2007). "Review of solar sorption refrigeration technologies: development and applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11(8): 1758-1775.
- Fischer, S. and S. Labinov (2000). *Not-in-kind technologies for residential and commercial unitary equipment*.
- Fong, K., T. T. Chow, et al. (2009). "Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city." *Solar Energy* 84(2): 227-244.

- Gutiérrez, F. (1988). "Behavior of a household absorption-diffusion refrigerator adapted to autonomous solar operation." *Solar Energy* 40(1): 17-23.
- Henning, H.-M. (2007). "Solar assisted air conditioning of buildings an overview." *Applied Thermal Engineering* 27(10): 1734-1749.
- Hildbrand, C., P. Dind, et al. (2004). "A new solar powered adsorption refrigerator with high performance." *Solar energy* 77(3): 311-318.
- Ishibashi, T. (1979). The operation results of the Yazaki experimental solar house. Silver Jubilee Congress of ISES, Atlanta, USA.
- Jakob, U., U. Eicker, et al. (2003). Development of an optimised solar driven Diffusion-Absorption Cooling Machine. Proceedings of the ISES Solar World Congress, Goteborg(Sweden).
- Kim, D. and C. I. Ferreira (2008). "Solar refrigeration option-a state-of-the-art review." *International Journal of refrigeration* 31(1): 3-15.
- Kunze, G. (2000). "Efficient solar cooling with an improved ammonia-absorption system." *Renewable Energy World* 3(6): 111-112.
- Lamp, P. and F. Ziegler (1998). "European research on solar-assisted air conditioning." *International Journal of refrigeration* 21(2): 89-99.
- Le Pierrès, N. (2005). Procédé solaire de production de froid basse température (-28 C) par sorption solide-gaz. Procède Matériaux et Energie Solaire, Université de Perpignan: 208.
- Liu, Y., R. Wang, et al. (2005). "Experimental study on a continuous adsorption water chiller with novel design." *International Journal of Refrigeration* 28(2): 218-230.
- Lof, G. O. G. and R. A. Tybout (1974). "The design and cost of optimized systems for residential heating and cooling by solar energy." *Solar Energy* 16(1): 9-18.
- Lokurlu, A. and G. Muller (2005). Experiences with the worldwide first solar cooling system based on trough collectors combined with double effect absorption chillers. Proceedings of the International Conference on Solar Air-conditioning,, Bad Staffelstein, Germany.
- Lu, Z., R. Wang, et al. (2006). "Performance analysis of an adsorption refrigerator using activated carbon in a compound adsorbent." *Carbon* 44(4): 747-752.
- McLinden, M. and S. Klein (1983). "Simulation of an absorption heat pump solar heating and cooling system." *Solar energy* 31(5): 473-482.

- Nunez, T., W. Mittelbach, et al. (2007). "Development of an adsorption chiller and heat pump for domestic heating and air-conditioning applications." *Applied Thermal Engineering* 27(13): 2205-2212.
- Papadopoulos, A., S. Oxizidis, et al. (2003). "Perspectives of solar cooling in view of the developments in the air-conditioning sector." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7(5): 419-438.
- Richter, L. and M. Safarik (2005). Solar cooling with ammonia water absorption chillers. Proceedings of International Conference Solar Air conditioning, Bad Staffelstein, Germany.
- Rouag, A. (2017). Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption. Génie mécanique. Biskra, Mohamed kheidher: 120.
- SACE (2003). Solar Air Conditioning In Europe.
- Safarik, M., L. Richter, et al. (2005). Performance data of a small capacity absorption chiller. Proceedings of International Conference Solar Airconditioning, Bad Staffelstein, Germany.
- Saha, B., A. Akisawa, et al. (2001). "Solar/waste heat driven two-stage adsorption chiller: the prototype." *Renewable Energy* 23(1): 93-101.
- Shiran, Y., A. Shitzer, et al. (1982). "Computerized design and economic evaluation of an aqua-ammonia solar operated absorption system." *Solar Energy* 29(1): 43-54.
- Storkenmaier, F., M. Harm, et al. (2003). Small-capacity water/LiBr absorption chiller for solar cooling and waste-heat driven cooling. Proceedings of international congress of refrigeration, Washington DC, USA.
- Syed, A., M. Izquierdo, et al. (2005). "A novel experimental investigation of a solar cooling system in Madrid." *International Journal of refrigeration* 28(6): 859-871.
- Tamainot-Telto, Z. and R. Critoph (1997). "Adsorption refrigerator using monolithic carbon-ammonia pair." *International Journal of Refrigeration* 20(2): 146-155.
- Tamainot-Telto, Z. and R. Critoph (2003). "Advanced solid sorption air conditioning modules using monolithic carbon-Ammonia Pair." *Applied thermal engineering* 23(6): 659-674.
- Tchernev, D. and D. Emerson (1988). "High-efficiency regenerative zeolite heat pump." *ASHRAE transactions* 94: 2024-2032.
- Van Hattem, D. and P. A. Data (1981). "Description and performance of an active solar cooling system, using a LiBr/H₂O absorption machine." *Energy and Buildings* 3(2): 169-196.

Wang, L., H. Bao, et al. (2009). "A comparison of the performances of adsorption and resorption refrigeration systems powered by the low grade heat." *Renewable Energy* 34(11): 2373-2379.

Wang, R., J. Wu, et al. (2001). "Performance researches and improvements on heat regenerative adsorption refrigerator and heat pump." *Energy conversion and management* 42(2): 233-249.

Wang, R., T. Ge, et al. (2009). "Solar sorption cooling systems for residential applications: options and guidelines." *International Journal of Refrigeration* 32(4): 638-660.

Wang, S. and R. Wang (2005). "Recent developments of refrigeration technology in fishing vessels." *Renewable Energy* 30(4): 589-600.

Ward, D. S. and G. O. G. Lof (1975). "Design and construction of a residential solar heating and cooling system." *Solar Energy* 17(1): 13-20.

Chapitre II

Etat de l'art des techniques de rafraichissement de l'air

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'état de l'art des techniques de rafraîchissement de l'air. Ce chapitre est composé de deux parties, la première partie expose les types de la climatisation conventionnelle, tels que les systèmes à détente directe, les systèmes tout air, les systèmes tout eau et d'autres systèmes. La deuxième partie est consacrée aux différentes technologies de la climatisation solaire. Après une récapitulation, une conclusion est exposée avec des perspectives d'avenir.

1. Partie 1 : Climatisation conventionnelle

Le tableau 2.1 nous donne les différents types des climatiseurs conventionnels comme suit :

- Les systèmes à détente directe ;
- Les systèmes tout air ;
- Les systèmes tout eau ;
- Les autres systèmes.

1.1 Les systèmes à détente directe

Comme ces systèmes permettent de rafraîchir l'air à l'aide d'un évaporateur placé dans le local à climatiser, ils sont utilisés pour des petits locaux de l'ordre de 2 à 10 KW (Zotto, Larre et al. 2000). On trouve deux grands types, climatiseurs individuels et armoires de climatisation.

1.1.1 Climatiseurs individuels

On trouve dans ce type les climatiseurs suivants : climatiseurs de fenêtre, climatiseurs mobiles, climatiseurs monoblocs et climatiseurs à éléments séparés.

1.1.1.1 Les climatiseurs de fenêtre

Les avantages des climatiseurs de fenêtre sont d'un prix très compétitif, Ils sont alimentés en monophasé 230 V. Les inconvénients de ce type des climatiseurs sont À l'extérieur des bâtiments, leur esthétique n'est pas favorable, l'air du local n'est pas brassé de façon homogène, Leur niveau de pression acoustique est élevé, Ils ne permettent pas le contrôle de l'hygrométrie (Desmons 2009).

1.1.1.2 Les climatiseurs mobiles

Ils permettent la déshumidification et le refroidissement du milieu ambiant. Ils comportent un bac de récupération des condensats. Une alarme sonore et/ou visuelle indique le niveau maximum, l'appareil est alors mis automatiquement à l'arrêt lorsque le bac qui réceptionne les condensats est plein. Ces appareils doivent être raccordés avec l'extérieur par une gaine souple afin de permettre l'évacuation de la chaleur de condensation (Desmons 2009).

1.1.1.3 Les climatiseurs monoblocs

Les climatiseurs monoblocs ont pour principal avantage d'être faciles à installer, Ils sont généralement équipés de ventilateurs à plusieurs vitesses. Ils peuvent permettre le chauffage et le

		Climatiseur conventionnel		
Système à détente directe		Système tout air	Système tout eau	Autres systèmes
Climatiseurs individuels	Armoire de climatisation	Clim à débits d'air constant	Clim à débits air variable	
-clim de fenêtre		-centrales traitement air uni zone	-centrale traitement air à débit variable	
-clim mobiles		-centrales traitement air multizone	-installation à 2 conduits	
-clim monobloc				
-clim à éléments séparés		-climatiseur toiture		
			ventilo-convecteur	Modules de traitement air Pompe à chaleur Volume réfrigérant Système mixte

Tableau 2.1 : différents types des climatiseurs conventionnels

refroidissement selon la figure 2.1 (Desmons 2009).

1.1.1.4 Les climatiseurs à éléments séparés

Le gros avantage de ce système est que la principale source de bruit est à l'extérieure du local climatisé. Ce choix technologique implique généralement de grandes longueurs des tuyauteries liquide et d'aspiration ce qui induit des pertes de charge significatives, il en découle une dégradation du rendement énergétique de la machine (Desmons 2009). Les systèmes multi-split sont conçus pour associer, à partir d'une seule et même unité extérieure, 2,3 ou 4 unités intérieures (types mural, console, plafonnier) (Zotto, Larre et al. 2000).

1.1.2 Les armoires de climatisation

Elles permettent le rafraîchissement d'un ou de plusieurs locaux, le contrôle de la température et de l'hygrométrie de l'air ambiant. Ces condenseurs sont équipés de condenseurs à air ou à eau (Zotto, Larre et al. 2000). On trouve les différentes variantes possibles suivantes (Desmons 2009) :

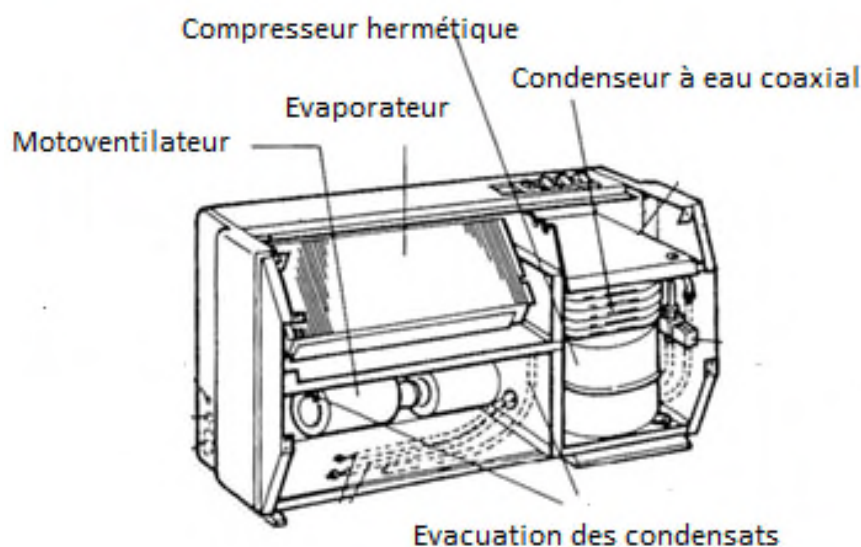


Fig 2.1 : Climatiseur monobloc (Desmons 2009).

Refroidissement seul à partir d'une batterie à détente directe ; Refroidissement seul à partir d'une batterie à eau glacée ; Refroidissement et chauffage.

1.2 Les systèmes tout air

Ils contiennent les systèmes à débit d'air constant et les systèmes à débit d'air variable.

1.2.1 Systèmes de climatisation à débit d'air constant

Ils contiennent centrales de traitement d'air uni-zone, centrales de traitement d'air multizones et les climatiseurs de toiture(ROOFTOP).

1.2.1.1 Centrales de traitement d'air uni-zone

Dans ce type d'installation l'air est traité dans une centrale puis distribué par un réseau de conduits à un ou plusieurs locaux (Recknagel 1995). Les éléments constituant ce type d'installation sont donnés par la figure 2.2.

1.2.1.2 Centrales de traitement d'air multizones

Centrales de traitement d'air uni-zone présentent l'inconvénient de distribuer de l'air aux caractéristiques identiques à tous les locaux traités. Cela n'est pas possible que lorsque les apports de chaleur des locaux raccordés sont les mêmes (Recknagel 1995).

Les centrales de traitement d'air multizones permettent la climatisation de locaux dont les apports de chaleur sont différents(Zotto, Larre et al. 2000)

1.2.1.3 Les climatiseurs de toiture(ROOFTOP)

Le Roof-Top est un appareil de climatisation et de chauffage monobloc, qui peut être, selon les cas, positionné en toiture ou au sol. Ils sont le plus souvent utilisés pour la climatisation de locaux de grande surface (Zotto, Larre et al. 2000)

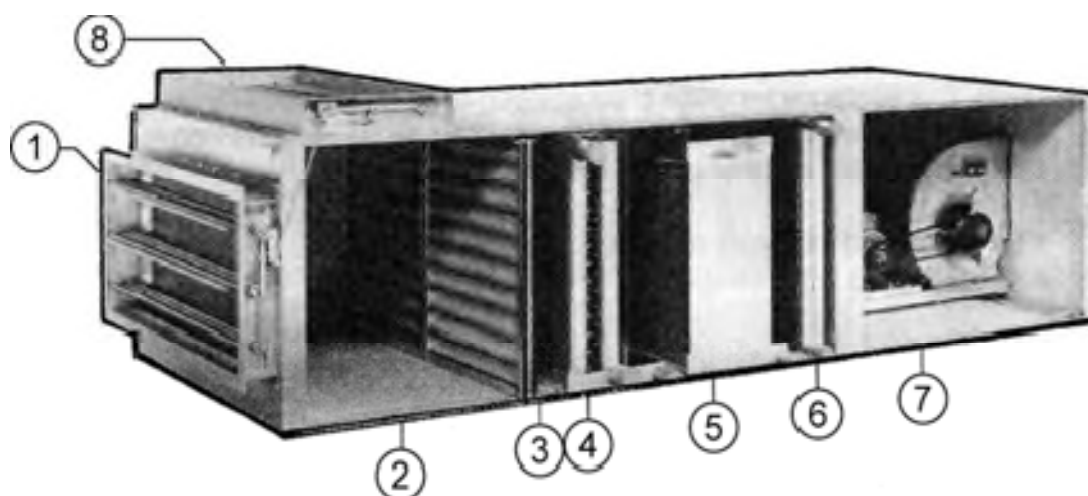


Fig. 2.2 : Centrale de traitement d'air (Desmons 2009).

La légende : 1 : Registre d'air neuf ; 2 : Boîte de mélange ; 3 : Filtre ; 4 : Batterie froide ; 5 : Humidificateur ; 6 : Batterie de chauffage ; 7 : Bloc ventilateur ; 8 : Registre d'air recyclé.

1.2.2 Systèmes de climatisation à débit d'air variable

Les Systèmes de climatisation à débit d'air variable contiennent les centrales de traitement d'air à débit variable et les installations à 2 conduits.

1.2.2.1 Les centrales de traitement d'air à débit variable

Dans les centrales de traitement d'air à débit variable, c'est le débit d'air qui change et la température qui est constante (Fong, Chow et al. 2009). Le principe de ce système est d'adapter le débit de soufflage aux charges variables des locaux à traiter (Zotto, Larre et al. 2000). Les avantages des centrales de traitement d'air à débit variable sont : 1) frais d'exploitation très compétitifs, 2) frais d'investissement faibles (Recknagel 1995).

1.2.2.2 Installation à 2 conduits

Le principe de ces systèmes est de distribuer à grande vitesse de l'air chaud et de l'air froid dans deux conduits distincts et de les mélanger dans une boîte de mélange généralement disposée en faux plafond au niveau de chaque local (Zotto, Larre et al. 2000). Chaque boîte de mélange est asservie à un thermostat d'ambiance permettant la prise en compte des besoins du local (Desmons 2009). Le principe de ce type est donné sur la figure. 2.3 (Fong, Chow et al. 2009).

1.3 Les systèmes tout eau ventilo-convecteurs

La climatisation centrale à eau glacée est basée sur le principe de la production d'eau glacée par des systèmes frigorifiques et la distribution de cette eau par réseau hydraulique qui atteint des appareils terminaux assurant la climatisation dans les locaux à traiter. Ces terminaux généralement sont des ventilo-convecteurs. Ces appareils terminaux assurent les fonctions suivantes (Desmons 2009) : Le refroidissement ; le chauffage et la filtration. Les systèmes tout eau par ventilo-convecteurs (2,3 ou 4 tuyaux) installés dans les locaux sont équipés d'une batterie ou de deux batteries (chaude ou froide) (Zotto, Larre et al. 2000).

Le mélange air neuf (air extérieur) et air recyclé (air intérieur) est filtré, chauffé en hiver ou refroidi en été, puis pulsé (Zotto, Larre et al. 2000). Les ventilo-convecteurs se composent principalement d'un carter contenant (Recknagel 1995) : Un ventilateur avec moteur le plus souvent à vitesse variable, Un échangeur de chaleur pour eau chaude et eau froide, Un filtre, Une grille d'aspiration et une autre de soufflage. L'échangeur de chaleur peut être raccordé par un système à 2, 3 ou 4 conduits au réseau d'eau du bâtiment (Recknagel 1995). La figure.2.4 nous donne le schéma d'un ventilo convecteur permettant le chauffage, le refroidissement, la filtration et l'admission d'air neuf.

1.4 Autres systèmes :

Les autres systèmes traités dans ce chapitre sont i) Modules de traitement d'air (MTA), ii) les pompes à chaleur, iii) Les systèmes mixtes les éjecto-convecteurs, iv) Débits de réfrigérant variable (VRV).

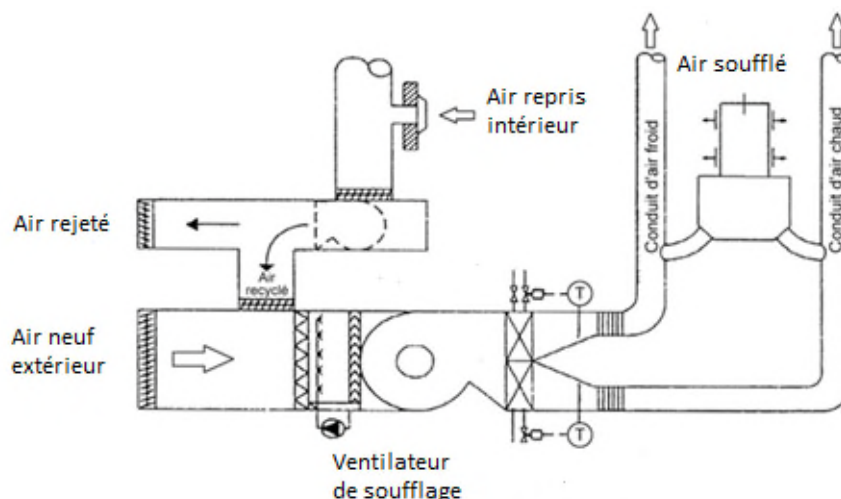


Fig. 2.3 : Schéma de principe d'une installation à 2 conduits(Zotto, Larre et al. 2000; Desmons 2009).

1.4.1 Modules de traitement d'air(MTA)

Ces modules de traitement d'air(MTA) sont équivalents aux ventilo-convecteurs 4 tuyaux mais sont placés dans un local technique par étage(Zotto, Larre et al. 2000). Il est raccordé à des diffuseurs linéaires par deux gaines souples permettant l'admission de l'air traité et la reprise. Un MTA remplit les fonctions suivantes: Filtration ; chauffage par batterie à eau chaude; refroidissement par batterie à eau glacée ; mélange de l'air du local avec de l'air neuf préalablement traité par une centrale ; soufflage et reprise de l'air par gaines souples (Desmons 2009).

1.4.2 Les pompes à chaleur

Une pompe à chaleur est un dispositif permettant de transférer une quantité de chaleur du milieu froid, vers un milieu chaud. Selon le but du dispositif de pompage, une pompe à chaleur peut soit être considérée comme un système de chauffage, soit être considérée comme un système frigorifique. Lorsque le but du dispositif de pompage est à la fois de chauffer et de refroidir, le système est alors considéré comme une thermo-frigo-pompe.

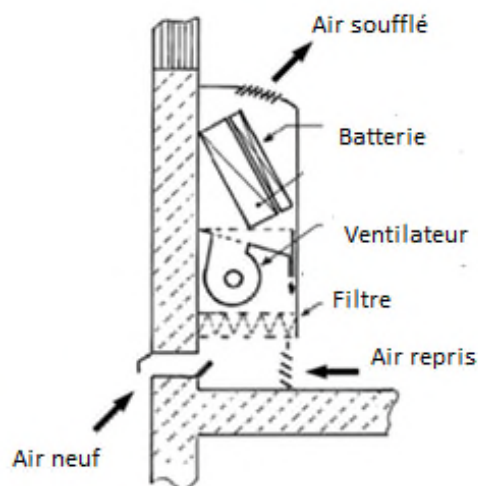


Fig. 2.4 : Schéma de principe d'un ventilo-convecteur (Desmons 2009).

On trouve cinq types des pompes à chaleur i) pompe à chaleur air/air, ii) Pompe à chaleur eau/eau, iii) Pompes à chaleur sol/air, iv) Pompe à chaleur air/eau et v) Pompe à chaleur sol/eau.

Les pompe à chaleur air/air sont plus coûteuses à l'installation, par contre leur coefficient de performance énergétique est bon et relativement stable (Desmons 2009). La figure 2.5 donne le schéma de principe d'une pompe à chaleur air / air réversible.

Les pompes à chaleur air/eau sont performantes à mi-saison. Par contre, leur effet calorifique devient faible aux basses températures extérieures (Desmons 2009). La figure 2.6 donne le schéma de principe d'une pompe à chaleur eau/air.

Les pompes à chaleur eau/eau présentent de bons coefficients de performance énergétique, elles permettent le stockage d'eau glacée (fluide frigoporteur) ou d'eau chaude (fluide caloporteur). La figure 2.7 donne le principe d'une pompe à chaleur eau/eau réversible. Les pompes à chaleur sol/air sont relativement coûteuses à l'installation. Elles présentent l'avantage de conserver un coefficient de performance énergétique en été comme en hiver. Pour les pompes à chaleur sol/eau on signale que le sol est un bon accumulateur de chaleur puisque les températures qui y règnent tout au long de l'année sont relativement constantes. Des capteurs enterrés dans lesquels circule de l'eau glycolée prélèvent la chaleur du sol et le véhicule vers l'évaporateur de la pompe à chaleur (Desmons 2009).

1.4.3 Les systèmes mixtes : les éjecto-convecteurs

Les éjecto-convecteurs avec échangeurs de chaleur alimentés en eau chaude ou froide sont disposés sous les fenêtres. L'air primaire (air de ventilation) alimente les éjecto-convecteurs par l'intermédiaire d'une installation centralisée à grande vitesse (Fong, Chow et al. 2009). Les éjecto-convecteurs sont des appareils terminaux raccordés hydrauliquement et aérauliquement. Les Avantages des éjecto convecteurs sont maintenance aisée du fait de l'absence de ventilateur, appareils très compacts, apport d'air neuf nécessaire assuré, réseau aéraulique compact du fait des vitesses élevées, et enfin il garantit l'hygrométrie relative grâce à la régulation par point de rosée au niveau de la centrale. Les inconvénients des éjecto-convecteurs sont i) le niveau sonore élevé et ii) le coût d'investissement élevé. La figure. 2.8 nous donne une vue d'ensemble d'une installation à éjecto-convecteurs.

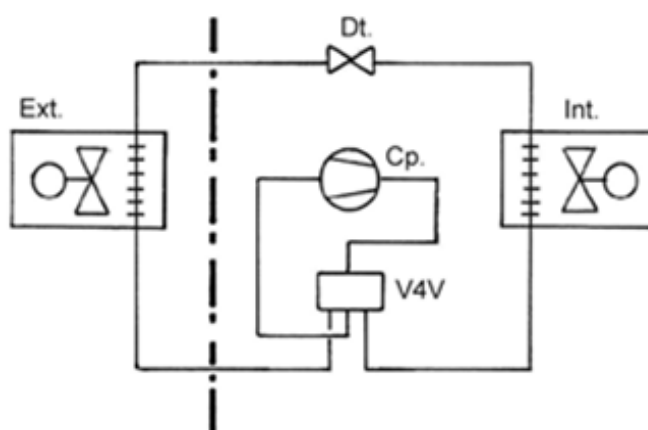


Fig. 2.5 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur air / air réversible (Desmons 2009).

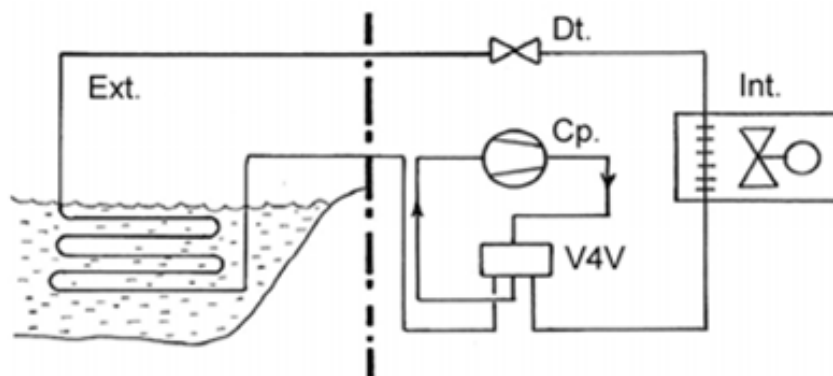


Fig. 2.6 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur réversible eau/air.(Desmons 2009)

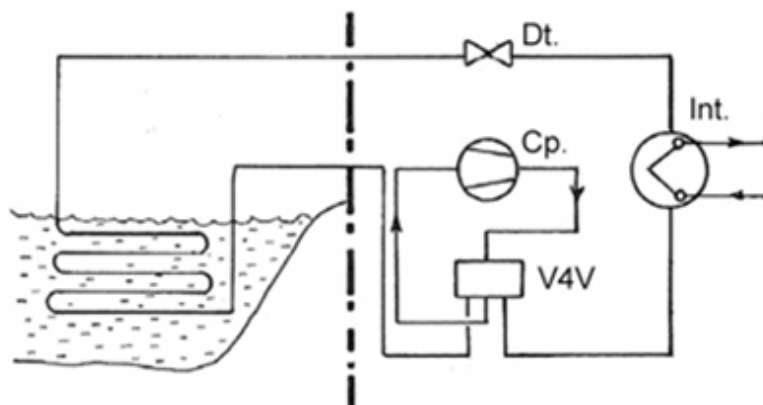


Fig. 2.7 : Schéma de principe d'une pompe à chaleur eau/eau réversible.(Desmons 2009)

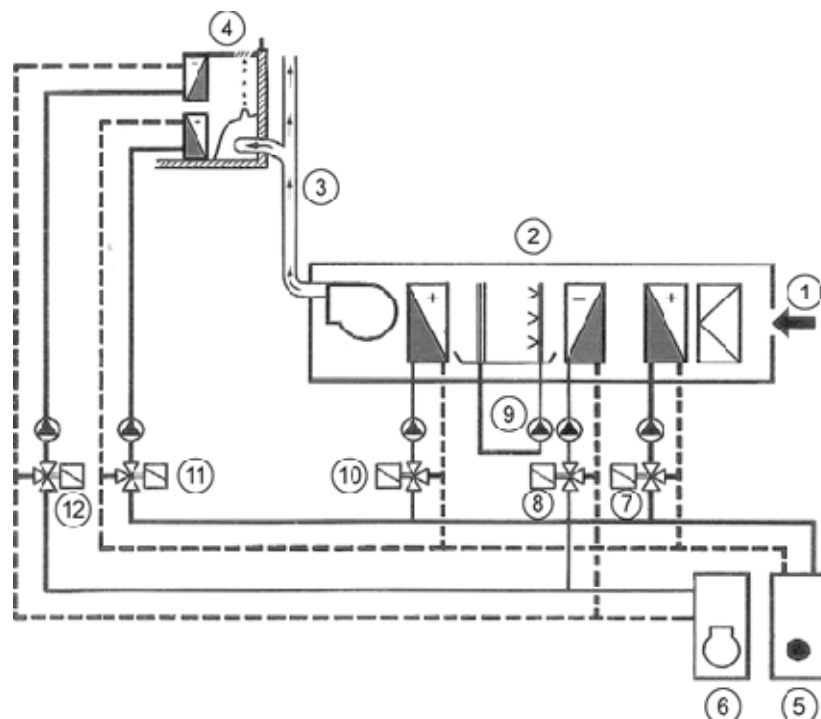


Fig. 2.8 : Vue d'ensemble d'une installation à éjecto-convecteurs (Desmons 2009).

La légende : 1 : air neuf ; 2 : centrale de traitement de l'air inducteur ; 3 : gaine d'air inducteur ; 4 : éjecto-convecteur ; 5 : chaudière (production de l'eau chaude) ; 6 : groupe à eau glacée ; 7 : vanne 3 voies de la batterie de préchauffage ; 8 : Vanne 3 voies de la batterie à eau glacée ; 9 : laveur adiabatique ; 10 : Vanne 3 voies de la batterie de réchauffage ; 11 : Vanne 3 voies de la batterie à eau chaude de l'éjecto-convecteur ; 12 : Vanne 3 voies de la batterie à eau glacée.

1.4.4 Volume réfrigérant variable (VRV)

VRV signifie volume de réfrigérant variable, DRV signifie débit de réfrigérant variable. Les 2 abréviations représentent la même technologie. Des machines sont définies comme étant VRV Inverter 2 ou 3 tubes. Inverter est le nom de la technologie utilisée pour faire varier la puissance frigorifique des compresseurs. La variation de la puissance frigorifique s'accompagne d'une variation de la puissance électrique absorbée. cette technologie permet d'adapter la puissance instantanée à l'écart mesure – consigne. La régulation de puissance des unités intérieures est réalisée par variation du débit de fluide frigorigène en fonction des températures ambiantes (Zotto, Larre et al. 2000).

2. Partie 2 : Climatisation Solaire

Les Différents types de climatisation solaire sont donnés par le tableau 2.2. La climatisation solaire présente plusieurs avantages très importants tels que (Shashi Reddy 2011) :

Le rayonnement solaire plus intense, plus nous avons besoin au refroidissement de air. La capacité de refroidissement solaire de climatisation sera plus aussi. Ceci est l'état idéal de l'harmonie entre la machine et la nature.

- a. Les machines solaires utilisent généralement des fluides frigorigènes respectueux de l'environnement, dans la plupart des cas, l'eau est utilisée qui n'a pas d'effet de serre.
- b. Machines solaires ont peu de pièces mobiles,
- c. Une longue durée de vie si conçu Correctement,
- d. Le réseau électrique est également soulagé,
- e. Les machines solaires conduit à une nouvelle réduction des émissions,

Climatisation solaire						
Climatisation solaire électrique	Climatisation solaire thermique					
	<table border="1"> <tr> <td>absorption</td> <td>adsorption</td> <td>dessiccation</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Dessiccation solide Dessiccation liquide</td> </tr> </table>	absorption	adsorption	dessiccation		
absorption	adsorption	dessiccation				
		Dessiccation solide Dessiccation liquide				

Tableau 2.2 : Différents types de climatisation solaire

f. Les émissions sonores sont plus faibles puisque la plupart des machines fonctionnent sans compresseurs.

Mais d'autres part la climatisation solaire présente trois inconvénients sont donnés comme suit: (Shashi Reddy 2011). i) Machines solaires ne sont pas efficaces, ii) les coûts sont élevés et iii) de nombreux systèmes ont beaucoup d'entretien.

A partir du flux de l'énergie solaire il y a deux voies à suivre : Conversion électrique par cellules photovoltaïques PV ou Conversion thermique(Wang, Bao et al. 2009). Les deux familles de systèmes solaires possibles sont : i) Alimentation d'un groupe à compression classique par des panneaux photovoltaïques et ii) Production de chaleur par des capteurs solaires thermiques pour faire fonctionner une machine frigorifique.

2.1 Climatisation Solaire Electrique (Photovoltaïque)

Un système Photovoltaïque air conditionné est constitué de cellules photovoltaïques fournissant de l'énergie électrique pour faire fonctionner un système de compression de vapeur(Shashi Reddy 2011)

Les systèmes les plus souvent envisagés sont les cycles thermodynamiques à compression mécanique de vapeur qui fonctionne par l'électricité produite à partir de l'énergie solaire photovoltaïque(Rouag 2017). La figure 2.9 nous donne le schéma de principe d'un climatiseur solaire électrique à compression de vapeur. Dans la climatisation de bâtiments, il faut soit prévoir un stockage d'énergie, soit prévoir un système d'appoint d'énergie. Généralement, l'énergie électrique prélevée du réseau(Rouag 2017). Il y a deux obstacles pour la commercialisation de ce type de systèmes i) les systèmes devraient être équipés d'un moyen de faire face à la variation de taux de production d'électricité comme la batterie électrique, ii) le prix d'un panneau solaire photovoltaïque devrait être diminué en concurrence avec d'autres technologies de refroidissement solaire(Kim and Ferreira 2008; Fong, Chow et al. 2009). Les systèmes à compression de vapeur utilisent des fluides frigorigènes, contribuant ainsi d'une façon importante à la dégradation de la couche d'ozone(Allab 2008).

2.1.1 Climatiseur solaire split DC

Parmi les avantages de ce système sont que, après le panneau solaire la puissance est changée en courant alternatif, par l'intermédiaire d'un inverseur, au large des produits standards-peuvent être utilisés, même pour les très petits systèmes. La puissance en excès peut être facilement utilisée dans le réseau interne, ou vendue au réseau public.

Un système à compression de vapeur classique déjà existante, même si décentralisée, peut facilement être converti en un système solaire assisté par simple addition des cellules photovoltaïques au réseau.

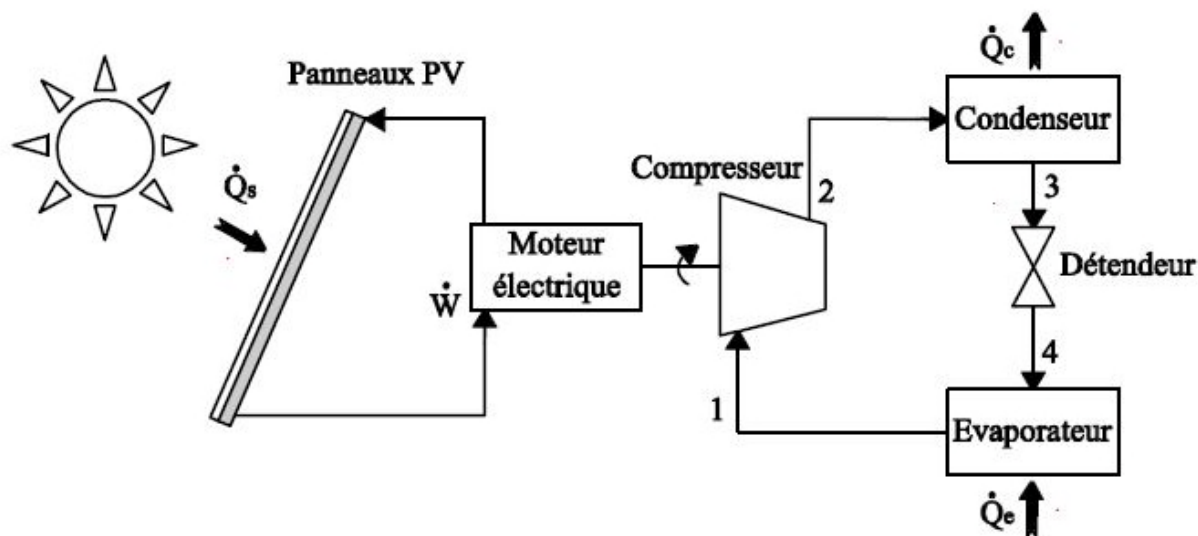


Fig. 2.9 : Schéma de principe d'un climatiseur solaire électrique à compression de vapeur(Kim and Ferreira 2008; Fong, Chow et al. 2009)

2.2 Climatisation solaire thermique

Les systèmes solaires thermiques utilisent la chaleur solaire plutôt que l'électricité solaire sont i) Refroidissement solaire par absorption ii) Refroidissement solaire par adsorption et iii) Refroidissement Solaire par dessiccation.

2.2.1 Refroidissement solaire par absorption

Deux grands cycles de refroidissement solaire par absorption peuvent être relevés : cycle d'absorption bromure de lithium-eau et cycle d'absorption eau-ammoniac(Al-Alili, Hwang et al. 2014). Le système d'absorption à 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(Henning 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(Henning 2007; Kim and Ferreira 2008).

Le couple H₂O-LiBr est préférable à la climatisation, Le système optimal est déterminé principalement par les performances technico-économiques en termes de coûts par unité produite d'énergie de refroidissement (Djebiret 2012). La technologie d'absorption actuelle peut fournir diverses machines d'absorption avec COP allant de 0,3 à 1,2. Choix d'une machine de refroidissement par absorption dépend principalement de la performance du capteur solaire utilisé(Kim and Ferreira 2008). L'évolution des systèmes d'absorption à gaz au cours des dernières années, principalement aux Etats-Unis et le Japon, pour les refroidisseurs LiBr-eau, ont mis à disposition dans les systèmes à double effet sur le marché avec le COP dans la gamme 1,0-1,2.

Systèmes triple effet sont encore en cours de développement, mais proche du marché, avec un COP de 1,7 (Balaras, Grossman et al. 2007).

Aujourd'hui, aussi quelques systèmes commerciaux de petite puissance, par exemple, inférieure à 30 kW, sont disponibles. Les refroidisseurs à absorption sont principalement appliqués si une source de chaleur 'pas cher' est disponible. Pour les applications de conditionnement d'air les refroidisseurs à absorption utilisant principalement le couple Eau-LiBr sont appliqués. L'eau est le réfrigérant et LiBr est le sorbant (Balaras, Grossman et al. 2007). Dans des conditions normales de fonctionnement les machines à simple effet ont généralement besoin des températures d'entraînement de la chaleur comprises entre 80-100 ° C et le COP atteindre environ 0,7. Deux générateurs travaillent à des températures différentes sont actionnés en série, de sorte que la chaleur de condensation du réfrigérant désorbé du premier générateur est utilisée pour chauffer le deuxième générateur. Ainsi un COP supérieur dans la gamme de 1,1 à 1,2 soit atteint. Cependant, les températures de conduite de l'ordre de 140-160 ° C sont généralement nécessaires pour conduire ces refroidisseurs. Ce type de systèmes est uniquement disponible dans la gamme de grandes capacités d'environ 100 kW et au-dessus (Henning 2007).

2.2.2 Refroidissement solaire à adsorption

Les avantages de refroidisseur à adsorption Eau/gel de silice ou Eau /Zéolite : IL n'y a pas de risque de cristallisation et par conséquent pas de limitation de la température. IL n'y a pas de pompe à solution interne et la consommation d'électricité est réduite à un minimum. Système de climatisation à adsorption carbone Activé / méthanol a été développé par Wang en 2001 à être alimenté par des sources de chaleur avec des températures proches de 100 ° C (Recknagel 1995). Le système a deux adsorbants avec 26 kg de carbone à l'intérieur de chacun d'eux et utilisé du méthanol comme réfrigérant, Le COP et le SCP de ce système ont été fortement influencés par le temps de cycle. Avec un temps de cycle de 30 minutes conduit à un COP de 0,15 et une puissance de refroidissement de 3,84 kW, avec un temps de cycle de 60 minutes conduit à un COP de 0,21 et la puissance de refroidissement de 3,03 kW. Dans les deux cas, la température d'évaporation était proche de 6 °C (Recknagel 1995).

La principale différence par rapport aux systèmes d'absorption est que deux ou plusieurs adsorbants sont nécessaires afin d'assurer un fonctionnement continu (Shashi Reddy 2011). Les refroidisseurs d'adsorption sont plus chers et leur disponibilité commerciale est encore limitée. En principe, leur COP est inférieur à celui des machines à absorption, mais ils peuvent utiliser la chaleur à basse température, ils peuvent ainsi être entraînés par des capteurs solaires plus efficaces (Henning 2007). Refroidisseurs d'adsorption semblent être comparables à des refroidisseurs à absorption en termes de COP maximale réalisable. Mais leurs densités de puissance de refroidissement sont beaucoup plus faibles. La technologie d'adsorption peut être compétitive dans les grands systèmes de refroidissement solaire où sa faible densité de puissance n'est pas un problème. Pour les systèmes de refroidissement solaire petit ou moyen, il a tendance à être trop encombrant et coûteux (Rouag

2017). La surface spécifique moyenne pour les installations à adsorption est de 3,49 m²/kWf alors que pour l'absorption elle est de l'ordre de 2,77 m²/kWf(Le Pierrès 2005). Les machines sont aussi plus volumineuses à cause de la faible conductivité thermique des absorbants(Allab 2008).

La simplicité du procédé, la large gamme de températures de chauffage et d'autres avantages tels que le fonctionnement silencieux pourrait conduire à un grand nombre de petites applications de climatisation assistée solaires. La recherche et le développement de nouveaux travaux sur les machines de petite taille d'adsorption est nécessaire afin de réduire leur volume et d'augmenter la densité de puissance(Shashi Reddy 2011).

2.2.3 Climatisation Solaire Par Dessiccation.

Les systèmes de climatisation solaire par dessiccation sont des systèmes fonctionnent directement par déshumidification et refroidissement de l'air des locaux. Ils demandent des faibles températures d'entrées (45 à 95°C). L'eau est utilisée comme réfrigérant et en contact direct avec l'atmosphère. Pour cela, on peut utiliser des simples capteurs à air(Le Pierrès 2005).

La base de cycle de refroidissement ouvert sorption : N'importe quel type de cycle de refroidissement ouvert sorption est basé sur une combinaison d'un refroidissement par évaporation avec déshumidification de l'air par un agent desséchant (Henning 2007).

Les systèmes à dessiccation sont des systèmes ouverts utilisant l'eau, en contact direct avec l'air, comme réfrigérant. Le cycle de rafraîchissement est une combinaison de rafraîchissement évaporatif avec une déshumidification par un matériau hygroscopique, qui peut être aussi bien liquide que solide(Kim and Ferreira 2008). Le terme "ouvert" signifie que le réfrigérant est évacué du système après qu'il ait produit son effet refroidissant, et qu'une nouvelle quantité de réfrigérant doit être injectée, le tout dans une boucle ouverte. Seule l'eau peut être utilisée comme réfrigérant puisqu'elle est en contact direct avec l'air ambiant. Les systèmes disponibles utilisent de l'eau, comme déshydratant, qui absorbe un sorbant comme le gel de silice, alumine activée, la zéolite, LiCl et LiBr (Kim and Ferreira 2008; Fong, Chow et al. 2009). Ces systèmes ont une double fonction : rafraîchissement et renouvellement d'air hygiénique. Par contre, dans les autres systèmes à cycle fermé, et pour des raisons sanitaires il faut assurer un apport de l'air neuf pris de l'extérieur dans le local(Rouag 2017).

La température de la source chaude nécessaire pour le fonctionnement du système est entre 45 et 95°C. Le COP nominal des systèmes de dessiccation est de l'ordre de 0,5 à des valeurs supérieures à 1(Rouag 2017).

2.2.3.1 Climatisation Solaire Par Dessiccation solide

La plupart des systèmes de dessiccation actuellement sur le marché utilisent un matériau de sorption solide tel que le gel de silice. Etant donné que l'agent déshydratant solide ne peut pas être mis en circulation par pompage, ces systèmes utilisent généralement un lit rotatif portant le matériau

sorbant, appelé «roue de dessiccation», pour permettre un fonctionnement continu (Balaras, Grossman et al. 2007).

L'application actuelle de ces systèmes reste faible et de l'ordre de 10 à 15% des installations existantes. Puisque le fonctionnement est basé sur le refroidissement évaporatif, il est évident que ces systèmes sont destinés aux climats secs et chauds (Rouag 2017). La figure 2.10 montre un exemple de système de refroidissement solaire à déshydratant solide. 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 évaporateur 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 ($B \rightarrow C$). Le résultat d'air chaud et humide est aussi chauffé à une température élevée par la chaleur du soleil dans le serpentin de chauffage ($C \rightarrow D$). L'air chaud et humide gagne en fin la roue de déshydratant avant qu'il est rejeté à l'air ambiant ($D \rightarrow E$). De l'autre côté, l'air frais 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 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 refroidissement est 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 inférieure à T_B , qui, à son tour, est en fonction de retour d'air climatisé au point A (Kim and Ferreira 2008; Guiren and Djeddar 2009). D'un point de vue thermodynamique, en principe, le COP d'un système à dessiccation ouvert est similaire à son homologue fermé. Par exemple, un COP de 0,7 a été trouvé avec un système de refroidissement à déshydratant solide. Un COP similaire a été également signalé pour une technologie à dessiccation solide. Mais dans la pratique, le COP varie largement selon les conditions d'exploitation (Kim and Ferreira 2008; Guiren and Djeddar 2009). Un système de refroidissement par déshydratant est en fait un système de conditionnement d'air. La déshumidification à dessiccation offre un contrôle de l'humidité plus efficace. Quand il y a une grande demande de déshumidification, la solution solaire de déshumidification dessicatif peut être une très bonne option (Kim and Ferreira 2008; Guiren and Djeddar 2009). Les systèmes ouverts les plus courants sont les systèmes de refroidissement à dessiccation avec une roue de déshumidification rotatif et un sorbant solide (Balaras, Grossman et al. 2007). Les avantages dessiccation solide sont donnés comme suit (Wang, Ge et al. 2009) :

- Le coût de fonctionnement peut être considérablement réduit en raison de l'utilisation de l'énergie thermique.
- Le coût initial pour le système de refroidissement déshydratant peut également être réduit en comparaison avec d'autres systèmes de sorption.
- Ce système est très fiable et facile pour l'entretien.

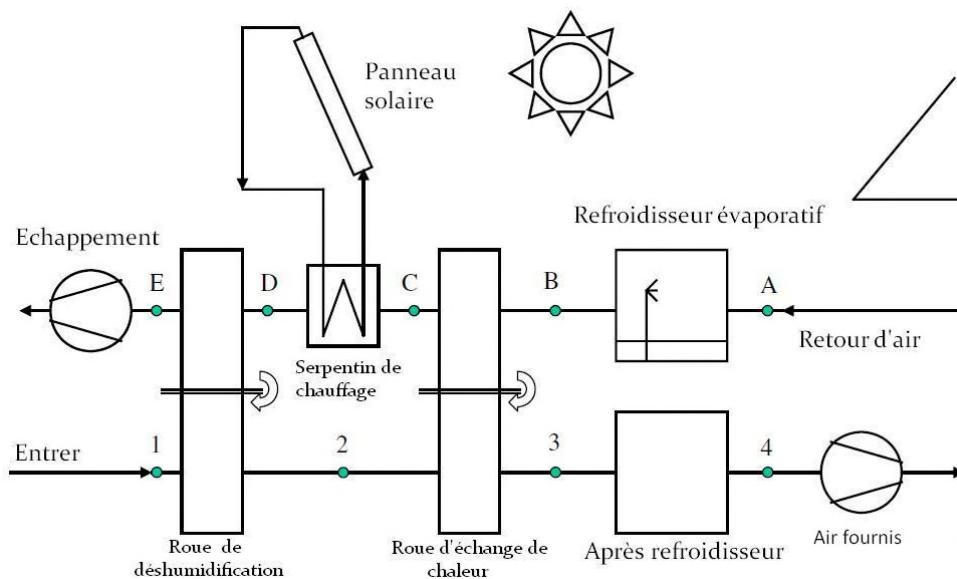


Fig 2.10 : Refroidissement à dessiccation solide avec capteur solaire (Kim and Ferreira 2008)

- Le Système de refroidissement à déshydratant solide est une bonne alternative au système classique à compression de vapeur (VC) en raison de son économie d'énergie et les caractéristiques sans CFC.
- Si un chauffage d'appoint est utilisé, un COP thermique d'environ 1,0 peut encore être atteint (COP solaire au-dessus de 0,4 à 0,6).
- Par rapport au système dessicant liquide, le système sera moins sujet à la corrosion.

Le principal problème pourrait être la grande taille de la CTA. (Wang, Ge et al. 2009).

Afin de rendre le système de refroidissement de déshydratant Solide plus adapté pour les applications résidentielles dans le marché futur, les lignes directrices suivantes sont proposées (Wang, Ge et al. 2009) :

- Développer de nouveaux matériaux déshydratant pour obtenir une meilleure capacité de déshumidification à une température entraînée inférieure.
- Utiliser un capteur solaire de faible coût,
- Proposer un nouveau mode de circulation dans le système de refroidissement solide déshydratant pour abaisser la température de régénération et de réduire la taille du système.
- Déterminer des stratégies optimales de fonctionnement à diverses conditions et des moyens de mise en œuvre des stratégies.

2.2.3.2 Climatisation Solaire Par Dessiccation liquide

Ils peuvent utiliser l'eau / chlorure de calcium ou de l'eau / chlorure de lithium. Ces systèmes ont une très faible température typique de conduite de 50 à 70 ° C (Shashi Reddy 2011). Les systèmes

employant des matériaux de sorption liquides sont moins étendues mais également disponible sur le marché (Shashi Reddy 2011). Ils ont plusieurs avantages tels que la possibilité de contenir, une pompe et un filtrage du dessiccant, fraîche lors de l'absorption et de la chaleur lors de la désorption, la possibilité de stockage d'énergie au moyen de solutions concentrées hygroscopiques, ainsi que des qualités bactériostatiques (Balaras, Grossman et al. 2007). Le schéma de principe d'un système de refroidissement à dessiccation liquide est présenté par la figure 2.11. Dans le déshumidificateur de la figure la solution concentrée est pulvérisée à travers le point A sur le serpentin de refroidissement au point B et est en même temps l'air ambiant point 1 est injecté. L'air ambiant sera déshumidifié par la solution concentrée pulvérisée et refroidi par le serpentin de refroidissement. Comme résultat on trouve l'air sec et frais au point 2 et une solution diluée au point C.

Dans le régénérateur, la solution diluée provenant de déshumidificateur est vaporisée à travers le serpentin de chauffage au point E qui est alimenté par des capteurs solaires et l'air ambiant au point 4 est soufflé à travers la solution de flux. Lorsque la solution est chauffée, une partie de l'eau de la solution diluée est extraite et transportée par l'air. La solution concentrée est perçue au point F, l'air humide chaud est rejeté à l'air ambiant au point 5. Un échangeur de chaleur de récupération préchauffe la fraîcheur de la solution diluée du déshumidificateur en utilisant la chaleur perdue de la solution chaude concentrée du régénérateur (Kim and Ferreira 2008; Guiren and Djeddar 2009). Les lignes directrices suivantes sont conseillées dans la construction du système de refroidissement à dessiccation liquide solaire pour utilisations résidentielles: (Wang, Ge et al. 2009).

- Faible coût de capteur solaire.
- La stratégie de contrôle approprié pour coordonner la concentration de déshydratant liquide et stockage de l'énergie.
- Unité de refroidissement sensible choisie en fonction du climat et du coût initial.
- Un système d'énergie hybride utilise la pompe à chaleur et l'énergie solaire est recommandée.
- Ce système contrôler l'humidité et la température de l'air et fournir de l'air de haute qualité.
- Ce système utilise efficacement une source de chaleur à basse température.

2.3 Installations de climatisation solaire en Europe

Aujourd'hui, environ 70 systèmes sont installés en Europe qui utilisent des capteurs solaires thermiques pour la climatisation. La plupart de ces systèmes ont été réalisés en Allemagne ou en Espagne selon la figure 2.12.

La puissance de refroidissement de tous les systèmes installés résume à environ 6,3 MW, et la superficie totale des capteurs à environ 17500 m². Comme on le voit sur la figure 2.13 environ 59% des systèmes utilisent des refroidisseurs à absorption. Dans environ 11% des installations refroidisseuses d'adsorption est installé et dans environ 23% des installations d'un système de

refroidissement déshydratant à roue de sorption. Seulement environ 6% de toutes les installations utilisent la technologie de déshydratant liquide qui montre que cette technologie est encore moins développée sur le plan commercial.

En termes de capacité de refroidissement de la distribution semble quelque peu différente, puisque 25% de la capacité de refroidissement installée totale utilise des refroidisseurs d'adsorption, à savoir les installations utilisant l'adsorption ont généralement une grande capacité de refroidissement.

Les deux plus grands systèmes installés aujourd'hui utilisent des refroidisseurs d'adsorption avec capacité de refroidissement de 350 kW; le premier en Grèce et le deuxième en Augsburg(Henning 2007)

3. Conclusion

La climatisation solaire peut conduire à des économies d'énergie primaire remarquables, si les systèmes sont bien conçus, conditions de réaliser des économies d'énergie primaire, une dimension de capteur suffisante et une taille de stockage d'énergie sont appropriées (Henning 2007). Il est essentiel de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire thermique en fournissant d'autres services tels que le système de chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire avec la chaleur solaire, autant que possible afin d'optimiser l'économie d'énergie. Aujourd'hui, environ 70 systèmes de climatisation à base de capteurs solaires sont installés en Europe. Cependant, Henning (2007) souligne que ces technologies sont encore à un stade précoce de développement.

Les données de terrain et de l'expérience acquise des installations solaires, dans des conditions réelles de fonctionnement, ont montré qu'il existe des lacunes fréquentes dans la conception et la partie contrôle du système. En outre, dans certains cas, les économies d'énergie attendues par les systèmes

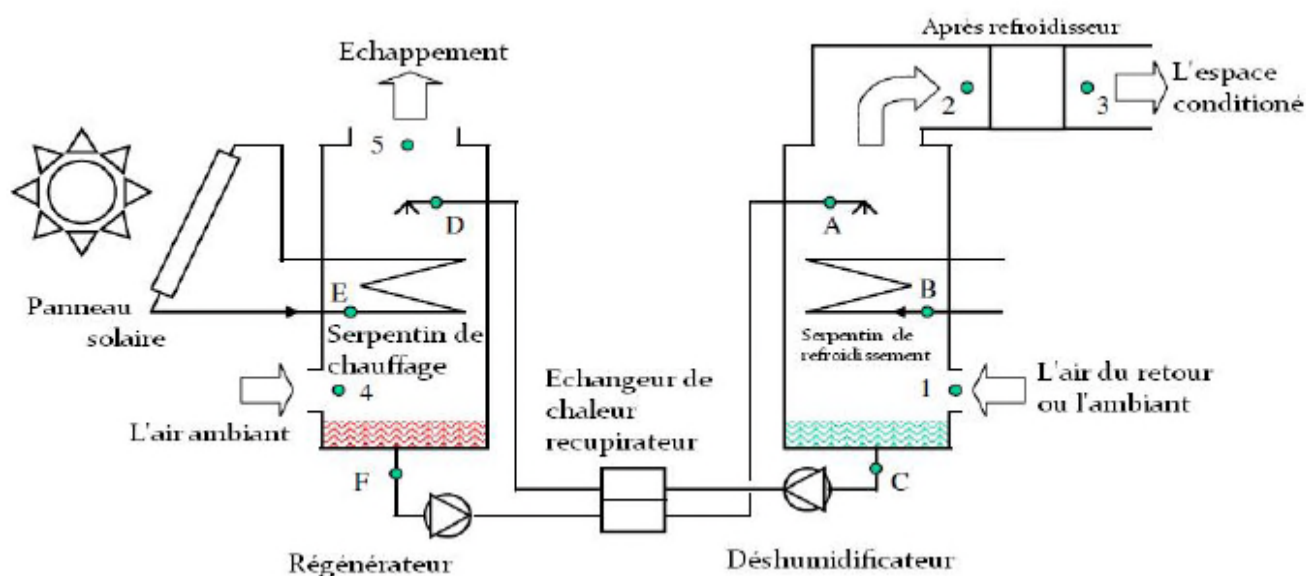


Fig 2.11 : Refroidissement à dessiccation liquide avec capteur solaire (Kim and Ferreira 2008).

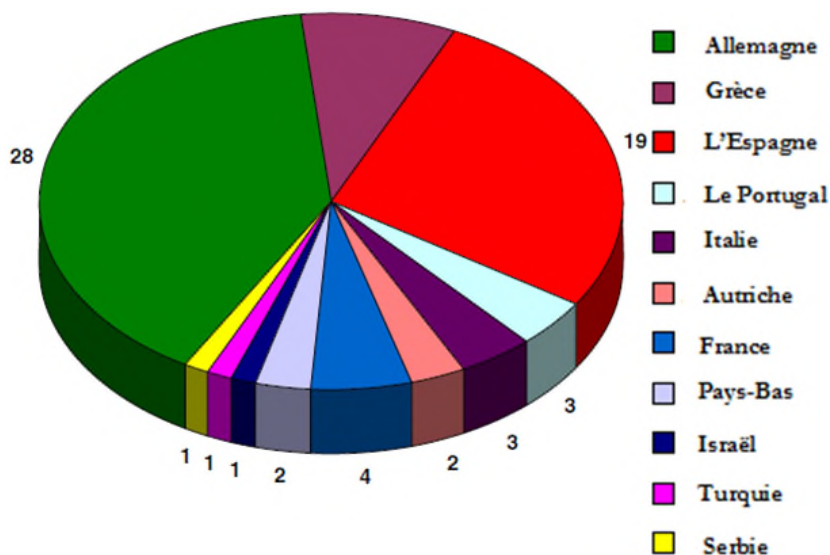


Fig. 2.12 : Aperçu sur la distribution des systèmes, qui utilise des capteurs solaires thermiques pour la climatisation, installés en Europe (Henning 2007).

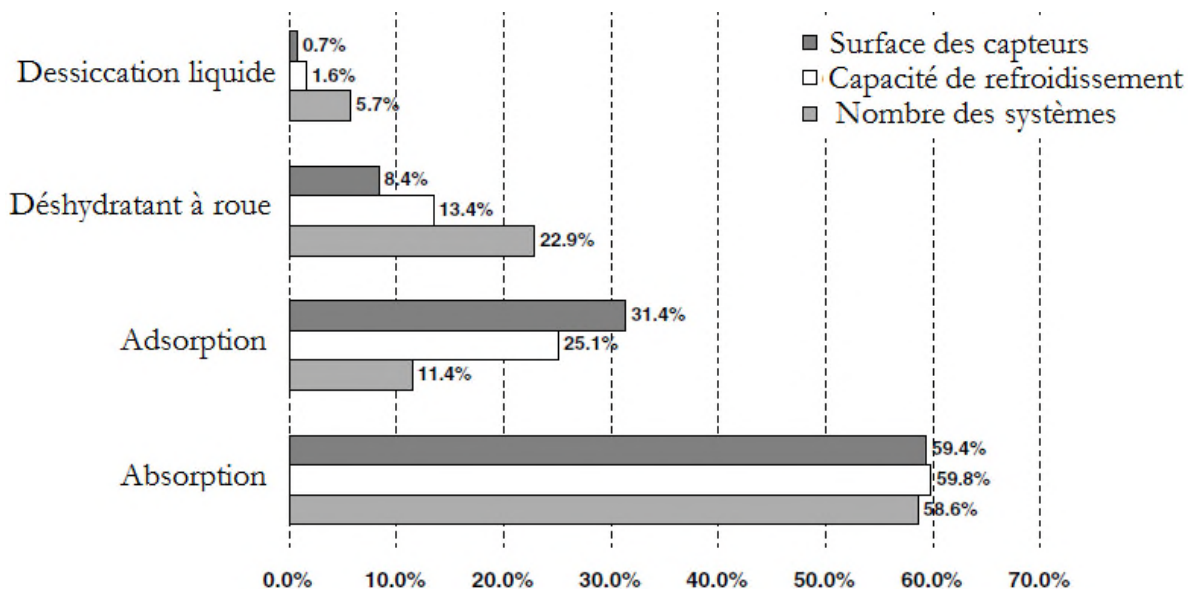


Fig. 2.13 : Distribution des systèmes en termes de nombre de systèmes, la capacité de refroidissement et de surface de capteurs installée (Henning 2007).

solaires ne pouvaient pas être obtenues dans la pratique. Cependant, il est très important de noter qu'un système de climatisation solaire nécessite un effort important au cours de la phase de conception. Souvent, il sera nécessaire d'effectuer des simulations informatiques annuelles de plusieurs différentes configurations afin de déterminer celui qui a la meilleure performance de coût énergétique.

Sur la base de l'expérience acquise, il est fortement recommandé de garder la conception des systèmes de climatisation à base de capteurs solaires le plus simple possible. Ainsi, l'amélioration de la performance des refroidisseurs à sorption et les cycles de refroidissement ouverts jouent un rôle clé pour la faisabilité économique de ces systèmes (Henning 2007). Les petits refroidisseurs, de technologie solaire thermique, peuvent être utilisés comme des nouvelles composantes

prometteuses afin d'augmenter le confort de vie. De tels systèmes pourraient être une option future en particulier pour les climats ensoleillés (Henning 2007). Dans cette logique, le chapitre suivant présentera une description d'une installation type de rafraîchissement solaire par adsorption dans la région de Biskra.

4. Bibliographie

- Al-Alili, A., Y. Hwang, et al. (2014). "Review of solar thermal air conditioning technologies." *International Journal of Refrigeration* 39: 4-22.
- Allab, F. (2008). *Etude Et Conception d'un Dispositif de Réfrigération Magnétique Base Sur L'effet Magnétocalorique Geant* Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- Balaras, C. A., G. Grossman, et al. (2007). "Solar air conditioning in Europe-an overview." *Renewable and sustainable energy reviews* 11(2): 299-314.
- Desmons, J. (2009). *Aide-mémoire de génie climatique-2e édition*, Dunod.
- Djebiret, M. A. (2012). *Etude de faisabilité d'un climatiseur solaire adapté à la région de Biskra*, Université Mohamed Khider de Biskra.
- Fong, K., T. T. Chow, et al. (2009). "Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city." *Solar Energy* 84(2): 227-244.
- Henning, H.-M. (2007). "Solar assisted air conditioning of buildings an overview." *Applied Thermal Engineering* 27(10): 1734-1749.
- Kim, D. and C. I. Ferreira (2008). "Solar refrigeration option-a state-of-the-art review." *International Journal of refrigeration* 31(1): 3-15.
- Le Pierrès, N. (2005). *Procédé solaire de production de froid basse température (-28 C) par sorption solide-gaz* Doctorat, Université de Perpignan.
- Recknagel, H., Sprenger, E., SCHRAMEK, E. R., & HONMANN, W (1995). *Le Recknagel-Manuel pratique du génie climatique*, Pyc.
- Rouag, A. (2017). *Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption* Doctorat LMD, Mohamed kheidher.
- Shashi Reddy , P. S. (2011). "Future Air Conditioning with Solar Technology: A Technical Overview." *International Journal of Engineering, Science and Metallurgy* 1: 348-356.
- Wang, L., H. Bao, et al. (2009). "A comparison of the performances of adsorption and resorption refrigeration systems powered by the low grade heat." *Renewable Energy* 34(11): 2373-2379.
- Wang, R., T. Ge, et al. (2009). "Solar sorption cooling systems for residential applications: options and guidelines." *International Journal of Refrigeration* 32(4): 638-660.
- Zotto, P. D., J.-M. Larre, et al. (2000). *Mémotech Génie Energétique*.

Partie 2

La faisabilité du climatiseur solaire à adsorption
dans la région de Biskra

Chapitre III

Faisabilité du climatiseur solaire à adsorption

L'étude bibliographique réalisée a montré que la technologie de production de froid par sorption semble être la meilleure option du couple coût/performance, en comparaison avec d'autres options thermomécaniques et photovoltaïques (Benfatah, Benchabane et al. 2011). Les technologies de production de froid par sorption solaire ont été présentées comme des alternatives intéressantes pour répondre aux besoins de climatisation, réfrigération, fabrication de glace et congélation.

L'intérêt particulier de ce chapitre est d'étudier la faisabilité du climatiseur solaire à adsorption sur un cas d'étude réalisé à Biskra (Projet I). Nous commençons par l'étude de l'installation de climatiseurs classiques mono-split appelés 'syst (A)' dans ce projet type. Nous entamerons par la suite l'étude de l'installation d'un climatiseur solaire à adsorption, syst (B), afin de comparer entre les deux systèmes selon le coût d'investissement et le coût de consommation électrique.

1. Description du projet I

Notre projet d'étude I est réalisé à Biskra situé au sud Est de L'Algérie, dont la localisation est donnée par la carte géographique et les données géographiques sont données respectivement par le tableau 3.1 et la figure 3.1.

Le résumé de gisement solaire de l'Algérie est donnée par le tableau 3.2. On remarque qu'à l'exception de la région côtière, la majorité du territoire national en particulier (le Sahara) est considérée parmi les zones les plus ensoleillées du globe terrestre ce qui représente un avantage très considérable pour l'utilisation de l'énergie solaire.

Pour identifier la zone climatique d'une ville algérienne on donne la carte climatique et les données climatiques de l'Algérie respectivement par la figure 3.2 et le tableau 3.3.



Fig. 3.1 : Localisation de la Wilaya de Biskra

Zone	Ville	Altitude(m)	Latitude(°)	Longitude(°)
4	Biskra	81	34,48°N	5,44°E

Tableau 3.1: Les données géographiques de Biskra (Capderou 1985)

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie par rapport à toute l'Algérie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 3.2 : Gisement solaire de l'Algérie (Capderou 1985; Bentouba, Slimani et al. 2010)



Fig. 3.2 : Carte climatique de l'Algérie (Benhabiles, Abbad et al. 2007).

L'analyse du tableau 3.3 permet de remarquer qu'il y a quatre zones principales numérotées de 1 à 4 en allant du nord vers le sud du pays. La température quotidienne pendant les séquences chaudes dépasse pour la majorité de ces zones les 30°C. Il nous permet aussi de distinguer trois types de climat : climat chaud et humide, climat chaud et sec et climat chaud (humidité moyenne), on peut conclure que le rafraîchissement de l'air est nécessaire pour la plus part des zones climatiques de l'Algérie et en particulier la ville de Biskra (Benhabiles, Abbad et al. 2007).

Zone N°		1			2			3			4		
Latitude		<500	500 :1000	>1000	<500	500 :1000	>1000	Sous zones	500 :1000	>1000	<500	500 :1000	>1000
	Eté	TB	34	33.5	30.5	38	37	35	41	39.5	36	46	42
φB		44	40	47	30	28	28	22	18	22	11	13	17

Tableau 3.3 : Données climatiques de l'Algérie(Benhables, Abbad et al. 2007; Bentouba, Slimani et al. 2010)

Le climat de Biskra est un climat saharien sec, d'après la figure 3.2 et le tableau 3.3 on' a durant la période estivale la température extérieure de base est égale à 46°C et humidité relative de 11%. La température moyenne supérieure dépasse le seuil de confort maximal pendant quatre mois, du mois de mai jusqu'au mois d'octobre (Benfateh 2009).

Le projet I a une surface de cent mètre carré, bien isolée. Pour capter le rayonnement solaire nous avons utilisé les capteurs solaires plans, ce type de capteur est réalisé localement et le refroidisseur à adsorption utilise au cours de son fonctionnement des températures faibles. Dans ce projet I nous avons considéré un salon et deux chambres voir la figure.3.3 et la figure 3.4.

Pour la sélection des appareillages de climatisation il faut au débit estimer le bilan thermique de climatisation pour chaque chambre. Cette estimation du bilan de climatisation du projet I est donnée par le tableau 3.4.

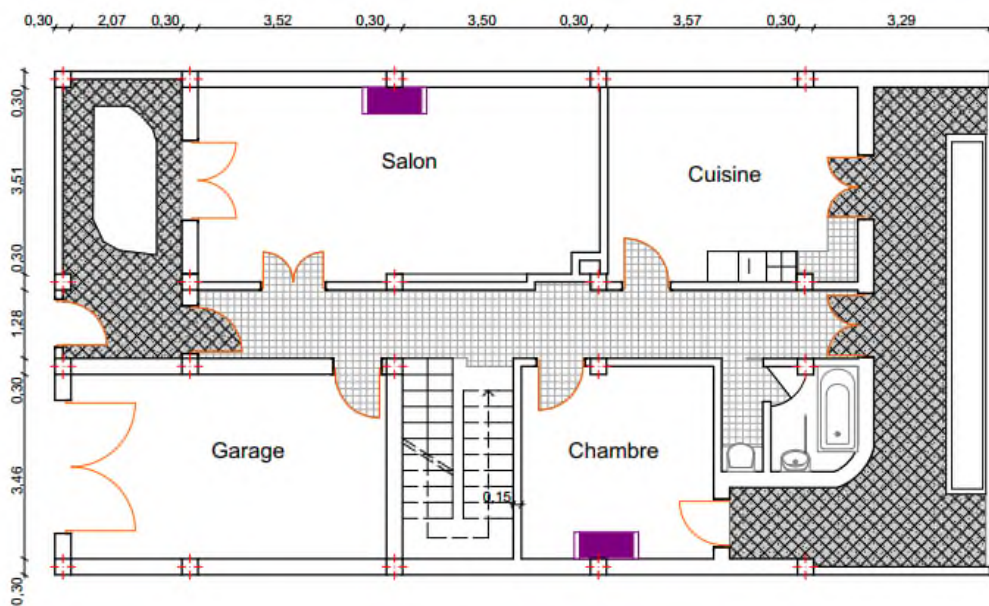


Fig. 3.3 : Vue en plan RDC

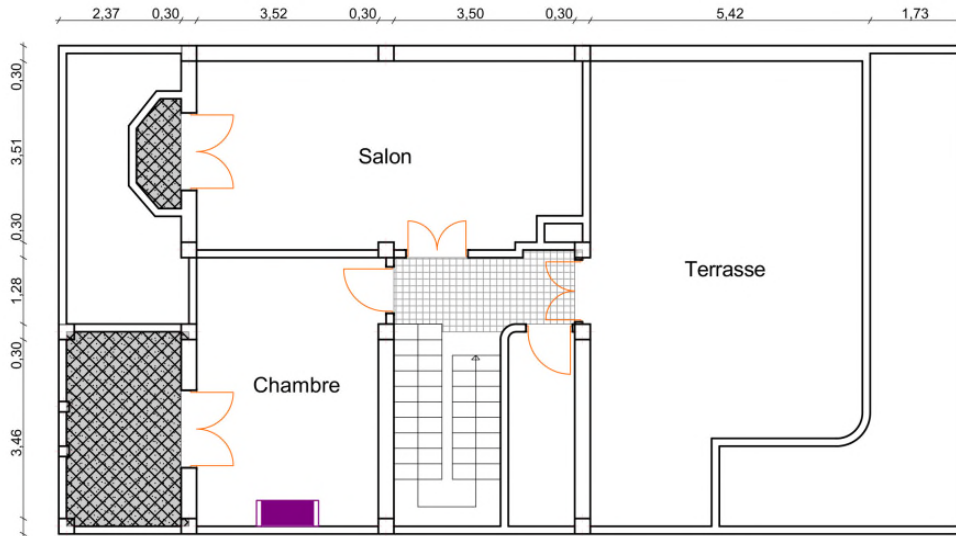


Fig. 3.4 : Vue en plan premier étage

Désignation	Chambre 0	Chambre 1	Salon 0	Total
Puissance Q0 kW	2,64	2,64	3,52	8,8

Tableau 3.4 : Récapitulation du bilan de climatisation

Chambre RDC : chambre 0, salon RDC : Salon 0, chambre 1^{er} étage : chambre 1, salon 1^{er} étage : Salon 1

2. Hypothèses

Dans la présente étude, les hypothèses suivantes sont considérées :

Pouvoir stocker de l'eau chaude pour assurer la quantité nécessaire pour la journée.

Le rayonnement solaire est utilisé comme source d'énergie pour la production de l'eau chaude, en supposant que son stockage peut assurer la quantité d'eau chaude nécessaire pour toute la journée.

Tous les prix exprimés en euros en toute taxe comprise avec 7% de TVA pour la consommation électrique et de 17% pour l'investissement.

Le prix moyen unitaire de l'électricité (1kwh) dans l'union européen de 13,16 centimes d'euros € HT est considéré comme prix de référence, augmenté de 13% en cinq ans.

Afin de pouvoir comparer, nous calculons le prix de l'électricité soutenu par l'état à un prix de 4.179 Dinars Algériens, DA, équivalent à 0.0354€.

Le système mono split est considéré comme système de référence.

Durée de vie climatiseur classique est 15ans, Durée de vie climatiseur solaire est 25ans.

Chapitre III : Faisabilité du climatiseur solaire à adsorption

Pour le contenu du chapitre on cite le bilan thermique, la sélection des différents composants pour les deux systèmes de climatisation avec le coût d'achat, puis on calcule le coût d'investissement total, le coût de consommation électrique pour les deux systèmes de climatisation ensuite étude comparative pour terminer par la durée d'amortissement et une conclusion.

A l'issue de ce chapitre on conclure que le climatiseur solaire à adsorption syst(B) malgré son coût d'investissement élevé au débit est faisable par réorientation de l'état au soutien initiale au coût d'investissement de ce dernier au lieu du climatiseur syst(A).

3. Climatiseur mono-split sys(A).

3.1 Sélection des modèles disponibles dans le marché

Selon le catalogue (LG 2017) et en fonction du bilan thermique on donne Caractéristiques des modèles sélectionnés syst(A) plus une récapitulatif de la sélection du climatiseur syst(A) respectivement par le tableau 3.5 et le tableau 3.6.

3.2 Coût investissement

Selon le catalogue (LG 2017) on donne un devis estimatif hors Taxe selon le tableau 3.7. Le coût total d'investissement avec TTC est égal à $3745,06 * 1,17 = 4381,72\text{€}$.

3.3 Consommation électrique

A partir du tableau.3.6 on détermine la consommation électrique pour l'ensemble des climatiseurs mono-split syst(A) tel que la consommation électrique totale = $(2 * 550) + (1 * 880) = 1980\text{Watt}$. Pour un fonctionnement de 2430 h/an, la consommation électrique annuelle est comme suit : $C_e = 1,98 * 2430 = 4811,4\text{KWh}$.

3.4 Coût Consommation électrique

En moyenne, les ménages de l'Union européenne payent leur électricité 13,16 centimes d'euros le kilowatt/heure (kWh) hors taxes [JDN 2018].

Le coût hors taxe de la consommation électrique annuelle est égal à $4811,4 * 0,1316 = 633,18\text{€}$

Le coût de consommation électrique avec tout taxe comprise est $633,18 * 1,07 = 677,50\text{€}$

Nous calculons maintenant le coût de l'électricité soutenu par l'état à un prix de 4.179 Dinars Algériens, DA, équivalent à 0.0354€.

Le coût de consommation électrique soutenu par l'état hors taxe est égale à $4811,4 * 0,0354 = 170,32\text{€}$

Caractéristiques		Chambre 0-1	Salon 0
Q0(w)		2500 watt	3500 watt
EER		4.55	3.98
COP		4.6	3.68
Consommation Energétique annuelle froid kwh		142	201
Puissance Absorbée Froid w		550	880
SEER/SCOP		6.2/4	6.1/4
Référence Unité Intérieure		A09RK.NSB	A12RK.NSB
Débit D'Air MAX	m ³ /h	720	720
Référence Unité Extérieure		S09AK.UL2	S12AK.UL2
Tension alimentation	V/Hz	220 -240/50	220 -240/50
Diamètre liquide gaz	pouce	1/4 -3/8	1/4 -3/8
Référence		S09AK.UL2+A09RK.NSB	S12AK.UL2+A12RK.NSB

Tableau.3.5 : Caractéristiques des modèles sélectionnés syst(A)

Désignation	Chambre 0 et 1	Salon 0
Puissance frigorifique	2500W	3500W
Modèle climatiseur	A09VK.NSB/S09AK.UL2	A12RK.NSB/S12AK.UL2

Tableau.3.6 : Récapitulatif de la sélection du climatiseur mono-split syst(A)

Climatiseur	Chambre 0	chambre 1	Salon 0	total	Maintenance/an
Prix en € HT	1182,94	1182,94	1379,18	3745,06	37,45

Tableau.3.7 : Récapitulatif de coût d'investissement HT du climatiseur syst(A).

Donc Le coût de la consommation électrique soutenu par l'état avec tout taxe comprise est $C_{ce}=170,32*1,07=182,24\text{€}$.

4. Climatiseur solaire à adsorption syst(B)

4.1 Description du syst(B)

La figure 3.5 nous montre un exemple d'une installation de rafraîchissement solaire par adsorption. Cet exemple se compose d'un refroidisseur par adsorption, tour de refroidissement, un capteur solaire, ballon du stockage de l'eau chaude, ventilo-convecteur, station de pompage et ballon du stockage de l'eau froide. Nous donnons au ci-dessous une description de chacun.

4.1.1 Refroidisseur par adsorption

Le refroidisseur présenté sur la figure 3.6 se compose des éléments suivants : Les adsorbants, Le condenseur, Evaporateur, Vannes de régulation, Tour de refroidissement, Capteur solaire plan, Réservoir de stockage d'eau chaude, ventilo-convecteurs, Pompe de circulation et Réservoir d'eau froide [SorTech AG 2011, Zhai et al 2008].

4.1.2 Les adsorbants

Afin de rendre la production de froid quasi continu deux adsorbants sont utilisés de façon alternée. L'adsorbant remplace le compresseur mécanique dans les systèmes classiques, ils ont besoin pour fonctionner de disposer de deux niveaux de température. Ils contiennent un adsorbant sous forme de granulés qui doivent être alternativement chauffés.

4.1.3 Le condenseur

Le condenseur est un échangeur de chaleur fonctionnant à haute température qui permet aux vapeurs

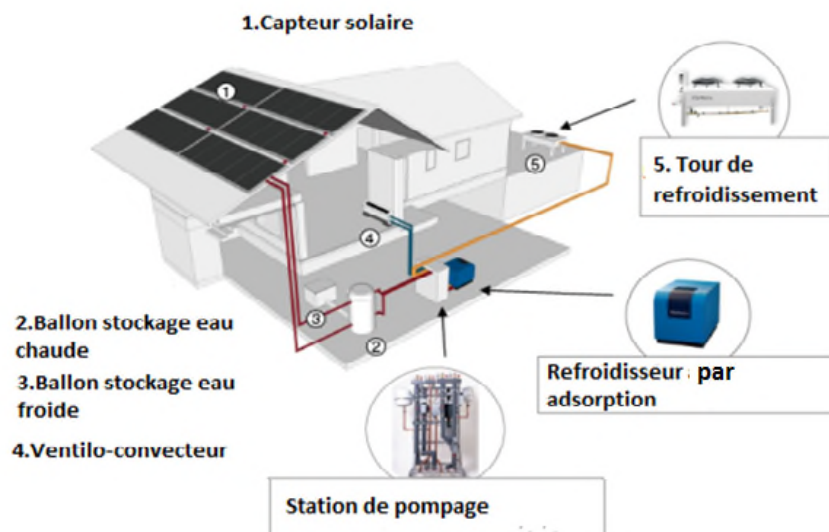


Fig. 3.5 : Exemple d'un système de climatisation solaire par adsorption pour un refroidisseur ou plus [SorTech AG 2011].

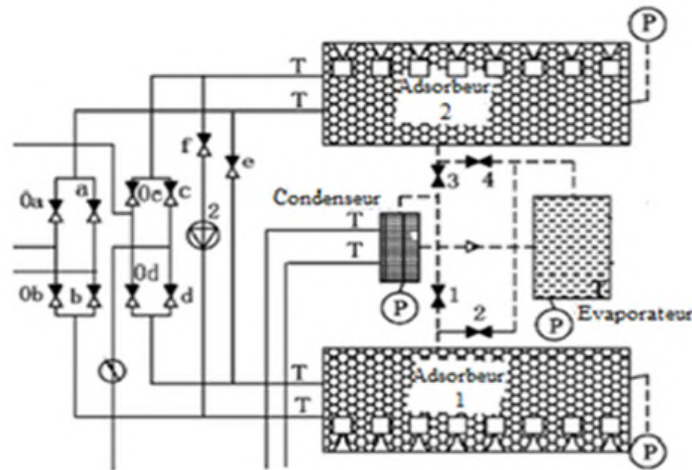


Fig. 3.6 : le refroidisseur et ses composants [Zhai et al 2008,Wang et al 2003].

désorbées sortant de l'adsorbent de se liquéfier en dégageant de la chaleur.

4.1.4 Evaporateur

L'évaporateur est un échangeur fonctionnant à basse température, il sert à absorber la chaleur du fluide caloporteur alimentant les ventilo-convecteurs. En absorbant de la chaleur, le fluide s'évapore progressivement pour être aspiré par l'adsorbent.

4.1.5 Vannes de régulation

On trouve deux types de vannes de régulation vannes électropneumatiques et vanne électromagnétique. La vanne de contrôle électropneumatique sert à contrôler le fonctionnement des vannes à vide pneumatiques. La vanne électromagnétique est une vanne commandée électriquement, elle permet d'interrompre l'écoulement du fluide, Lorsqu'elle est mise sous tension le fluide passe pour l'électrovanne type normalement fermé

4.1.6 Tour de refroidissement

La tour de refroidissement est un échangeur par lequel on évacue vers le milieu extérieur la chaleur issue de système de refroidissement. La transmission de chaleur se produit par un échange de chaleur entre l'air et l'eau et par l'évaporation d'une petite partie de l'eau à refroidir. Elle sert à alimenter le condenseur et un des deux lits chaque fois.

4.1.7 Capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est un composant de base pour la plupart des équipements solaires thermiques. Il s'agit d'un dispositif pour recueillir l'énergie solaire, convertir en énergie thermique et la transférer à un fluide caloporteur.

4.1.8 Réservoir de stockage d'eau chaude

C'est un réservoir d'eau accumulant la chaleur obtenue par des capteurs solaires thermiques pour la restituer ensuite sous forme d'eau chaude. Il s'agit de l'élément essentiel de l'installation solaire. En effet le rendement de toute l'installation dépend en grande partie de ce composant et de sa bonne exploitation.

4.1.9 Ventilateurs-convecteurs

Il s'agit d'un appareil qui permet de traiter l'air d'un local, aussi bien en chauffage qu'en climatisation. L'air repris de la pièce est filtré puis traversé dans ses échangeurs avant d'être pulsé dans la pièce à l'aide d'un ventilateur.

4.1.10 Pompe de circulation

La pompe de circulation accélère le débit d'eau vers l'ensemble des émetteurs dans une installation de climatisation pour accélérer les échanges thermiques.

4.1.11 Réservoir d'eau froide

C'est un emplacement utilisé pour le stockage, la régulation et le contrôle des ressources en eau. Il s'agit d'un réservoir réceptionnant l'eau stockée pour alimenter l'installation désirée à l'aide d'une pompe à eau.

4.2 Principe de fonctionnement du syst(B).

La figure 3.7 représente le système de climatisation solaire avec un refroidisseur à deux lits. Le point le plus essentiel dans ce système est le principe de fonctionnement de refroidisseur par adsorption. Le fluide caloporteur de deux adsorbants est relié à la cuve de stockage d'eau chaude et la source d'eau fraîche [Zhai et al 2008, Wang et al 2003].

L'eau refroidie produite par le refroidisseur d'adsorption sera envoyée aux ventilateurs-convecteurs installés à l'intérieur des locaux climatisés grâce à une pompe de circulation. Pour bien montrer le fonctionnement du refroidisseur nous le divisons en deux phases:

4.2.1 Première phase

L'adsorbant(1) est alimenté par l'eau chaude et l'adsorbant(2) par l'eau froide. Selon la figure 3.8 et à l'aide du système de régulation l'adsorbant(1) sera alimenté par l'eau chaude et l'adsorbant(2) sera alimenté par l'eau froide. Dans ce cas le sorbat de l'adsorbant(1), très chaud avec pression élevée est refoulé vers le condenseur où il dégage la chaleur pour se condenser avant d'être injecté dans l'évaporateur. Ensuite le sorbat change son état de liquide à gaz par aspiration de la chaleur du fluide

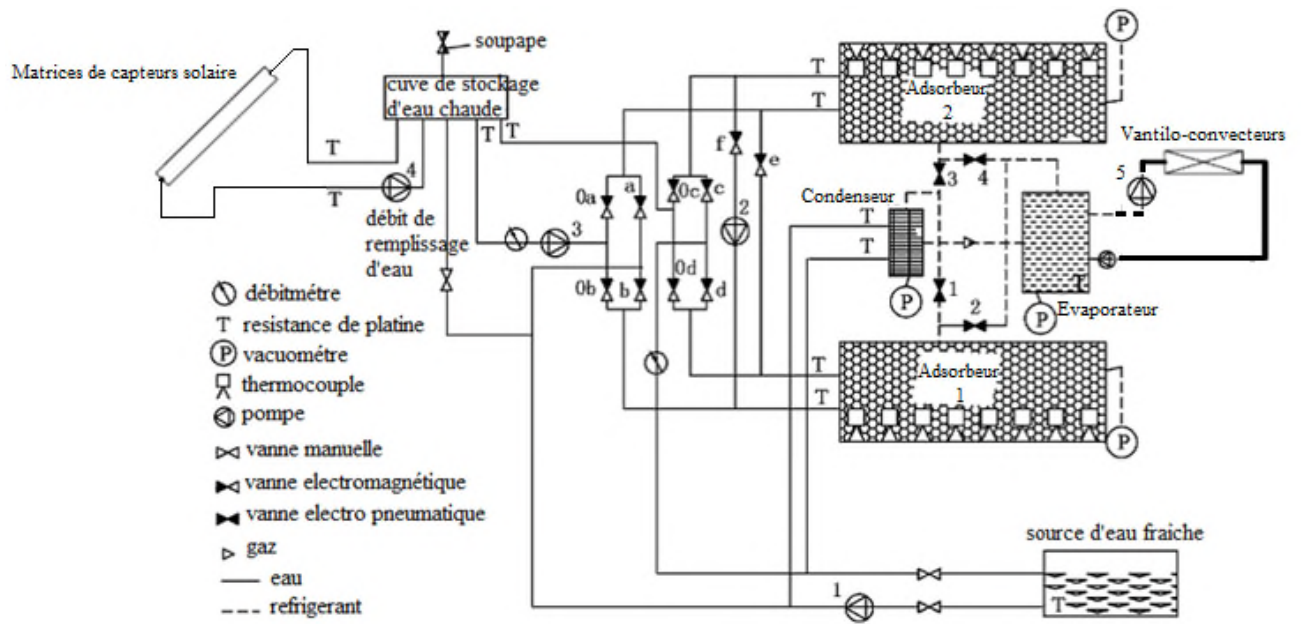


Fig. 3.7: schéma de système solaire à adsorption avec plus de détail sur le refroidisseur à deux lits [Zhai et al 2008,Wang et al 2003].

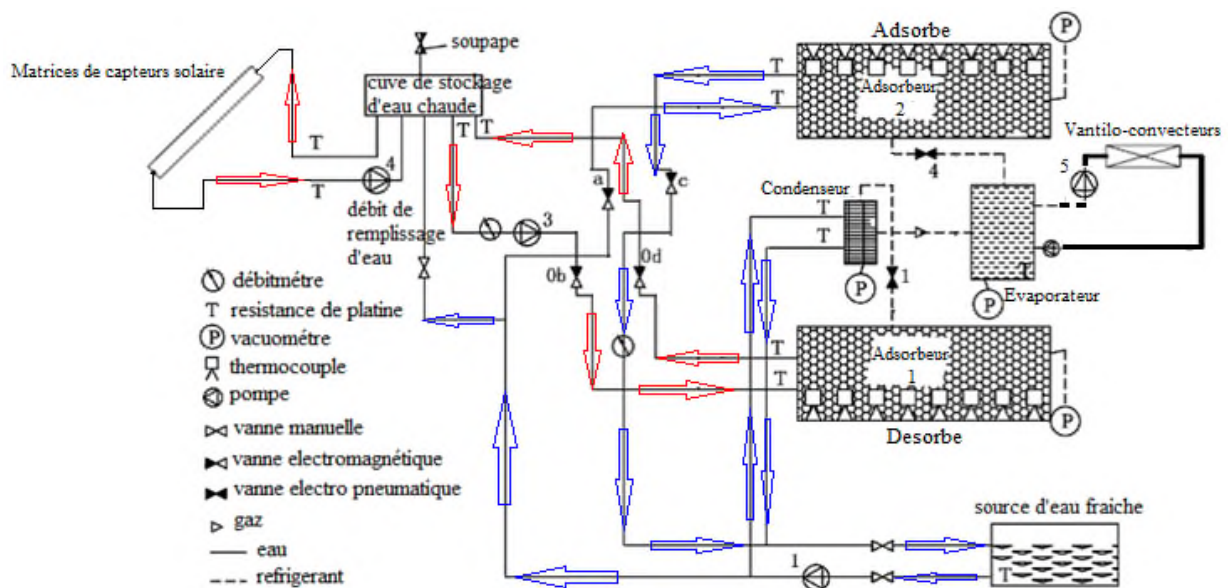


Fig. 3.8: schéma de système solaire le cas de l'adsorbueur 1 désorbe et l'adsorbueur 2 adsorbe [Djebiret 2012]

caloporteur provenant des ventilos-convecteurs, il sera aspiré par l'adsorbueur(2). Cette phase est terminée lorsque le sorbat est totalement transféré de l'adsorbueur(1) vers l'adsorbueur(2).

4.2.2 Deuxième phase

L'adsorbueur(1) est alimenté par l'eau froide et l'adsorbueur(2) est alimenté par l'eau chaude. Selon la figure 3.9 et à l'aide du système de régulation l'adsorbueur(2) sera alimenté par l'eau chaude et l'adsorbueur(1) sera alimenté par l'eau froide. Dans ce cas le sorbat de l'adsorbueur(2), très chaud avec

4.3.3 Station de pompage

D'après le même catalogue [SorTech AG2011] et pour les mêmes conditions nous avons pris station de pompage PCS 08, les caractéristiques et une vue générale sont données respectivement par le tableau 3.10 et la figure 3.12.

4.3.4 Connexion

D'après le catalogue [SorTech AG2011] et pour les mêmes conditions nous avons pris connexion Set PCS 08.

4.3.5 Capteur solaire

Pour la sélection du capteur solaire nécessaire au système de climatisation solaire par adsorption il faut calculer premièrement le besoin d'eau chaude pour le refroidisseur d'adsorption ensuite estimer la surface de captation pour le système à installer.

			ACS 08
	Puissance frigorifique nominale	KW	8
	COP therm		0,60
Circuit eau glacée	Température entrée/sortie	°C	18/15
	Débit volumique	m ³ /h	2,0
Circuit rejet chaleur	Température entrée/sortie	°C	27-32
	Débit volumique	m ³ /h	3,7
Circuit conduit chaleur	Température entrée/sortie	°C	72/65
	Débit volumique	m ³ /h	1,6
Fourniture d'électricité	Voltage	V	230 ~
	fréquence	Hz	50
	Consommation	w	7
Dimensions	Longueur /largeur/hauteur	mm	790/1060/940
	Poids net	Kg	265

Tableau 3.8 : Caractéristiques du refroidisseur à adsorption ACS 08 [SorTech AG 2011]



Fig. 3.10 : Refroidisseur à adsorption ACS 08 [SorTech AG].

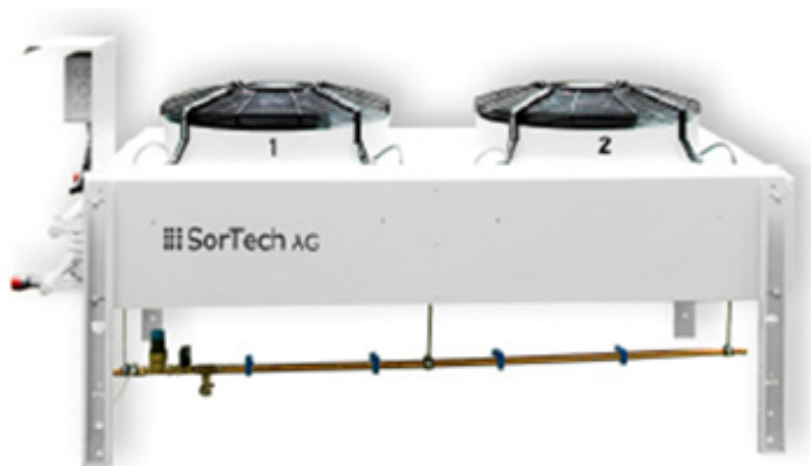


Fig. 3.11: Tour de refroidissement RCS 08 [SorTech AG 2011].



Fig. 3.12: Station de pompage PCS 08 [SorTech AG 2011].

Modèle	RCS 08	
Caractéristiques	Unité	Valeur
Power/ puissance	kw	21
ventilateurs EC	unité	2
Consommation d'eau Max	m ³ /a	4
puissance absorbée	kw	0,65
Dimensions(WLH)	cm	200x115x95
Poids net	Kg	188
Prix	€	3690

Tableau 3.9 : Caractéristiques du tour de refroidissement sélectionné [SorTech AG 2011].

4.3.5.1 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 calculer le volume d'eau chaude nécessaire pour un bon fonctionnement du système. D'après la description précédente des composants du système le débit d'eau chaude pour le refroidisseur à adsorption est 1,6 m³/h, Lors d'une opération de 18h nous avons le besoin de volume d'eau égal à vingt huit milles huit cent litres, alors la quantité d'énergie nécessaire E_{ECN} utilisée par le refroidisseur à adsorption est donnée par l'équation 3.1 :

$$E_{ECN} = q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{EEC} - T_{SEC}) \cdot t \quad (3.1)$$

Où C_p est la capacité calorifique de l'eau (4,2 KJ/kg/°c), ρ sa masse volumique (1 kg/l), et T_{EEC} , T_{SEC} température d'entrée, sortie d'eau chaude. Les températures d'entrée et de sortie d'eau chaude sont prisent 72°c et 65°c respectivement, q_v débit volumique d'eau chaude pour le refroidisseur à adsorption exprimé en m³/h, t temps de fonctionnement par jour exprimé en heure.

Le besoin énergétique nécessaire utilisé par le refroidisseur à adsorption est égal à :

$$q_v = 1600/3600 \text{ l/s} \quad \rho = 1 \text{ kg/l} \quad C_p = 4,2 \text{ kj/Kg.}^\circ\text{C} \quad T_{EEC} = 72^\circ\text{C} \quad T_{SEC} = 65^\circ\text{C} \quad t = 18 \text{ h}$$

$$E_{ECN} = 235,20 \text{ KWh.}$$

La sélection du capteur solaire selon [Twenga 2015], nous permettons de choisi le modèle Capteur Bt Collector ou la Superficie d'entrée est 1,859m², le prix unitaire d'un capteur selon la référence précédente est 685,00€. Les caractéristiques et une vue générale du capteur solaire choisi sont données respectivement par le tableau 3.11 et la figure3.13:

Caractéristiques	Unité	valeur
Modèle	-	PCS 08
Fluide de fonctionnement	-	eau
Circuits hydrauliques	Unité	3
Pompes à haut rendement	Unité	3
Puissance absorbée	W	520
Dimensions W/L/H	Cm	89/97/140
Poids Net	Kg	70Kg
Prix	€	4239

Tableau 3.10 : Caractéristiques de la Station de pompage sélectionnée [SorTech AG 2011].

4.3.5.2 Estimation de la surface de captation

La puissance solaire disponible PSD est donnée par l'équation 3.2 :

$$PSD = E \cdot \eta \cdot C_i \cdot C_o \cdot C_c \quad (3.2)$$

PSD : Puissance solaire disponible exprimée en Wh/(m² jour).

E : énergie solaire reçue en KWh/jour.m²

C_i : coefficient d'inclinaison des capteurs solaire.

C_o : coefficient d'orientation des capteurs solaire.

C_c : coefficient de correction du fluide caloporteur (eau).

η : Rendement du capteur solaire (dans notre cas est égale à 80%).

Pour déterminer la puissance solaire disponible, nous avons besoin aux valeurs des coefficients suivants:

Les valeurs des coefficients sont des valeurs génériques:

C_i= 0,999 ; C_o= 1 (sud) ; C_c= 1 [Kharchi et al 2007].

η= 0,80 pour un capteur plan, avec le rayonnement solaire journalier à Biskra

Chapitre III : Faisabilité du climatiseur solaire à adsorption

Désignation	unité	valeur
Débit d'eau chaude	m ³ /h	1,6
Besoin d'eau chaude	l/jour	28800
Le besoin énergétique	kWh	235 ,20
T _{EECH}	°c	72
T _{SECH}	°c	65
Surface de captation	m ²	39,24
Rendement du capteur solaire	%	80
PSD	mh/m ² jour	5994
Nombre des capteurs nécessaires	unité	21
Prix Unitaire	€	685,00
	DA	75877,45
Prix Totaux des Capteurs	€	14385
	DA	1593426.45
Modèle	-	Bt Collector
Rayonnement solaire journalier E(à Biskra)	wh/m ² jour	7500
Dimensions hors tout h/L/l	mm	1935/1020/77
Contenance en eau de l'absorbeur	L	2,1
Superficie d'entrée	m ²	1,859
Poids à vide	kg	31

Tableau 3.11: Les caractéristiques du capteur solaire sélectionné [Twenga 2015].



Fig. 3.13 : Capteur Bt Collector [Twenga 2015].

$E=7500 \text{ Wh/jour.m}^2$ [Capderou 1985].

$PSD=7500.0,80.0,999.1.1=5994 \text{ Wh/jour.m}^2$

Donc la surface de captation nécessaire : $S=E_{ECN}/PSD=235200/5994=39,24\text{m}^2$

4.3.6 Réservoir du stockage d'eau chaude

La sélection est faite à l'aide de [Fundiscount 2015], une vue générale et les caractéristiques du réservoir de stockage d'eau chaude choisi sont données respectivement selon la figure 3.14 et le tableau 3.12.

4.3.7 Réservoir d'eau froide

La sélection est faite à l'aide de [Twenga 2015], Les caractéristiques du réservoir de stockage d'eau froide choisi sont données par le tableau 3.13.



Fig. 3.14 : Réservoir de stockage de l'eau chaude [Fundiscount 2015].

Désignation	unité	valeur
Volume	litre	150
Diamètre	m	0,47
hauteur	m	1,43
Pression de Fonctionnement	bar	6
Prix	€	660

Tableau 3.12 : Les caractéristiques du réservoir de stockage d'eau chaude [Fundiscount 2015].

désignation	Capacité	L/l/h	prix	modèle
<u>Unité</u>	Litre	mm	€	Citerne à
valeur	300	1050/625/780	238	eau Horizontale Duraplas

Tableau 3.13 : Caractéristiques du Réservoir de stockage d'eau froide [Twenga 2015].

4.3.8 Ventilo-convecteur

Les données nécessaires pour la sélection des ventilo-convecteurs sont données par le tableau 3.14. Selon [Carrier 2011] nous donnons le tableau 3.15 pour la sélection des ventilo convecteurs.

4.3.9 Adoucisseur

Un adoucisseur d'eau est un dispositif qui capte les ions calcaires, responsables de la formation du tartre dans les différentes canalisations.

4.4 Coût investissement

Nous essayons dans cette partie de calculer le coût d'investissement du climatiseur solaire par adsorption. Le tableau 3.16 présente le coût d'investissement HT des composants du climatiseur solaire par adsorption. Nous remarquons que le coût d'investissement total HT du climatiseur solaire par adsorption est 38496€.

4.5 Consommation électrique

La consommation électrique en watt des différents composants de l'installation est donnée grâce aux catalogues [SorTech 2011] des fournisseurs selon le tableau 3.17.

La consommation électrique en KWh en 2430 h/an. est égale à $1,242 \times 2430 \text{ h} = 3018,06 \text{ KWh}$, $C_e = 3018,06 \text{ KWh}$.

Fabricant	Carrier
Unité	Unité basse consommation énergétique type LEC
Ventilo	Ventilo-convecteur 42N raccords gauche avec vanne 4voies on off 230v kit isolation vanne ; sans vanne d'arrêt
Modèle	ventilo-convecteur carrossée vertical
Système	à deux tubes
Conditions standards	température de l'air=27°c Température entrée eau=7°c
	Vitesse maximum 100% Température sortie eau=12°c

Tableau 3.14 : Les données nécessaires à la sélection des ventilo-convecteurs

Caractéristiques	CH0/CH1	Salon 0
Puissance frigorifique sélectionné kw	2.54kw	3,70 kw
Taille	29	39
Puissance absorbée par moteur ventilateur w	15	35
Intensité nominale	A 0,16	0,29
Débit d'eau	l/s 0,12	0,18
Diamètre raccord	pouce 3/4	3/4
Tension nominale	230 V - 1 ph - 50 Hz	230 V - 1 ph - 50 Hz
Dimensions hors tout mm LxlxH	1030x 220x 657	1230x220x657
Total HT €	1251*2	1387
Total HT €	3889	

Tableau 3.15 : Récapitulatif de la sélection des ventilo-convecteurs [Carrier 2011].

4.6 Coût Consommation électrique

Par la même analyse employée au coût de consommation électrique du climatiseur mono-split. syst(A), on donne le Coût de consommation électrique du climatiseur solaire à adsorption syst(B)HT par le tableau 3.18.

Désignation	Prix HT€
Refroidisseur à adsorption ACS 08	
Tour de refroidissement RCS 08	17289
Station de pompage	
Ensemble de raccordement PCS 08	245
Capteur solaire	14385
Réservoir d'eau de stockage de chaleur	660
Réservoir stockage eau froide	238,00
Ventilo convecteur	3889
Adoucisseur	1790
Total	38496

Tableau 3.16 : Coûts d'investissement syst(B) HT

désignation	Ce en w
Refroidisseur à adsorption ACS 08	7
Tour de refroidissement	650
Station de pompage	520
Ventilo-convecteur	65
Total	1242

Tableau 3.17 : Consommation électrique syst(B).

Désignation	Climatiseur solaire à adsorption
Consommation électrique watt	1242
Consommation électrique KWh	$2430 \times 1,242 = 3018,06 \text{KWh}$
Cout Consommation électrique Cce	$3018,06 \times 13,16 = 39717,67 \text{C€}$
Cout Consommation électrique Cce	397,17€

Tableau 3.18: Coût de Consommation électrique du climatiseur solaire à adsorption syst (B) (HT).

Pour le prix d'électricité soutenu l'état on donne le coût de consommation électrique du climatiseur solaire à adsorption syst(B) avec soutien d'état(HT) par le tableau 3.19

Nous donnons le coût d'investissement, le coût de consommation d'électricité sans et avec soutien d'état avec tout taxe comprise selon le tableau 3.20.

5. Comparaison et discussions

Afin de pouvoir comparer, on donne le coût d'investissement et le coût de la consommation électrique annuelle avec et sans soutien de l'état pour les deux systèmes (A) et (B) par le tableau 3.21 Selon le résumé de l'étude comparative donné par le tableau récapitulatif 3.22 et la figure 3.15 on peut conclure les résultats suivants :

Le coût d'investissement initial du climatiseur solaire syst(B) est plus cher dix fois que le coût d'investissement initial du climatiseur mono-split syst(A).

Désignation	Climatiseur solaire à adsorption
Consommation électrique watt	1242
Consommation électrique KWh	$2430 \times 1,242 = 3018,06 \text{KWh}$
Cout Consommation électrique avec soutien d'état €	$3018,06 \times 0,0354 = 106,84 \text{€}$

Tableau 3.19 : Coût de Consommation Electrique du climatiseur solaire à adsorption syst(B) avec soutien d'état(HT).

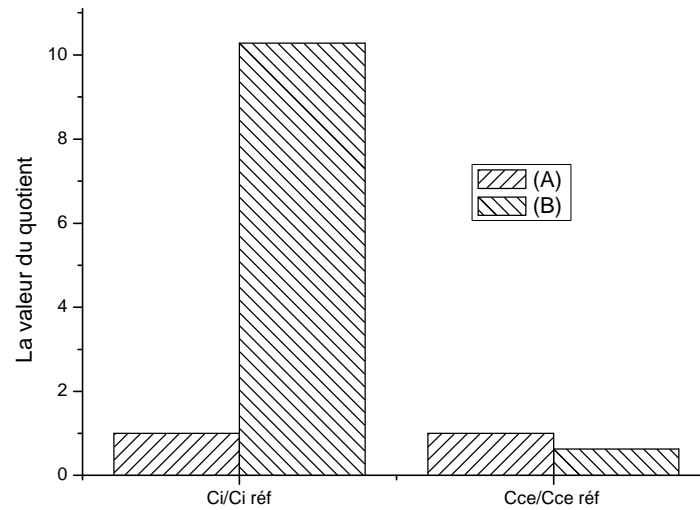


Fig. 3.15 : Récapitulatif de l'étude comparative pour syst(A) et (B).

Le coût d'investissement initial du climatiseur solaire syst(B) est plus cher dix fois que le coût d'investissement initial du climatiseur mono-split syst(A).

Le coût de consommation électrique du climatiseur solaire syst(B) est moins cher que le coût de consommation électrique du climatiseur mono-split syst(A).

L'inconvénient remarquable du climatiseur solaire syst(B) est son coût d'investissement initial très

Prix	Coût investissement	Coût Consommation électrique	Coût Consommation électrique avec soutien
HT en €	38496	397,18	106,84
TTC en €	45040,32	424,98	114,32

Tableau 3.20 : Récapitulatif climatiseur solaire à adsorption syst(B).

Système	Ci € TTC	Ci/Ci ref	Cce € TTC	Cce/Cce ref	Cce € TTC avec soutien	Cce/Cce ref
(A)	4381,72	1,00	677,5	1,00	182,24	1,00
(B)	45040,32	10,28	424,98	0,63	114,32	0,63

Tableau. 3.21 : Coût investissement et coût Consommation électrique pour syst(A) et (B).

Système	Ci/Ci réf	Cce/Cce réf
(A)	1,00	1,00
(B)	10,28	0,63

Tableau.3.22 : Récapitulatif de l'étude comparative pour syst(A) et (B)

élevé par rapport au climatiseur mono-split syst(A), par contre il est avantageux de point de vue coût de consommation électrique ce qui nous oriente à étudier la durée d'amortissement du climatiseur solaire syst(B) par rapport au climatiseur mono-split syst(A).

6. La durée d'amortissement

La durée d'amortissement est la durée de retour sur investissement d'une installation, afin de réduire au maximum la durée d'amortissement d'une installation, la meilleure option reste de diminuer sa consommation d'énergie le plus possible. La durée de vie de climatiseur solaire syst(B) est nettement plus de 25 ans contre 15 ans au climatiseur mono-split syst(A) selon [consoGlobe 2018].

Les équations suivantes donnent le coût d'investissement cumulé des climatiseurs examinés, elles sont données en fonction du coût d'investissement, coût de consommation électrique et coût de la maintenance. Pour l'électricité non soutenue par l'état on donne les équations 3.3, 3.4 et 3.5 lient les différents facteurs influents sur le coût d'investissement cumulé du système de climatisation.

$$C_{c \text{ syst}} = C_i + x(C_{ce} + C_m) \quad (3.3)$$

$$C_{c \text{ syst A}} = 4381,72 + x(677,5 + 43,81)$$

$$C_{c \text{ syst A}} = 4381,72 + x(721,31) \quad (3.4)$$

$$C_{c \text{ syst B}} = 45040,32 + x(424,98 + 450,40)$$

$$C_{c \text{ syst B}} = 45040,32 + x(875,38) \quad (3.5)$$

Pour l'électricité soutenue par l'état on donne les équations 3.6 et 3.7 lient les différents facteurs influents sur le coût d'investissement cumulé du système de climatisation.

$$C_{c \text{ syst A}} = 4381,72 + x(182,24 + 43,81)$$

$$C_{c \text{ syst A}} = 4381,72 + x(226,05) \quad (3.6)$$

$$C_{c \text{ syst B}} = 45040,32 + x(114,32 + 450,40)$$

$$C_{c \text{ syst B}} = 45040,32 + x(564,72) \quad (3.7)$$

La figure 3.16 est consacrée pour la durée d'amortissement pour les deux systèmes A et B avec et sans soutien d'état, Selon la figure on peut constater que :

Lorsque l'état ne soutient pas l'électricité:

- Le coût accumulé du syst(B) est plus cher que le syst(A).

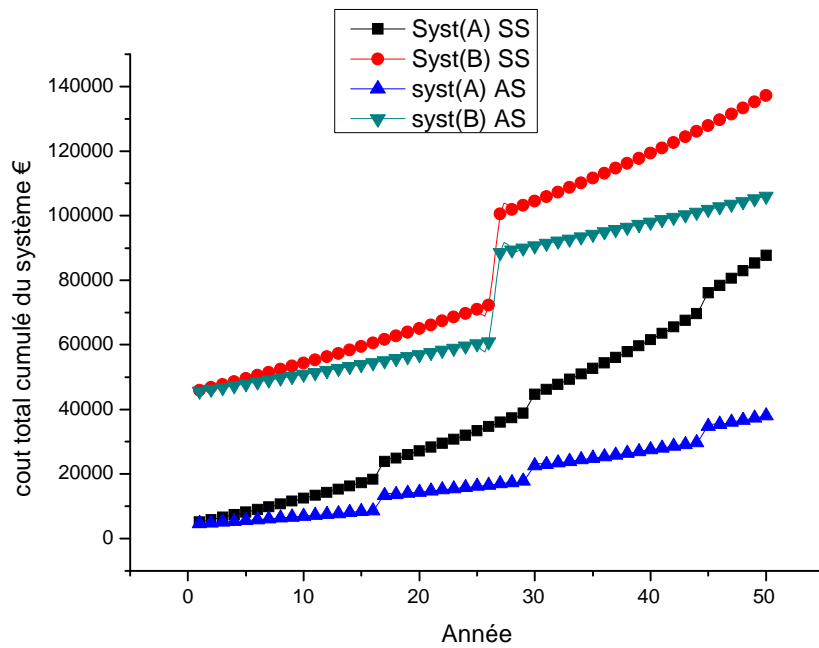


Fig. 3.16 : La durée d'amortissement des systèmes A et B sans et avec soutien

- Le décalage entre les deux coûts accumulés pour les deux systèmes est moins large

Lorsque l'état soutien l'électricité:

- Le coût accumulé du syst(B) reste aussi plus cher que le syst(A).
- Le décalage entre les deux coûts accumulés pour les deux systèmes est plus large
- Le climatiseur solaire syst(B) ne peut pas amortir le climatiseur mono-split syst(A) soit avec ou sans soutien d'état.

La figure 3.17 est consacrée pour la durée d'amortissement pour les syst(A) et (B) avec soutien initial du syst(B). Selon la figure on peut constater que :

Avant 25 ans :

- Le coût accumulé du syst(B) est moins cher que celui du syst(A)

Après 25 ans :

- Le climatiseur solaire syst(B) est plus cher que le climatiseur syst(A) mais on remarque que l'écart se diminue au fur et à mesure pour être égale à ce du syst(A).

La portée des résultats

- Les résultats contribuent à la protection de l'environnement

- Utiliser des fluides frigorigènes neutres vis-à-vis l'environnement

Piste de recherche et recommandation

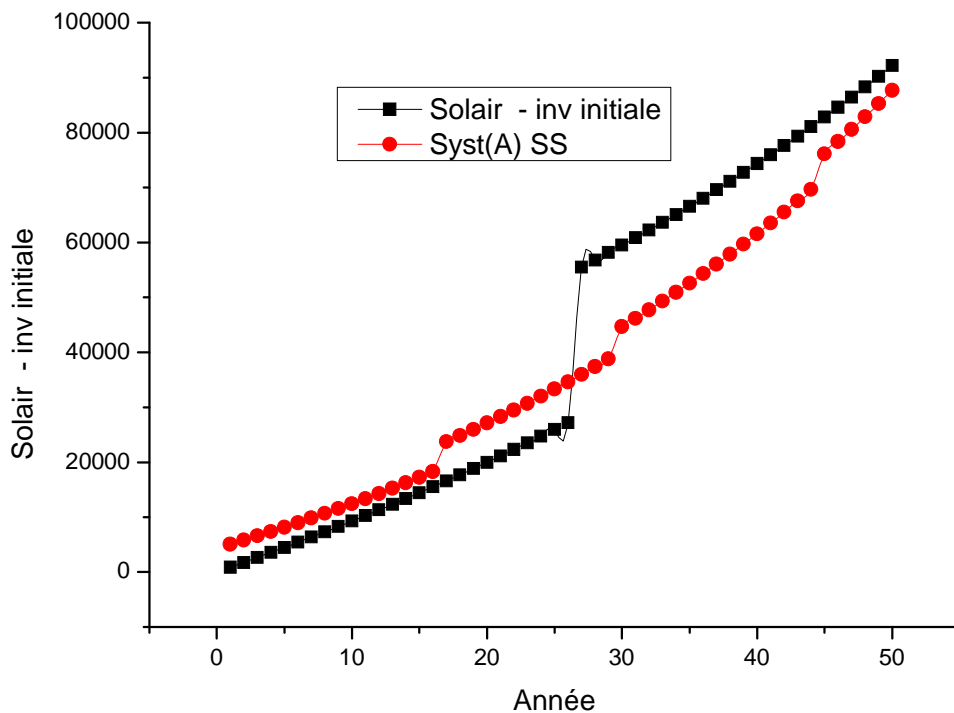
- Il est demandé d'étudier aussi le climatiseur centralisé à eau glacée syst(C).
- Comparer entre les systèmes de climatisation mono-split syst(A), climatiseur solaire à adsorption syst(B) et climatiseur centralisé à eau glacée syst(C) du point de vue coût d'investissement, coût de consommation d'électricité, dégagement de chaleur et Emission des gaz CO₂,

Une brève conclusion.

- Le climatiseur solaire à adsorption syst(B) a une importance considérable en Algérie par le soutien initial de l'état au lieu du climatiseur mono-split syst(A) ce qui protège l'environnement et la santé humaine.

7. Conclusion

En fonction du coût de l'électricité, l'étude technico-économique réalisée sur le projet type I (relatif



- **Fig.3.17** : La durée d'amortissement pour système A et B (avec soutien initiale).

Chapitre III : Faisabilité du climatiseur solaire à adsorption

au site de Biskra), montré la faisabilité du climatiseur solaire syst(B) par rapport au climatiseur classique mono-split syst(A) de points de vue coût investissement et consommation d'électricité.

L'étude comparative entre ces des deux systèmes a montré que le coût d'investissement relatif aux climatiseurs mono-split syst(A) est beaucoup moins cher que celui du climatiseur solaire syst(B). L'inconvénient de ce dernier résume dans son coût d'investissement initial très élevé. De point de vue coût consommation électrique, le climatiseur solaire syst(B) est trouvé moins cher que le climatiseur mono-split syst(A).

L'étude de la durée d'amortissement des deux systèmes a montré que le coût d'investissement du climatiseur solaire syst(B) peut être amorti en Algérie, pour concurrencer le système de référence, uniquement dans le cas où l'état réoriente son soutien de l'électricité vers le soutien de coût d'investissement du climatiseur solaire syst(B).

Le prochain chapitre s'intéresse à un projet type avec des besoins frigorifiques plus important en utilisant à la fois les deux systèmes A et B et un climatiseur centralisé à eau glacée syst(C). La comparaison se généralisera en se basant sur le coût d'investissement, coût de consommation d'électricité, dégagement de chaleur et Emission des gaz CO₂.

8. Bibliographie

- Benfatah, H., A. Benchabane, et al. (2011). Rafrachissement Solaire en Algérie par des Procédés de Sorption. Premier Séminaire Nationale de Génie Mécanique(SNGM01), Biskra.
- Benfatah, H. (2009). Etude du Rafrachissement par la Géothermie, Application à l'Habitat. Génie Mécanique. Biskra, Université Mohamed Khider: 107.
- Benhabiles, A., B. Abbad, et al. (2007). "Climatisation solaire en Algérie." Revue générale du froid & du conditionnement d'air(JUL): 22-26.
- Bentouba, S., A. Slimani, et al. (2010). L'énergie renouvelable en Algérie et l'impact sur l'environnement. 10ème Séminaire International sur la physique Energétique, Université Bachar(Algérie).
- Capderou, M. (1985). Atlas solaire de l'Algérie: Aspect énergétique, Office des publications universitaires.
- Catalogue LG : Mural standard 2017, Catalogue obtained from Website : [https://clim-elec-discount.com/wp-content/uploads/2017/01/LG-STANDARD.pdf\(2017\)](https://clim-elec-discount.com/wp-content/uploads/2017/01/LG-STANDARD.pdf(2017))
- Consoglobe. Climatisation solaire : fraîcheur sans pollution. disponible sur : <https://www.consoglobe.com/climatisation-solaire-fraicheur-pollution-3274-cg>. (2018)
- Desmons, J. (2009). Aide-mémoire de génie climatique-2e édition, Dunod.
- Fan, Y., L. Luo, et al. (2007). "Review of solar sorption refrigeration technologies: development and applications." Renewable and Sustainable Energy Reviews 11(8): 1758-1775.
- JDN. Prix de l'énergie en Europe. disponible sur : <http://www.journaldunet.com/economie/energie/prix-de-l-energie-en-europe.shtml>.(26 03 2018)
- SorTech AG, Cold from Heat Product Catalogue 2011, Catalogue obtained from Website: www.sortech.de (2011).
- Zotto, P. D., J.-M. Larre, et al. (2000). Mémotech Génie Energétique.

Chapitre IV

Recommandations sur l'usage du système solaire à adsorption

L'objectif de ce chapitre est de découvrir le climatiseur adéquat à la région de Biskra grâce à l'étude de la faisabilité du climatiseur solaire à adsorption syst(B) par rapport au climatiseur mono-split syst(A) et le climatiseur centralisé à eau glacée syst(C) installés à la ville de Biskra située au Sud-Est de l'Algérie. Une étude comparative entre ces trois systèmes est conduite, basée sur les mêmes hypothèses du troisième chapitre, sur le coût d'investissement, coût de consommation électrique, la chaleur rejetée à l'extérieur et l'émission des gaz CO₂.

1. Description du projet II

Le projet II est constitué d'un appartement d'habitation de R+1 où on installe les systèmes de climatisation prototypes. Il est situé à Biskra au Sud-Est de l'Algérie.

Les vues en plans et vue en perspective du projet sont présentées respectivement par fig. 4.1, fig. 4.2, fig. 4.3 et fig. 4.4.

Le calcul de bilan de climatisation est basé sur la méthode donnée par l'aide mémoire de génie climatique(Desmons 2009) et Mémotech Génie Énergétique(Zotto, Larre et al. 2000). La récapitulation du bilan de climatisation du projet type est donnée par le tableau 4.1. Les climatiseurs choisis comme prototypes dans ce projet sont le climatiseur mono-split syst(A), le climatiseur solaire à adsorption syst(B) et le climatiseur centralisé à eau glacée syst(C). L'intérêt général de ce projet est d'identifier les points forts et les points faibles des trois systèmes de climatisation pour relever le meilleur système de climatisation et le vrai future système de la climatisation pour motiver et encourager les chercheurs, les fabricants et les gouverneurs. Dans ce chapitre on donne les démarches méthodologiques suivantes pour chaque système :

- Sélection du système de climatiseur étudié, - Coût investissement - La consommation électrique,
- Le coût de la consommation électrique, - La chaleur dégagée par le système vers l'extérieur ,

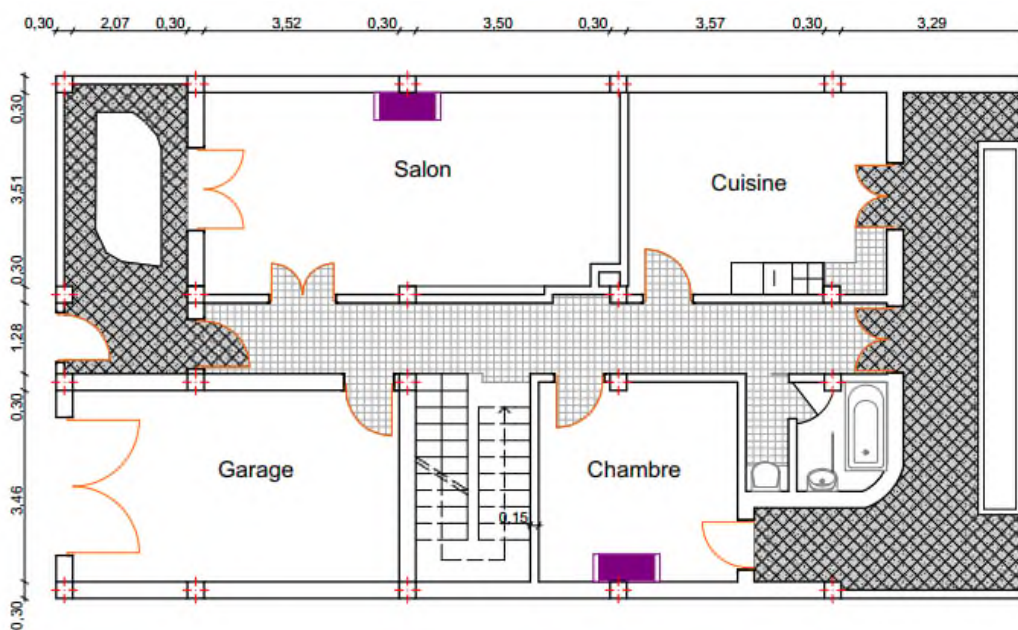


Fig. 4.1 : Vue en plan RDC

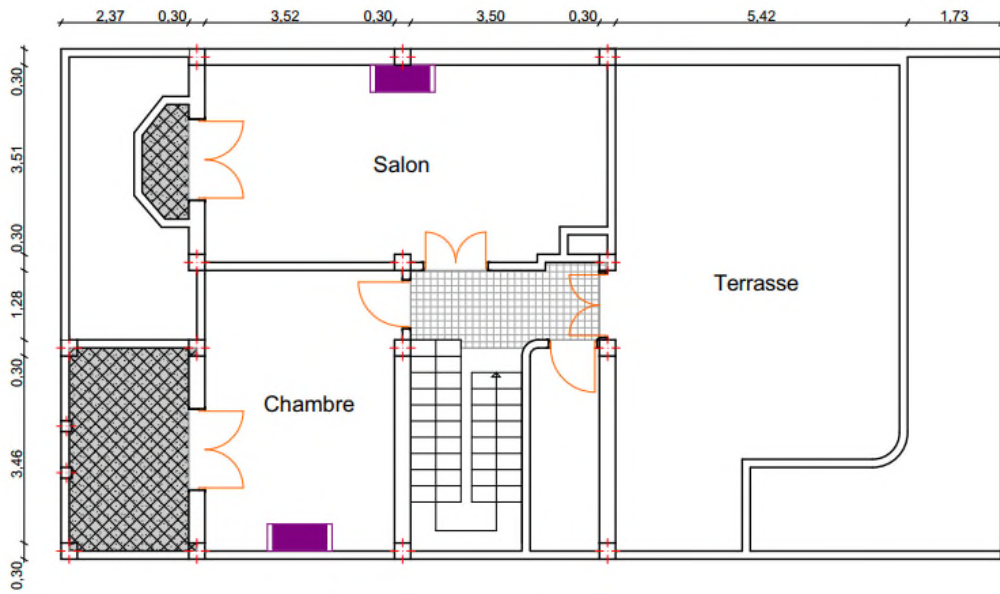


Fig. 4.2 : Vue en plan premier étage

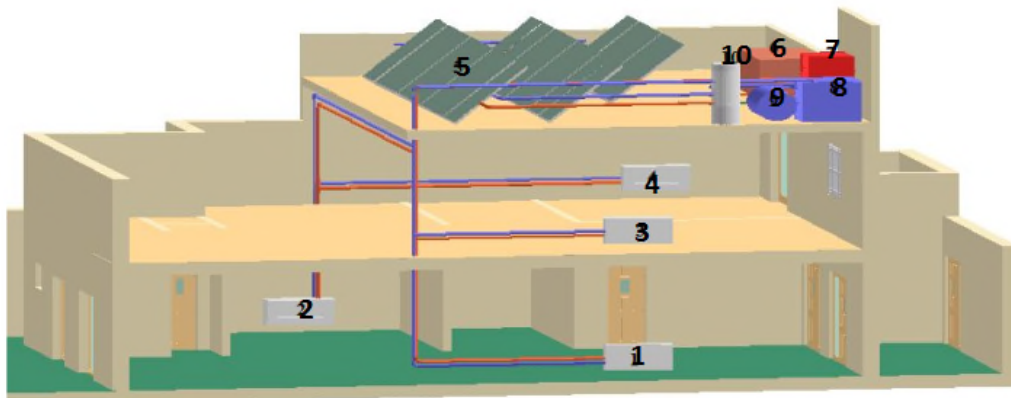


Fig. 4.3 : Vue en perspective du syst(B) sans murs de cloisons

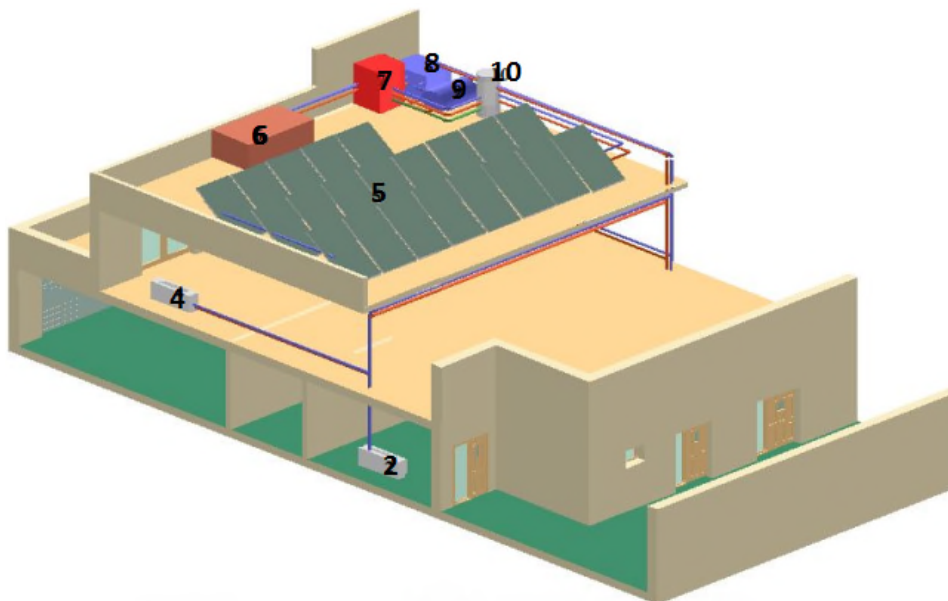


Fig. 4.4 : Vue en perspective du syst(B).

La légende : Chambre RDC : chambre 0, salon RDC : Salon 0, chambre 1^{er} étage : chambre 1, salon 1^{er} étage : Salon 1

1. Ventilateur-convecteur salon 0 ; 2. Ventilateur-convecteur chambre 0 ; 3. Ventilateur-convecteur salon 1 ; 4. Ventilateur-convecteur chambre 1 ; 5. Panneau solaire ; 6. Tour de refroidissement ; 7. Station de pompage ; 8. Refroidisseur d'adsorption ; 9. Ballon d'eau pour stockage de la chaleur ; 10. Citerne eau froide.
- Emission des gaz CO₂ - étude comparative entre les trois systèmes A, B et C, - étude de la durée d'amortissement et enfin - conclusions et recommandations.

Pour arriver aux objectifs cités, on suit un cadre théorique basé sur une étude comparative entre les trois systèmes de climatisation du point de vue coût investissement C_i, le coût de consommation électrique C_{ce}, le dégagement de chaleur vers l'extérieur Q_{re} et l'émission des gaz CO₂ E_{CO2}.

2. Etude du système de climatiseur mono-split syst(A)

2.1 Sélection du système de climatiseur mono-split système

En fonction du bilan thermique et selon (LG 2017) on donne un récapitulatif de la sélection du climatiseur syst(A) par le tableau.4.2.

2.2 Coût d'investissement du système de climatiseur mono-split système

Selon le catalogue (LG 2017) du fournisseur LG on donne un devis estimatif hors taxe selon le tableau.4.3.

Tous les prix exprimés en euros toute taxe comprise avec 7% de TVA pour la consommation électrique et 17% pour l'investissement.

Le coût total d'investissement avec TTC selon le tableau 4.3 est égal à $4928 \times 1,17 = 5765,76\text{€}$.

2.3 Consommation électrique du système de climatiseur mono-split système

On détermine la consommation électrique pour l'ensemble des climatiseurs mono-split syst(A) à partir du tableau.4.2 comme suit : $(3 \times 550\text{w}) + (1 \times 880\text{w}) = 2530\text{Watt}$.

Pour un fonctionnement de 18 h/Jour pendant tout l'été (4 mois et 15 jours) donc un total des heures de fonctionnement de 2430 h/an c-à-d une consommation électrique annuelle de 6148KWh.

Désignation	Salon 0	Chambre 0	Salon 01	Chambre 01	Total
Puissance w	2699,34	1562,55	2192,68	2977,21	9431,77

Tableau 4.1 : Récapitulation du bilan de climatisation (Zotto, Larre et al. 2000; Desmons 2009)

2.4 Coût de la consommation électrique du système de climatiseur mono-split système

En moyenne, les ménages de l'Union européenne payent leur électricité en 13,16 centimes d'euros le kilowatt/heure (kWh) hors taxes (JDN 2018).

Le coût de consommation électrique HT est égal à $6147,9 \times 0,1316 = 809,06\text{€}$.

Donc $C_{cc}(\text{en HT}) = 809,06\text{€}$.

Le coût de consommation électrique $C_{cc}(\text{en TTC}) = 809,06\text{€} \times 1,07 = 865,70\text{€}$

2.5 Dégagement de la chaleur au niveau de condenseur du système de climatiseur mono-split.

La puissance thermique dégagée par le condenseur est donnée par $Q_{cd} = Q_0 + W_{ab}$, Selon le tableau 4.2 on trouve $Q_{0\text{ tot}} = (3 \times 2500) + (1 \times 3500) = 7\,500 + 3500 = 11000\text{watt}$

$W_{ab\text{ tot}} = (3 \times 550) + (1 \times 880) = 2\,530\text{watt}$, $Q_{cd\text{ tot}} = Q_{0\text{ tot}} + Q_{ab} = 11000 + 2530 = 13530\text{watt} = 13,53\text{ KW}$

La chaleur dégagée au condenseur par jour est égale à $13,53 \times 18 = 243,54\text{KWh/jour}$. La chaleur dégagée au condenseur par an est égale à $13,53 \times 2430\text{ h/an} = 32\,877,9\text{KWh}$.

2.6 La chaleur rejetée à l'extérieur par le système de climatiseur mono-split système

La chaleur rejetée à l'extérieur par le syst(A) est donnée par l'équation 4.1 :

$$Q_{re} = Q_{cd} + Q_{nc} \quad (4.1)$$

La chaleur rejetée à l'extérieur pour le syst(A) par jour est égale à :

$$Q_{re} = Q_{cd} + Q_{nc} = 243,54 + 294 = 537,54\text{KWh/jour}.$$

La chaleur rejetée à l'extérieur pour le syst(A) par an est égale à $Q_{re} = 537,54 \times 135 = 72\,567,9\text{ KWh/an}$.

Désignation	Salon 0/Chambre 0/Salon 1	Chambre 1
Puissance frigorifique w	2500	3500
Modèle	A09VK.NSB/S09AK.UL2	A12RK.NSB/S12AK.UL2
COP	4.6	3.68
EER	4,55	3,98
Qab w	550	880

Tableau.4.2 : Récapitulatif de la sélection du syst(A)

Climatiseur	Salon 0	Chambre 0	Salon 1	Chambre 1	total	Maintenance annuelle
Prix HT en €	1182,94	1182,94	1182,94	1379,18	4928	49,28

Tableau.4.3 : Récapitulatif de cout d'investissement HT du syst(A)

2.7 Emission des gaz CO₂ par le système de climatiseur mono-split système

La production d'électricité mondiale est principalement issue des combustibles fossiles. Le principal inconvénient de ces combustibles fossiles est l'émission de dioxyde de carbone qui est l'un des gaz à effet de serre responsable du réchauffement climatique. Les différents combustibles employés sont donnés par la figure 4.5. L'augmentation de la concentration du CO₂, et des autres gaz à effet de serre provoque une augmentation de la température moyenne sur terre, ce qui présente de grands dangers(Bentouba, Slimani et al. 2010). En Algérie on considère 1kWh d'électricité émet 548g de CO₂ selon (International Energy Agency 2016).

L'émission de CO₂ est le produit de l'émet de CO₂ de 1KWh par consommation électrique annuelle $E_{CO_2}=548*6147,9=3\ 369\ 049,2g$ de CO₂=3369,05Kg de CO₂, donc L'émission des gaz CO₂ par an pour le syst(A) est 3369,05Kg.

3.Etude du système de climatiseur solaire à adsorption

3.1 La sélection du système de climatiseur solaire à adsorption

On s'intéresse pour ce système à la sélection de Refroidisseur à adsorption, tour de refroidissement et tubes de connexion, Station de pompage, capteur solaire, réservoir d'eau de stockage de chaleur , réservoir stockage eau froide, ventilo-covecteur et adoucisseur.

Pour cette installation on utilise pour capter le rayonnement solaire les capteurs solaires plans, ce type de capteur est réalisé localement et le refroidisseur d'adsorption utilise des températures faibles lors de son fonctionnement.

La sélection est faite d'après le catalogue (SorTech AG 2011), elle a donnée les appareilles suivants :

3.1.1 Refroidisseur à adsorption, tour de refroidissement, Station de pompage et tubes de connexion

D'après le catalogue (SorTech AG 2011) et pour la puissance frigorifique calculée on a choisi le refroidisseur à adsorption ACS 08, la tour de refroidissement RCS 08, Station de pompage PCS 08 et tubes de connexion Set PCS 08, leurs caractéristiques sont données par les tableaux 4.4, 4.5, 4.6, 3.9 et 3.10.

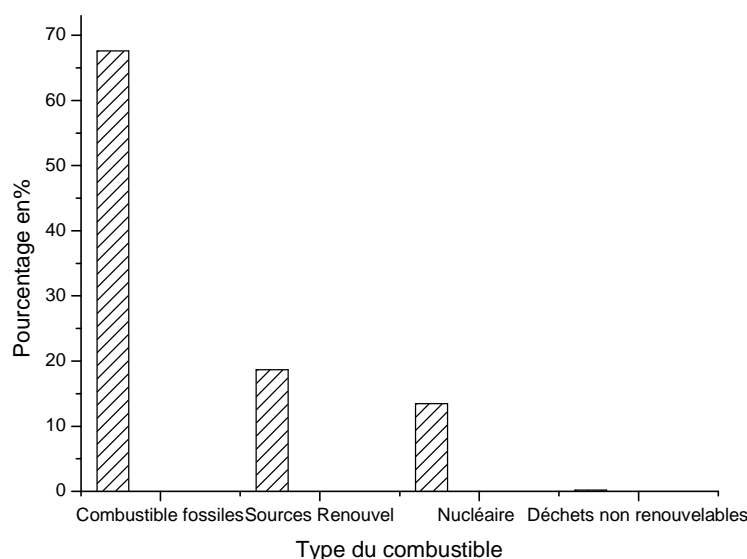


Fig. 4.5 : Différents combustibles utilisés pour produire l'électricité (Bentouba, Slimani et al. 2010)

3.1.2 Le capteur solaire plan

La sélection du capteur solaire est faite d'après (Twenga 2015), on a choisi le Capteur Bt Collector ou la superficie d'entrée est $1,859\text{m}^2$ ce qui nous donne un total de vingt et un capteurs. Les caractéristiques du capteur solaire plan sélectionné sont données selon le tableau 3.11.

3.1.3 Ballon solaire pour le stockage de la chaleur

La sélection est faite à partir du site (Fundiscount 2015), leurs caractéristiques sont données par le tableau 3.12.

3.1.4 Citerne à eau

La sélection de la citerne à eau est faite à partir de (Twenga 2015), elle a donnée le modèle horizontale Duraplas, leurs caractéristiques sont données selon le tableau 3.13.

3.1.5 Ventilateur-convecteur

La sélection des ventilateur-convecteurs est faite à partir de (carrier 2011), leurs caractéristiques sont données par le tableau 4.7.

3.1.6 Adoucisseur

Un adoucisseur d'eau est un dispositif qui capte les ions calcaires, responsables de la formation du tartre dans les différentes canalisations.

Modèle	ACS 08
Puissance frigorifique nominale	8kw
COP thermique nominal	0.60
Capacité frigorifique kw	5-11
Capacité calorifique kw	10-25kw
Consommation électrique w	7
Dimensions W/L/H cm	79/106/94
Poids net kg	265
COP thermique max	0.65
la plage de fonctionnement	
circuit d'eau glacée °C	6-20
Circuit de rejet de chaleur °C	22-37
conduite circuit de chauffage °C	55-95

Tableau 4.4 : Les caractéristiques et plage de fonctionnement du refroidisseur à adsorption ACS 08

3.2 Coût d'investissement

D'après les catalogues des fournisseurs on donne le coût des appareillages par tableau 4.8.

3.3 Consommation électrique

D'après les catalogues du fournisseur on donne la consommation électrique pour les différents appareillages par le tableau.4.9. Pour 2430 h/an de fonctionnement la consommation électrique en KWh/an est égale à $1,906 \times 2430 = 4631,58$ KWh.

3.4 Coût de la consommation électrique

Le coût de la consommation électrique hors taxe est égal à : $C_{ce} = 4\,631,58 \times 0,1316 = 609,51\text{€}$

3.5 La chaleur rejetée à l'extérieur

Pour le calcul de l'énergie nécessaire à la production d'eau chaude utilisée par le refroidisseur syst(A)

Il faut d'abord connaître le volume d'eau chaude nécessaire pour un bon fonctionnement. La description des composants nous donnons un débit d'eau chaude pour le refroidisseur d'adsorption de $1,6\text{m}^3/\text{h}$, Lors d'une opération de 18h on a besoin de volume d'eau égal à 28800 litre

Circuit eau glacée	Température entrée/sortie	°C	18/15
	Débit volumique	.m ³ /h	2.0
	Perte de charge	.mbar	300
	Pression de service max	.bar	4
	Filetage extérieur de connexion		1'
Circuit rejet chaleur	Température entrée/sortie	°C	27/32
	Débit volumique	.m ³ /h	3.7
	Perte de charge	.mbar	350
	Pression de service max	.bar	4
	Filetage extérieur de connexion		1'
Circuit conduit chaleur	Température entrée/sortie	°C	72/65
	Débit volumique	.m ³ /h	1.6
	Perte de charge	.mbar	230
	Pression de service max	.bar	4
	Filetage extérieur de connexion		3/4'

Tableau.4.5 : Caractéristiques du circuit de Refroidisseur à adsorption ACS 08

fourniture d'électricité	Voltage	V	230
	fréquence	Hz	50
	Consommation	w	7
Dimensions	longueur	mm	790
	largeur	mm	1060
	hauteur	mm	940
	Poids net	kg	265
	poids Brut	kg	295

Tableau. 4.6 : Dimensions du refroidisseur à adsorption ACS 08

Caractéristiques	Salon 0 et 1	Chambre 0	Chambre 1
Puissance frigorifique	2699,34w/2192,68w	1562,55w	2977,21w
Taille	29	19	39
Puissance abs ventilo	15w	14w	35 w
Intensité nominale	0,16	0,15	0,29
Tension nominale	230 V - 1 ph - 50 Hz	230 V - 1 ph - 50 Hz	230 V - 1 ph - 50 Hz
LxlxH mm	1030x 220x 657	830 x 220x 657	1230x220x657
Cout HT €	2502	1191	1387€

Tableau. 4.7 : Caractéristiques des ventilo-convecteurs sélectionnés

Désignation	cout €
Refroidisseur à adsorption ACS 08	9990
Tour de refroidissement RCS 08	3690
Station de pompage	4239
Ensemble de raccordement PCS 08	245
Capteur solaire	14385
Réservoir d'eau de stockage de chaleur	660
Réservoir stockage eau froide	238,00
Ventilo-convecteur	5080
Adoucisseur	1790
Total HT	39687

Tableau. 4.8 : Le cout des appareillages du syst(B).

alors la quantité d'énergie nécessaire E_{ECN} utilisée par le refroidisseur d'adsorption est donnée par l'équation 4.2.

$$E_{ECN} = q_v \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{EEC} - T_{SEC}) \cdot t \quad (4.2)$$

Où C_p est la capacité calorifique de l'eau (4.2 KJ/kg/°c), ρ sa masse volumique (1 kg/l), et T_{EEC} ;

Désignation	Consommation électrique w
Refroidisseur à adsorption ACS 08	7
Tour de refroidissement	650*2
Station de pompage	520
Ventilo-convecteur	79
Total	1906

Tableau.4.9 : Consommation électrique du syst (B).

T_{SEC} température d'entrée et sortie d'eau chaude. Les températures d'entrée et de sortie d'eau chaude sont prisent $72^{\circ}c$ et $65^{\circ}c$ respectivement, q_v débit volumique d'eau chaude pour le refroidisseur d'adsorption exprimé en m^3/h , t temps de fonctionnement par jour exprimé en heure. Le besoin énergétique sera :

$$E_{ECN}=(1600/3600).1.4,2.(72-65).18=235,20kwh.$$

Puisque le rendement du capteur est 80% donc la chaleur journalière non captée a ajoutée pour le système de climatisation classique est $235,20*100/80=294KWh$. Donc la chaleur journalière non captée à ajoutée au climatiseur solaire syst(B) est : $294-235,20=58,8kWh$.

La chaleur journalière rejetée à l'extérieure $Q_{re}=Q_{tour}+Q_{nca}=378+58,8 =436,8KWh$.

La chaleur annuelle rejetée à l'extérieure $Q_{re}=436,8*135=58968KWh/an$.

3.6 Emission des gaz CO_2

L'émission des gaz CO_2 pour le climatiseur solaire à adsorption syst(B) est donnée en fonction de la consommation électrique annuelle et l'émission d'un KWh d'électricité en Algérie. En Algérie on considère 1kWh d'électricité émet 548g de CO_2 selon (International Energy Agency 2016). Donc $E_{CO_2}=Ce*0,548=4631,58*0,548=2538,10Kg$ par an.

4.Etude du système de climatiseur centralisé à eau glacée

4.1 Sélection des composants

On s'intéresse pour ce système à la sélection des ventilo-convecteurs, le groupe à eau glacé, le circulateur d'eau et un adoucisseur.

4.1.1 ventilo-convecteur

D'après le catalogue (carrier 2011) et en fonction du bilan thermique les caractéristiques des ventilo-convecteurs sélectionnés sont données par le tableau 4.10.

4.1.2 Groupe eau glacée

On calcule la puissance frigorifique Q_0 du groupe eau glacée avec une majoration de 10%.

$$Q_0 = (2,54 + 1,49 + 2,54 + 3,7) * 1,10 = 11,30 \text{KW}$$

Pour la sélection du Groupe Eau Glacée Air/Eau R404A on utilise (carrier 2011) et on choisit le modèle 30RB017. Les caractéristiques du groupe choisi sont données par le tableau.4.11.

4.1.3 Circulateur et adoucisseur

La sélection du circulateur et l'adoucisseur est donnée par le tableau 4.12.

4.2 Coût investissement

Le coût d'investissement du syst(C) d'après (carrier 2011) est donné par le tableau 4.13. Donc $C_i \text{ HT} = 23320,76\text{€}$ et $C_i \text{ TTC} = 23320,76 * 1,17 = 27285,22\text{€}$.

4.3 Consommation électrique

La Consommation électrique du syst(C) d'après (carrier 2011) est donnée par le tableau 4.14.

La consommation électrique annuelle en KWh est $C_e = 7,939 \text{KW} * 2430 \text{h} = 19291,77 \text{KWh}$.

4.4 Coût de consommation électrique

Selon la consommation électrique annuelle, on aura un coût de consommation électrique annuelle en TTC est $(19291,77 * 0,1316) * 1,07 = 2716,51\text{€}$, c'est à dire $C_{ce} = 2716,51\text{€}/\text{an}$.

4.5 Dégagement de la chaleur au niveau du condenseur

Selon le catalogue du fournisseur (carrier 2011) la puissance frigorifique $Q_0 = 16,4 \text{Kw}$, La puissance absorbée par compresseur est $Q_{ab} = 7,8 \text{KW}$, on obtient une puissance thermique dégagée par le

Caractéristiques	Salon 0 et 1	Chambre 0	Chambre 1
Puissance frigorifique	2699,34w/2192,68w	1562,55w	2977,21w
Taille	29	19	39
Puissance abs ventilo	15w	14w	35 w
Intensité nominale	0,16	0,15	0,29
Tension nominale	230 V - 1 ph - 50 Hz	230 V - 1 ph - 50 Hz	230 V - 1 ph - 50 Hz
LxlxH mm	1030x 220x 657	830 x 220x 657	1230x220x657
Cout HT €	2502	1191	1387€

Tableau. 4.10 : Les caractéristiques des ventilo-convecteurs sélectionnés pour le syst(C).

Modèle	30RB017
Puissance frigorifique kw	16.4
EER(Efficacité énergétique)	3,04
L x lx h mm	1136 x 584 x 1579
Unité avec alimentation	Tri 400V+T
Circuit puissance V-ph-Hz	400-3-50
Puissance absorbée KW	7.8
Intensité nominal de l'unité A	8
Cout Total HT €	16115
Source	Catalogue carrier

Tableau. 4.11 : Caractéristiques du Groupe Eau Glacée Air/Eau R404A sélectionné

Désignation	Modèle	Cout HT €
Circulateur eau	GRUNDFOS UP	335,76
Adoucisseur	Prestige Bio 30 L	1790

Tableau. 4.12: Sélection du circulateur et adoucisseur

Désignation	Prix HT €
Ventilo	5080
Groupe	16115
Circulateur eau	335.76
Adoucisseur	1790
Total HT	23320.76

Tableau. 4.13 : Cout d'investissement du syst(C).

condenseur est $16,4+7,8=24,2\text{KW}$.

La quantité de chaleur journalière dégagée par le condenseur est $Q_{cd}=24,2*18=435,6\text{KWh/jour}$.

La quantité de chaleur annuelle dégagée par le condenseur $Q_{cd}=24,2*2430\text{ h}=58\ 806\text{KWh/an}$

4.6 La chaleur rejetée à l'extérieur

Comme le syst(A) : $Q_{re}=Q_{cd}+Q_{nca}$

Désignation	Ce w
Ventilo-convecteur	79
Groupe	7800
Circulateur eau	60
Total	7939

Tableau 4.14 : Consommation électrique du climatiseur syst C

On a $Q_{cd}=435,6\text{KWh/jour}$ par contre, $Q_{nca}=294\text{KWh/jour}$.

$Q_{re}=435,6+294=729,6\text{KWh/jour}$, $Q_{re}=(435,6+294)*135=98\ 496\text{KWh/an}$

4.7 Emission des gaz CO2

En Algérie on considère 1kWh d'électricité émet 548g de CO₂ selon (International Energy Agency 2016). L'émission de CO₂ est le produit de l'émet de CO₂ de 1KWh par la consommation électrique annuelle. $E_{CO_2}=0,548*Ce=0,548*19291,77=10571,89\text{Kg}$.

5. Comparaison et discussions

5.1 Coût d'investissement

D'après l'étude du coût d'investissement pour les syst(A), syst(B) et le syst(C), nous donnons une récapitulation de ceux-ci selon le tableau. 4.15. On remarque que le coût du syst(B) est le plus cher par contre le syst(A) est le moins cher.

5.2 Consommation électrique

D'après l'étude de la Consommation électrique pour les trois systèmes (A), (B) et le syst(C) nous donnons une récapitulation de ceux-ci selon le tableau. 4.16.

On remarque que la consommation électrique du syst(B) est moins que celle du syst(A) et (C).

5.3 Coût de consommation électrique

D'après l'étude du Coût de consommation électrique sans soutien de l'état pour les trois systèmes le tableau. 4.17 nous donne une récapitulation de ceux-ci, afin de pouvoir comparer, nous calculons le prix de 1KWh d'électricité soutenu par l'état Algérien à un prix de 4.179 Dinars Algériens, DA, équivalent à 0.0354€, on donne le coût d'investissement avec soutien d'état pour les trois systèmes. Selon le tableau 4.18. On remarque que le coût de la consommation du syst(B) est la plus faible.

5.4 Dégagement de chaleur au condenseur et au tour de refroidissement

Le dégagement de chaleur au condenseur et au tour de refroidissement pour les trois systèmes est donné par le tableau. 4.19 Ainsi Le tableau 4.20 nous donne la chaleur non capté pour les trois systèmes.

5.5 La chaleur rejetée à l'extérieur

D'après l'étude de la chaleur rejetée à l'extérieur pour les trois systèmes le tableau. 4.21 nous donne une récapitulation de ceux-ci. On remarque que la chaleur rejetée à l'extérieur par le syst(B) est la plus faible par contre la chaleur rejetée à l'extérieur par le syst(C) est la plus élevé.

5.6 Emission des gaz CO₂

D'après l'étude de l'Emission des gaz CO₂ pour les trois systèmes le tableau 4.22 nous donne une récapitulation de ceux-ci. On remarque que l'Emission des gaz CO₂ par le syst(B) est la plus faible par contre émission des gaz CO₂ par le syst(C) est la plus élevé.

5.7 Récapitulation

Le résumé de l'étude comparative est donné par le tableau récapitulatif 4.23. D'après ce dernier et

Système	Ci TTC €	Ci/Ci réf
(A)	5765,76	1,00
(B)	46433,79	8,05
(C)	27285,29	4,73

Tableau. 4.15 : Coûts investissements pour les sys(A), syst(B) et syst(C).

Système	Ce KWh
(A)	6147,9
(B)	4361,58
(C)	19291,77

Tableau 4.16 : Consommation électrique pour les sys(A), syst(B) et syst(C).

Système	Cce SS € TTC	Cce SS/Cce SS réf
(A)	865,70	1,00
(B)	652,17	0,75
(C)	2716,50	3,14

Tableau.4.17 : Cout consommation électrique sans soutien d'état pour les sys(A), syst(B) et syst(C).

Système	Cce AS € TTC	CceAS/CceASréf
(A)	232,87	1,00
(B)	175,43	0,75
(C)	730,73	3,14

Tableau. 4.18 : Cout consommation électrique avec soutien d'état pour les trois systèmes A, B et C.

Système	Qcd-tour KWh	Qcd-tour/Qcd réf
(A)	243,54	1,00
(B)	378	1,55
(C)	435,6	1,79

Tableau. 4.19 : Dégagement de chaleur au condenseur et au tour de refroidissement

Système	Qnca KWh	Qnca/Qnca réf
(A)	294	1,00
(B)	58,8	0,20
(C)	294	1,00

Tableau. 4.20 : La chaleur journalière non capté pour les trois systèmes A, B et C.

Système	Qre KWh	Qre/Qre réf
(A)	537,54	1,00
(B)	436,8	0,81
(C)	729,6	1,36

Tableau 4.21 : La chaleur journalière rejetée à l'extérieur pour les trois systèmes A, B et C.

figure.4.6 on extraire les résultats suivants :

Le coût d'investissement initial du climatiseur solaire syst(B) est plus cher,

Le coût de consommation électrique du climatiseur solaire syst(B) est le moins cher ;

La chaleur rejetée à l'extérieur par le climatiseur solaire syst(B) est la moins faible ;

L'émission des gaz CO₂ par le climatiseur solaire syst(B) est la moins faible ;

Le coût d'investissement initial du climatiseur mono-split syst(A) est le moins cher ;

Le coût de consommation électrique du climatiseur syst(A) est moins cher que celui du syst(C) ;

La chaleur rejetée à l'extérieur par le syst(A) est moins faible que celle du climatiseur syst(C) ;

Système	E_{CO_2} Kg	$E_{CO_2}/E_{CO_2 \text{ réf}}$
(A)	3369,05	1,00
(B)	2538,10	0,75
(C)	10571,89	3,14

Tableau 4.22 : Emission des gaz CO₂ pour les trois systèmes A, B et C.

Système	$C_i/C_i \text{ réf}$	$C_{ce}/C_{ce \text{ réf}}$	$Q_{re}/Q_{re \text{ réf}}$	$E_{CO_2}/E_{CO_2 \text{ réf}}$
(A)	1,00	1,00	1,00	1,00
(B)	8,05	0,75	0,81	0,75
(C)	4,73	3,14	1,36	3,14

Tableau. 4.23 : Récapitulatif de l'étude comparative

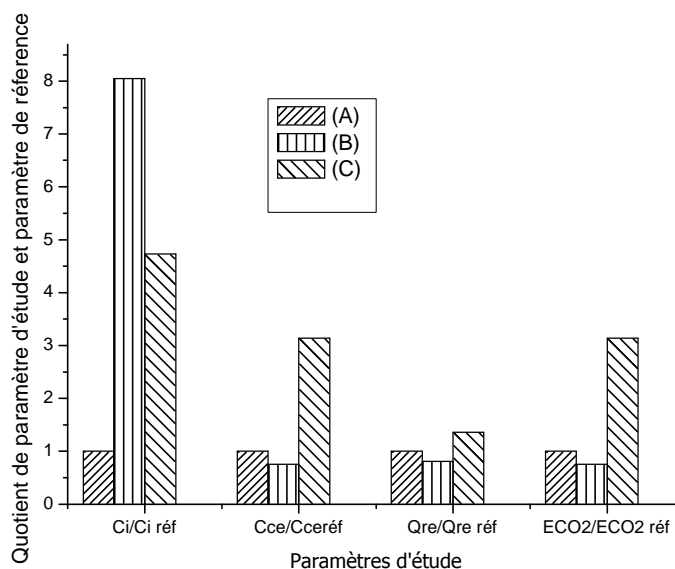


Fig.4.6 : Récapitulatif de l'étude comparative

L'émission des gaz CO₂ par le climatiseur mono-split sys(A), est moins faible que celle du climatiseur centralisé à eau glacée sys(C) ;

L'émission des gaz CO₂ par le climatiseur centralisé sys(C) est la plus élevée.

Donc comme brève conclusion le seul inconvénient du climatiseur solaire sys(B), est son coût d'investissement initial très élevé par rapport aux sys(A) et syst(C)

Par contre climatiseur solaire sys(B) est avantageux par rapport aux systèmes A et C. soit du point de vue coût de consommation électrique, dégagement de chaleur à l'extérieur et émission des gaz CO₂. On remarque aussi que le climatiseur mono-split syst(A) est plus avantageux que le climatiseur

centralisé à eau glacée syst(C) soit du point de vue coût d'investissement, coût consommation électrique, chaleur dégagée à l'extérieur et émission des gaz CO₂.

Ces résultats nous oriente a étudié la durée d'amortissement du climatiseur solaire syst(B) par rapport aux syst(A) et syst(C).

6. La durée d'amortissement

Pour étudier la durée d'amortissement lorsque l'état n'intervient pas (sans soutien) on donne les équations 4.3 ,4.4 et 4.5 lient les différents facteurs influents sur le coût accumulé d'un système de climatisation.

$$C_{c \text{ syst } A} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 5765,76 + x(865,69 + 57,65)$$

$$C_{c \text{ syst } A} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 5765,76 + 923,34x \quad (4.3)$$

$$C_{c \text{ syst } B} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 46433,79 + x(652,18 + 464,33) = 46433,79 + 1116,51x \quad (4.4)$$

$$C_{c \text{ syst } C} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 27285,29 + x(2716,51 + 272,85)$$

$$C_{c \text{ syst } C} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 27285,29 + 2989,39x \quad (4.5)$$

Pour étudier la durée d'amortissement lorsque l'état intervient (avec soutien) on donne les équations 4.6, 4.7 et 4.8 lient les différents facteurs influents sur le coût accumulé d'un système de climatisation.

$$C_{c \text{ syst } A} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 5765,76 + x(232,69 + 57,65)$$

$$C_{c \text{ syst } A} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 5765,76 + 290,34x \quad (4.6)$$

$$C_{c \text{ syst } B} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 46433,79 + x(175,29 + 464,33)$$

$$C_{c \text{ syst } B} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 46433,79 + 639,62x \quad (4.7)$$

$$C_{c \text{ syst } C} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 27285,29 + x(730,16 + 272,85)$$

$$C_{c \text{ syst } C} = C_i + x(C_{ce} + C_m) = 27285,29 + 1003,01x \quad (4.8)$$

La figure 4.7 est consacrée pour la durée d'amortissement pour les trois systèmes A, B et C sans soutien de l'état, on constate que :

Avant neuve ans le climatiseur solaire syst(B) est le plus cher, le climatiseur mono-split syst(A) est le moins cher.

A neuve ans le climatiseur solaire syst(B) et le climatiseur centralisé syst(C) ont le même cout, le climatiseur solaire syst(B) est plus cher que le climatiseur mono-split syst(A).

Après neuve ans le climatiseur solaire syst(B) est moins cher que le climatiseur centralisé syst(C), le

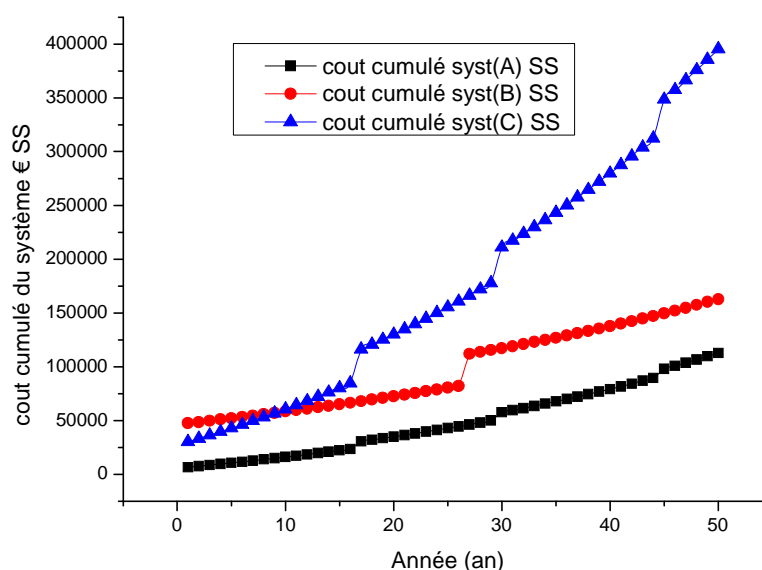


Fig. 4.7 : La durée d'amortissement pour les trois systèmes (sans soutien) (Benfatah, Benchabane et al. 2018).

Le climatiseur solaire syst(B) est plus cher que le climatiseur mono-split syst(A).

La figure 4.8 est consacrée pour la durée d'amortissement pour les deux systèmes A et B sans et avec soutien d'état, on constate que lorsque l'état ne soutient pas le coût cumulé du syst B est plus cher que celui du syst A et le décalage entre eux est moins large. Dans le deuxième cas l'état soutient le coût cumulé du syst(B) reste aussi plus cher que celui du syst(A) mais le décalage entre eux est plus large. La figure 4.9 est consacrée pour la durée d'amortissement pour les deux systèmes A et B avec soutien initial du syst(B). on constate qu'avant vingt sept ans le coût cumulé du syst(B) est moins cher que celui du syst(A), Après vingt sept ans le climatiseur solaire syst(B) est plus cher que le climatiseur syst(A) mais on remarque que l'écart se diminue pour être égal à celui du syst(A) au environ de cinquante ans.

A la fin de ce chapitre l'utilisation du climatiseur solaire à adsorption peut fournir les résultats remarquables suivants :

Utiliser l'énergie solaire au lieu de l'énergie électrique dans la climatisation durant la période estivale, Contribution à la protection de l'environnement, moins d'émission des gaz CO₂, diminuer le dégagement de chaleur vers le milieu extérieur, utiliser des fluides frigorigènes neutres vis-à-vis l'environnement et Contribution à la protection de la santé publique.

On présente aussi les recommandations suivantes, l'état Algérien doit changer son soutien vers le climatiseur syst(B) au lieu du climatiseur syst(A) où on arrive après cinquante ans à protéger l'environnement et la santé humaine sans aucune perte financière, mettre en relation le monde de la recherche avec le monde socio-économique, mettre à disposition de la société les résultats de la recherche qu'elle a contribué à financer, accompagner la maturation de ces résultats jusqu'à mesurer

leur valeur économique, encadrer les transferts de technologies et de connaissances, Contribuer à la création d'entreprises, développer les collaborations scientifiques avec des partenaires extérieurs, faciliter le transfert des résultats de la recherche vers la société civile.

Pour la critique de la recherche nous attirons l'attention que ses résultats correspondent à un projet de petit volume c'est-à-dire pour un projet de grand volume on peut voir d'autres résultats d'une part

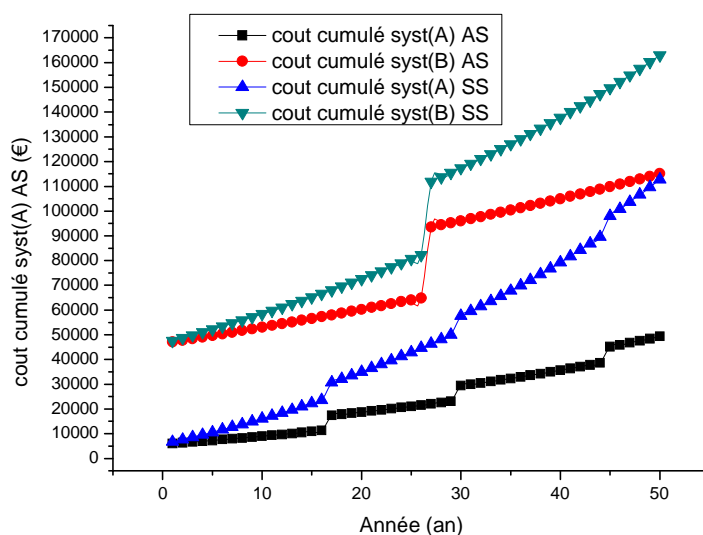


Fig.4.8 : La durée d'amortissement pour les deux systèmes A et B avec et sans soutien(Benfatah, Benchabane et al. 2018).

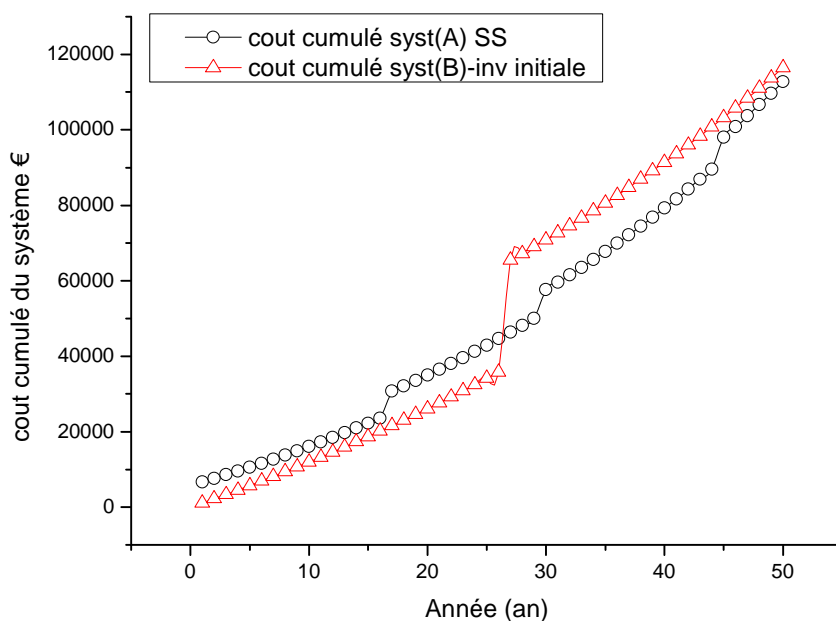


Fig.4.9 : La durée d'amortissement pour système A et B (moins investissement initiale) (Benfatah, Benchabane et al. 2018).

d'autre part ses résultats dépendent des coûts d'investissement, des équipements et de consommation d'électricité qui sont variable avec le temps et selon le pays. Certaines suppositions limitent la valeur de ces résultats puisque elles dépendent de l'état tel que le TVA, le coût électricité le coût d'investissement et le soutien de l'état. Aussi il est très demandé d'étudier d'améliorer les performances du climatiseur solaire syst(B) pour augmenter surtout leur densité énergétique, Trouver une approche pour minimiser l'influence des paramètres variables sur la valorisation des résultats obtenus.

Comme brève conclusion le climatiseur solaire à adsorption syst(B) est le vrai future climatiseur en Algérie par une réorientation de l'état vers le soutien d'état vers ce dernier au lieu du syst(A) et syst(C) avec protection de l'environnement et de la santé humaine.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré la faisabilité du climatiseur solaire syst(B), par rapport au climatiseur mono-split syst(A) et climatiseur centralisé à eau glacée syst(C), de point de vue coût d'investissement et de protection de l'environnement.

L'étude comparative des trois syst(A), (B) et (C) a montré que :

- Le seul inconvénient du climatiseur solaire syst(B) est son coût d'investissement initial très élevé.
- Le climatiseur mono-split syst(A) est le meilleur de point de vue coût investissement
- Le climatiseur solaire syst(B) est le meilleur système des points de vue (i) coût consommation électrique, (ii) chaleur dégagée à l'extérieur et (iii) émission des gaz CO₂.

En vertu de la politique actuelle de soutien de l'état à la facturation de l'électricité, les résultats de l'étude montrent que le système (A) présente le meilleur choix de point de vue coûts totaux d'investissement, de consommation électrique et de maintenance.

De point de vue environnemental, l'étude a montré que le système (B) reste toujours plus avantageux que les systèmes classiques (A) & (C) notamment pour son utilisation directe de l'énergie solaire, sa faible consommation électrique,, sa faible quantité de chaleur rejetée à l'extérieur et ses faibles émissions de CO₂. Il a été conclu que les conditions actuelles, marquées par le coût de l'électricité soutenu par l'état, n'encouragent pas le passage vers l'installation des systèmes de climatisation de sources renouvelables (Benfatah, Benchabane et al. 2018).

Parmi les recommandations de la présente étude, on cite la nécessité de rediriger le soutien actuel du coût de l'électricité vers le soutien du coût d'investissement du système (B). Dans ce cas, le système de climatisation solaire par adsorption sera plus compétitif dans le marché algérien. Ainsi, les systèmes de climatisations à impact bénin sur l'environnement remplaceront progressivement le système (A) utilisé actuellement. Par ailleurs, les résultats de la présente étude peuvent encourager les

Chapitre IV : Recommandations sur l'usage du système solaire à adsorption

chercheurs à conduire des études sur les systèmes de climatisation solaire pour l'amélioration des connaissances sur la conception et le fonctionnement de ces derniers.

Il est recommandé d'étudier des projets de différents volumes puisque les résultats obtenus correspondent au cas de deux projets de petits volumes. Aussi il est recommandé d'étudier l'amélioration des performances du climatiseur solaire syst(B) pour augmenter surtout leur densité énergétique (Benfatah, Benchabane et al. 2018).

8. Bibliographie

Benfatah, H., A. Benchabane, et al. (2018). « Feasibility of solar adsorption air-conditioning in the region of Biskra : Reflexion on the government support for electricity bills. » *Journal of Applied Engineering Science & Technology* 4(1) :77-82.

Bentouba, S., A. Slimani, et al. (2010). L'énergie renouvelable en Algérie et l'impact sur l'environnement. 10ème Séminaire International sur la physique Energétique, Université Bachar(Algérie).

camif.ADOUCISSEUR PRESTIGE BIO II. disponible sur. <https://www.camif.fr/adoucisseur-prestige-bio-ii-centre-pilote-eau-douce-30-litres/p10003135.html>.(2016)

Carrier, Catalogue général 2011: Solution de chauffage et climatisation, Catalogue obtained from Website: <http://www.carrier.fr> (2011).

Catalogue LG : Mural standard 2017, Catalogue obtained from Website : <https://clim-electricdiscount.com/wp-content/uploads/2017/01/LG-STANDARD.pdf>(2017)

Desmons, J. (2009). Aide-mémoire de génie climatique-2e édition, Dunod.

Fundiscrout.Ballon solaire. Disponible sur : <https://www.fundiscount.fr/ballon,solaire,150,litres,inox,cuve,garantie,2,ans-68-57.html>.(2015),

International Energy Agency IEA, données sur les émissions du CO₂, obtained from Website: <http://www.iea.org> (2016).

JDN. Prix de l'énergie en Europe. disponible sur : <http://www.journaldunet.com/economie/energie/prix-de-l-energie-en-europe.shtml>.(26 03 2018)

SorTech AG, Cold from Heat Product Catalogue 2011, Catalogue obtained from Website: www.sortech.de (2011).

Twenga. Citerne à eau 300 L horizontale Duraplas. disponible sur <http://www.twenga.fr/>.(01 2015)

Zotto, P. D., J.-M. Larre, et al. (2000). Mémotech Génie Energétique

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Ce travail présente une étude et analyse des procédés solaire de production de froid par sorption en vue de la réalisation d'une première installation à Biskra caractérisée par un climat semi aride. L'objectif est de contribuer à la réalisation d'un climatiseur solaire à adsorption dans cette région par la présentation : (i) d'une étude bibliographique des différentes technologies de production de froid adaptées à la région de Biskra ; (ii) une étude de la faisabilité économique et écologique de cette technologie ; (iii) et par la proposition de certaines recommandations nécessaires pour la bonne exploitation de cette technologie qui n'est pas encore testée dans un climat similaire à celui de la région de Biskra.

La démarche suivie est principalement comparative entre les différents systèmes de production de froid : de point de vue coût d'investissement, coût de consommation d'électricité, dégagement de chaleur et émission de CO₂ pour deux projets types (I et II) installés à Biskra.

Cette thèse présente une étude détaillant les différentes technologies disponibles dans la littérature pour produire le froid. Il a été établi que les technologies solaires de production du froid par sorption sont l'option favorisée pour l'utilisation de l'énergie solaire. Cela s'applique à l'adsorption, l'absorption et au refroidissement déshydratant. En effet, les systèmes d'absorption sont surtout plus appropriés pour la climatisation avec le couple H₂O-LiBr et avec le couple NH₃-H₂O pour la réfrigération et la congélation. Ainsi, il a été conclu que le système d'adsorption du couple charbon actif/méthanol est le meilleur couple parmi tous les couples étudiés dans la littérature. Pour la production de basses températures et la climatisation on utilise respectivement le couple charbon actif/ammoniac et le couple zéolite / eau. Ainsi, le travail bibliographique réalisé dans le cadre de cette thèse a permis la recommandation du procédé à adsorption pour le rafraîchissement solaire en Algérie, et à Biskra en particulier, notamment pour les raisons suivantes :

- La machine à adsorption utilise pour son fonctionnement des températures, relativement faibles (50 à 100°C) d'où la possibilité d'utiliser des capteurs plans à eau qui peuvent être fabriqués localement.
- La disponibilité des matériaux adsorbants (charbon actif, gel de silice, zéolithe..) et des fluides frigorigènes (eau, méthanol..).
- L'appareillage totalement statique (ou presque).
- La conception d'un tel système est très simple et peut être automatisée facilement.

Conclusion générale

- Le COP thermique élevé par rapport à d'autres systèmes qui utilisent la chaleur.

Par ailleurs, l'état de l'art des techniques de rafraîchissement de l'air réalisé a montré que l'utilisation de la climatisation solaire peut conduire à des économies d'énergie primaire remarquables, notamment si ces systèmes sont bien conçus et que la dimension des capteurs et la taille de stockage d'énergie sont appropriées. Les données de terrain et de l'expérience acquise des installations solaires, dans des conditions réelles de fonctionnement, ont montré qu'il existe des lacunes fréquentes dans la conception et la partie contrôle du système. En outre, dans certains cas, les économies d'énergie attendues par les systèmes solaires ne pouvaient pas être obtenues dans la pratique. Cependant, il est très important de noter qu'un système de climatisation solaire nécessite un effort important au cours de la phase de conception. Souvent, il sera nécessaire d'effectuer des simulations informatiques annuelles de plusieurs différentes configurations afin de déterminer celui qui a la meilleure performance de coût énergétique.

Sur la base de l'expérience acquise disponible dans la littérature, il est fortement recommandé de garder la conception des systèmes de climatisation à base de capteurs solaires le plus simple possible. Ainsi, l'amélioration de la performance des refroidisseurs à sorption jouent un rôle clé pour la faisabilité économique de ces systèmes. Ainsi, il a été établi que les petits refroidisseurs, de technologie solaire thermique, peuvent être utilisés comme des nouvelles systèmes prometteurs afin d'augmenter le confort de vie. De tels systèmes pourraient être une option future en particulier pour les climats ensoleillés.

En fonction du coût de l'électricité, l'étude technico-économique réalisée sur le projet type I (relatif au site de Biskra), a montré la faisabilité du climatiseur solaire, syst(B), par rapport au climatiseur classique mono-split, syst(A), de points de vue coût d'investissement et coût de consommation électrique. Le coût d'investissement relatif aux syst(A) est beaucoup moins cher que celui du syst(B). L'inconvénient de ce dernier réside dans son coût d'investissement initial très élevé. Par contre, le coût de consommation électrique du syst(B) est trouvé moins cher que le syst(A). Ainsi, l'étude de la durée d'amortissement des deux systèmes a montré que le coût d'investissement du climatiseur solaire syst(B) peut être amorti en Algérie, pour concurrencer le système de référence, uniquement dans le cas où l'état réoriente son soutien de l'électricité vers le soutien du coût d'investissement du climatiseur solaire syst(B).

De point de vue coût d'investissement et de protection de l'environnement, l'étude technico-économique réalisée sur le projet type II (étudié également pour le site de Biskra), a montré la faisabilité du climatiseur solaire syst(B) pour des conditions liées au coût de l'électricité. Ceci est uniquement dans le cas où l'état réoriente son soutien de l'électricité vers le soutien du coût d'investissement du climatiseur solaire syst(B) pour pouvoir remplacer la climatisation mono-split syst(A) et centralisé à eau glacée syst(C)

Conclusion Générale

En vertu de la politique actuelle de soutien de l'état à la facturation de l'électricité, les résultats de l'étude montrent que le système (A) présente le meilleur choix de point de vue coûts totaux d'investissement, de consommation électrique et de maintenance.

L'étude a montré que le seul inconvénient du climatiseur solaire syst(B) est son coût d'investissement initial très élevé. De point de vue environnemental, le système (B) reste toujours plus avantageux que les systèmes classiques (A) & (C) notamment pour son utilisation directe de l'énergie solaire, sa faible consommation électrique, sa faible quantité de chaleur rejetée à l'extérieur et ses faibles émissions de CO₂. Il a été conclu que les conditions actuelles, marquées par le coût de l'électricité soutenu par l'état, n'encouragent pas le passage vers l'installation des systèmes de climatisation de sources renouvelables.

Parmi les recommandations de la présente étude, on cite la nécessité de rediriger le soutien actuel du coût de l'électricité vers le soutien du coût d'investissement du système (B). Dans ce cas, le système de climatisation solaire par adsorption sera plus compétitif dans le marché algérien. Ainsi, les systèmes de climatisations à impact bénin sur l'environnement remplaceront progressivement le système (A) utilisé actuellement. Par ailleurs, les résultats de la présente étude peuvent encourager les chercheurs à conduire des études sur les systèmes de climatisation solaire pour l'amélioration des connaissances sur la conception et le fonctionnement de ces derniers. Il est également recommandé d'étudier des projets de différents volumes puisque les résultats de la présente thèse correspondent au cas de deux projets de petits volumes. Aussi il est recommandé d'étudier l'amélioration des performances du climatiseur solaire syst(B) pour augmenter surtout leur densité énergétique.