

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Génie Mécanique

Option : Systèmes Energétiques Et Développement Durable

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme de :**

**MASTER**

*Thème*

**Étude de la technique de rafraichissement  
solaire par dessiccation solide dans la  
région de Biskra**

Présenté par :

Abdel karim HADJI

Proposé et dirigé par :

Dr. Adnane LABED

Promotion : Juin 2014

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*À tous les membres de ma famille.*

*À ma mère avec toute mon affection.*

*À mon père avec toute ma reconnaissance et estimation.*

*À mes très chères grand-mères*

*À tous mes amis.*

*À tous les étudiants de la Faculté des Sciences et de  
la Technologie au département de génie mécanique*

*À tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, même  
avec un mot d'encouragement et de gentillesse.*

*Avec mes remerciements les plus sincères.*

# *Remerciements*

*Le présent travail a été effectué à l'université de Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie département de génie Mécanique.*

*Un grand merci au bon dieu pour m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et du savoir.*

*je remercie particulièrement :*

*Mon encadreur Adnane LABED qui a dirigé ce travail et pour l'encouragement et les nombreux conseils dont nous ont été bénéfiques.*

*Je remercie aussi Messieurs A.BENCHABANE et K.AOUES pour leurs fluctueuses discussion.*

*J'adresse mes sincères remerciements pour tous les enseignants de mon département pour leur patience et leurs efforts au cours de notre formation d'ingénieur.*

*Enfin, jeremercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Sommaire

---

## SOMMAIRE

Dédicace.....	I
Remerciements.....	II
Sommaire.....	III
Table des illustrations.....	VII
Liste des tableaux.....	XI
Nomenclature.....	XII
Introduction Générale.....	1

## CHAPITERE I

### Généralités sur le froid solaire

Introduction.....	3
1. Description des technologies de réfrigération solaire par sorption.....	3
1.1. Absorption .....	3
1.2. Adsorption.....	6
2. Les applications des systèmes de réfrigération par sorption.....	7
2.1. La climatisation.....	7
2. 2.La réfrigération.....	7
2.3. Fabrication de la glace et la congélation.....	8
3. Conclusion.....	8

## CHAPITERE II

### Etude de la dessiccation en cycle ouvert

1. Introduction.....	9
2. Précis théorique sur l'air humide .....	9

# Sommaire

---

2.1. Définitions relatives à l'air humide.....	9
2.2. Précis théorique sur le phénomène de sorption.....	11
3. La dessiccation en phase solide en cycle ouvert.....	14
3.1. Les matériaux dessiccant.....	14
3.1.1. Les dispositifs d'échange utilisés pour la dessiccation en phase solide.....	16
3.2. Principe du cycle évaporatif à dessiccation en phase solide.....	20
3.3. Configuration annexes de centrales "dessiccantcooling".....	23
3.3.1. Modifications du cycle de Pennington.....	23
3.4. Conclusion sur la dessiccation solide.....	28
4. La dessiccation en phase solide en cycle ouvert.....	29
4.1. Les solutions hygroscopiques ou sorbants.....	29

## CHAPITRE III

### Les capteurs solaires à air

1. Introduction.....	31
2. Principes d'un capteur solaire plan.....	31
2.1. Caractéristiques techniques des capteurs solaires plans.....	32
2.2. Partie avant (les vitrages).....	32
2.2.1. Partie absorbante (l'absorbeur).....	33
2.2.2. Partie arrière.....	33
2.2.3. Fluide caloporteur.....	34
2.2.4. Les capteurs à air.....	35
3. Travaux des recherches réalisées sur les capteurs solaires plans à air.....	35
3.1. Les paramètres internes.....	35

## Sommaire

---

3.2. La vitre.....	35
3.3. L'absorbeur.....	36
3.4. Les paramètres externes.....	37
3.4.1. Température ambiante.....	37
3.4.2. Vitesse devente.....	37
3.4.3. Quelque exemple d'application.....	37
4. Avantages et inconvénients.....	38

### CHAPITRE IV

#### Etude de la faisabilité du (Desiccantcooling) dans la région de Biskra

Introduction.....	39
1. Considérations géothermiques.....	39
1.1. Le Continental intercalaire.....	39
1.2.La températuredu sol.....	42
1.3. Profondeur d'enfouissement des canalisations.....	44
2. Considérations Energétique.....	45
2.1. Situation de l'Algérie et de la ville de Biskra en vue de la climatisation.....	45
2.2. Evaluation des besoins et techniques de rafraichissement solaire.....	46
2.3. Présentation des différentes configurations étudiées.....	47
3. Etudes des systèmes a dessiccation pour des conditions de la région de Biskra, à partir des diagrammes de l'air humide.....	51
3.1.Présentation de chaque composant.....	52
3.1.1. Roue dessicatrice.....	52
3.1.2. Roue sensible.....	53
3.1.3. Humidificateurs.....	53

## Sommaire

---

<b>3.1.4. Batterie de régénération.....</b>	<b>54</b>
<b>3.2. Résultats des tests des différents systèmes.....</b>	<b>55</b>
<b>3.2 .1. Système de Pennington.....</b>	<b>55</b>
<b>3.2 .2. Système de Dunkle.....</b>	<b>57</b>
<b>3.2 .3. Système de Henning.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2.4. Surface de captation nécessaire pour le fonctionnement d'un système de (desiccantcoolin .....</b>	<b>60</b>
<b>4. Conclusion.....</b>	<b>61</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>62</b>
<b>Référence Bibliographiques.....</b>	<b>63</b>

# Liste des Figure

---

## Table des illustrations

Figure 1.1. Schéma d'un refroidissement à absorption .....	4
Figure 2.1. Diagramme de l'air humide.....	11
Figure 2.2. Représentation des équilibres hygriques dans une enceinte fermée .....	12
Figure 2.3. (a) influence de la température sur la sorption (exemple) (b) isothermes de sorption-désorption (exemple) .....	13
Figure 2.4. vue au microscope à balayage électronique d'un échantillon gel de silice.....	14
Figure 2.5. Schéma d'une roue à dessiccation.....	17
Figure 2.6. Evolution de la pression partielle de vapeur à la surface de l'adsorbant .....	18
Figure 2.7. Système à humidification direct avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide.....	20
Figure 2.8. Mode humidification indirecte avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide.....	21
Figure 2.9. Mode humidification combinée avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide .....	22
Figure 2.10. Mode dessiccant cooling (cycle Pennington) et son évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide.....	23
Figure 2.11. Cycle dessiccant cooling adapté aux climats à humidité absolue élevée (18g/kg).....	24
Figure 2.12. Cycle dessiccant cooling adapté aux climats à humidité absolue très élevée (25g/kg) .....	25
Figure 2.13. Schéma de principe d'un échangeur à surface mouillée.....	25
Figure 2.14. Cycle dessiccant cooling avec à un échangeur à surfaces mouillées .....	26

## Liste des Figure

---

Figure 2.15. Cycle de recirculation avec l'évolution de l'air dans le diagramme de l'air humide.....	27
Figure 2.16. Cycle de Dunkle avec l'évolution de l'air dans le diagramme de l'air humide.....	27
Figure 2.17. Evolution du $\psi$ pour une journée de fonctionnement d'une centrale à dessiccation .....	28
Figure 3.1. Vue générale d'un capteur plan à eau.....	32
Figure 3.2. Vue générale le d'un capteur à air.....	35
Figure 4.1. Limite géographique de la nappe albienne .....	40
Figure 4.2. Carte représentant les nappes du Continental Intercalaire .....	41
Figure 4.3. L'évolution la température de l'air dans l'échangeur.....	43
Figure 4.4. Signal de température de sol en fonction de la profondeur.....	43
Figure 4.5. Températures moyennes du sol en fonction de la profondeur P dans un site au centre de la France .....	44
Figure 4.6. Zones climatiques de l'Algérie .....	45
Figure 4.7. Schéma du modèle étudié.....	48
Figure 4.8. Schématisation des différentes formes d'obstacles utilisés.....	48
Figure 4.9. Comparaison des rendements des différentes configurations en fonction du débit.....	49
Figure 4.10. Puissances électriques consommées en fonction du débit pour différentes configurations étudiées.....	50
Figure 4.11. Température de l'air à la sortie du capteur pour différents débits.....	51
Figure 4.12. schéma d'un système de Pennington.....	55
Figure 4.13. Diagramme de l'air humide « Système de Pennington ».....	56
Figure 4.14. Schéma d'un système de Dunkle.....	57

## Liste des Figure

---

Figure 4.15. Diagramme de l'air humide « Système de Dunkle ».....	58
Figure4.16. Schémas d'un système de Henning (25g/kg).....	59
Figure 4.17. Diagramme de l'air humide « système de Henning (25g/kg)».....	59

## Liste des Tableaux

---

### Liste des tableaux

Tableau 2.1. Tableau des principaux fabricants de roues dessiccant.....	19
Tableau 4.1. Les possibilités d'utilisation des eaux chaudes de l'aquifère albien.....	42
Tableau 4.2. Propriétés du sol (réf.:station météorologique de biskra) .....	42
Tableau 4.3. Conditions de bases extérieures du calcul des installations de Climatisation en Algérie .....	46
Tableau 4.4. Evolution de la température de sortie en fonction du débit pour différentes configurations.....	50
Tableau 4.5. Résultat de calcule pour le système de PENNINGTON.....	56
Tableau 4.6. Résultat de calcule pour le système de DUNKLE.....	58
Tableau 4.7. Résultat de calcule pour le système de HENNING.....	60

## Nomenclature

---

### Nomenclature

SYMBOLE	DESCRIPTION	UNITE
CP	Capacité calorifique massique	[Kj/kg <sup>-1</sup> ]
P	Pression statique de l'air	[Pa]
h	Enthalpie massique	[Kj/kg <sup>-1</sup> ]
m	Masse d'eau	Kg]
w	Teneur en eau	[Kg <sub>ve</sub> /kg <sup>-1</sup> ]
RD	roue dissiccatrice	
RS	roue sensible	
t	température	[°C]
x	humidité absolue de l'air	[g/kg <sub>as</sub> ]

SUMPOLEGRECQUE	DESCRIPTION	UNITE
$\varphi$	humidité relative	[%]
$\eta$	rendement	

INDICES	DESCRIPTION
as	Relative à l'air sec
Ve	Relative à la vapeur d'eau
e	entrée
s	sortie
hum	humidificateur

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## Introduction Générale

L'évolution actuelle du contexte énergétique mondiale, liée aux problèmes environnementaux d'aujourd'hui et de demain, rend essentielle la mise en place de mesures et de technologies favorisant la sobriété énergétique de nos sociétés. Les énergies renouvelables, ainsi que la recherche d'une meilleure efficacité énergétique des procédés visant à contrôler l'ambiance thermo-hygrique de nos habitats sont, depuis le premier choc pétrolier des domaines privilégiés d'action.

L'utilisation de l'énergie solaire pour produire du froid est une alternative attirante, puisque le maximum d'énergie solaire correspond généralement à celui des besoins en froid. Les technologies basées sur un processus de transformation thermodynamique sont actuellement les plus prometteuses.

En Algérie, l'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables les plus abondantes. Elle est à l'origine du cycle de l'eau et du cycle des saisons. Elle est donc à l'origine de richesses énergétique telles que le charbon, le pétrole et le gaz. L'énergie solaire est utilisée depuis des siècles de façon plus ou moins indirect notamment pour le séchage et le chauffage en générale.

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3000 heures (haut plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. Notre potentiel en énergie solaire thermique représente quatre fois la consommation énergétique mondiale d'après New EnergyAlgeria (NEAL: Compagnie fondée par le gouvernement algérien en 2002, pour développer les énergies renouvelables.

L'Algérie reçoit assez de soleil pour couvrir 60 fois les besoins de l'Europe de l'Ouest, selon le ministère algérien de l'énergie. Il est donc important d'exploiter ce gisement, gratuit et non polluant, dans le domaine de la production de froid, notamment dans les régions rurales isolées. Dans ces zones rurales isolées, où l'accès aux réseaux électrique est difficile et coûteux, des solutions écologiques, dans le but d'amélioration les conditions de vie des personnes, feront l'objectif de beaucoup de travaux de recherches en cours.

**Dans le premier chapitre** nous présentons quelques généralités sur le froid solaire et les différentes technologies de sorption (absorption et adsorption) qui sont classées selon le niveau de la température de refroidissement.

**Dans le deuxième chapitre** nous présentons la technologie de froid solaire à dessiccation en cycle ouvert qui s'appuie sur l'utilisation du potentiel de changement de phase de l'eau pour refroidir l'air soufflé dans un local. Pour maximiser l'effet de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, le flux d'air ventilé est d'abord desséché dans une roue dessiccation nécessitant un flux d'air chauffé par des capteurs solaires (de 50 à 80°C).

**Dans Le troisième chapitre** nous présentons les principes et caractéristiques techniques des capteurs solaires et nous citons les avantages et les inconvénients de ces derniers.

**Le quatrième chapitre est réservé à l'étude** de la faisabilité du rafraîchissement par dessiccation dans la région de Biskra.

A la fin du manuscrit, nous présentons une conclusion générale et les perspectives de la présente étude .

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur le froid solaire**

## Introduction

Dans le contexte économique et énergétique actuel, l'introduction des technologies qui utilisent des énergies renouvelables comme source de chaleur, montre un double avantage: limiter la pollution et réduire le cout du combustible

Les systèmes de rafraîchissement solaire qui utilisant des machines frigorifique à absorption font partie des plus prometteurs en matière d'utilisation des énergies renouvelables [1]. Actuellement seulement 10% des systèmes de climatisation de confort utilisent un cycle à absorption. Le potentielle de développement étant de ce point de vue très élevé [2]

L'utilisation de la chaleur comme source d'énergie ouvre la possibilité d'utilisation du soleil en tant que (combustible) de la machine frigorifique [3]. Un grand intérêt de ces procédés vient également du fait que le besoin en rafraichissement coïncide la plupart du temps avec la disponibilité du rayonnement solaire. En 2005 les systèmes de climatisation de confort solaires en Europe représentaient une puissance totale de seulement 6MW [4]

La première machine frigorifique à absorption a été réalisée en 1858 par l'ingénieur Français Ferdinand Carrée. Ce premier système utilisait l'eau comme absorbant et l'ammoniac comme réfrigérant. Aujourd'hui le mélange binaire le plus utilisé est le LiBr/H<sub>2</sub>O, avec l'eau comme fluide frigorigène. Contrairement aux systèmes utilisant NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O ou la pression est supérieure à la pression ambiante. Ceux utilisant H<sub>2</sub>O- LiBr fonctionnent à des pressions inférieures à 1atm, pour attendre une température d'évaporation relativement faible et intéressante en climatisation. L'utilisation de cette solution binaire est intéressant pour les caractéristiques du fluide de travail non-toxique, non flambe et non –explosive

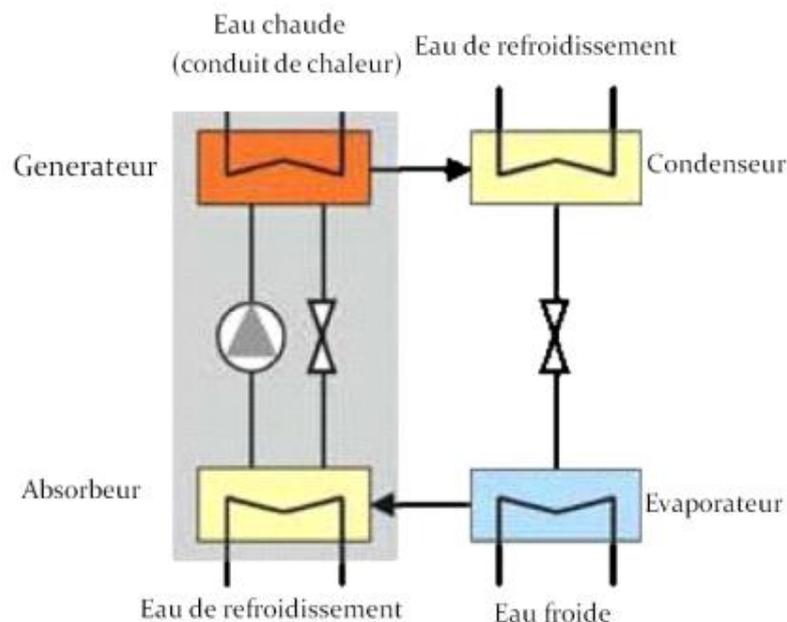
## 1. Description des technologies de réfrigération solaire par sorption

### 1.1. Absorption

Le phénomène d'absorption est le mélange d'un gaz dans un liquide, les deux fluides se présentant avec une forte affinité pour former une solution [5]. Ce processus est réversible et dont on peut décrire le principe d'un système à simple effet travaillant avec le couple H<sub>2</sub>O-LiBr. (Figure 1). La machine comporte:

1. Une pompe apport la solution riche vers la zone à haut pression.

2. Le mélange est chauffé dans le générateur par l'énergie solaire permettant ainsi la séparation du réfrigérant (H<sub>2</sub>O) de l'absorbant (LiBr solution).
3. La vapeur de réfrigérant (H<sub>2</sub>O) est envoyée vers le cycle traditionnel: condenseur, détenteur et l'évaporateur. Le froid est produit par l'évaporation du fluide frigorigène dans l'évaporateur à basse pression.
4. La solution pauvre (LiBr) retourne dans l'absorbeur en passant par une vanne de détente.
5. La vapeur de réfrigérant est absorbée par la pauvre solution de l'absorbeur arrivée du générateur. Le cycle peut recommencer.



**Figure 1 : Schéma d'un refroidissement à absorption [8]**

La majorité des systèmes d'absorption à un effet, sont composés d'un panneau plan à basse température. Les recherches récentes montrent qu'il existe également des systèmes à double effet, disponibles sur le marché, avec un COP thermique de l'ordre de 1,0-1,2 et des systèmes à triple effet de COP thermique de 1,7 les systèmes d'absorption à multi effet exigent des températures plus élevées du générateur de chaleur, qui peut être obtenu à des prix très élevés avec des tubes de concentration :

Rappelons ici que deux COP clés sont utilisés dans ce cas:

$$\text{COP}_{\text{thermique}} = \frac{\text{Energie de Froid produite}}{\text{Energie recue par le système}} \quad (1)$$

$$\text{COP}_{\text{solaire}} = \frac{\text{Energie de Froid produite}}{\text{Energie Recue par le capteur solair}} \quad (2)$$

Après une comparaison économique, [6] étudier le cout total du système par la partie solaire du système. D'autre part, [7] ont développé un nouveau modèle d'un réfrigérateur à absorption à double effet H<sub>2</sub>O-LiBr. Les résultats du test ont prouvés que le système à double effet pourrait être conduit par l'eau chaude à basse température allant de 60 à 75°C, qui peut facilement être fourni par les chauffes – eau solaire traditionnelle. En comparaison avec un réfrigérateur à simple effet, le réfrigérateur à double effet pourrait attendre à peu près le même COP du système conventionnel avec une réduction des couts d'environ 50%.

D'après Fan et al. Deux grandes couples de travail ont été déjà utilisés dans les systèmes de réfrigération solaire à absorption ; le H<sub>2</sub>O-LiBr et le NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>O.

D'une manière générale, les systèmes à NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O sont souvent utilisés pour la réfrigération et dans les applications industrielles, tandis que les systèmes à H<sub>2</sub>O-LiBr sont plus adaptés aux besoins de la climatisation.

### **Les Avantages NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O**

Evaporation à la température au-dessous de 0°C

### **Les inconvénients NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O**

Toxiques et dangereux pour la santé (ammoniac)

Besoin d'une colonne pour l'opération de redresseur à haut pression

### **Les Avantages H<sub>2</sub>O-LiBr**

Bon COP

Respectueux l'environnement

Grande chaleur latente dévalorisation

### **Les inconvénients H<sub>2</sub>O-LiBr**

Le risque de congélation, donc un dispositif anti-cristallisation est nécessaire

Relativement cher (LiBr)

Fan et al. [8] rapportent que d'autres couples de travail ont été également étudiés. Au Danemark, Worsoe-Schmidt [9] a développé un réfrigérateur solaire à absorption solide avec  $\text{NH}_3\text{-CaCl}_2$  et  $\text{SrCl}_2$  comme couple de travail. Les études expérimentales ont montré un COP de 0.10, correspondant à une production de la glace de  $6\text{kg/m}^2$  (de surface de capteur solaire). Des travaux similaires ont aussi été effectués par Enhard et Hahne [10] dans une machine de climatisation solaire démonstrative, avec  $\text{NH}_3\text{-SrCl}_2$  comme un couple de travail. Bansal et al [11] rapportent une unité de  $1,5\text{KW/jour}$  utilisant  $\text{NH}_3$  comme fluide frigorigène et IMPEX (80%  $\text{SrCl}_2$ -et 20% Graphite) comme absorbant. Le COP maximal théorique de l'unité est de 0,143, et il dépend des conditions climatiques.

Aux Mexique, une étude théorique d'un système de réfrigération intermittent à absorption a été réalisée par W.Revera [12]. Le système équipé d'un concentrateur parabolique et exploité avec un mélange  $\text{LiNO}_3$ . Les résultats ont montré que pour une météo typique du Mexique, il est possible de produire jusqu'à  $11,8\text{kg}$  de glace et le COP thermique est dans la fourchette de 0,15 et 0,4 en fonction des températures de génération et de la condensation

## 1.2. Adsorption

Comme déjà plus haut, l'adsorption est un phénomène qui résulte généralement de l'interaction entre un solide (absorbant) et un gaz (gaz réfrigérant), sur la base d'un processus de réaction physique ou chimique. Une machine de réfrigération par adsorption utilise le phénomène de l'adsorption physique entre le fluide frigorigène et un adsorbant solide; les molécules du réfrigérant sont à fixer à la surface de l'adsorbant via des connections de type Van der Waals [13].

Un système à adsorption est généralement composé d'un générateur, un condenseur, une vanne de détente et d'un évaporateur. Le générateur se compose d'une plaque solaire contenant l'adsorbant, qui est chauffé par le rayonnement solaire, pour la désorption du réfrigérant.

Lorsque le lit d'adsorbant est employé d'une manière fixe, souvent le cas le cycle d'adsorption peut être utilisé sans aucune pièce mobile. D'une part, l'utilisation de lit fixe implique un fonctionnement sans bruit, simplicité mécanique, haute fiabilité et une très longue durée de vie. D'autre part, les lits fixes peuvent aussi être utilisés dans le fonctionnement de cycle intermittent, avec un changement dans le lit d'adsorbant entre l'adsorption et la désorption, ce qui diminue le COP du système. Par conséquent, lorsqu'un débit constant de la vapeur, qui

gagne l'évaporateur, est nécessaire pour assurer un refroidissement continu, deux ou plusieurs lits d'adsorbant doivent être mise en service dans le cycle [13].

## **2. Les applications des systèmes de réfrigération par sorption**

Sur la base de la demande de la température de refroidissement, les applications des systèmes solaire par sorption peuvent être classés en trois catégories :1) la climatisation (8-15°C) pour les espaces, 2) la réfrigération (0-8°C) pour les produit alimentaire et le stockage des vaccins, et 3) la congélation (<0°C) pour la fabrication de glace ou de but de congélation.

### **2.1.La climatisation**

Un système de climatisation est utilisé pour contrôler la température et l'humidité et le confort thermique pour les gens.La demande de cette application est élevée dans les lieux habites notamment dans les grandes villes. Les systèmes de réfrigération solaire par sorption sont adaptés à la climatisation en raison du faible cout d'installation et de la grande capacité de refroidissement. Dans les années 1960, les systèmes solaires à absorption ont été considérés comme étant le futur candidat dans le domaine de la climatisation [14].

### **2.2. La réfrigération**

Le système à sorption peut également être utilisé dans des applications à basse température comme le stockage des produits alimentaires et de vaccines. En fait, ces technologies sont intéressantes pour un but de réfrigération dans des régions éloignées ou des zones rurales, des pays en développement où l'accès à l'électricité est pratiquement impossible. Différents types de réfrigérateurs solaires à sorption ont été développés. Dans la suite de cette section, nous citons quelque unes en se basant sur le travail de Fan et al[8].

Uppal et al [15].Ont construit en 1986, un réfrigérateur solaire à absorption  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  de petite capacité (56 l) pour stocker les vaccins dans des régions éloignes. Dans la même période,Staicovici [16] a développé un système à absorption intermittent à un seul étage pour le stockage du poisson. Le COP thermique actuel est dans la fourchette de 0,25-0,30 pourrait être obtenu à la température de régénération et de condensation de 80 et 24,3°C, respectivement.

### 2.3. Fabrication de la glace et la congélation

Pour l'application de congélation qui a besoin d'une température inférieure à 0°C, comme la production de glace et le stockage à congélation ; un refroidisseur à absorption, ou un refroidisseur à réaction chimique peuvent également être utilisés de manière générale, la demande d'une basse température de refroidissement, nécessite la plus grande température de génération possible pour bien conduire un système de réfrigération à sorption.

On peut citer quelques réalisations typiques comme suit :

Medini et al [17] ont étudié un glaçon solaire à adsorption sans valve avec une surface de 0,8m<sup>2</sup>. Le prototype utilise un cycle quotidien intermittent avec de charbon actif AC35-méthanol comme couple. Les résultats ont montré qu'avec un COP thermique de 0,40, il est possible d'obtenir un COP solaire brut de 0,15 et à produire 4 kg de glace par jour, pendant l'été.

Critoph [18] a construit un petit réfrigérateur solaire à adsorption solide. Le panneau est de 1,4m<sup>2</sup> de surface et contient 17kg de charbon actif. La boîte froide est éloignée du capteur, étant lié à celui-ci par un tuyau flexible en acier, il est possible de produire jusqu'à 4kg de glace par jour dans un cycle quotidien.

### 3. Conclusion

Dans ce chapitre, une revue de la production du froid solaire par sorption (absorption et adsorption) a été établie en se basant sur la synthèse de Fan *et al* [8]. Nous en concluons que les technologies de réfrigération solaire par sorption peuvent être utilisées pour produire une large gamme de température de froid. Les technologies examinées sont intéressantes pour en servir aux besoins de réfrigération, de climatisation et de la production de glace. Ces technologies, de sorption, peuvent surtout répondre à la demande de conservation de l'énergie et de la protection de l'environnement.

# **CHAPITRE II**

## **Etude de la dessiccation en cycle ouvert**

## 1. Introduction

Dans le chapitre précédent, les enjeux et les techniques relatifs à la climatisation solaire ont été énoncés. La dessiccation en cycle ouvert, ou « desiccant-cooling » est l'une d'entre-elles.

Nous allons d'abord préciser les relations reliant les différentes grandeurs concernant l'air humide et le phénomène physique de la sorption. En effet, le « desiccant-cooling » s'appuie sur la déshumidification préalable de l'air. La déshumidification de l'air peut se faire par refroidissement, à l'aide d'une surface d'échange à une température inférieure à la température de rosée, de l'air. Ainsi l'air dans la couche limite de l'échange thermique est saturée et l'eau condense, c'est un processus isenthalpe. Dans le cas du desiccant-cooling, la déshumidification par sorption est utilisée. La déshumidification, réalisée par sorption, s'effectue soit à travers un dispositif sur lequel est posé un matériau desiccant (on parle alors de "déshydratation en phase solide"), soit dans des échangeurs dans lesquels est pulvérisée une solution desiccant, ("déshydratation en phase liquide"). La sorption peut donc prendre place entre un gaz et un solide, auquel cas on parle d'adsorption, soit entre un gaz et un liquide (absorption).

Les matériaux et les dispositifs technologiques employés pour réaliser la déshumidification par adsorption sont présentés. Puis le cycle complet du « desiccant-cooling » en phase solide est présenté et l'évolution de l'air dans le diagramme de l'air humide est décrite. Les cycles supplémentaires sont également explicités [19].

## 2. Précis théorique sur l'air humide et le phénomène de sorption

### 2.1. Définitions relatives à l'air humide

L'air qui nous entoure de toute part est un mélange de différents gaz permanents (azote, oxygène, dioxyde de carbone ..... ) et de vapeur d'eau, celle-ci étant en quantité variable, sa part massique allant de pratiquement 0% à 3% chaque gaz a donc sa propre pression partielle de vapeur, égale à celle qu'il exercerait dans le même volume s'il était seul. Si nous désignons par:

- $p_{as}$  la pression de vapeur partielle de l'air sec
- $p_{ve}$  la pression de vapeur partielle de vapeur d'eau

La loi de Dalton nous donne la pression totale du mélange, telle que: [19]

$$p_{tot} = p_{as} + p_{ve} \quad (1)$$

Alors que généralement les gaz sont miscibles en toutes proportions, l'air ne peut emmagasiner qu'une certaine quantité de vapeur d'eau, et ce parce que la pression partielle de la vapeur d'eau ne peut en aucun cas dépasser la pression de vapeur saturante de l'eau. En effet, au-delà de cette limite l'eau se condense en phase liquide (dépôt ou brouillard).

Il est possible de caractériser la quantité de vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec. (Équation 2). C'est l'humidité absolue exprimée en kilogramme d'eau par kilogramme d'air sec ( $kg/kg_{as}$ )

$$W = 0.622 \cdot \frac{p_{ve}}{p_{tot} - p_{ve}} \quad (2)$$

On appelle humidité relative  $\varphi$  ou taux d'humidité le rapport, pour une température donnée de la pression partielle de vapeur d'eau à la pression de vapeur saturante de l'eau.

$$\varphi = \frac{100 \cdot p_{ve}}{p_{v,sat}} = \frac{100 \cdot W}{0.622 + W} \cdot \frac{p_{tot}}{p_{v,sat}} \quad (3)$$

L'enthalpie de l'air correspond à l'énergie contenue dans une masse d'air. Elle varie en fonction de la température et de la teneur en eau de la masse d'air. Elle est égale à la somme des enthalpies de ses constituants. Soit:

- $h_{as}$  l'enthalpie massique de l'air sec en  $KJ/kg_{as}$
- $h_{ve}$  l'enthalpie massique de la vapeur d'eau en  $KJ/kg_{as}$

$$h_{ah} = m_{as} \cdot h_{as} + m_{ve} \cdot h_{ve} \quad (4)$$

Rapporté à la masse d'air sec on obtient l'enthalpie  $h$  de la masse d'air humide par kilogramme d'air sec :

$$h = h_{as} + W \cdot h_{ve} \quad (5)$$

Pour de faibles écarts de température, de l'ordre de ceux présents dans les applications de thermique du bâtiment, il est possible de considérer la capacité thermique massique de l'air sec constant est égale à  $1 \text{ kJ/kg}$ . L'enthalpie massique de la vapeur d'eau est telle que:

$$h_{ve} = h_{ve} + c_{p_{ve}} \cdot T \quad (6)$$

Avec:  $h_{ve}$  chaleur latente de vaporisation de l'eau à 0°C (2500KJ/Kg)

$cp_{ve}$  Capacité thermique massique moyenne de la vapeur d'eau (1.86KJ/Kg)

T température d'air en °C

En définitive, l'enthalpie d'une masse d'air exprimée en kJ par kg d'air sec soit (1+W) kg d'air humide s'exprime ainsi:

$$h=T+W.(2500+1.86.T) \quad (\text{kJ/kg}_{as}) \quad (7)$$

Finalement, pour une condition d'air (et une pression) donnée, toutes ces grandeurs sont accessibles à partir de la connaissance de deux d'entre elles par des calculs élémentaires. Afin de les éviter, et pour avoir une représentation graphique des transformations appliquées à une masse d'air, on construit un diagramme de l'air humide ou diagramme psychrométrique (Figure 1), qui permet par simple lecture de remonter à toutes les grandeurs énoncées ci-dessus pour une même pression atmosphérique (généralement donnée pour le niveau de la mer).

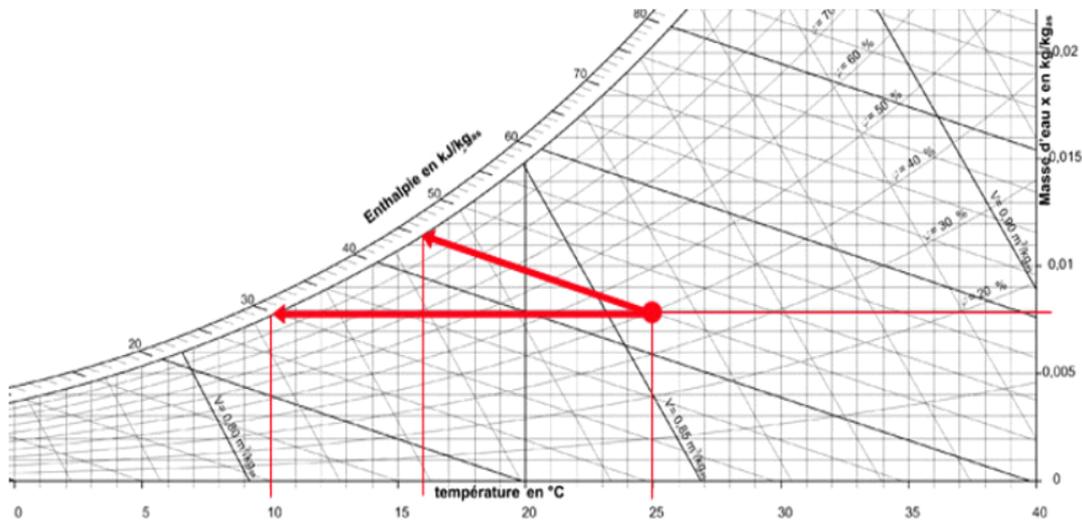


Figure 1 : Diagramme de l'air humide [19].

## 2.2. Précis théorique sur le phénomène de sorption

La sorption est le phénomène physique régissant la fixation des molécules de gaz de la masse d'air sur un substrat. Des matériaux ou des solutions liquides ayant la capacité de capturer et

de retenir des gaz sont appelés des sorbants. Pour le cas de produits ayant une grande affinité avec la vapeur d'eau on parle de matériaux ou solution déshydratants.

Tout produit, qu'il soit d'origine végétale, animale ou minérale contient de l'eau, comme évidemment les solutions aqueuses. On peut donc distinguer dans tous produit de masse Totalem: [19].

- Une masse d'eau
- La masse restante  $m_s = m - m_e$  appelée masse anhydre ou masse sèche.

On définit la teneur en eau d'un produit par :

$$W = \frac{m_e}{m_s} \text{ en base sèche} \quad (8)$$

$$w_h = \frac{m_e}{m} \text{ En base humide}$$

La capacité de sorption d'un matériau est liée à la pression de vapeur saturante à la surface du produit. L'activité de l'eau dans un produit est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau du mélange constitué par l'air humide et la pression de vapeur saturante à la surface du produit. Si l'air ambiant et le produit sont à l'équilibre, alors il n'y a plus de transfert de masse, et l'humidité relative ( $\varphi_a$ ) de l'air ambiant est alors égale à 100 fois l'activité de l'eau.

Ces notions sont schématisées dans la (figure 2) Dans l'enceinte avec l'eau liquide, la pression partielle de la vapeur d'eau est égale à la pression vapeur saturante de l'eau alors que dans l'enceinte avec un produit hygroscopique, la pression partielle de l'eau est en fonction de l'activité de l'eau du produit.

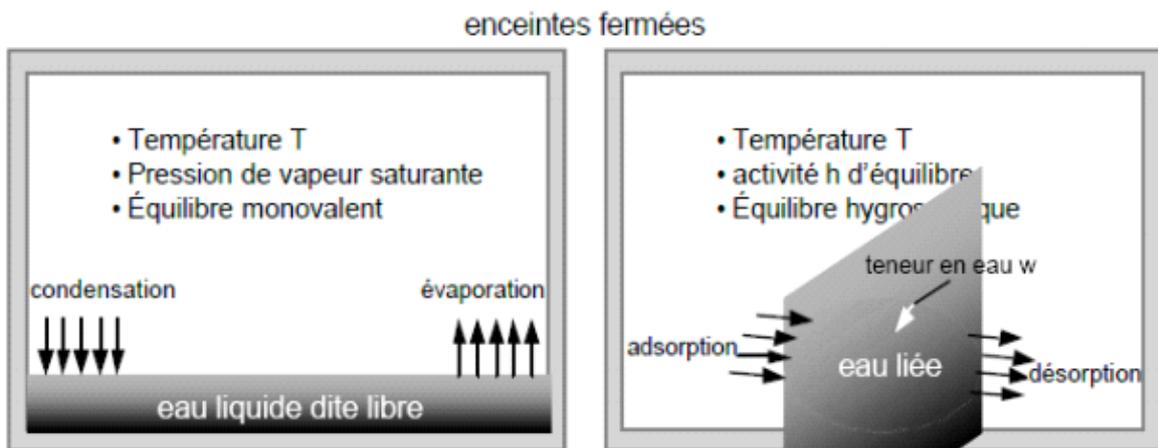
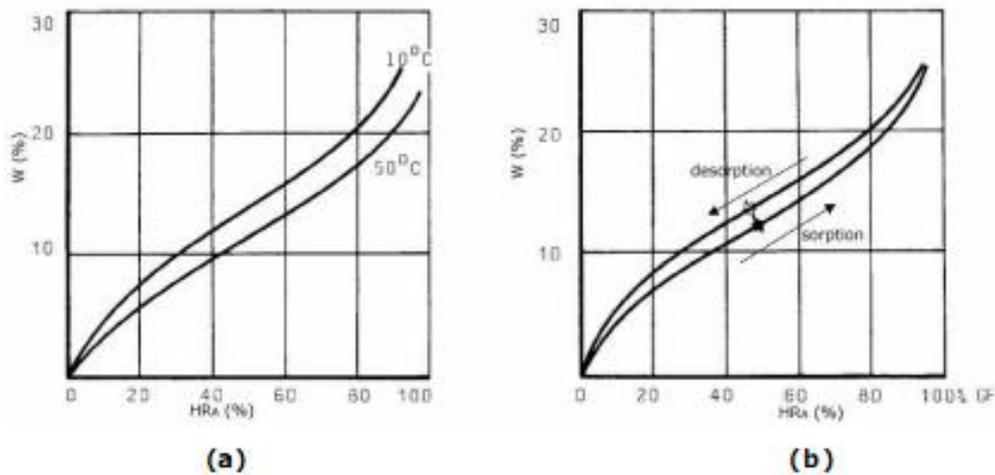


Figure 2 : Représentation des équilibres hygriques dans une enceinte fermée [20].

L'activité de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau  $W$  et de sa température. La courbe représentant pour une température donnée la teneur en eau  $W$  d'un produit en fonction de la valeur de l'activité de l'eau ou de l'humidité relative de l'air en équilibre est appelée:

- Isotherme de sorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit sec.
- Isotherme de désorption si elle a été déterminée expérimentalement en partant d'un produit saturé en eau.



**Figure 3 : (a) influence de la température sur la sorption (exemple) (b) isothermes de sorption-désorption (exemple) [19].**

La (figure 3) montre que la courbe de désorption ne se superpose pas précisément à la courbe de sorption. Cette non coïncidence est appelée hystérésis de désorption.

Ainsi pour déshumidifier l'air, il faut que la pression de vapeur saturante d'eau à la surface du desiccant soit la plus faible possible (figure 3). C'est –à-dire que la teneur en eau et la température du produit desiccant doit être la plus faible possible. Puis le produit desiccant se chargeant en eau, il devient nécessaire de régénérer le produit, c'est –à-dire de le décharger en eau pour conserver une capacité de sorption satisfaisante. Pour cela, on chauffe le produit, la teneur en eau du produit devient plus faible pour un air à même humidité relative. De plus le fait de chauffer l'air autour baisse automatiquement l'humidité relative. Le produit (relâche) donc de l'humidité.

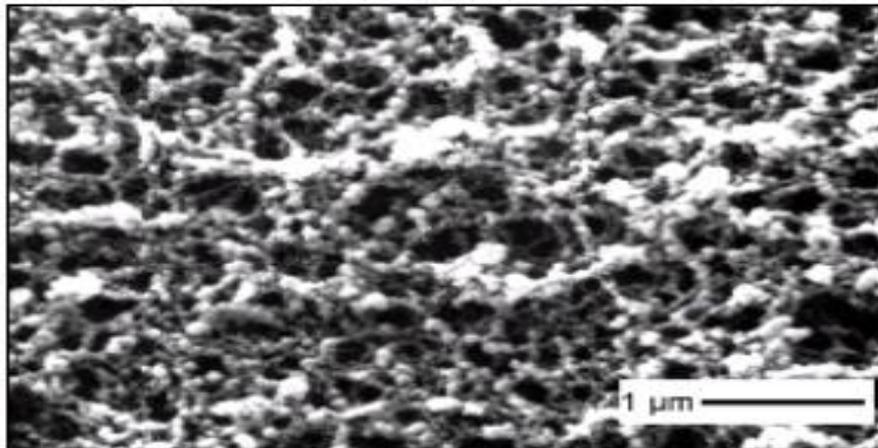
La sorption est un phénomène exothermique caractérisé par la chaleur de sorption mise en jeu. Cette quantité n'est pas parfaitement égale à la chaleur latente de vaporisation de l'eau, le processus est donc différent, bien que proche, d'un processus isenthalpe.

### 3. La dessiccation en phase solide en cycle ouvert

Avant d'étudier le fonctionnement global du cycle, voyons tout d'abord le phénomène d'adsorption qui permet la déshumidification nécessaire au fonctionnement du cycle. Nous verrons ensuite les matériaux utilisés et les dispositifs utilisés, et enfin le fonctionnement global de cycle La sorption solide ou adsorption

#### 3.1. Les matériaux desiccant

Idéalement, un cube de côté  $l$  a une surface de  $6l^2$ , et une sphère de rayon  $R$  une surface de  $4\pi R^2$ . En réalité, ces formes géométriques idéales et parfaites, n'existent pas car l'inspection au microscope à balayage électronique (MEB) nous montre des irrégularités de surface. Ainsi il est possible d'observer ces irrégularités à l'échelle micrométrique. En particulier dues aux vides, marches, pores, et autres imperfections. Ces imperfections créent une surface réelle (ou développée) toujours supérieure à la surface idéale. La surface spécifique est définie comme étant la surface développée par gramme de produit.



**Figure 4 : Vue au microscope à balayage électronique d'un échantillon gel de silice [19].**

Les matériaux desiccant ont généralement une surface spécifique de 100 à 1000m<sup>2</sup>/g. Les molécules d'eau se fixent dans une première couche grâce aux forces de Van der Waals entre elles et le matériau (interaction de faible intensité entre atomes, molécules ou une molécule et un cristal). Pour une teneur en eau supérieure, l'eau se fixe sur cette monocouche initiale.

Enfin pour une teneur en eau fort, l'eau se fixe à l'intérieur des pores et se condense, grâce à la tension superficielle élevée dans les pores qui modifie les conditions de condensation.

Les matériaux desiccant utilisés dans les opérations de conditionnement d'air sont les suivant

### **Les charbons actifs :**

Le charbon actif ou charbon activé ou charbon végétal, se présente sous la forme d'une poudre noire, légère, constituée essentiellement de matière carbonée à structure poreuse. Ces enfin une sort de charbon de bois. La fabrication se décompose en deux étapes : une première étape de calcination ou carbonisation, à de fortes températures, des produits constituants et une deuxième étape d'activation consistants à augmenter son pouvoir adsorbant, notamment en éliminant les goudrons qui obstruent les pores. En fonction de la taille des pores, ils peuvent également être utilisés pour le filtrage des liquides.

### **Les Alumines Activées :**

Les alumines activées sont des oxydes d'aluminium très poreux obtenus par déshydratation partiel de l'alumine hydratée. Les alumines activées ont la propriété d'absorber de nombreux contaminants du fait de leur très grand porosité. Cette porosité et la chimie de surface de l'alumine activée confèrent des propriétés catalytiques très utiles dans les nombreuses applications industrielles. Le fait qu'elles soient également hydrophiles permet leur utilisation dans les procédés de déshumidification.

### **Les Zéolites :**

Les zéolites sont des alumino-silicates cristallins et poreux. Résultant des enchainements de tétraèdres de  $\text{SiO}_4$  et  $\text{AlO}_4$ . De nombreuses structures différentes de zéolites existent selon la manière dont sont arrangés ces tétraèdres et selon le rapport Si/Al.

### **Le Gel de silice ou silicaGel :**

Les gels de silice ( $\text{SiO}_2$ ) sont élaborés à partir de silicate de sodium. Ils sont caractérisés par une grande surface spécifique, de l'ordre de  $800\text{m}^2/\text{g}$ . et la taille de leurs pores dépend de la technique de fabrication. Ce matériau est depuis longtemps utilisé dans les applications de déshumidification industrielle, mais aussi dans l'industrie agroalimentaire et la chimie sous forme de petits sachets de grains de gel de silice afin de conserver les ou les médicaments à un faible taux d'humidité.

Le matériau le plus utilisé par les fabrications est le gel de silice

### **3.1.1. Les dispositifs d'échange utilisés pour la dessiccation en phase solide**

Il existe quatre dispositifs utilisés pour la dessiccation (sans refroidissement) en phase solide [21] :

#### **Les tours à dessiccations :**

Ce sont deux tours remplies de matériau dessiccant qui sont régénérées de manière cyclique. Elles sont utilisées pour les applications industrielles et non pour les applications de conditionnement d'air du fait de leur grande taille.

#### **Les lits horizontaux tournant :**

Des disques sur lesquels est déposé le matériau dessiccant sont entraînés par un moteur et tournent autour d'un axe vertical. L'air de régénération et l'air de processus passent à travers les disques en rotation. Ainsi ce processus est continu. L'avantage technologique est la simplicité et son coût relativement faible. Les inconvénients sont sa difficulté (sinon impossible) mise en place dans une centrale de traitement d'air et sa faible étanchéité entre les deux flux d'air.

#### **Lit verticale multiple :**

Ce système est un compromis entre les deux systèmes précédents, les matériaux dessiccant se trouvant dans un anneau cylindrique perforé qui est tourné entre l'air de soufflage et l'air de retour. Ce système est très performant et adapté aux applications à basse température de rosée mais il nécessite l'utilisation d'un système mécanique complexe et des conditions de maintenance assez strictes avec un coût

**La roue à dessiccation ou "roue desiccant"**: (Figure 5) C'est le système le plus développé. Il s'agit d'une roue composée d'une matrice en matériau composite ou en cellulose sur laquelle est déposé le matériau dessiccant. Elle tourne lentement entre deux flux d'air opposés. L'air de processus est déshumidifié en passant à travers de petits canaux qui retiennent l'humidité. Le matériau dessiccant se sature en humidité et ne permet plus de déshumidifier le flux d'air. Il passe alors dans la section de régénération où il est échauffé grâce à l'air de régénération. Une fois l'eau désorbée, le matériau est refroidi par le flux d'air du processus avant de pouvoir à nouveau capter l'humidité.

La (figure 5) représente l'évolution de la teneur en eau et de la pression de vapeur en eau à la surface du desiccant en fonction des positions angulaires de la roue. Dans le début de la zone de process, c'est –à-dire de 0 à 20°, l'air est peu déshumidifié et sert surtout à refroidir le matériau desiccant. De 20 à 80°, la pression de vapeur saturante de vapeur d'eau à la surface du matériau est faible, l'air est déshumidifié. De 180 à 200°, l'air de régénération permet de réchauffer le matériau, ce qui augmente la pression de vapeur saturante à la surface du matériau, l'humidité est donc relâché dans le flux d'air de régénération de 200 à 360°. Ce fonctionnement induit une forte hétérogénéité dans la veine d'air après la roue, ce qui complique les mesures réalisées à l'intérieur de la centrale, nécessitant des dispositifs visant à homogénéiser la section [22, 23].

La vitesse de rotation d'une roue est faible, comprise entre 10 et 20 tours par heure. Une section de purge est parfois comprise, elle permet d'éviter un échange superflu de chaleur sensible entre les deux flux.

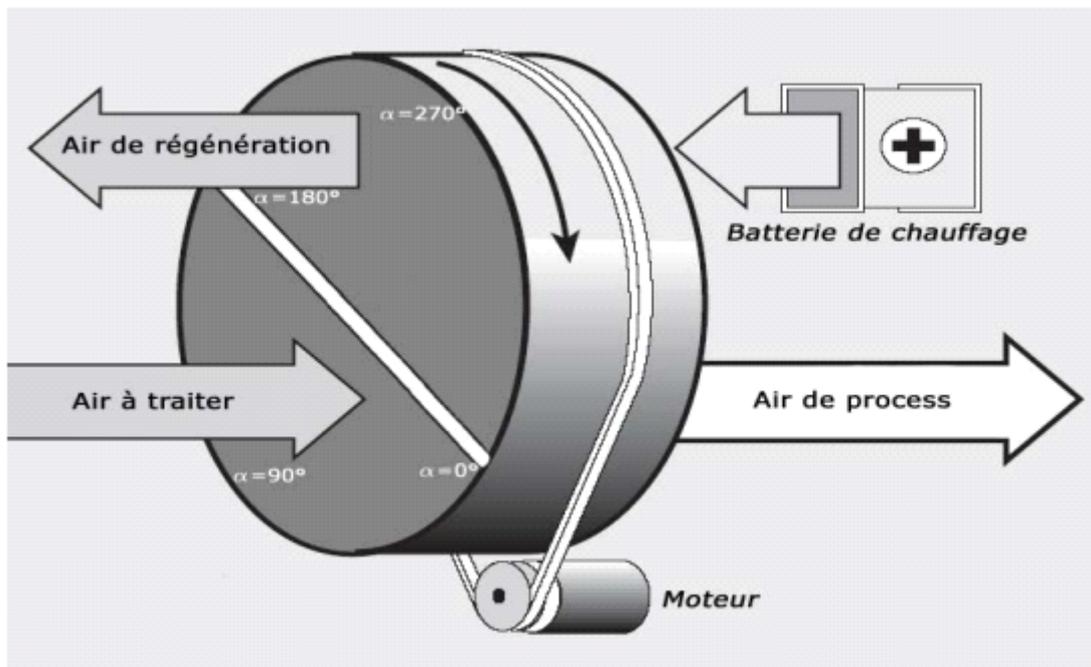


Figure 5 :Schéma d'une roue à dessiccation[19].

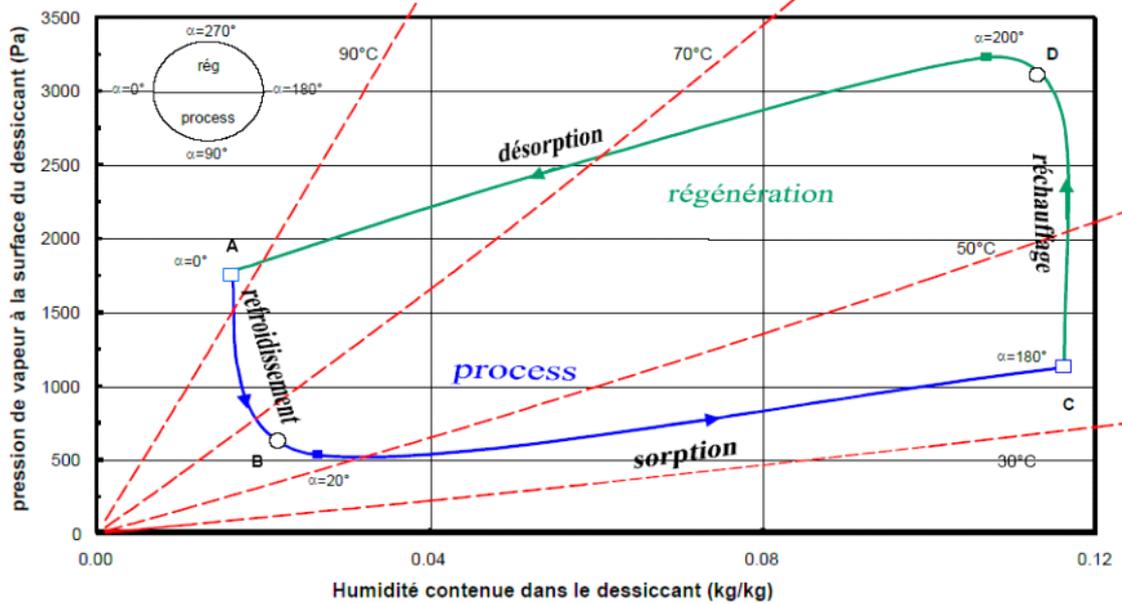


Figure 6 : Evolution de la pression partielle de vapeur à la surface de l'adsorbant [24].

Enfin, on notera qu'une solution de chlorure de lithium visqueuse peut être déposée sur une matrice dans une roue dessiccant. Le fabricant de roue Klingenburg utilise cette technologie. Dans les faits, cette roue s'utilise de la même manière que les autres, si ce n'est qu'elle doit continuellement tourner afin que la solution visqueuse de LICI ne se déplacé pas par gravité. De plus la température de régénération ne doit pas dépasser 70°C pour ne pas abimer la matrice sur laquelle est déposé le substrat.

Actuellement, les principaux fabricants de roue à dessiccation sont les suivants:

**Tableau 2.1. Principaux fabricants de roues dessiccant**

company	Country of origin	dessiccant	Wheel size	disposition
Munters USA	US	SIGEL, ALTI SILicates, New proprietary	0.25 - 4.5m	OWN use
Muntrs AB	Sweden	SIGEL, ALTI SILicates, New proprietary	0.25 - 4.5m	OWN use
SeibuGiken	Japan	SIGEL, ALTI SILicates, New proprietary	0.1 – 6 m	OWN use, export:US, South America and Europe
Nichias	Japan	SiGel,MoL,sieves	0.1 - 4 m	Export
DRI	India	SiGel,MoL,sieves	0.3 – 4 m	Owen use Export
Klingenburg	Germany	Al oxide,LICI	0.6 – 5 m	Export, to OEMS
Proflute	Sweden	SiGel,MoL,sieves	0.5 – 3 m	to OEMS
Bry- Air	US	SiGel ,(pellets)		Owen use
Rotor Source	US	SiGel,MoL,sieves	0.5 – 3 m	to OEMS
NovelAire	US	SiGel,MoL,sieves	0.5 – 3 m	to OEMS

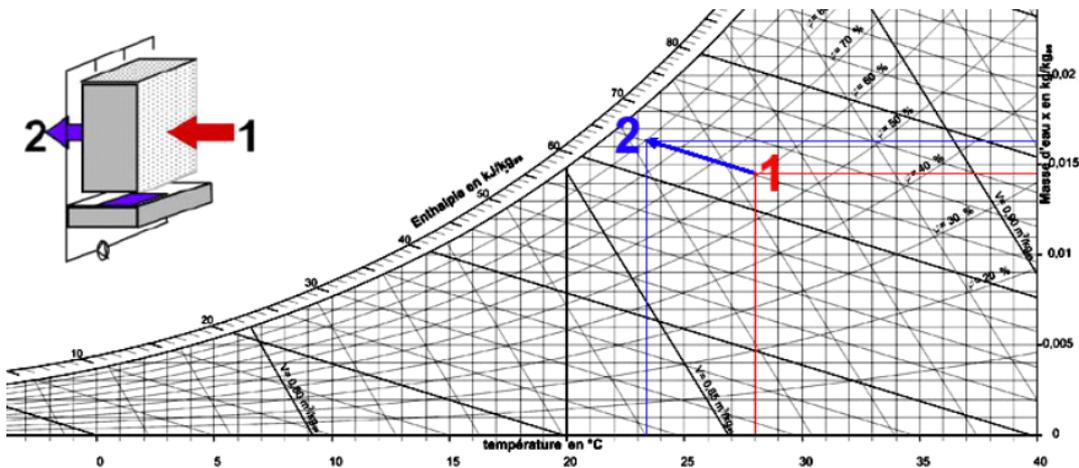
(Si Gel = gel de silice, ALTi silicates= alumines activées, Mol. Sieves = tamis moléculaires, Lici= solution visqueuse de chlorure de sodium;OWN use = utilisation propre, to OEM=intégration par des fabricants tiers de centrales de traitement d'air)[25].

Les dimensions des roues présentes sur le marché permettent de traiter des débits volumiques d'air allant de quelques centaines de  $m^3/h$  à 100 000 /h.

### 3.2. Principe du cycle évaporatif à dessiccation en phase solide

Le desiccantcooling est un cycle ouvert, qui s'appuie principalement sur l'utilisation de l'eau et de son potentiel de changement de phase pour refroidir l'air soufflé dans un local. L'élément de base d'un tel cycle est donc un humidificateur.

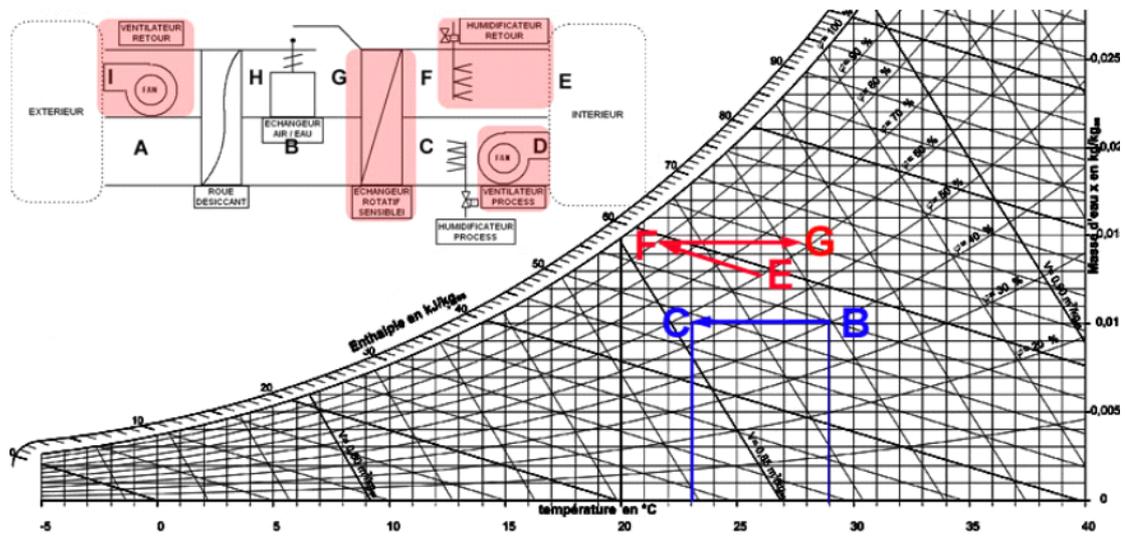
- L'eau est pulvérisée en très fines gouttelettes qui s'évaporent dans un flux d'air. L'évaporation d'un liquide est un processus endothermique qui nécessite de l'énergie, la chaleur latente de vaporisation. Cette énergie est récupérée dans le flux d'air qui voit donc sa température baisser. Ce processus s'effectue à enthalpie constante, (figure7). Mais il est limité par la pression de vapeur saturante de l'eau. En effet à partir d'une certaine quantité d'eau présente dans l'air, celle-ci ne peut plus être présente à l'état gazeux, l'air est donc saturé et son humidité relative est égale à 100%.



**Figure 7 :Système à humidification direct avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide [19].**

Pour une humidité de 60% à 28°C, porter l'humidité relative à 90% permet d'abaisser la température de soufflage à 23,2 °C. Ce système est fortement limité dans les climats humides ou le gain en température est minime. De plus, il en résulterait une humidité intérieure excessive.

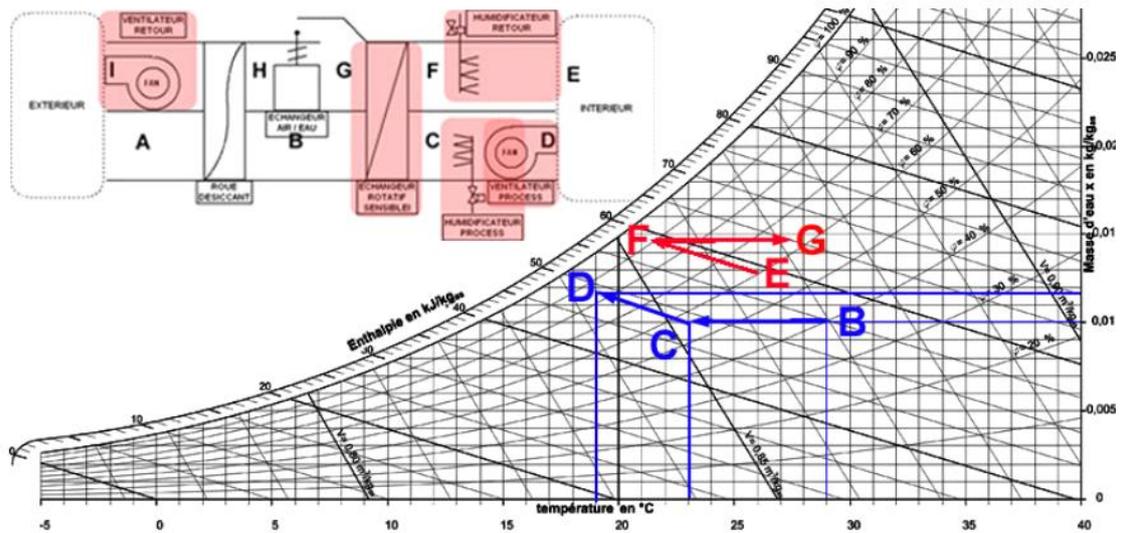
- En ajoutant un échangeur de chaleur sensible au système, il est possible de refroidir le flux d'air de ventilation sans l'humidifier. En effet, l'air de retour est refroidi par humidification direct, et l'échangeur (rotatif, à plaques à tubes) permet de refroidir l'air soufflé. Cela nécessite donc une centrale de traitement d'air double flux. Sur la (figure 8), la centrale complète est présentée. Seuls les éléments surlignés en rouge sont mis en route pour le fonctionnement du mode indirect.



**Figure 8 : Mode humidification indirecte avec l'évolution correspondante sur le diagramme l'air humide[19].**

Pour une température extérieure de 29°C et 40% d'humidité relative ainsi que 26°C et 60% respectivement pour les conditions intérieures, la température de soufflage atteinte est de 23°C, sans augmentation de l'humidité spécifique.

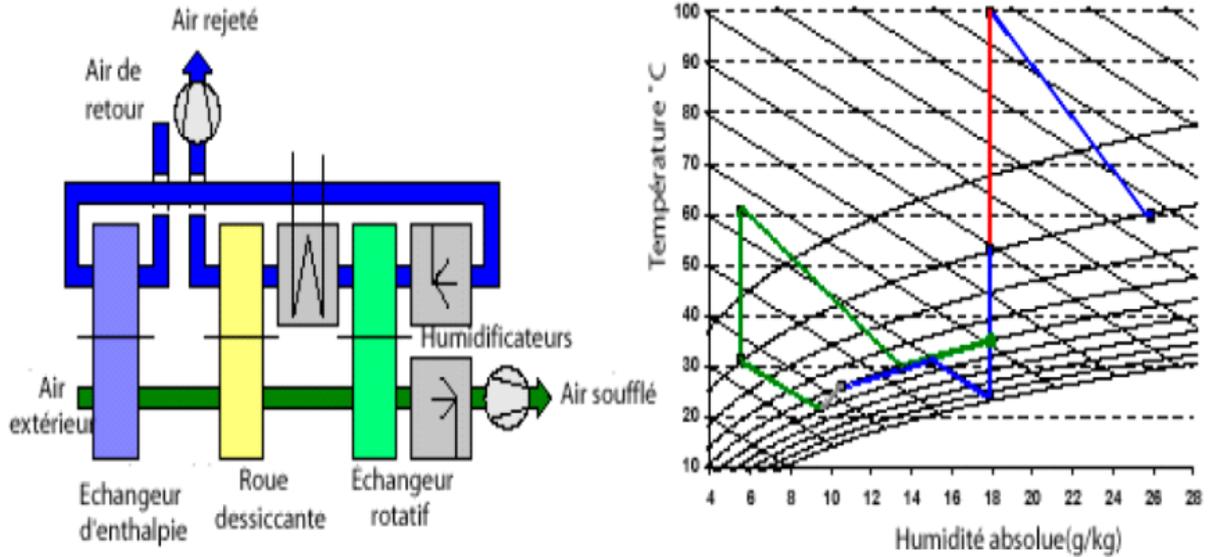
- Si l'humidificateur de la veine de process est mis en route, c'est le mode d'humidification combinée qui est utilisé (Figure 9). Après être refroidi sensiblement comme dans le mode humidification direct, l'air de ventilation est refroidi adiabatiquement dans l'humidificateur jusqu'à une humidité relative de 85%, et une température de 19°C. ce mode procure une humidité spécifique supérieure à l'air extérieur, et peut donc induire une humidité intérieure trop grande.



**Figure 9 : Mode humidification combinée avec l'évolution correspondante sur le digramme de l'air humide [19].**

- Le mode desiccantcoolingcycle de Pennington, [26], permet de refroidir l'air de ventilation, tout en réduisant ou en maintenant l'humidité spécifique extérieur. Le fonctionnement de ce mode est représenté à la (figure 10). pour maximiser l'effet de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, le flux d'air ventilé est tout d'abord desséché dans la roue à dessiccation de manière quasi isenthalpe ( $A \rightarrow B$ ) puis refroidi dans l'échangeur sensible ( $B \rightarrow C$ ), et enfin humidifié adiabatiquement dans un la valeur d'air ( $C \rightarrow D$ ). Le fonctionnement d'un tel système utilise la veine de reprise, préalablement refroidi dans l'humidificateur ( $E \rightarrow F$ ) afin de refroidir l'air de process dans l'échangeur sensible ( $F \rightarrow G$ ). Cet air est ensuite réchauffer à travers un échangeur de chaleur air/eau, ou batterie chaud ( $G \rightarrow H$ ). la température de régénération varie de 50 à 90°C, en fonction de type de roue utilisée et de puissance froide nécessaire. Sur la (figure 10), cette température ne peut être représentée, elle est de 65°C. la chaleur nécessaire provient des capteurs solaires de l'installation. Cet air chaud permet de régénérer le matériau dessiccantif (c'est-à-dire de faire baisser la teneur en eau du matériau) en le réchauffant ( $H \rightarrow I$ ) et en entraînant l'humidité avec lui.

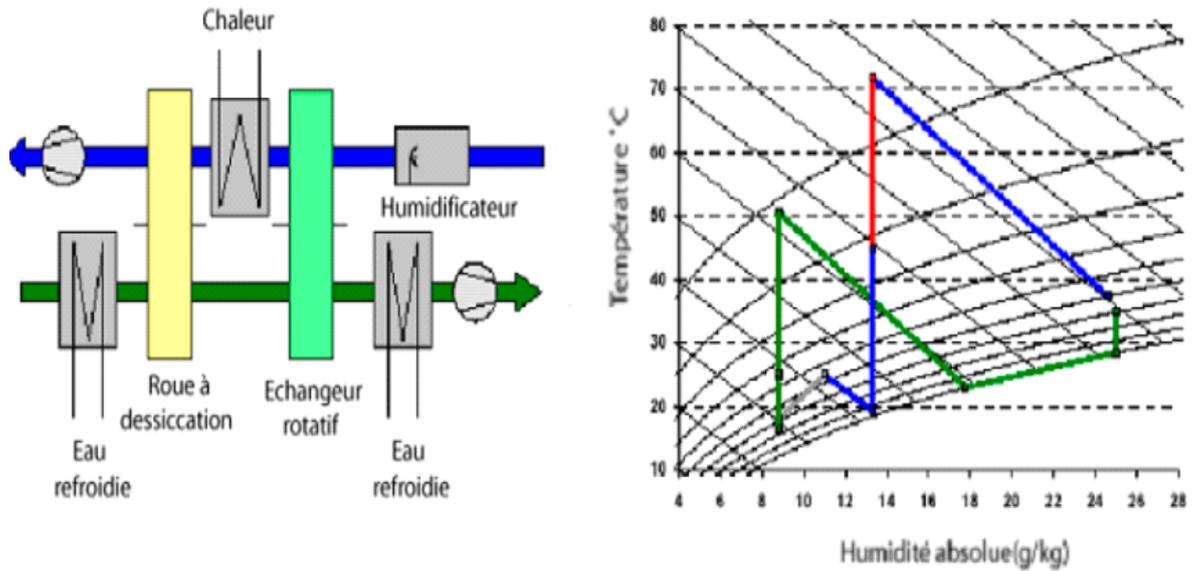




**Figure 11 : Cycle desiccant-cooling adapté aux climats à humidité absolue élevée (18g/kg) [27].**

Pour les climats à humidité absolue très élevée, des batteries à eau froide sont employées coté process, avant la roue dessiccant et à la place de l'humidificateur.

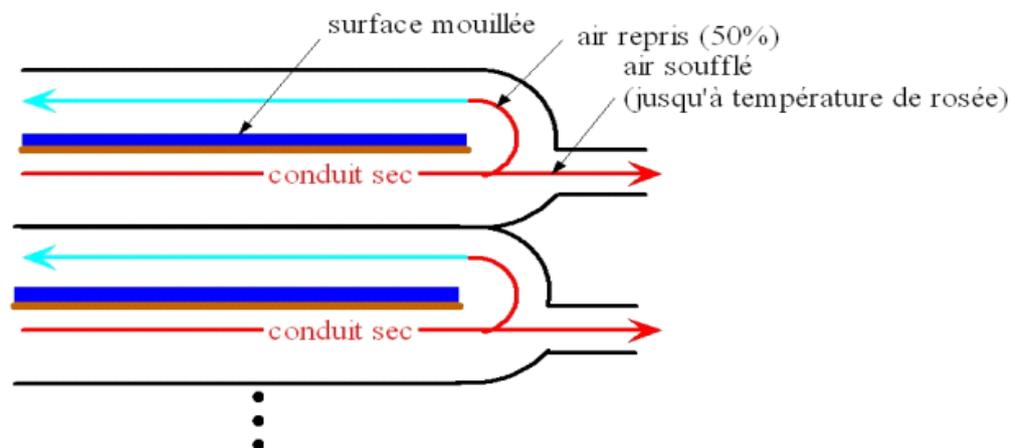
Cette eau froide permet d'opérer une première déshumidification par condensation et un refroidissement de l'air de process, ne nécessite pas d'être très froide. Par exemple, pour un température de l'air extérieur de 35°C et une humidité absolue de 25 g/kg, la température de rosée est de 28,5°C. Une eau à 24°C permet d'abaisser l'humidité relative de 7 g/kg. La deuxième batterie froide permet d'abaisser température de l'air ventilé à la température souhaitée sans qu'il soit nécessaire de déshumidifier l'air davantage. Cette eau refroidie peut donc provenir, d'une rivière, de pieux géothermiques, d'un tour à refroidissement ou de groupe froid à compression fonctionnant à un régime de température haut, bénéficiant ainsi d'un fort coefficient de performance[19].



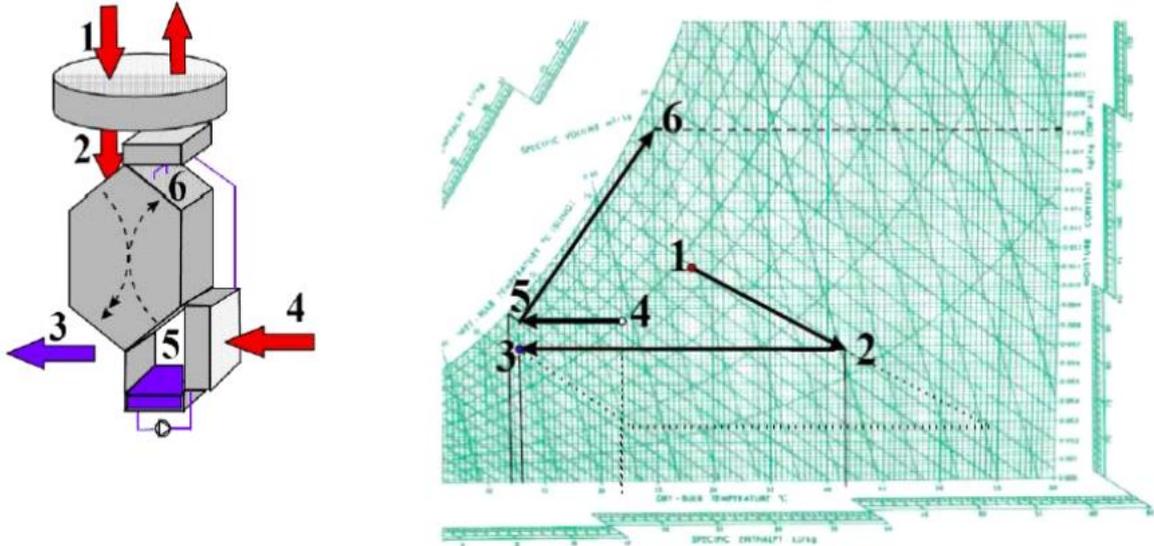
**Figure 12 : Cycle desiccant-cooling adapté aux climats à humidité absolue très élevée (25g/kg) [27].**

Maclaine-cross [28]. propose de remplacer les humidificateurs classiques par des échangeurs à surface humide. Le principe est de séparer en deux

Le flux d'air, une part étant recirculée et humidifiée dans des conduits parallèles refroidissant ainsi sensiblement l'air ventilé (Figure 13). Un tel dispositif peut, de manière théorique, attendre la température de rosée de l'air. Dans les faits, on observe une efficacité de 110 à 120% sur la température humide, et une efficacité allant jusqu'à 85% sur la température de rosée.



**Figure 13 : Schéma de principe d'un échangeur à surface mouillée[19]**



**Figure 14 : Cycle desiccant-cooling avec à un échangeur à surfaces mouillées [29]**

L'air de reprise est d'abord refroidi par l'eau récupérée à la sortie de l'échangeur à surfaces mouillée, puis passe dans l'échangeur où l'air de ventilation lui cède de la chaleur. Un tel cycle permet d'obtenir des conditions de soufflage identiques à un cycle de Pennington classique, mais évite l'utilisation d'un humidificateur dans la veine de process. Jain [30], propose également un cycle utilisant ce type d'échangeur.

Tous ces cycles sont des adaptations du cycle de Pennington, et ont comme particularités de fonctionner en tout air neuf. Le maintien d'une température intérieure confortable oblige parfois à augmenter le débit de ventilation. Dans ce

Cas-là, le volume d'air extérieure à refroidir augmente, et donc les besoins dus aux charges climatiques eux aussi. C'est pourquoi le cycle de recirculation a été développé. Ce cycle ne permet pas le renouvellement de l'air, 100% de l'air utilisé provenant du locale.

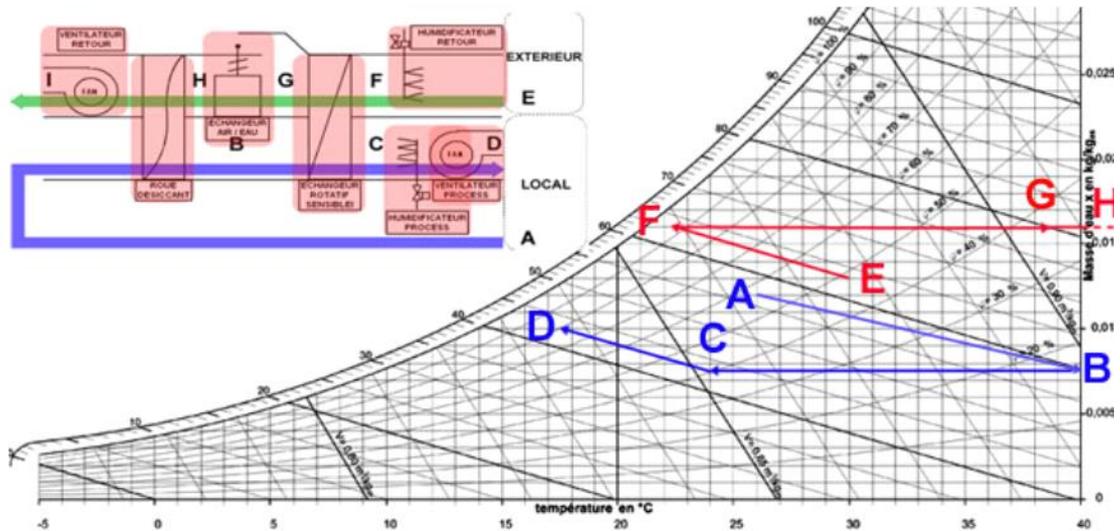


Figure 15 : Cycle de recirculation avec l'évolution de l'air dans le diagramme de l'air humide[19].

Le cycle de Dunkle [31], est également un cycle fonctionnant en air recyclé, auquel un humidificateur et une roue de récupération de chaleur sensible sont ajoutés avant la roue desiccant. L'air soufflé est ainsi refroidi deux fois avant d'être humidifié adiabatiquement.

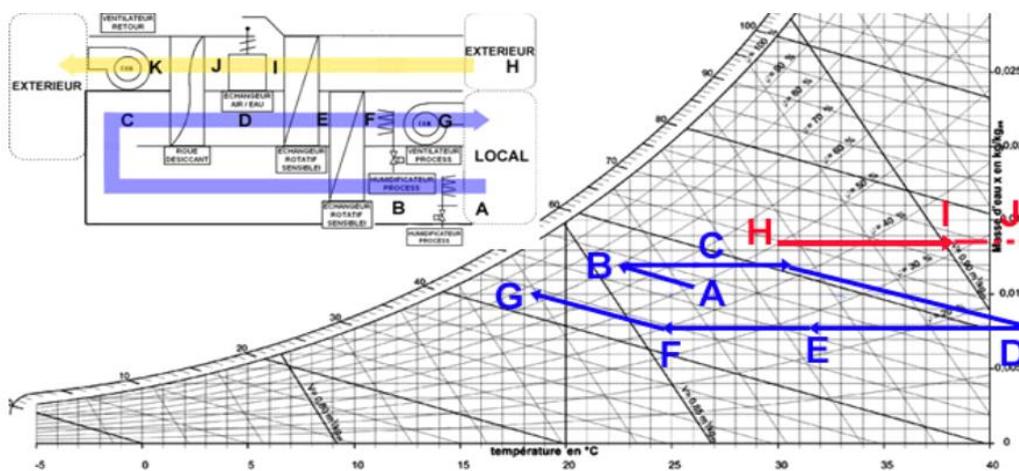


Figure 16 : cycle de Dunkle avec l'évolution de l'air dans le diagramme de l'air humide [19].

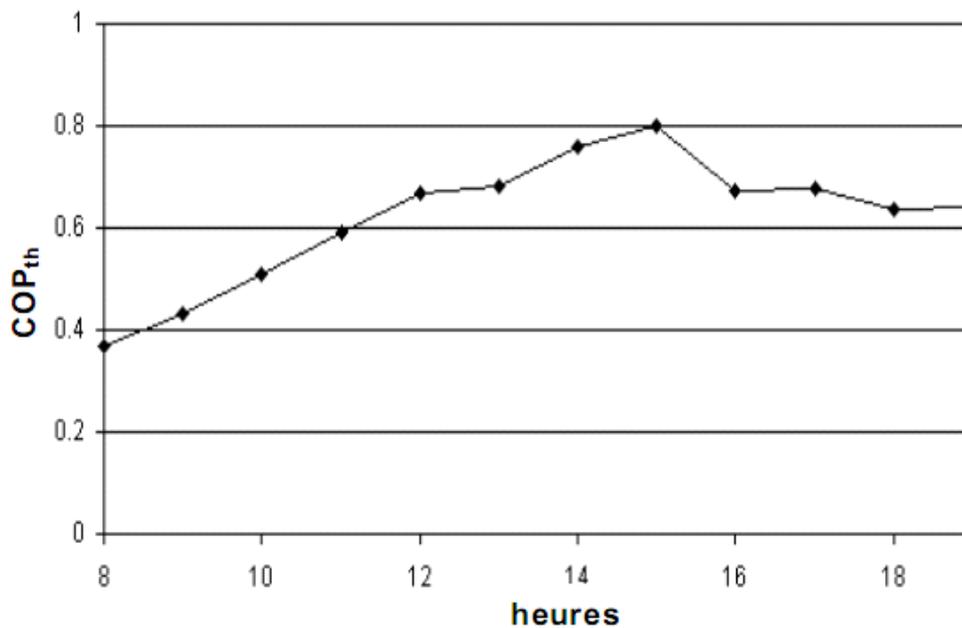
Jain [30] a étudié les performances des cycles Pennington à recirculation et Dunkle pour 16 villes indiennes avec un climat humide. De manière générale, le COP baisse avec l'humidité de l'air ambiant qui augmente. Pour une température de régénération de 130 °C, le COP thermique calculé du cycle de Dunkle est aux alentours de 0.35, alors qu'il est de 0.2 pour le

cycle à recirculation et de 0.1 pour le cycle de Pennington. Il étudie COP thermique pouvant atteindre 2.

Mais dans la pratique, seul le cycle de ventilation (Pennington) est utilisé. Les autres techniques n'ont pas été développées expérimentalement. La complexification du cycle, et la hausse des coûts d'investissement ne se justifie pas par une hausse des performances suffisantes. Il est important de noter que Jain ne prend jamais en compte les consommations électriques, les conclusions peuvent donc changer en fonction de celles-ci, et expliquer aussi pourquoi il ne subsiste que le mode de Pennington, étant donné que les autres modes utilisent plus de composants, avec une perte de pression plus importante dans la centrale.

### 3.4. Conclusion sur la dessiccation solide

La dessiccation en phase solide (notamment le cycle Pennington) est caractérisée par un COP thermique plus faible que les autres technologies de froid solaire, et qui fluctue fortement en suivant les conditions d'utilisation, comme le montre la figure suivante:



**Figure 17 : Evolution du  $COP_{th}$  pour une journée de fonctionnement d'une centrale à dessiccation (cycle Pennington) [19].**

Il y a donc deux manières d'améliorer les performances des installations de refroidissement à dessiccation. Soit chaque composant (notamment la roue à dessiccation, ou l'élément permettant la déshumidification) est optimisé et ses performances intrinsèques sont améliorées, soit le fonctionnement global de la centrale est optimisé à l'aide de nouveaux

cycles ou de systèmes de gestion et de contrôle optimisés à l'aide de nouveaux cycles ou de systèmes de gestion et de contrôle, afin d'améliorer ainsi les performances saisonnières.

#### 4. La dessiccation en phase liquide en cycle ouvert

##### 4.1. Les solutions hygroscopiques ou sorbants

Les solutions liquides ayant un fort pouvoir hygroscopique sont des solutions ayant une pression partielle de vapeur saturante pour l'eau plus faible que l'eau liquide à une même température. Cette pression de vapeur saturante est proportionnelle à sa température (plus la solution est chaude moins elle est hygroscopique) et inversement proportionnelle à sa concentration (plus la solution est concentrée, plus elle est hygroscopique).

Ces solutions sont pulvérisées sur un substrat afin d'être mises en contact avec le flux d'air et capturent ainsi l'humidité de ce dernier en cas d'absorption, la relâchant en cas de désorption, ou régénération.

Il existe quatre fluides dessiccant utilisés dans les applications de déshumidification. Ce sont le triéthylène Glycol (TEG), le chlorure de lithium (LiCl), le chlorure de Calcium ( $\text{CaCl}_2$ ) et le Bromure de lithium (LiBr). Ce sont des mélanges avec de l'eau à différentes concentrations. Ces liquides peuvent être analysés à travers cinq critères,

**Performance** : c'est la quantité de vapeur d'eau pouvant être absorbée par la solution. La force motrice de l'échange est la différence de pression de vapeur d'un fluide est faible, plus la déshumidification sera efficace. Ce paramètre est fonction des caractéristiques physiques de la solution, mais aussi des caractéristiques globales de l'échangeur, à savoir géométrie, Débit... Ainsi ce n'est pas un critère absolu, c'est le plus difficile à évaluer. En prenant en compte seulement la pression de vapeur d'eau (fonction de la température et de la concentration du fluide) il est possible d'avoir un critère précis, mais en contrepartie ne reflétant pas tout à fait réellement les performances du fluide en fonctionnement dans l'absorbeur. En effet les performances sont également fonction du « mouillage » du média de l'échangeur, c'est-à-dire de la tension de surface qui doit être faible, des limites de solubilité des sels. Enfin un fluide ayant une faible viscosité réduira d'autant la puissance utilisée dans les diverses pompes.

- **Corrosivité** : les fluides utilisés, notamment les sels, sont des substances corrosives, il faut donc être très vigilant lors de la conception pour, d'une part

s'assurer de la non corrosivité des matériaux employés, et d'autre part s'assurer le plus possible d'éviter les fuites.

- **Cristallisation** : les sels employés étant en solution aqueuse, il y a une limite de solubilité de ceux-ci. Cette limite est fonction de la température et de la concentration de la solution. Elle est importante car elle oblige à limiter la concentration des solutions et ainsi limiter les capacités d'absorption.
- **Toxicité** : les fluides employés doivent avoir la toxicité la plus faible possible. Bien qu'un procédé doive empêcher toute gouttelette d'être entraînée dans le flux d'air, il est impossible d'utiliser un fluide ayant une toxicité démontrée. Dans le même état d'esprit la pression de vapeur saturante du mélange doit être évaluée afin une nouvelle fois d'éviter contamination.
- **Coûts** : Une évaluation peut être effectuée à partir des fournisseurs de produit chimiques. De plus en fonction des volumes utilisés (dépendants de l'existence d'un stockage de la solution ou non), il est possible de voir si le coût des fluides est négligeable par rapport à celui d'une installation de climatisation solaire.

# **Chapitre III**

## **Les capteurs solaires à air**

## 1. Introduction

L'exploitation des sources d'énergie renouvelables et essentiellement la conversion de l'énergie solaire a connu Depuis les années 1970 un regain d'intérêt considérable suite à la crise énergétique .ainsi, étant une source renouvelable et Nationale, l'énergie solaire permet, d'une part de réduire la <<dépendance énergétique>>.Etant une source Peu polluante, elle permet d'éviter les atteintes à l'environnement occasionné par le processus de production de transport et de consommation des sources d'énergies conventionnelles d'autre part.

Les capteurs solaires plans à air ont pour but la transformation de l'énergie radiante du soleil en énergie Thermique extraite par l'air en écoulement dans l'isolateur Cette énergie est ensuite utilisée dans divers applications, à savoir ; le chauffage des habitations, le chauffage de l'eau sanitaire, le séchage des produits alimentaires la climatisation et la réfrigération...

## 2. Principes d'un capteur solaire plan

Le capteur solaire plans est tout système exposé au rayonnement solaire afin de le capter et de le transformer en énergie thermique,Ce système de captage est base sur l'effet de serre ou le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre (0.3 et,  $3\mu\text{m}$ ), il traverse la vitre et il est piégé a l'intérieur ou il capté par la surface absorbante.

L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge (entre 4 et  $30\mu\text{m}$ ), ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi de verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers l'extérieure. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection unepartie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur.

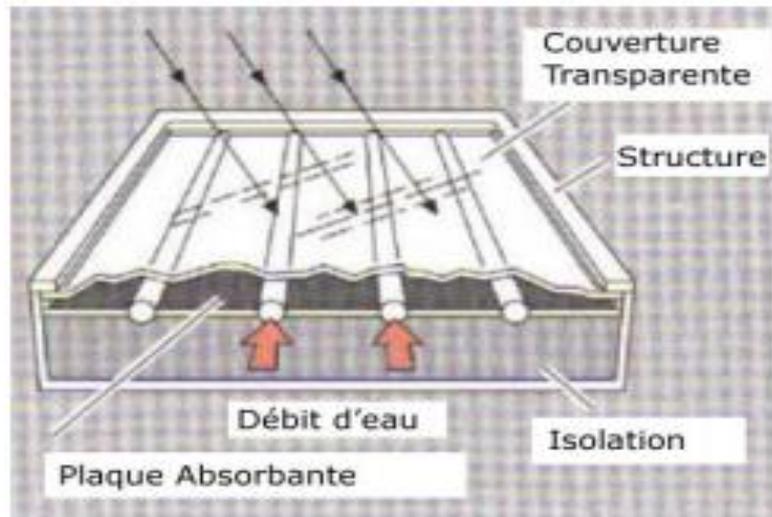


Figure 1 : Vue générale d'un capteur plan à eau[19].

### 2.1. Caractéristiques techniques des capteurs solaires plans

Plusieurs types de capteurs solaires plans existent actuellement leurs différences résident dans le choix de chaque élément.

### 2.2. Partie avant (les vitrages)

Ce sont des couvertures transparentes au rayonnement solaire mais opaque au rayonnement infrarouge de grand longueur d'onde émis par l'absorbeur (effet de serre). Ils sont en général en verre de faible teneur d'oxyde de fer, parfois en plastique, mais celui-ci vieillit mal sous l'action des ultra-violet. En général on ne dépasse pas deux vitrages car au-delà le gain obtenu sur les pertes thermiques est compensé par les pertes de réflexion et réfraction.

Les vitrages ont une épaisseur de 4 mm environ et sont situés à 25 – 40mm de l'absorbeur et munis de joints d'étanchéité au niveau du boîtier. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles :

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plus part du rayonnement reçu.
- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

### 2.2.1. Partie absorbante (l'absorbeur)

C'est au niveau de laquelle s'effectue la conversion thermique. Il transforme le rayonnement solaire en chaleur et échange celle-ci avec le fluide caloporteur. Il est par conséquent l'organe principal du capteur. Il doit assurer les fonctions suivantes :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident
- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
- N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie.

En général, il est composé de plaque ou de tube de plastique, de cuivre d'aluminium ou d'acier (inox ou galvanisé)

Ces principales caractéristique sont :

- Un facteur d'absorption solaire aussi voisin que possible de l'unité.
- Un coefficient d'émission d'ondes thermique de grande amplitude ( $\lambda > 3\mu\text{m}$ ) faible.
- Une bonne conductivité thermique.
- Une bonne résistance chimique et anticorrosive.

### 2.2.2. Partie arrière

#### -l'isolant

Elle est généralement constituée d'une couche isolante, qui diminue les pertes par convection et ralentit ainsi le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Elle est montée directement sur le fond et les parois du bâti. Elle doit être opaque au rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde émis par l'absorbeur. Elle permet de calorifuger le système. Le choix du matériau doit assurer les qualités essentielles suivantes :

- Une faible conductivité thermique
- Une faible densité
- Une chaleur massique basse

- Une bonne résistance dans toute la plage de températures auxquelles il peut être soumis.

On utilise généralement trois catégories d'isolants :

- Isolants minéraux (exemple : laine de verre, laine de Roch....)
- Isolants végétaux ou plastique (exemple : bois, liège).

#### **-le boîtier ou le coffre**

Permet l'assemblage des différents éléments du capteur, il doit assurer une protection efficace contre les agents atmosphériques.

#### **2.2.3. Fluide caloporteur**

A pour rôle de véhiculer la chaleur entre l'absorbeur pour l'utilisation ou le stockage.

Le fluide caloporteur doit satisfaire aux conditions :

- Faible viscosité et point de coulée aussi bas que possible.
- Haut point d'ébullition et bas point de congélation.
- Inertie chimique vis-à-vis des matériaux de l'installation.
- Tension de vapeur aussi basse que possible.
- Pertes de charge faible.
- Coefficient de transfert thermique élevé.
- Grande capacité calorifique et toxicité faible.
- Stabilité physique et chimique dans les conditions d'emploi et de stockage.

Il est évident qu'un même type de fluide ne peut être le meilleur au regard de toutes ces propriétés. Le choix doit être fait en fonction des conditions particulières à chaque installation. En règle générale la température d'utilisation impose le choix du fluide.

On utilise principalement trois sortes de fluides (air, eau, glycol, ...)

### 2.2.4. Les capteurs à air

Ils sont utilisés pour le chauffage direct de l'air, et lorsque la température désirée n'est pas très haut ( $<70^{\circ}\text{C}$ ). car le rendement baisse fortement avec la hausse de la température de l'air caloporteur. L'avantage d'installations, des ailettes dans l'absorbeur est d'augmenter le coefficient d'échange convectif entre l'air et le fluide caloporteur et l'absorbeur, ces capteurs peuvent être utilisés dans une installation de "desiccantcooling".

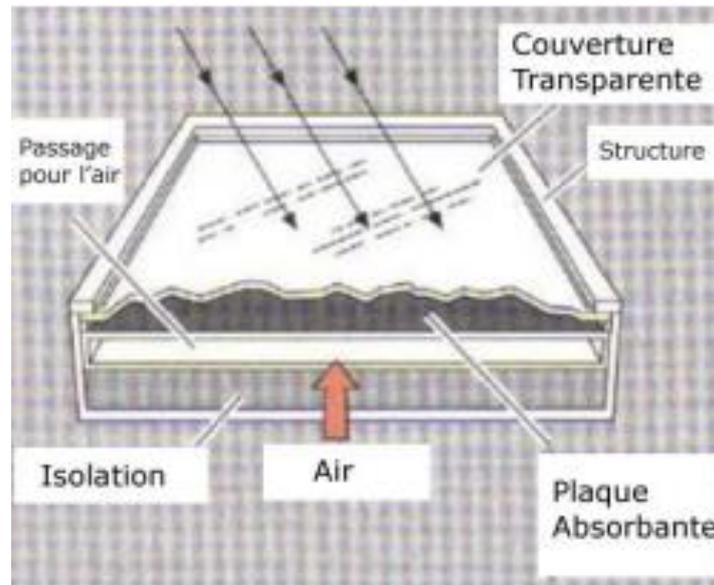


Figure 2 : vue générale le d'un capteur à air [19].

### 3. Travaux de recherche réalisée sur les capteurs solaires plans à air

Plusieurs types de capteurs à air ont été construits et testés à travers le monde, l'objectif principale étant de collecter le maximum d'énergie solaire à un coût minimum. Pour atteindre cet objectif, des grandes voies (travaux) sont aujourd'hui explorées.

Nous exposons quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent le côté thermique avec des études énergétiques effectuées sur les capteurs solaires plans à air.

#### 3.1. Les paramètres internes

#### 3.2. La vitre

En vue de l'optimisation du rendement thermique du capteur solaire, Youcef.S-Ali [32] ont montré dans une étude expérimentale que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce à la minimisation des pertes vers

l'extérieur Wijesundura [33] ont trouvés dans ces travaux expérimentaux que l'effet de la couverture double est (10-15%) d'efficacité Turhankoyuncu[34] a aussi étudié expérimentalement l'influence du nombre de couvertures et il a trouvé que ce facteur influe fortement sur l'efficacité du capteur. Le verre et toute à fait intéressant comme couverture pour les dispositifs solaires, puisque il absorbe presque toute le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur ayant pour résultats une amélioration de l'efficacité thermique du capteur. mais son utilisation possède aussi des inconvénients qui sont, son cout élevé et sa fragilité pendant le transport et en service, c'est la raison pour laquelle, pendant plusieurs années des couvertures en plastique transparent ont été appliquées largement pour construire des capteurs solaires de cout modéré et rigides Donatien[35], a souligné d'après une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différant a des performances meilleures qu'un capteur a deux vitres de même matière

### 3.3. L'absorbeur

L'amélioration des performances des capteurs solaires plans consiste à limiter les pertes thermiques entre l'absorbeur et l'environnement. L'étude menée par [36], a porté sur l'application d'un critère analytique pour estimer la géométrie optimale de l'absorbeur et a souligné qu'un capteur avec chicanes en forme de V et ondulés importantes sur l'amélioration du rendement. Hollands Kgt, Shewen Ec[37], ont montrer que l'efficacité et le rendement thermique de V et doublés (7-12%) en comparaison avec le capteur plan

L'allongement du capteur solaire influe fortement sur son efficacité Suleyman Karsli Augustus. M. Leon, S. Kumar[38.39] et al ont analysé qu'il n'existe pas une grande différence entre l'absorbeur sélective et non sélective, l'efficacité de l'absorbeur sélective et 30% et pour l'absorbeur non sélective 29% [40].

Dans une étude expérimentale, six déferent types des capteurs solaires plans utilisés dans les séchage des récoltes, ont été conçu, fabriqués et analysés par Filiz Ozgen [41] dans le but de voir l'influence de la façon de passage de l'air, du nombre de couvertures et la forme de l'absorbeur sur leur rendement. Les modèles des capteurs sont :

Modèle 1 : la vitre est simple et en plastique, l'absorbeur est noir et plat, et l'air passe entre

Modèle 2 : la vitre est en plastique, l'absorbeur est noir et plat, d'avant passe.

Modèle 3 : une simple vitre en plastique, l'absorbeur noir est une plaque de zigzag, d'avant passe.

Modèle 4 : la vitre simple et en plastique, l'absorbeur et un plaque plane, d'arrière passe.

Modèle 5 : la vitre simple et en plastique, l'absorbeur noir est une plaque de zigzag, d'arrière passe.

Modèle 6 : double couverture en plastique, l'absorbeur est une plaque plane noire, d'arrière passe.

Les rendements de ces capteurs ont été respectivement 42.11% 45.88% 44.23% 23.39% 39.06% et 36.94%. Les résultats de cette étude ont montré que le capteur du type 2 est le plus efficace, alors que celui du type 6 est le moins efficace, le nombre de vitres et la façon de passage de l'air influent considérablement sur l'efficacité du capteur, alors que l'influence de la forme de la surface absorbante est moins.

### **3.4. Les paramètres externes**

#### **3.4.1. Température ambiante**

La température de l'environnement influe fortement sur le fonctionnement du capteur solaire.

#### **3.4.2. Vitesse de vent**

La vitesse de vent apparaît dans le coefficient de convection entre la vitre et l'extérieur qui agit sur la valeur des pertes, c'est pourquoi la connaissance des données météorologiques est important. Lorsque le coefficient de transfert thermique du au vent est à son maximum (pour une longueur de 1m d'absorbeur noir installé horizontalement) la réduction maximum de l'efficacité s'avère au plus bas niveau comme souligné par [42].

#### **3.4.3. Quelques exemples d'application**

- Chauffage d'un bâtiment en générale
- Chauffage d'un garage
- Chauffage d'un sous-sol ; réduction d'humidité

#### 4. Avantages et inconvénients

L'utilisation de l'air comme fluide caloporteur est susceptible de réduire les coûts de fabrication, voire d'entretien.

En effet l'air ne présente pas de problèmes de gel ou d'ébullition, qui imposent d'utiliser des fluides contenant de l'antigel et de prévoir des sécurités pour éviter les surpressions qui peuvent se produire en cas de panne de circulateur dans les capteurs à eau.

- Les phénomènes de corrosion ou d'entartrage, qui peuvent diminuer les performances et la durée de vie d'une installation à eau sont inexistantes.
- Les problèmes d'étanchéité paraissent moins cruciaux.
- Le capteur à air, est, enfin, plus léger que les dispositifs classiques et généralement moins complexe de réalisation, donc plus facilement intégrable dans un bâtiment ou un processus industriel et son coût d'installation est plus faible.

Néanmoins, l'air présente un certain nombre d'inconvénients :

- Coefficients d'échange thermique plus faibles que pour les liquides, ce qui conduit généralement à augmenter les surfaces d'échanges.
- Faible valeur du produit de la masse volumique par la chaleur massique, ce qui impose l'utilisation de forts débits volumiques, ce qui augmente la consommation électrique des auxiliaires (ventilateur).
- Problèmes de salissure des citres dans les cas où l'air circulent entre la vite et l'absorbeur.

Il en résulte la nécessité de soigner la conception aéraulique et thermique du capteur.

# **Chapitre IV**

**Etude de la faisabilité**

**du**

**(Dessiccantcooling)**

**dans la région de**

**Biskra**



## **Introduction**

Dans ce chapitre, nous étudions, les possibilités d'exploiter le potentiel énergétique et géothermique de la région de Biskra pour faire fonctionner un système de (desiccant cooling), que ce soit en terme température de génération, ou soit par le pré-rafraîchissement en bénéficiant de la température du sol.

Nous étudions ainsi, les possibilités de fournir la température de génération (50-80°C) nécessaire pour le fonctionnement de ces systèmes par des capteurs solaires plans à air qui ont été réalisés et étudiés ultérieurement dans notre université.

La faisabilité et l'adaptation d'un tel système dans la région de Biskra a été étudiée à partir des diagrammes de l'air humide à la fin de ce chapitre.

## **1.Considérations Géothermiques**

La géothermie s'intéresse à l'exploitation des sources d'eau chaude en profondeur. Elle constitue l'une des principales ressources d'énergie renouvelable dans le monde. Il existe à travers le monde deux types principaux de géothermie: - la géothermie haute énergie, elle concerne les gisements des zones continentales actives qui se caractérisent par des températures supérieures à 150 °C. Elle est destinée principalement à la production d'électricité; - la géothermie basse énergie, qui concerne les gisements des zones des plates-formes continentales stables, recouvertes de terrains sédimentaires caractérisées par une température comprise entre 30 °C et 150 °C. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

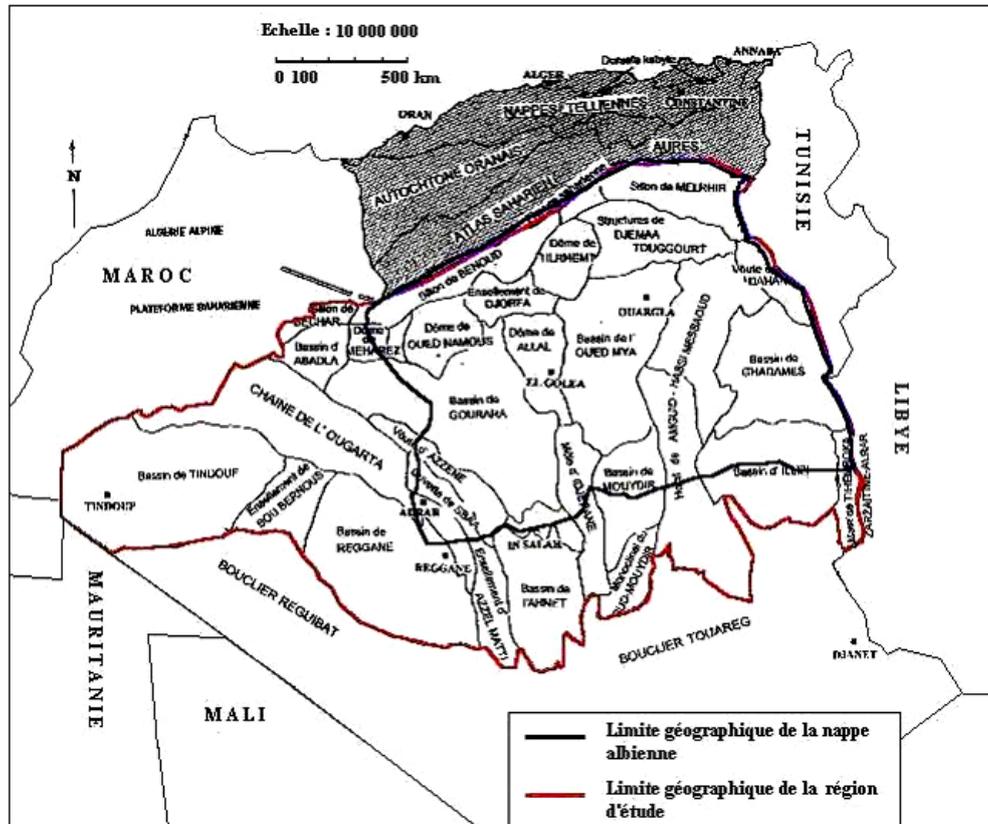
### **1.1. Le Continental intercalaire**

Le sud Algérien est un vaste territoire dont le potentiel géothermique est contenu dans les bassins sédimentaires des zones continentales stables. Les ressources géothermiques sont principalement de basse énergie. Afin de déterminer les régions d'intérêt géothermique, les cartes de gradient géothermique de flux de chaleur sont établies.

Les forages pétroliers et hydrauliques qui traversent le territoire saharien indiquent bien que dans certaines régions, les eaux sont très chaudes, ces constatations nous permettent de considérer le Sahara algérien comme favorable à la production de l'énergie géothermique.

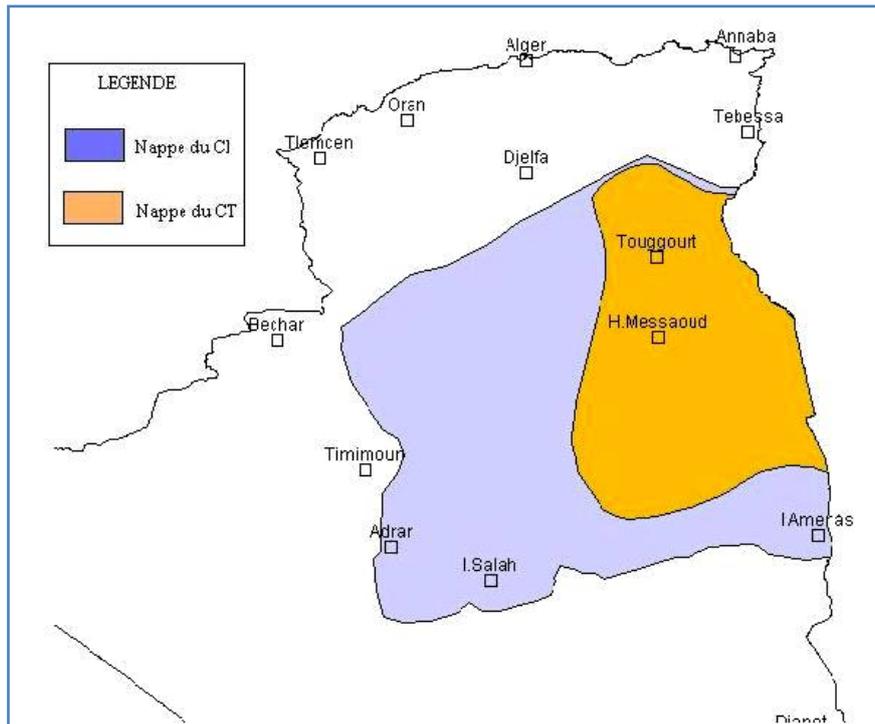
Si le potentiel géothermique du Nord algérien est bien déterminé, pour le Sud algérien une étude détaillée s'avère nécessaire pour l'évaluation du potentiel géothermique.

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence; au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre Nord de l'Algérie, plus particulièrement dans les régions de l'Oranie, de la Kabylie et du Constantinois. [43]



**Figure 1: limite géographique de la nappe albienne [43]**

Dans la région de Biskra, l'aquifère du continental intercalaire se présente sous forme d'une nappe artésienne, et elle constitue la plus grande réserve d'eau souterraine dans le Sahara algérien. Cette nappe est surmontée par celle du complexe terminal qui se présente sous forme d'une nappe libre, (Figure 2).



**Figure 2 : Carte représentant les nappes du Continental Intercalaire [43]**

Les températures les plus élevées enregistrées sont 98°C à Guelma et 118°C à Biskra, située dans la partie Sud-Est du pays. En termes de production d'énergie, l'énergie géothermique interne a été estimée, par le CDER, pour fournir un potentiel de 700MW (plus le flux de l'exploitation de la plate-forme albiennaise avec le débit total des sources d'eau chaude). Cependant, ces sources d'eau chaude ne sont malheureusement pas exploitées à des fins industrielles[44].

Les formations détritiques du continental intercalaire constituent un grand réservoir qui couvre une superficie réservoir de 600.000 Km<sup>2</sup>. En Algérie il est localisé dans la partie septentrionale du Sahara, et il s'étend jusqu'à la Tunisie et la Libye (Figure 1). Ce réservoir affleure au sud, il est semi-libre à l'Ouest et captif dans sa partie orientale. Du point de vue géothermique, la partie orientale est la plus prometteuse les températures enregistrées varient entre 50-70°C, certains forages débitent à 400l/s. La profondeur du réservoir passe de 800m à Ouargla, à -1300m à Touggourt puis à 2600m à Biskra.

Les applications possibles des eaux chaudes de l'Albien En Algérie, les eaux chaudes de l'Albien sont utilisées essentiellement pour le bal néologie. Une place particulière doit être accordée à ces ressources qui présentent des réserves importantes et des températures non négligeables, atteignant dans la partie Est les 70°C. Les domaines d'applications sont variés, ces eaux peuvent convenir pour le chauffage urbain et pour des usages agricoles.

**Tableau 1: Les possibilités d'utilisation des eaux chaudes de l'aquifère albien. [44]**

Temperature de l'eau (°C)	Possibilités d'utilisations
70	Réfrigération (limite inférieure)
60	Elevage d'animaux, climatisation
50	Culture de champignons chauffage de serre par tuyau aérien,
40	Chauffage urbain
30	Fermentation, chauffage de serre par paillasses radiant
20	Pisciculture

### 1.2. La température du sol

Dans une étude menée à l'université de Biskra pour l'identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, l'influence de la température du sol, la profondeur d'enfouissement des canalisations ainsi que leurs longueurs a été étudiée. La température du sol, à toute profondeur et à tout instant, est généralisée afin de prendre en compte chaque composante. Son calcul dépend donc de la température de l'air extérieur et du flux de rayonnement global incident mais aussi de l'humidité du sol, de la couverture du sol par la végétation, de la vitesse du vent, et de l'humidité relative moyenne de l'atmosphère. Ainsi, le modèle prend en compte la plupart des spécificités du lieu d'implantation de l'échangeur air-sol étudié.[45]

**Tableau 2 : Propriétés du sol (réf.: station météorologique de Biskra) [45]**

Masse volumique $\rho_{sol}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Capacité calorifique $C_{psol}$ (J/kg K)	Conductivité Thermique $\lambda$ sol (W.m/K)	Diffusivité thermique $a$ (m <sup>2</sup> /s)	Profondeur de pénétration $\delta$ (m)	Albédo ( $\alpha$ )
1800	1340	1.5	$6.22 \times 10^{-7}$	2.5	0.35

Les courbes des figures 3 et 4 montrent l'évolution la température de l'air dans l'échangeur de l'entrée jusqu'à la sortie pour différentes profondeurs. On remarque que la température de l'air décroît de l'entrée de l'échangeur jusqu'à la sortie.

Un écart important (environ 16 °C) est enregistré. Cet écart correspond à une distance de l'entrée égale à 50 m. Au-delà de cette longueur, la chute de la température est peut remarquable.

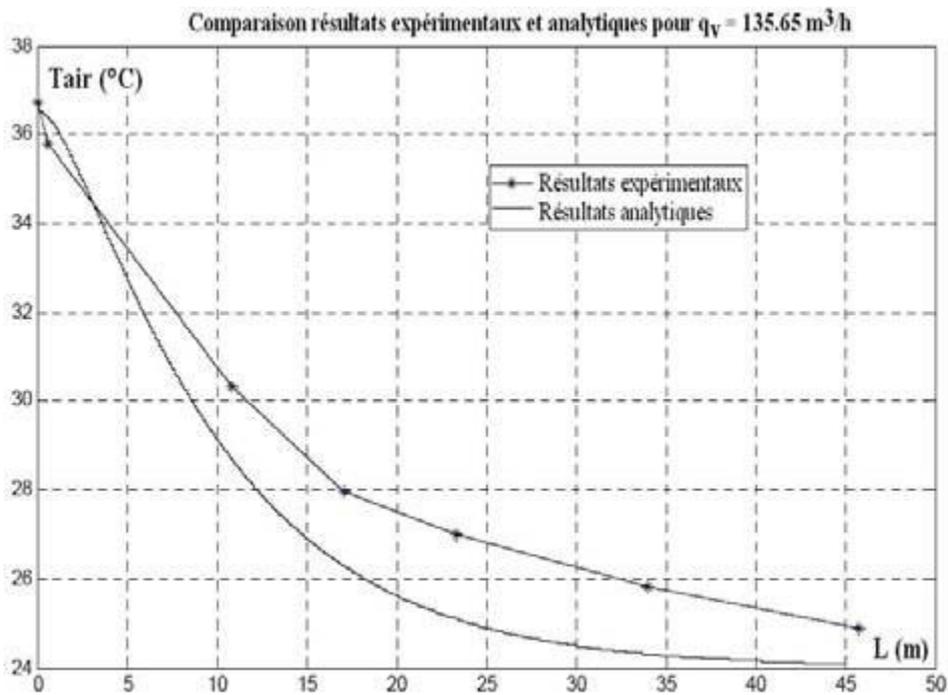


Figure 3: l'évolution la température de l'air dans l'échangeur [45]

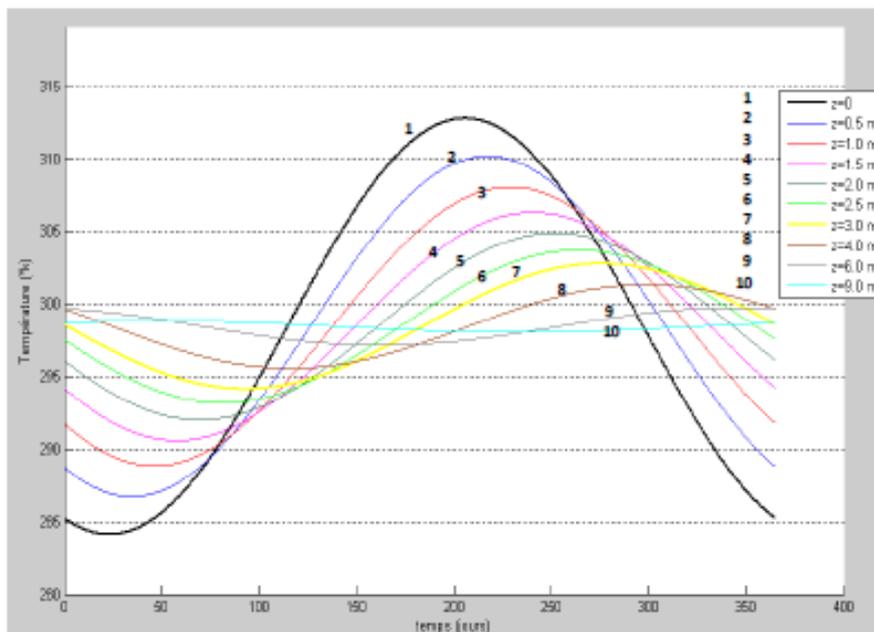


Figure 4: Signal de température de sol en fonction de la profondeur [46]

### 1.3. Profondeur d'enfouissement des canalisations

Le sol joue un rôle de tampon thermique entre l'extérieur et la canalisation enterrée. C'est lui qui isole celle-ci de l'influence des conditions atmosphériques. La profondeur d'enfouissement est donc un paramètre important qui joue un rôle sur la qualité de cette isolation. Elle doit être déterminée en fonction de la nature du sol et de l'objectif recherché (chauffage ou rafraîchissement). Dans le cas d'un puits qui chercherait à utiliser le déphasage journalier (la fonction rafraîchissement est alors recherchée), une profondeur de 40 cm est a priori suffisante. Pour un déphasage saisonnier (on privilégie dans ce cas la fonction préchauffage), une profondeur minimale de 1,50 m est requise. Au-delà, l'efficacité du puits augmente encore, mais des contraintes économiques ne permettent pas généralement d'installer le puits à de telles profondeurs. Au-delà d'une dizaine de mètres sous la surface du sol, la température du sol ne varie plus sous l'effet de l'évolution de la température extérieure. Des essais et des mesures concernant les températures du sol à différents profondeurs dans un site en France, ont aboutis à des résultats résumés dans le graphe suivant :

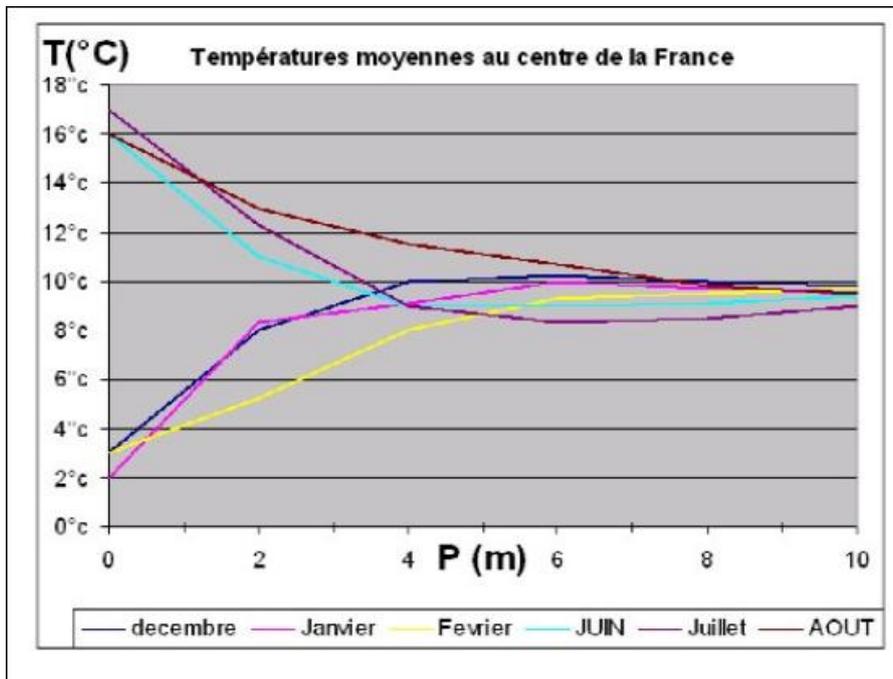


Figure 5: Températures moyennes du sol en fonction de la profondeur P dans un site au centre de la France [46]

## 2.Considérations Energétique

La maîtrise de l'énergie est un des problèmes majeurs auxquels notre société va devoir faire face décennies à venir, à la fois en termes d'épuisement ressources et d'impact sur le réchauffement de planète.

### 2.1.Situation de l'Algérie et de la ville de Biskra en vue de la climatisation

La situation l'Algérie (latitude 36° N) signifie que le climat y règne et qui s'étale sur une importante période l'année est chaud et variant entre humide et sec. Cette situation rend pratiquement impossible de maintenir température intérieure des habitations à un niveau compatible avec l'exercice des activités humaines.La température quotidienne pendant les séquences chaudes dépasse pour la majorité de ces régions les 30°C.

Il est donc souhaitable de climatiser les habitations dans les où la température quotidienne moyenne dépasse de confort. C'est le cas des différentes zones climatiques de l'Algérie (figure .1) qui sont au nombre de quatre plus une sous zone dont la région de Chleff.

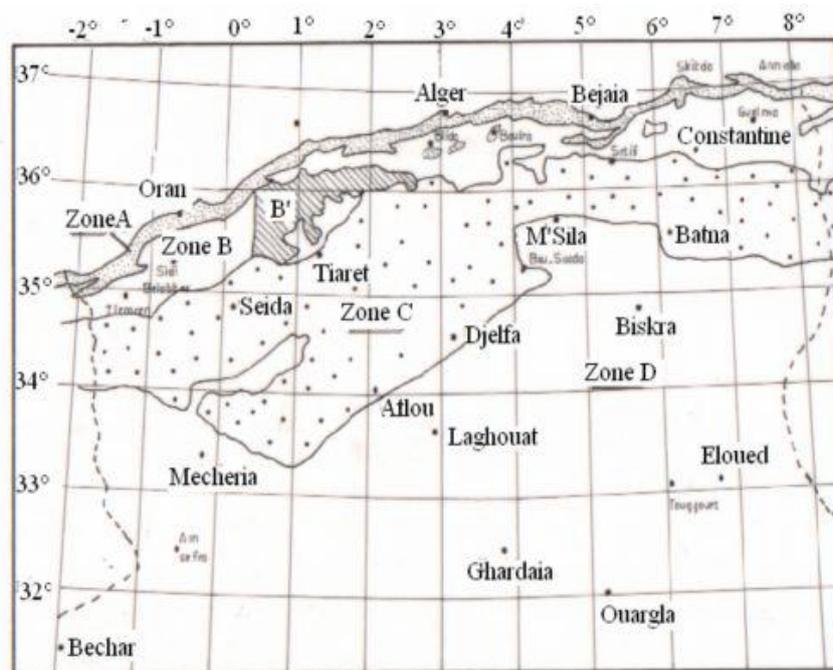


Figure 6: Zones climatiques de l'Algérie [47]

D'après la carte, Biskra se trouve dans la zone D. Caractérisée par son climat saharien, Biskra est située à une latitude de 34°48' Nord et une longitude de 5°44' Est. Son altitude par rapport au niveau de la mer est de 85 m, la pression atmosphérique à cette altitude est 1,004 bar.Le tableau .3 donne quelques valeurs de base utilisées pour le dimensionnement des systèmes de climatisation.

**Tableau 3: Conditions de bases extérieures pour le calcul des installations de climatisation en Algérie [47]**

Zones climatiques	Condition de Base : été		
	Température $T_{amb}$	Ecart Diurne en °C	Humidité Relative $H_R$
<b>Zone A</b>			
< 500m	34	9	44
500 – 1000m	33.5	10	40
>1000m	30.5	9	47
<b>Zone B</b>			
< 500m	38	15	30
500 – 1000m	37	15	28
>1000m	35	14	28
Subfield B' : > 500m	41	18	41
<b>Zone C</b>			
500 – 1000m	39.5	20	18
>1000m	36	18	22
<b>Zone D</b>			
< 500m	45	20	11
500 – 1000m	42	18	13
>1000m	37.5	16	17

## 2.2. Evaluation des besoins et techniques de rafraîchissement solaire

La climatisation est nécessaire dans les habitations d'inertie moyenne (parois pesant entre 200 et 100Kg/m<sup>2</sup>). Elle permet d'extraire une charge thermique des locaux pour les maintenir à une température donnée. Cette charge dépend de:

- La température intérieure et extérieure.
- L'humidité relative interne et externe.
- Les apports solaires à travers les parois opaques et les fenêtres).
- Les apports dus aux occupants.
- Les apports dus au renouvellement d'air.
- La vitesse du vent.

Contrairement aux autres sources, l'énergie solaire nous permet la construction de systèmes indépendants (autonomes). Néanmoins, nous pouvons dire que cette énergie possède un mode de conversion thermique sans concentration. La mise en œuvre pour la récupération de cette énergie nécessite une technologie simple et qui peut s'adapter simplement au site et à la région considérée et dans de très nombreuses utilisations. L'implantation d'un système solaire en un site ne doit se faire qu'après avoir estimé la productivité de ce système en fonction du gisement solaire local disponible réellement, par des beaux jours ou par des jours médiocres. Divers systèmes de conversion solaire sous forme d'énergie calorifique sont en service,

utilisés dans plusieurs applications, tels que le chauffage des locaux et le chauffage de l'eau sanitaire, la distillation solaire, particulièrement dans les zones arides où l'approvisionnement en eau potable et en eau douce des populations connaît un sérieux problème.

Dans certains pays du Tiers-Monde qui sont dépourvus de sources traditionnelles, la recherche dans le domaine énergétique est très actuelle et, ceci bien entendu pour réduire leurs importations énergétiques. Ceci dit, l'application et la recherche tant sur le plan amélioration des performances des capteurs solaires plans que sur les fours solaires, les séchoirs solaires, le froid solaire, chauffage solaire, sont des sujets prépondérants.

Les travaux effectués jusqu'à ce jour dans notre université et surtout nos deux Laboratoires (LGM et LGEM) portent en particulier sur cette perspective, à savoir l'amélioration permanente des performances thermiques des insolateurs plans. Une amélioration sensible de ces performances a été obtenue.

Les capteurs solaires plans à air ont pour but la transformation de l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans l'insolateur. Cette énergie est ensuite utilisée dans diverses applications, à savoir ; le chauffage des habitations, le chauffage de l'eau sanitaire, le séchage des produits alimentaires, le froid solaire etc.

C'est dans ce contexte précis que nous nous intéressons dans cette partie à l'étude de cette chaîne énergétique, qui comportera donc deux volets, le premier concernant l'insolateur plan en présentant des résultats obtenus dans notre université. Le second concernant la faisabilité des systèmes de froid solaire par dessiccation dans la région de Biskra. L'intérêt est porté sur le « desiccantcooling » vu la faible température de régénération (55-80°C).

### **2.3. Présentation des différentes configurations étudiées**

En vue d'améliorer et optimiser les performances thermiques de ces systèmes classiques, les chercheurs ont opté à combiner trois solutions technologiques :

- ✓ La première consiste à introduire différentes géométries de rugosités dans la veine d'air mobile.
- ✓ La deuxième consiste à inverser le sens de l'écoulement de l'air dans le capteur.
- ✓ La troisième consiste à faire circuler l'air chauffé autour de la plaque inférieure du CSP (CSP à double passage d'air)[48].

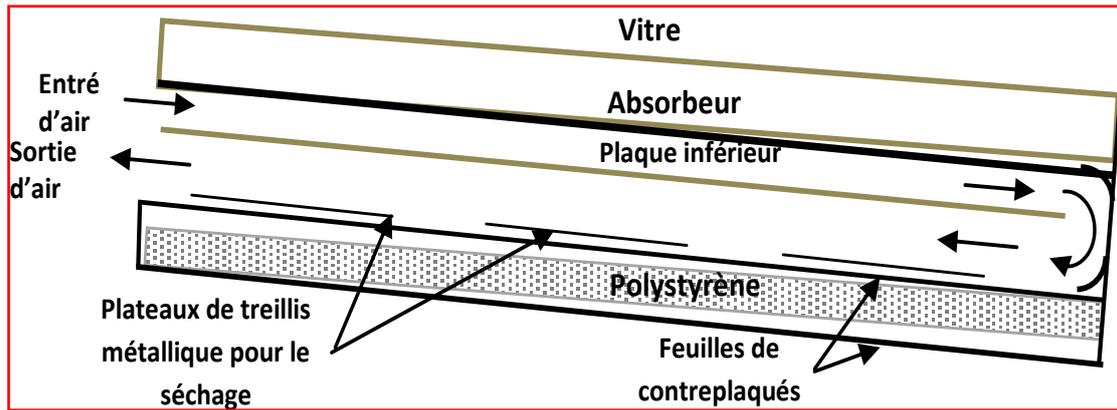


Figure 7: Schéma du modèle étudié [48]

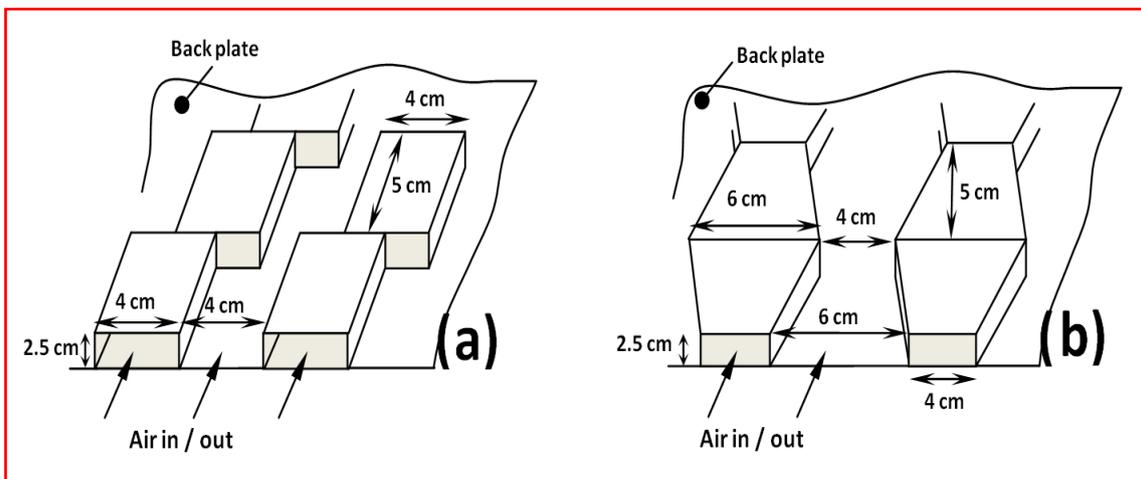
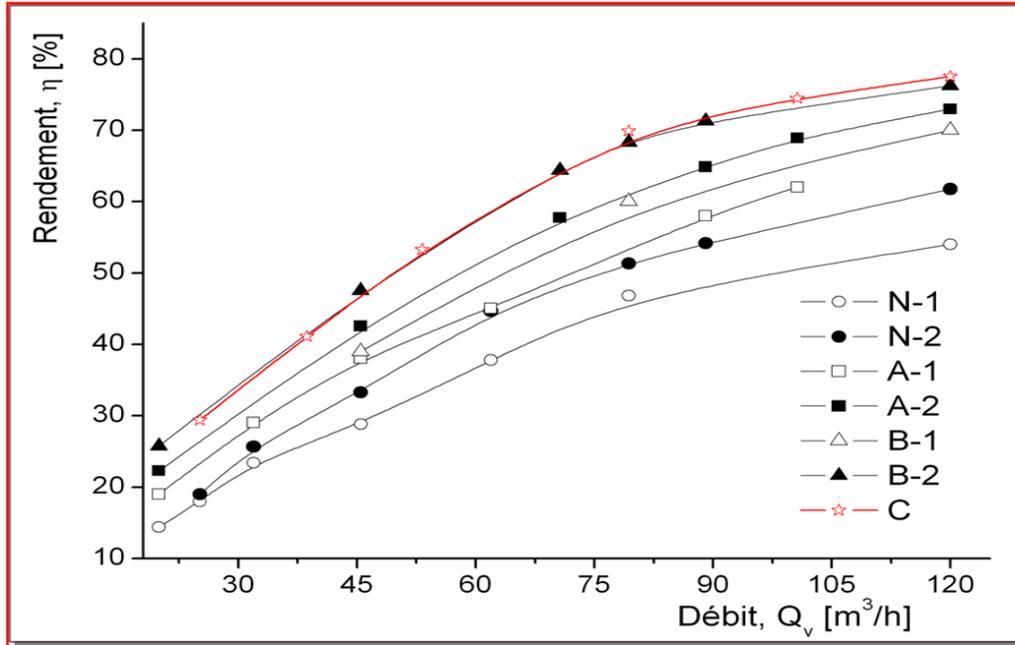


Figure 8: Schématisation des différentes formes d'obstacles utilisés. [48]

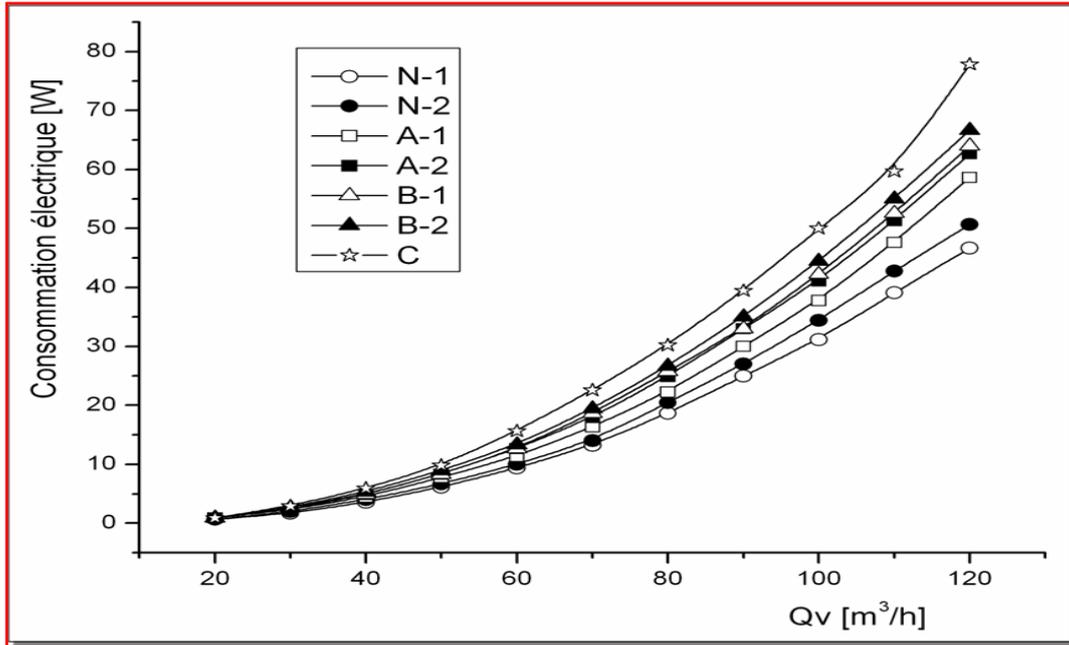
Il est à noter d'après la (figure.9) que le rendement du capteur augmente lorsqu'il est muni de chicane. Ceci s'explique par le fait que l'introduction des chicanes dans la veine dynamique induit une augmentation de la surface d'échange. A remarquer aussi, que les chicanes de forme trapézoïdales provoquent une diminution des sections de passage de l'air. Cette diminution de section de passage implique l'augmentation du nombre de *Reynolds* ; ce qui signifie que l'échange thermique convectif entre l'air et l'absorbeur s'améliore et par conséquent le rendement du capteur augmente



**Figure 9 : Comparaison des rendements des différentes configurations en fonction du débit. [48]**

On remarque dans la(Figure.7) que, dans le capteur muni de chicanes trapézoïdales les pertes de charges sont plus importantes que dans les autres capteurs. Ceci est dû au fait que le diamètre hydraulique et la section de passage sont plus petits que les sections des deux autres capteurs. On constate que les pertes de charge dans ce capteur sont d'environ 1.5 fois plus importantes que celles du capteur N (sans chicanes). En première approximation on peut déduire que les pertes de charges sont inversement proportionnelles à la section de passage et au diamètre hydraulique.

Les chicanes trapézoïdales placées dans le capteur B font augmenter les pertes de charge ainsi que la consommation électrique (figure.8). On note pour un débit de  $120m^3/h$  des augmentations de perte de charge et de consommation électrique d'environ 23.6% et 42% respectivement, par comparaison aux capteurs N. Toutefois ces consommations restent toujours faibles par rapport au gain apporté par l'adjonction de ce type de chicanes. En effet à titre d'illustration il est facile de voir que pour un débit volumique de  $80m^3/h$ , les pertes de charges dues sont de :  $\Delta P(B2) = 1.26 \times \Delta P(N2)$  alors que le rendement obtenu est  $\eta(B2) = 1.4 \times \eta(N)$ .



**Figure 10 : Puissances électriques consommées en fonction du débit pour différentes configurations étudiées. [48].**

Il ressort des valeurs enregistrées que l'adjonction de chicane, de forme trapézoïdale avec une incidence normale à l'écoulement et pour le cas de la configuration et la disposition choisies, paraît la plus avantageuse par rapport à celle des chicanes rectangulaires et que dans les deux cas le rendement du capteur est nettement supérieur à celui d'un capteur sans chicanes, une amélioration de 15% pour un débit de 80 m<sup>3</sup>/h est remarquée pour le cas d'un capteur garni de chicanes trapézoïdales, et que par exemple pour avoir un rendement de 50% avec un capteur sans chicanes, le débit nécessaire est de 75 m<sup>3</sup>/h alors qu'avec un capteur garni de chicanes trapézoïdales, le débit nécessaire n'est que de 45 m<sup>3</sup>/h, autrement dit.

Le tableau IV.4 donne les valeurs des températures de l'air à la sortie pour différents débits. On remarque que sans la présence de chicanes (CSP-N) la température de l'absorbeur est plus élevée, ceci traduit un mauvais échange thermique.

**Tableau 4: Evolution de la température de sortie en fonction du débit pour différentes configurations. [48].**

Configuration	Débits [m <sup>3</sup> /h]				
	20	40	60	80	100
N	70	58	54	<b>50.5</b>	48.5
A	78	61.7	57	<b>55.6</b>	51.2
B	82.5	65	59	<b>57</b>	53.5

Les relevés des températures de l'air à la sortie du capteur ont permis la détermination de leurs évolutions réelles comme nous avons pu le constater après avoir étudié l'influence du **type de chicanes** sur le rendement. On peut remarquer sur la (figure 11).Que les deux capteurs ; avec et sans chicanes peuvent fournir l'énergie nécessaire pour le fonctionnement des systèmes de rafraîchissement par dessiccation.

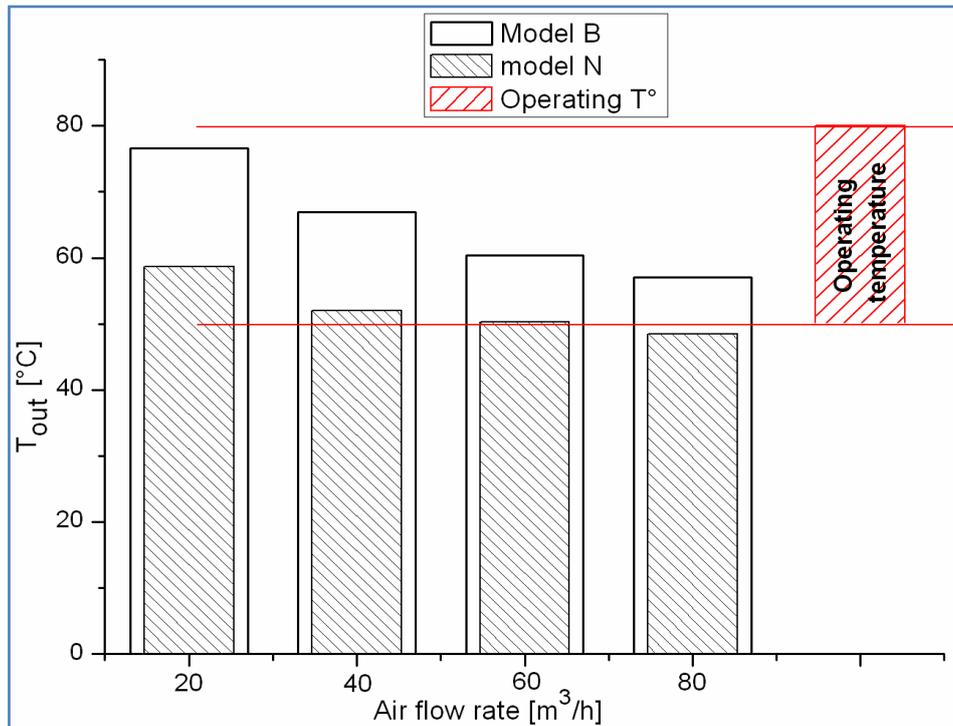


Figure 11: Température de l'air à la sortie du capteur pour différents débits [48].

### 3. Etudes des systèmes à dessiccation pour des conditions de la région de Biskra, à partir des diagrammes de l'air humide:

Afin que notre calcul soit plus raisonnable, nous avons choisi de tester quelques systèmes de (Desiccant-cooling) dans des conditions environnementales plus ou moins extrêmes ( $T=40^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{HR}=30\%$ ). A cette température, le rafraîchissement des locaux est indispensable. Nous avons choisis trois systèmes afin de les tester dans nos conditions environnementales ; le système de Pennington (Figure 12), système de Dunkle (Figure 14) et le système de Henning.

Nous donnons ci-dessous une brève description de quelques systèmes de « desiccantcooling ».

On prendra comme référence la CTA expérimentale, et de taille réelle, installée au LEPTIAB de l'Université de La Rochelle (France). [49].

### **3.1. Présentation de chaque composant**

L'air aspiré de l'extérieur (air neuf) passe à travers la roue dessiccatrice « RD » où il est déshumidifié à enthalpie constante. Cette transformation s'accompagne d'une élévation substantielle de la température. L'air est ensuite acheminé vers un échangeur rotatif, appelé roue sensible « RS », où il est refroidi au contact des ailettes relativement froides avant son admission dans l'humidification à eau. L'air est alors refroidi et son humidité augmente pour arriver aux conditions de soufflage requises. Un ventilateur centrifuge entretient le mouvement et le soufflage de l'air traité à l'intérieur du local à climatiser. On suppose que la traversée du ventilateur chauffe l'air d'un degré avec un  $x$  constant. [49].

#### **3.1.1. Roue dessiccatrice « RD »**

La RD est un des éléments clé de l'installation de rafraîchissement par dessiccation. Les conditions de l'air à la sortie de la RD dépendent des caractéristiques de l'air à l'entrée de la roue. Son rôle premier est de sécher au maximum l'air afin que son humidification entraîne un refroidissement maximum. La déshumidification de l'air fait que sa température augmente alors que son enthalpie reste constante. Pour que la RD reste fonctionnel, il faut que le dessiccant soit régénéré par l'intermédiaire de l'air chaud sortant de la batterie chaude alimenté par les panneaux solaires (Figure 12).

Les propriétés de l'air à la sortie de la roue dépendent des conditions d'équilibre de l'air avec le dessiccant qui reposent sur les conditions de l'air et sur l'état du matériau adsorbant en provenance de la régénération qui sont fonction des conditions l'air de régénération. Le fonctionnement de la RD en régime permanent dépend alors des conditions d'entrée (température et humidité) en air neuf et en régénération. A cet effet le taux de déshumidification sera examiné pour différents conditions de la température de d'humidité en air neuf et en régénération.

La vitesse de rotation de la RD est donnée égale à 20 tr/minute. Le dessiccant utilisé est le silica-gel.

#### **3.1.2. Roue sensible « RS »**

La RS est une matrice poreuse accumulatrice de chaleur qui tourne autour d'un axe et passe alternativement dans un flux d'air froid puis dans un flux d'air chaud. La matrice stocke la chaleur au passage dans le fluide chaud pour restituer au fluide froid. L'échange de chaleur dépend de l'écart de température entre les fluides des deux côtés de la roue, du rapport des

débites des fluides de la nature des fluides. Dans notre cas ; le fluide est l'air, les débits d'air sont égaux et l'efficacité de la roue dépend donc de l'écart de température entre les deux entrées de la roue. L'efficacité de la RS utilisée est légèrement supérieur à 0.7 quel que soit l'écart considéré grâce aux hypothèses suivantes [49].

- Le transfert de chaleur est décrit par des coefficients d'échange (convection).
- Les canaux à travers lequel l'air circule sont identiques. Dans les conditions de l'expérience, le transfert thermique se fait de la même manière dans le fluide chaud et le fluide froid.
- Une étanchéité parfaite est assurée entre les deux sections de passage des fluides.
- La vitesse de rotation de la RS est donnée égale à 10 tr/minute

### 3.1.3. Humidificateurs

Afin de réaliser la température minimale requise à la sortie d'un humidificateur, le phénomène d'évaporation doit se dérouler à la température humide constante : La température de l'eau de l'humidification doit être égale à la température humide de l'air. Il s'agit donc en premier lieu de s'assurer que le rafraîchissement à travers les humidificateurs à rotation se déroule à température humide constante. Pendant l'humidification l'enthalpie de l'air humide reste donc quasi constante. En effet l'enthalpie de l'air humide est une moyenne pondérée entre l'enthalpie de l'air sec et celle de la vapeur d'eau.

En évaporant les gouttelettes d'eau se vaporisent et sont entraînées dans l'air. La chaleur de vaporisation est prélevée dans l'air donc sa température diminue. Parallèlement, la quantité de vapeur d'eau augmente ce qui augmente la part de l'enthalpie de vapeur d'eau et la somme reste quasi constante avec une différence due à la perte d'enthalpie dans l'eau liquide qui est quasi négligeable. Cette hypothèse est d'autant plus vraie si l'intervalle de température est compris entre 15°C et 35°C et celui des humidités absolues  $x = 5 \sim 6$  g/kg ce qui représente le domaine d'application du rafraîchissement par dessiccation et évaporation.

La validité de cette hypothèse pour l'intervalle de température et d'humidité indiqué peut être facilement vérifiée sur le diagramme de l'air humide où les lignes de température humide constante sont parallèles aux lignes isenthalpiques.

$$h(t, x)_{a, \text{entrée}} = h(t, x)_{a, \text{sortie}} \quad (1)$$

L'efficacité de l'humidification est définie par :

$$\eta_{hum} = \frac{\Phi(t,x)_{sortie} - \Phi(t,x)_{entr\ée}}{1 - \Phi(t,x)_{entr\ée}} \quad (2)$$

Sur le circuit de soufflage, l'humidification est régulée par l'intermédiaire d'un système à électrovanne. Le moteur de l'humidificateur tourne à vitesse constante de 12000 tr/mn.

### 3.1.4. Batterie de régénération

C'est un échangeur de chaleur air-eau, à courants croisés, servant au réchauffage de l'air repris du local et qui servira à la régénération du dessiccant dans la RD. Plus la température de l'air sortant sera élevée, plus la régénération est meilleure. La méthode du nombre d'unité de transfert (NUT), a été utilisée pour dimensionner cette batterie. La méthode consiste à définir l'efficacité de l'échangeur comme étant le rapport de la chaleur réellement échangé entre les deux fluides sur la chaleur maximale que peuvent échanger les deux fluides, cette chaleur maximale étant fonction des températures d'entrée des fluides.

Cette batterie est alimentée par l'eau chauffée à l'énergie solaire dans les panneaux sous vide. Notre contribution dans ce travail est de chercher d'autres solutions plus simples et disponibles dans notre région pour remplacer cette batterie, ces solutions peuvent être les capteurs solaires à air, chauffe-eau solaire, les gisements géothermiques de la région de Biskra.

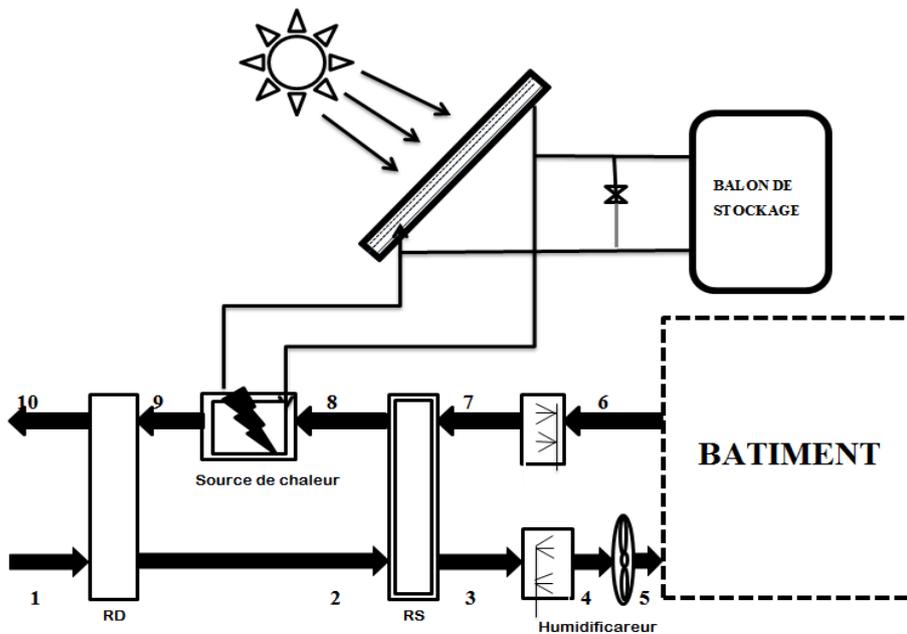


Figure12: schéma d'un système de Pennington. [49]

### 3.2. Résultats des tests des différents systèmes

#### 3.2.1. Système de Pennington

Nous avons commencé par une température ambiante égale à 40°C et une humidité relative égale à 30%. Nous voulons offrir température de soufflage et un degré d'humidité dans les conditions de confort (< 20°C et < 60%). D'après les calculs basés sur le diagramme de l'air humide (Figure13) les conditions de soufflage sont de l'ordre de 20°C et de 85% d'humidité (Tableau 5). Cette dernière valeur dépasse les conditions de confort d'après la norme ASHRAE2003. De cet effet, on peut dire que le système de Pennington n'est pas adaptable dans la région de Biskra.

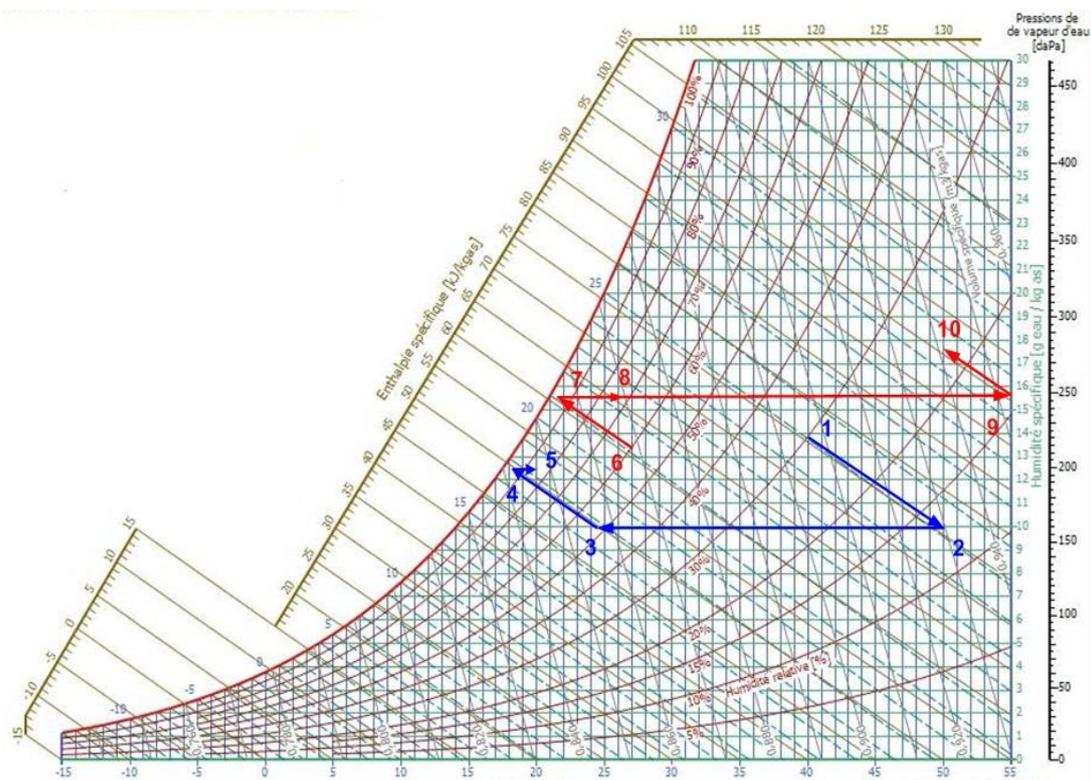


Figure 13: Diagramme de l'air humide « Système de Pennington »

**Tableau 5 : résultats de calcul pour le système de Pennington**

<b>POINT</b>	<b>Température sèche [°C]</b>	<b>Humidité relative [%]</b>	<b>Humidité absolue [g/kgas]</b>	<b>Enthalpie spécifique [kJ/kgas]</b>
<b>1</b>	<b>40</b>	<b>30</b>	<b>14</b>	<b>76</b>
<b>2</b>	<b>50</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>76</b>
<b>3</b>	<b>24.5</b>	<b>52</b>	<b>10</b>	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>18</b>	<b>98</b>	<b>12.5</b>	<b>50</b>
<b>5</b>	<b>20</b>	<b>85</b>	<b>12.5</b>	<b>52</b>
<b>6</b>	<b>27</b>	<b>60</b>	<b>13.5</b>	<b>61</b>
<b>7</b>	<b>21.5</b>	<b>98</b>	<b>15.8</b>	<b>61</b>
<b>8</b>	<b>26.5</b>	<b>72</b>	<b>15.8</b>	<b>67</b>
<b>9</b>	<b>55</b>	<b>17</b>	<b>15.8</b>	<b>96</b>
<b>10</b>	<b>50</b>	<b>23</b>	<b>17.8</b>	<b>96</b>

### 3.2.2. Système de Dunkle

Le système de Dunkle a les mêmes composantes que le système de Pennington. La seule différence est que Dunkle utilise l'air évacué du local climatisé comme un milieu ambiant ce qui diminue la température d'entrée, mais aussi augmente l'humidité relative. La solution proposée par Dunkle pour baisser cette humidité est d'ajouter une autre roue dessicatrice.

On remarque d'après l'étude (Figure 15), que nous avons peu arrivé à des conditions de soufflage dans la marge acceptable (Tableau 6).

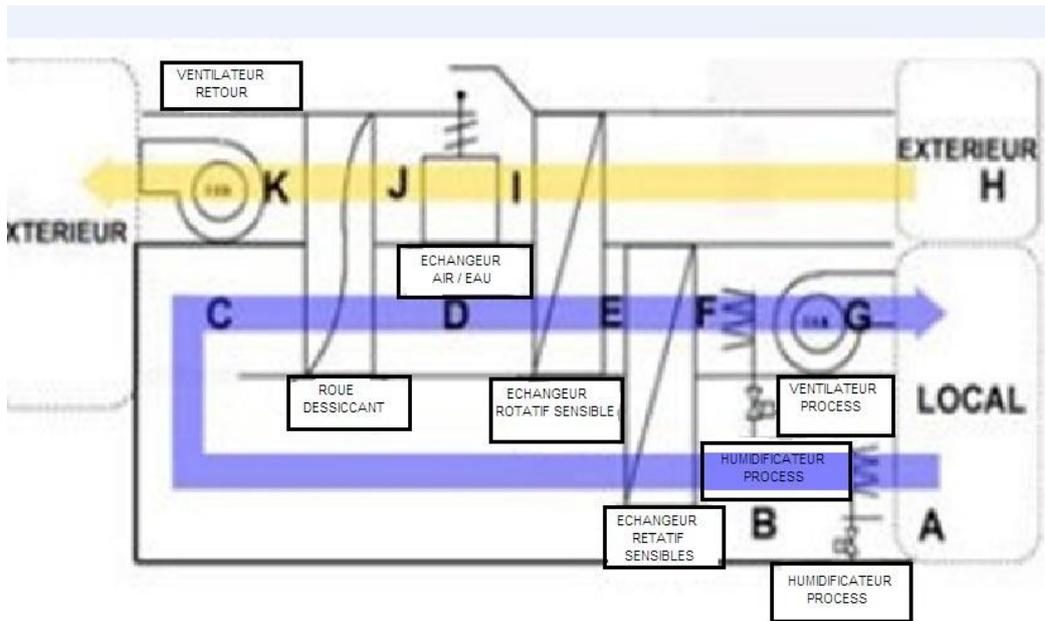


Figure 14: Schéma d'un système de Dunkle [19]

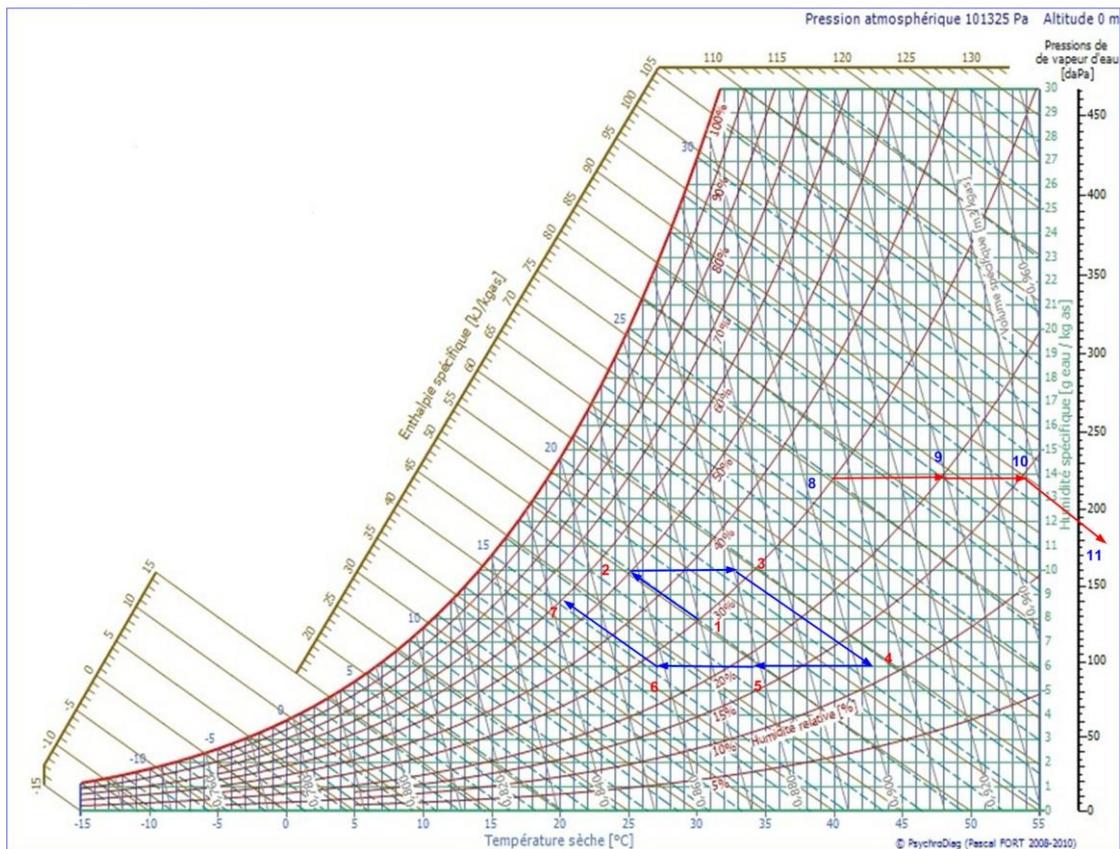


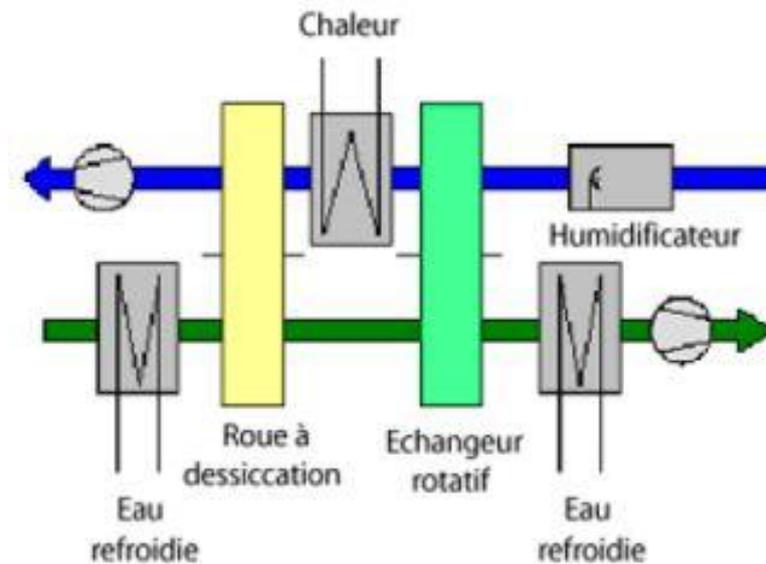
Figure 15: Diagramme de l'air humide « Système de Dunkle »

**Tableau 6 : résultats de calcul pour un système de DUNKLE**

POINT	Température sèche [°C]	Humidité relative [%]	Humidité absolue [g/kgas]	Enthalpie spécifique [kJ/kgas]
1	30	30	8	50.5
2	25	50	10	50.5
3	33	32	10	58
4	43	12	6	58
5	34	18	6	49
6	27	28	6	43
7	20	60	8.9	43
8	40	30	14	76
9	48	20	14	84
10	54	15	14	90
11	60	9	11.3	90

### 3.2.3. Système de Henning

Le système de Henning diffère de celui de Pennington par la présence d'un échangeur de chaleur à l'entrée du système. On remarque d'après l'étude (Figure 17), que nous avons pu arriver à des conditions de soufflage dans la marge acceptable (Tableau 7).



**Figure 16: Schéma d'un système de Henning (25g/kg) [19]**

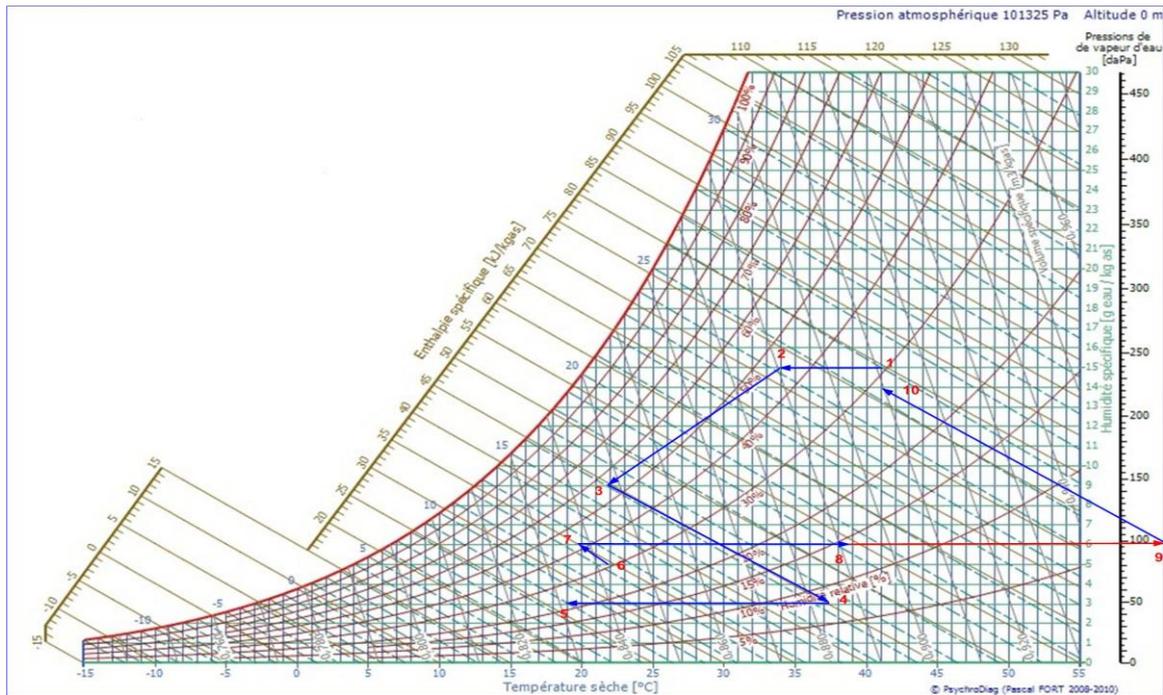


Figure 17: Diagramme de l'air humide « système de Henning (25g/kg)»

Tableaux 7 : Résultats de calcul pour le système de HENNING (25g/kg)

POINT	Température sèche [°C]	Humidité relative [%]	Humidité absolue [g/kgas]	Enthalpie spécifique [kJ/kgas]
1	40	30	14	76
2	33	45	14	69
3	21	51	8	41
4	37	5	2	41
5	19	18	2	28
6	22	25	4	33
7	20	35	5	33
8	39	12	5	53
9	60	5	5	73
10	40	29	13	73

### **3.2.4. Surface de captation nécessaire pour le fonctionnement d'un système de (desiccant cooling)**

Pour calculer la surface totale des capteurs solaires nécessaire au fonctionnement de ces systèmes, nous avons choisi de un capteur muni de chicanes trapézoïdales qui présentent le meilleur rendement thermique en comparaison avec les autres capteurs. Ce type de capteur peut fournir une température moyenne  $\approx 57^{\circ}\text{C}$  pour un débit spécifique de  $47\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ . Le débit nécessaire pour le fonctionnement de ces systèmes est de  $(2800-3200\text{m}^3/\text{h})$ , ce qui nécessite une surface de captation entre  $60$  et  $68\text{ m}^2$ .

## **4. Conclusion**

Vu la situation géographique de la ville de Biskra, la climatisation des locaux est indispensable en été où le climat est vraiment trop chaud. Nous avons montré dans ce chapitre les capacités énergétiques et géothermiques de la région de Biskra qui peuvent servir comme énergie gratuite pour le fonctionnement des systèmes de climatisation solaire.

Nous avons testé les différents systèmes de rafraîchissement par dessiccation solaire en utilisant le diagramme de l'air humide. Les calculs ont été élaborés sur la base des conditions environnementales plus ou moins extrêmes dans la région de Biskra.

L'étude de faisabilité des différents systèmes montre que celui de Pennington est n'est pas adaptable à la région de Biskra, tandis que ceux de Dunkle et de Henning peuvent fournir de l'air dans la fourchette du confort.

# CONCLUSION

## Conclusion General

Nous avons, au cours de ce travail, essayé de cerner le problème de la climatisation solaire par dessiccation. Cette technique relativement nouvelle et prometteuse pourrait trouver des applications avantageuses dans un pays à fort potentiel solaire comme l'Algérie. Outre l'emploi de l'énergie solaire, ce procédé est « propre » puisqu'il présente l'avantage de n'utiliser que l'eau comme agent de refroidissement.

Les différentes technologies de production de froid par des procédés de conservation thermique à partir de l'énergie solaire ont été étudiées.

Le système d'adsorption est surtout plus approprié pour la climatisation, tandis que les systèmes d'absorption sont plus employés pour la production de basse température et la réfrigération.

L'objectif de ce travail, est l'étude de la faisabilité d'un système de froid solaire à dessiccation en cycle ouvert.

D'après l'étude, le système de Penington apparaît non adaptable à la région de Biskra, tandis que le système de Dunkel et celui de Henning peuvent fournir de l'air frais dans la marge des conditions de confort.

Les capteurs solaires plans à air réalisés et étudiés ultérieurement dans notre université peuvent fournir la température de génération (50-80°C) nécessaire pour le fonctionnement de ces systèmes.

Les études faites sur les gisements solaire et géothermique de la région de Biskra montre que cette dernière avère être l'une des meilleurs et des plus aptes régions pour l'installation de ces systèmes.

## Références Bibliographiques

- [1] Nelson. R. M, B. Wardono, Simulation of a solar-assisted LiBr-H<sub>2</sub>O cooling system. ASHRAE Trans (1996), 102(1):104-9.
- [2] Eiker. U. D. Pietruschka, optimisation and Economics of solar cooling systems'. Advances in Building Energy Research (2009); Nr. 1 vol 3, 45-82(38).
- [3] Ziegler.F, state of the Art in absorption heat pumping and cooling technologie International journal of refrigeration, (2002) 25 (4), pp. 450-459.
- [4] Nick. J-Leptin, political framework for research and development in the field of renewable energies, international conference solar air conditioning, (2005) Staffelstein.
- [5] Dieng, A. O. and R.Z. Wang, "Literature review on solar adsorption technologies for ice-making and air-conditioning purposes and recent developments in solar technology", Renewable and sustainable Energy Reviews 5,313-342 (2001).
- [6] Grossman, G., "solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning", solar Energy 72, 53-62 (2002).
- [7] Sumathy, K., Z. C. Huang and Z. F. Li, "Solar adsorption cooling with low grade heat source-A strategy of development in south china ", Solar Energy 72, 155-165 (2002).
- [8] Fan, Y., L. Luo and B. Souyri, "Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and application ", Renewable and Sustainable Energy Review 11, 1758-1775.
- [9] Worsoe-Schmidt, P., "A solar-powered solid-absorption refrigeration system", International journal of Refrigeration 2, 75-84 (1979).
- [10] Erhard, A. and E. Hahne, "Test and simulation of a solar-powered absorption cooling machine", Solar Energy 59,155-162 (1997).
- [11] Bansal, N. K., J. Blumenberg, H. J. Kavasch and T. Roettinger, " Performance testing and evaluation of solid absorption solar cooling unit", Solar Energy 61, 127-140(1997).
- [12] Rivera, C. O. and W. Rivera, "Modeling of an intermittent solar Absorption refrigeration system operating with ammonia-lithium nitrate mixture", Solar Energy Materials and Solar Cells 76,417-427 (2003).
- [13] Critoph, R. E., "Rapid cycling solar/biomass powered adsorption refrigeration system ", Renewable Energy 16,673-678 (1999)
- [14] Kapur, J. C., "A report on the utilization of solar energy for refrigeration and air conditioning application", Sol Energy 4,39-47 (1960).
- [15] Uppal, A. H., B. Notron and S.D. Probert, "A Low-cost solar-energy stimulated absorption refrigerator for vaccine storage", Applied Energy 25,167-174 (1986)
- [16] Staicovici, M. D., "An autonomous ammonia-water refrigeration system ", Solar Energy 36,115-124 (1986)

- [17] Medini, N., B. Marmottant, S. El Golli and P. Grenier, "Etude d'une machine solaire autonome à fabriquer de la glace ", Int J Refrig 14(1991).
- [18] Critoph, R. E., "An ammonia carbon solar refrigerator for vaccine cooling ", Renewable Energy 5, 502-508 (1994).
- [19] ThibautVitte, le froidsolaire par desiccation appliqué au bâtiment: Proposition d'une stratégie de regulation du système, these de doctorat. Université de Lyon, 2007.
- [20] Merakeb. S., Modélisation des structures en bois en environnement variable, Thèse de doctorat, limoges, Université de limoges, 2006, p.146
- [21] Torrey. M., Westerman J., " Desiccantcoolingresource guide technology" [en ligne], disponible sur : <Http://www.wbdg.org/ccb/COOL/maindct1.pdf>
- [22] Maalouf, C., Etude du potentiel de rafraichissement d'un système évaporaif à désorption avec régénération solaire, Thèse de doctorat, la rochelle, Université de la rochelle, 2006, p. 195
- [23] Ademe (Dermee), conception. Réception suivi des opérations de froid solaire, Rapport d'étude, Angers, ADEME, janvier 2007, p 65.
- [24] Stabat P., Modélisation de composants de systèmes de climatisation mettant en œuvre l'adsorption et l'évaporation d'eau, Thèse de doctorat, Paris, Ecole des mines e paris , 2003, p 275
- [25] Wurm j. KosarD. Clemens T., solide desiccanttechnologyreview, Bulletin of the International Institut of refrigeration, [en ligne],2003, vol 02-3, disponible sur [www.iifir. Org /en/doc/1043.pdf](http://www.iifir.org/en/doc/1043.pdf) (mars 2007)
- [26] Pennington N.A., Humidity changer for air conditioning, US Patent, 1955, 2700 537.
- [27] Henning H. M., E. Wiemken, solar assisted air conditioning of buildings: overview on technologies and state-of –art, IN: Mediterranean Congress of climatization, 2004, lisbonne, Portugal.
- [28] Maklaine-Cross I.L., Banks P.J., A general theory of wet surface heat exchangers and its application to regenerative evaporative cooling, ASME, Journal of heat transfer, 1981 , vol. 103, pp. 579-585.
- [29] Van Zyl R., Warwicker B, Dessiccant the future, in: CIBSE /ASHRAE Conference, September 2003 Edimbourg, Royaume Uni, [en ligne], disponible sur <http://cibse.org/pdfs/3dwarwicker.pdf>
- [30] Jain S, DharP.L., Evaluation of solid desiccant –based evaporative cooling cycles for typical hot and humid climates , Int. J. of Refrigeration , 1955, Vol. 18 (5) , pp.287-96.
- [31] Dunkle R. V., A method of solar air conditioning, Mechanical ChemEng Trans, 1965, vol. 1, pp73-78.

- [32] Youcef.S -Ali and j. y. Desmons, "Numerical and experimental study of a solar equipped with offset rectangular plate fin absorber plate", *renewable energy*, vol.31, N°13, pp. 2063-2075, 2006.
- [33] Wijesundara ne, Lee Leah, lomiktjiioe le, *solar energy* 28(5), 3633-70 edit. (1982)
- [34] Turhankoyuncu\*. 'Performance of various designs of solar air heaters for crop drying applications'. *Renewable énergie*, 31 (2006), pp.1073-1088.
- [35] Donatien Njomo. "Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre". *Rev. Gén. therm*, 37(1998), pp.973-980
- [36] Karim.M.A and M.N.A Hawlader, performance investigation of flat plate, V-corrugated and finned air collectors, *énergie*, VOL. 31, N°4, pp.452-470, 2006.
- [37] Hollands Kgt, Shewen Ec. "Optimization of flow passage geometry for air heating plate-type solar collectors". *ASME J Solar Energy Engng* 1981; 103(4): 323-23.
- [38] Suleyman Karsli., "performance analysis of new-desingsolar air collectors for drying application". *Renewable Energy*, 32 (2007), pp. 1645-1660.
- [39] Augustus. M. Leon, S. Kumar\*. "Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors", *solar Energy*, 81(2007), pp. 62-75.
- [40] Moumimi.N, S. Youcef-Ali, A. Moumimi, J.Y, desmons, "Energy analysis of a solar air collector with rows of fins", *renewable Energy* 29 (2004) 2053-2064.
- [41] Filiz Ozgen, Mehmet Esen, Hikmet Esen, " Experimental investigation of thermal performance of a double-flow solar air heat exchanger having aluminum cans", *renewable Energy* 34 (2009) 239-2398.
- [42] <http://fr.wikipedia.org/wiki/climatisation-solaire>.
- [43] Ouali. S A. Khellaf et K. Baddari, Etude géothermique du Sud de l'Algérie, *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9 N°4 (2006) 297 – 306
- [44] Boudghene. A. Stambouli a, n, Z. Khiat b, S. Flazi b, Y. Kitamura; A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues; *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (2012) 4445–4460
- [45] Mohamed Saadeddine, Identification et analyse des principaux facteurs influant le comportement thermique d'un échangeur air/sol enterré, Mémoire de Magister, Université de Biskra 2013.
- [46] <http://www.puitscanadien.com/pages/26.php> 10/02/2011
- [47] Ben habiles A. et al. Climatisation solaire en Algérie. *Revue générale du froid et du conditionnement d'air*, 2008. N° JUL, 22-26
- [48] Adnane Labeled, contribution à l'étude des échanges convectifs en régime transitoire dans les capteurs solaires plans à air ; application au séchage des produits agro-alimentaires, thèse de doctorat. Université de Biskra, 2012.

- [49] Zerouali Mohammed, Etude de faisabilité d'une installation de rafraichissement solaire par dessiccation avec des conditions climatiques de la ville d'Ain Beida, Mémoire de master Université Larbi ben M'HDI, Oum el BOUAGHI, 2011.

## ملخص :

الاهتمام المتزايد باستخدام وتطوير تقنيات التبريد الشمسي بسبب الفوائد الاقتصادية والبيئية الهامة قادنا إلى دراسة الجدوى من هذه النظم في الصحراء الجزائرية وخاصة في منطقة بسكرة.

الهدف من هذه الدراسة هو معرفة امكانية تطبيق الملتقطات الشمسية المصنعة و المجربة في جامعة بسكرة في تقنية التبريد الشمسي (desiccant cooling).

من خلال الدراسات السابقة التي تم اجراؤها في جامعتنا، نستطيع أن نؤكد أن درجة حرارة الهواء المسخن في الملتقطات الشمسية كافية لتشغيل هذه الأنظمة و كذلك هو الأمر مع الماء الساخن، فإنه بفضل الملتقطات الشمسية وصلنا إلى درجة حرارة تصنيع و كذا تخزين تفوقان الحرارة المطلوبة في أنظمة التبريد الشمسي المذكورة آنفا (55-80).

كذلك قمنا بالتأكد من نجاعة بعض هذه التقنيات في ظروف المناخ الصيفي للصحراء الجزائرية وبالأخص ظروف مدينة بسكرة، وقد وجدنا ان بعض هذه التقنيات صالح للمنطقة . قمنا كذلك باستعراض بسيط للإمكانيات الطاقوية لمدينة بسكرة سواء الامكانيات الجوفية (المياه الساخنة، درجة حرارة التربة...) او المخزون الشمسي للمنطقة، وقد اثبتنا هنا انها من افضل المناطق لاستعمال هذه التقنيات.

## Résumé

L'intérêt croissant de l'utilisation et le développement des technologies de climatisation solaire à leurs divers avantages économiques et environnementaux impressionnants, nous a conduits à étudier la faisabilité de ces systèmes dans la Sahara algérienne et particulièrement dans la région de Biskra. Ainsi, nous présentons dans ce travail des résultats expérimentaux sur les capteurs solaires plans vitrés (FPC), qui ont été réalisés et étudiés dans notre université entre 2008 et 2012 pour différentes applications afin d'évaluer leurs capacités de refroidissement dans la région de Biskra (latitude 34 ° 48'N et la longitude 5 ° 44'E).

En outre, cette étude a permis de montrer que la température atteinte par les capteurs solaires dans une large bande de débit d'air peut satisfaire les besoins en énergie pour la déshumidification dans les systèmes de refroidissement par dessiccation. Ainsi, la température de l'eau chaude produite par les FPCs et celle stockée est dans l'intervalle de température de fonctionnement de ces systèmes (55-80 ° C).