



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté Sciences et de la Technologie
Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. :

Présenté et soutenu par :

ZEKRI Ali

Le :

Etude d'un système de rafraichissement solaire par dessiccation solide dans la région de Ouargla

Jury :

Mr	MOUMMI Abdelhafid	Professeur	Université de Biskra	Président
Mr	BENMACHICHE Abdelmoumène Hakim	Professeur	Université de Biskra	Rapporteur
Mr	ZELOUF Miloud	MAA	Université de Biskra	Examineur

Remerciement

Tout d'abord, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donnée santé et courage pour terminer ce travail dans les meilleures conditions.

Un grand MERCI à mon encadreur Mr. BENMACHICHE Abdelmoumène Hakim pour son suivi sérieux, ses encouragements et ces conseils fructueux qu'elle j'ait accordé à la réalisation de ce travail.

Je me remercie mon amie et collègue Mr.A.BENARFAU pour son aide et sa disponibilité.

Je souhaite remercier KA, qui été pour moi une source de motivation et de confort et de soutien, malgré la distance.

Je remercie très chaleureusement toutes les personnes ayant contribué, de près et de loin, à la réalisation de ce travail.

Finalement, un merci spécial aux membres du jury qui ont accepté de juger ce modeste travail.

Dédicace

Avec un énorme plaisir je dédie ce travail à mes très chers parents votre courage, vos sacrifices ont été pour moi le meilleur soutien durant ce long parcours.

A mes chers frères et sœur.

A mes très chers amis et mes collègues de ma filière génie mécanique énergétique.

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

Résumé :

L'énergie de refroidissement est produite Le plus souvent à l'aide des systèmes de compresseurs électriques qui malgré le développement des sources d'énergie renouvelables, sont encore produits de manière conventionnelle.

Des scientifiques du monde entier travaillent au développement de méthodes alternatives de production de froid qui minimisent la consommation électrique et les coûts d'exploitation du système, les systèmes qui peuvent remplacer les systèmes de compression sont des systèmes de sorption alimentés par l'énergie solaire.

Le but de ce travail est de présenter une simulation d'une installation de rafraichissement solaire par dessiccation solide dans les conditions climatiques réelles. La plate forme TRNSYS 17 a été l'environnement final de simulation.

ملخص:

يتم إنتاج طاقة التبريد في الغالب باستخدام أنظمة الضواغط الكهربائية والتي على الرغم من تطوير مصادر الطاقة المتجددة، لا تزال تنتج بشكل تقليدي. يعمل العلماء في جميع أنحاء العالم على تطوير طرق تبريد بديلة تقلل من استهلاك الطاقة وتكاليف تشغيل النظام، الأنظمة التي يمكن أن تحل محل أنظمة الضغط هي أنظمة امتصاص تعمل بالطاقة الشمسية. الهدف من هذا العمل هو تقديم محاكاة لمحطة التبريد الشمسي بواسطة التجفيف الصلب في ظل ظروف مناخية حقيقية. كانت منصة TRNSYS 17 هي بيئة المحاكاة النهائية.

TABLE DES MATIERES

Tables des matières

Remerciement.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Tables des matières.....	IV
Liste des figures.....	VIII
Liste des tableaux.....	X
Nomenclature.....	XI
Introduction.....	1

CHAPITRE I *Revue bibliographique concernant la climatisation*

I.1 Etude bibliographique.....	3
I.2 Notion de climatisation	8
I.2.1 Définition	8
I.2.2 Les caractéristiques de l'air humide	8
I.2.2.1 Température sèche (T_s)	10
I.2.2.2 Température humide (T_h)	10
I.2.2.3 Température de rosée (T_r)	10
I.2.2.4 Enthalpie (H)	10
I.2.2.5 Humidité relative (ϕ)	10
I.2.2.6 Humidité absolue (w)	11
I.2.2.7 Volume spécifique (v)	11
I.2.2.8 Masse volumique (ρ)	11
I.2.3 Notion de confort thermique en climat tropical humide :	13
I.3 Principes de la production de froid :	14
I.3.1 Cycle frigorifique :	14
I.3.2 Coefficient de performance d'une pompe à chaleur (COP) :	16
I.3.3 Coefficient d'efficacité frigorifique (EER Energy Efficiency Ratio) :	17
I.4 Distribution du froid :	18
I.4.1 Distribution en détente directe :	18
I.4.2 Distribution en détente indirecte (à eau glacée) :	19

CHAPITRE II *Energie solaire*

II. Energie solaire	20
II.1 Potentiel solaire	21
II.1.1 Au monde	22
II.1.2 En Algérie	23
II.2 Exploitation de l'énergie solaire.....	24
II.2.1 Capteur solaire photovoltaïque	24
II.2.2 Capteur solaire thermique	25
II.2.2.1 Solaire thermodynamique	25
II.2.2.1.1 Capteur cylindro-parabolique	26
II.2.2.1.2. Capteur solaire parabolique	26
II.2.2.1.3. Capteur solaire à miroirs de Fresnel	27
II.2.2.2 Solaire thermique actif	27
II.2.2.2.1 Capteurs solaires plans à air	27
II.2.2.2.2. Capteurs solaires plans à eau	28
Les capteurs plans vitrés.....	28
Les capteurs plans non vitré.....	29
Les capteurs solaires à tubes sous vide	31
II.2.2.3 Solaire thermique passif	32
II.3 Importance des techniques de refroidissement solaire	33

CHAPITRE III *Le Système Evaporatif a Dessiccation*

III.1 Description des technologies de climatisation solaire.....	35
III.2.1 Techniques basées sur l'emploi de l'électricité.....	36
III.2.1.1 les systèmes à compression.....	36
III.2.1.2 Les systèmes à effet Peltier.....	36
III.2.2 Techniques basées sur un processus thermomécanique.....	36
III.2.2 .1 Le cycle Rankine.....	36
III.2.2 .2 Le cycle à jet de vapeur.....	36
III.2.3 Techniques basées sur la sorption d'un gaz.....	37
III.2.3.1 La machine à absorption.....	37
III.2.3.2 La machine à adsorption.....	39

III.2.3.3 Le desiccant cooling.....	40
III.3 Principe du cycle évaporatif à dessiccation en phase solide.....	41
III.4 Le phénomène de sorption.....	44
III.4 .1 théorique sur le phénomène de sorption.....	44
III.5 les matériaux dessicants.....	47
III.5.1 Généralités.....	47
III.5.2 Types de matériaux dessicants.....	47
III.5.3 La durée de vie des matériaux dessicants.....	51

CHAPITRE IV *Simulation d'une installation de climatisation solaire*

IV.1 Introduction.....	52
IV.2 Présentation de l'installation étudiée.....	52
IV.3 Les composants de l'installation à dessiccation :	52
IV.3.1 Roue dessiccation « Rd »	52
IV.3.2 Roue sensible « RS »	53
IV.3.3 Batterie de régénération	54
IV.3.4 Capteur solaire	54
IV.4 Description général sur les conditions réelles	54
IV.4.1 Description structurelle du local.....	54
IV.4.2 Conditions Des Sites.....	54
IV.4.3 Conditions de projet à l'extérieur.....	55
IV.4.4 Description du système de climatisation.....	55
IV.4.5 Données techniques.....	57
IV.5 Simulation avec TRNSYS	57
IV.5.1 Aperçu sur TRNSYS	57
A. TRNSYS Simulation studio	58
B. TRNBuild	58
IV.5.2 Meteonorm.....	59
IV.5.3 L'installation de dessiccation sur TRNSYS.....	59
IV.6 Résultats et discussions.....	61

Table des matières

IV.6.1 L'influence de température ambiante sur l'efficacité de la RS.....	63
IV.6.2 L'influence de débit d'air variable sur	64
A_l'efficacité de la RS.....	65
B_Température de local.....	65
C_Humidité de local.....	66
Conclusion général.....	67
Référence Bibliographique	
Annexe	

LISTE DES FIGURES

LISTES DES FIGURES

Figure I.1 Différentes zones spécifiques d'un diagramme Psychrométrique.....	11
Figure I.2 Détermination des caractéristiques d'un point.....	12
Figure I.3 Zone de confort thermique Source : Claessens et al. 1996).....	13
Figure I.4 Le cycle frigorifique a compression mécanique.....	15
Figure II.5 Le cycle frigorifique (Carnot).....	16
Figure I.6 Climatisation "à détente directe"	18
Figure I.7 Climatisation "à eau glacée"	19
Figure II-1 : Les applications de l'énergie solaire	21
Figure II-2 : Disponibilité de l'énergie solaire	21
Figure II-3 : L'ensoleillement dans le monde	22
Figure II-4 : l'ensoleillement journalier dans l'Algérie	23
Figure II-5 : Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque.....	25
Figure II-6 : Capteur cylindro-parabolique.....	26
Figure II-7 : Capteur solaire parabolique.....	26
Figure II-8 : Miroirs de Fresnel	27
Figure II-9 : Capteur solaire thermique à air	28
Figure II-10 : Schéma d'un capteur solaire vitré	29
Figure II-11 : Descriptif d'un capteur non vitré	30
Figure II-12 : Capteur solaire thermique à tubes sous vide	31
Figure II-13 : Fonctionnement d'un mur Trombe	33
Figure III.1 : Tableau des différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire.....	34
Figure I.2 : Schéma de fonctionnement du cycle absorption à simple effet	38
Figure III.3 : Schéma de fonctionnement d'une machine à adsorption	39
Figure III.4 : Schéma de système à dessiccation solide avec capteurs solaires (DEC solide), utilisant des roues à sorption et de récupération de chaleur (source : Fraunhofer ISE). Ci-dessous : étapes de fonctionnement d'une unité DEC (source : Munters).....	40
Figure III.5 : Système à humidification directe avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide.....	41
Figure III.6 : Mode humidification indirecte avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide.....	42
Figure III.7 : Mode humidification combinée avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide.....	43
Figure III.8 : Mode desiccant cooling (cycle Pennington) et son évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide	44
Figure III.9 : (a) Influence de la température sur la sorption (exemple) (b) Isothermes de Sorption – désorption (exemple).....	46
Figure III.10 : Pression de vapeur à la surface pour différentes solutions d'eau-triéthylène glycol.....	48
Figure III.11 : Pression de vapeur à la surface pour différentes solutions d'eau-Chlorure de Lithium	49
Figure IV.01 : Schéma d'un système à dessiccation solide avec roue à sorption.....	51
Figure IV-02 : Roue dessiccation.....	53

Figure IV-03 : Roue sensible (échangeur rotatif).....	53
Figure IV-04 : Disposition préliminaire du système HVAC.....	56
Figure IV-05 local électrique 30 kV, site de production de Haoud Berkaoui (Algérie)....	56
Figure IV-06 : Configuration et composant de TRNSYS.....	57
Figure IV-07 : Vue sur Meteonorm.....	59
Figure IV-08 : Système de climatisation solaire sous environnement TRNSYS.....	60
Figure IV-09 : la variation d'humidité ambiante et l'humidité de local électrique.....	62
Figure IV-10 : la variation de température ambiante et la température de local électrique	62
Figure IV-11 : la variation de la température d'eau entrant et sortant a le capteur solaire	63
Figure IV.12 : La variation de l'efficacité ε RS durant une journée avec un d'début d'aire fixé.....	64
Figure IV.13 : La variation de l'efficacité ε RS en fonction du débit d'aire	65
Figure IV.14 : La variation de température du local en fonction du débit d'aire	65
Figure IV.15 : La variation d'humidité relative du local en fonction du débit d'aire	66

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Composition volumique de l'air.....	9
Tableau I.2 coefficient moyen de performance différent types.....	17
Tableau IV.1 : les plages de température et humidité de site	55
Tableau IV.2 : Coefficients de transmission thermique	55
Tableau IV.3 : Chaleur produite par l'illumination et les équipements	55
Tableau IV-04 : Paramètre de simulation pour débit d'air fixé.....	63
Tableau IV.04 : Paramètre de simulation pour débit d'air variable.....	65

Symbole	Description	Unité
COP	Le coefficient de performance	
COPth	Le coefficient de performance théorique	
N	La vitesse de rotation	trs/min
Cp	Chaleur spécifique	kJ/kg.K
h	Enthalpies	KJ/kg
T	Température	°C
TpeRs	Température d'airs frais (process air) entrant à la RS	°C
TpsRs	Température d'airs frais (process air) sortant à la RS	°C
TreRs	Température d'air de régénération sortant à la RS	°C
m	Débit massique de l'air	kg/s
ε_{RD}	L'efficacité Roue dessiccation	
ε_{rs}	L'efficacité Roue sensible	
ε_{hm}	L'efficacité Humidificateurs	
η	l'efficacité d'un panneau solaire	
Q	L'énergie extraite du flux d'air pour évaporer l'eau	kJ/s
ρ	La masse volumique	kg/m ³
λ	Conductivité thermique	W/m.K
HR	Humidité relative	%

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

La nécessité pour la climatisation dans un bâtiment a été satisfaite au cours des années de différentes manières.

Conventionnellement, seuls les systèmes basés sur le cycle de Rankine inversé (compression de la vapeur) ont été utilisés pour fournir un refroidissement dans les bâtiments résidentiels et commerciaux. Ce type de système est caractérisé par l'utilisation d'une grande quantité d'électricité par son compresseur.

Toutefois, l'électricité est une forme de très haute qualité de l'énergie qui doit être utilisée seulement dans les processus spécifiques, car elle est souvent plus chère que les autres types d'énergie.

Différents types de systèmes avec une baisse de la demande d'électricité ont été développés ces derniers temps, tels que les systèmes à absorption (directs et indirects), les systèmes de refroidissement par évaporation ou de refroidissement avec des surfaces froides.

Le système étudié dans cette thèse, est un système de refroidissement évaporatif solaire à dessiccation solide. Ce système est capable de fournir de l'air frais à l'aide d'une quantité nettement plus faible de l'électricité, par ce qu'il n'utilise pas un compresseur, il refroidit l'air en plusieurs étapes, et utilise la chaleur comme vecteur d'énergie principale.

Le système n'a pas besoin une haute température pour travailler, généralement environ 55 ° C, il peut provenir d'une variété de sources, comme le chauffage urbain, l'énergie solaire ou la chaleur résiduelle. Cette possibilité améliore encore plus de ses avantages environnementaux et économiques. En plus de cela, le système n'utilise pas n'importe quel type de fluides frigorigènes, qui contiennent habituellement des CFC.

Le système de rafraîchissement solaire à dessiccation permis aussi de supprimer la plupart des nuisances d'une climatisation classique :

- La consommation d'électricité peut être jusqu'à 20 fois inférieure à celle d'un système classique à compression,
- Les fluides frigorigènes employés sont inoffensifs puisqu'il s'agit d'eau et de solutions salines,
- La nuisance sonore du compresseur est supprimée. Ces systèmes peuvent être utilisés aussi bien seuls qu'en complément de systèmes classiques de conditionnement d'air ; l'objectif principal étant d'utiliser ces technologies « émission zéro » pour réduire la consommation énergétique et les émissions de CO₂.

Dans le premier chapitre de ce travail, une étude bibliographique sur le système évaporatif à dessiccation et on va donner différentes définitions sur le froid et son utilisation

Dans le second chapitre, on va parler sur l'énergie solaire et ses différents types d'exploitation

Dans le troisième chapitre on va parler sur le Principe de fonctionnement d'un cycle évaporatif à dessiccation solide et les matériaux dessiccants utilisés

Dans le dernier chapitre on présentera les résultats obtenus après l'application de ce système sur le site de OUARGLA et on termine avec une conclusion générale sur ce travail.

CHAPITRE I

*Revue bibliographique concernant la
climatisation*

I.1 Etude bibliographique :

S. JOIN et P. L. DHAR (1995) ont présenté une évaluation des différents cycles de climatisation à dessiccation solides dans les climats chauds et humides. L'évaluation psychrométrique des cycles possibles pour 16 villes indiennes typiques a été réalisée pour obtenir des conditions de confort standards dans la pièce. Ils ont aussi étudié l'influence de différentes conditions extérieures, de l'efficacité des échangeurs et des refroidisseurs à évaporation sur le coefficient de performance frigorifique et sur le débit d'air volumétrique par unité de puissance frigorifique. On trouve que le cycle de Dunkle est le meilleur pour une large gamme de conditions extérieures. Cependant, les cycles utilisant des échangeurs à surface humide donnent des performances encore meilleures.

KAMEL HADDAD et al. (2008) ont étudié des modèles de simulation qui sont développés pour un système de compression de vapeur classique à refroidissement et un système de refroidissement par évaporation à dessiccation installé dans une maison R-2000. La consommation d'électricité et les indices de confort sont ensuite prédits pour les deux systèmes pour trois régions du pays. Et avec des proportions variables de la chaleur sensible. Ils ont trouvé que, par rapport à un système conventionnel, le système de refroidissement par évaporation à dessiccation peut mener à des réductions importantes de la consommation d'électricité et aussi de réduire les nombres d'heures si les conditions à l'intérieur de l'espace sont inconfortables.

CHADI MAALOUF et al. (2005) ont étudié la performance du système dessiccant en fonction de l'efficacité de ses composantes. ils ont déduit que Le système est très influencé par l'efficacité de l'échangeur de chaleur et par l'efficacité des humidificateurs. De même la température de régénération est un facteur influençant le coefficient de performance du système. On envisage à présent de coupler le modèle avec le modèle de l'installation solaire afin d'étudier l'influence de la surface des collecteurs solaires ainsi que du volume de stockage. Quant à l'influence des conditions météorologiques, la performance du système dépend surtout de l'humidité absolue extérieure et on constate par exemple que sur le littoral méditerranéen chaud et humide l'installation du système seul n'est pas efficace. Enfin on

peut noter que la complexité du système étudié s'adapte avec l'environnement de simulation utilisé SPARK. Grâce à sa souplesse et à sa modularité, cet environnement permet d'utiliser et de tester rapidement plusieurs modèles tout en offrant des techniques de résolution numériques ambitieuses. Simulation of a desiccant-evaporative cooling system for residential buildings.

BOUALEM OUAZIA et al. (2009) et **Hayssam Barhoun et al. (2009)** ont décrit un prototype de système de refroidissement à évaporation par dessiccation (DEC) et décrit sa performance en termes de contrôle de l'humidité intérieure et d'efficacité énergétique. Les résultats expérimentaux et ceux de la simulation montrent que le système de refroidissement à évaporation par dessiccation peut permettre un meilleur contrôle de l'humidité et fournir des conditions de confort acceptables. Les résultats de la simulation montrent que le système de refroidissement par dessiccation est particulièrement bien adapté pour des zones du pays ayant une charge latente élevée. En revanche, l'étude a identifié une série de mesures d'amélioration à prendre afin d'améliorer l'efficacité énergétique de l'unité.

HEMANT PARMAR et D. A. HINDOLIYA (2010) ont étudié la performance d'un système dessiccant dans les différentes villes sélectionnées dans un climat chaud et humide de l'Inde et ils sont basés sur une étude de simulation sur le système de refroidissement à dessiccant solide pour cinq endroits différents situés dans un climat chaud et humide.

Ils ont montré que la performance du système de refroidissement à dessiccation est fortement influencée par le taux d'humidité de l'air ambiant.

Cinq emplacements indiens (Mumbai, Chennai, Kolkata, Vishakhapatnam, Guwahati) se rapportent à la même zone climatique (chaude et humide), mais le potentiel de refroidissement dessiccant est trouvé différent. Pour Mumbai, ce système présente un potentiel élevé pour le refroidissement de confort dans les bâtiments par rapport à d'autres endroits dans la même zone climatique.

Une tentative a aussi été faite pour étudier l'influence de l'efficacité de refroidisseur par évaporation directe (un des composants de système de refroidissement dessiccant). Il a été constaté que la DEC ayant une efficacité 15% de plus, le COP du système de refroidissement à dessiccant peut être amélioré d'environ 30% - 50% selon l'endroit.

L.BELLIA et al (2000) ont étudié des diverses configurations de système de climatisation à dessiccation. Ils ont étudiés; plus tard un premier bilan des coûts d'exploitation pour les climats italiens.

Pour cela, un logiciel commercial, DesiCalc™, a été utilisé: à partir du fichier européen connu sous le nom TRY, des données climatiques horaires ont été calculées de manière adéquate et traitées. Pour une application de magasins de détail, pour les quatre sites italiens, économie maximale d'environ 22% a été obtenu, tandis que pour le théâtre d'économie obtenue est supérieure et a été évalué entre 23% et 38%. Pour les deux applications, le besoin de puissance globale électrique est réduit (jusqu'à environ 55%), et aussi les heures pendant lesquelles le système n'a pas bien contrôlé l'humidité relative intérieure sont fortement réduites.

J. R. CAMARGO et E. GODOY JR et al (2005) ont analysé l'influence de certains paramètres de fonctionnement, tels que la température de réactivation de l'adsorbant, et la relation entre le débit d'air de réactivation et la processe d'air de circulation (R / P) sur la performance du système. En outre, cet article présente une application d'un système proposé dans des plusieurs villes tropicales et équatoriales avec des caractéristiques climatiques différentes

Cette analyse montre que moins faible rapport de(R / P) et une basse température de réactivation prendre pour le meilleur point de fonctionnement.

Les analyses de la condition de l'air d'alimentation montrent que le système est capable de fournir le confort thermique dans les climats humides.

THIBAUT VITTE et al (2005) ont présenté une étude réalisée sur une maison individuelle située à Mâcon, France.

A partir du modèle d'une maison appelée «maison de référence», en conformité avec la réglementation thermique française, différents paramètres concernant les murs, les projections ou la ventilation sont modélisés séparément dans TRNSYS afin d'évaluer celles qui ont influencé le confort thermique plus. Une attention particulière est accordée à des conditions estivales.

L'un des intérêts de cette étude est de pouvoir mesurer et comparer les économies d'énergie de nombreuses solutions techniques connues à l'heure actuelle.

A partir de cette comparaison, il est possible de proposer une maison avec des performances similaires à une maison de référence pour la thermique d'hiver et de très bonnes prestations pour la thermique d'été.

Sur cette maison peut se greffer le modèle de rafraîchissement solaire par dessiccation développé. Les tests effectués montrent que l'installation permet de réduire sensiblement la température (-7 à -8°C)

d'un bâtiment classique ('de référence') pour un jour très chaud (32°C), et ceci avec une température de soufflage à 21°C en moyenne.

JOUDI et al. (2001) ont étudié la performance annuelle d'un système dessicant de Pennington assisté par le solaire et utilisant du silica gel. Ce système est installé dans une maison individuelle de deux étages à Bagdad. Il est utilisé en hiver pour le chauffage et en été pour le rafraîchissement. L'installation solaire comprenait de capteurs à air et des blocs de béton pour le stockage de chaleur. Leur étude a montré que le paramètre le plus important dans le fonctionnement de l'installation solaire était la surface des capteurs solaires. Le débit d'air avait peu d'importance. Quant à l'installation dessicante, sa performance dépendait de l'efficacité de l'échangeur rotatif, des humidificateurs et de la température de régénération. La performance de la roue dessicante avait peu d'influence sur le système.

En Europe, plusieurs études sur les systèmes dessicants et leur faisabilité ont été menées.

DITTMAR (1997) a étudié la faisabilité du cycle de Pennington assisté par le solaire pour deux villes : Gothenburg (Suède) et Würzburg (Allemagne). Le système est couplé à un bâtiment de 3 étages de 200 m² chacun. Les simulations annuelles effectuées sous Trnsys, ont montré que selon la localité, 65 à 85% des besoins de rafraîchissement peuvent être fournis par l'utilisation de l'humidification directe et indirecte. Pendant l'année, le mode dessicant est utilisé entre 10 et 20% du temps.

Les calculs ont montré que pour avoir un taux de couverture solaire de 0,75, il faut 7 à 10 m² de capteurs solaires par 100m² de bâtiment et un volume de stockage de 75 l par m² de capteur solaire (7 pour Gothenburg).

LINDHOLM (2000) a étudié la faisabilité des systèmes évaporatifs et dessicants (cycle de Pennington) pour différentes villes Suédoises. Ce qui est intéressant dans son travail c'est la méthodologie qu'il a développée et qui est basée sur le principe de la ligne limite, principe utilisé dans cette thèse et qui prend en considération l'interaction bâtiment – système - climat.

Dans le cadre de la tâche 25 (Solar Heating and Cooling Program) de l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), on a recensé une quinzaine d'installations dessicantes solaires en Europe. La plupart de ces installations sont démonstratives et ont été faites pour la recherche. Citons en particulier l'Allemagne où se trouve plus de la moitié de ces installations.

HENNING et al. (2001) ont étudié une installation dessicante à Riesa (Allemagne) utilisée pour climatiser une salle de séminaire de 330 m^3 et un débit d'air de $2700 \text{ m}^3/\text{h}$. Cette installation comporte 20 m^2 de capteurs plans liquides et un ballon de stockage de 2 m^3 . Un suivi expérimental de l'installation pendant l'année 1997, a conclu à un taux de couverture solaire de 76% (le taux calculé par les simulations est de 81%). Pour améliorer le système de point de vue économique et énergétique (côté solaire), des capteurs à air ont été intégrés dans l'installation dessicante. De tels systèmes peuvent fonctionner d'une façon autonome pour le rafraîchissement des locaux dans les régions tempérées en Europe Centrale. Cependant si des conditions strictes en température et humidité absolue dans le local doivent être respectées ou si le climat devient humide (région méditerranéenne), le couplage du système avec une batterie froide traditionnelle est nécessaire. Cette dernière solution est intéressante car dans certains cas (climat méditerranéen) elle permet d'obtenir des réductions de 50% en consommation d'énergie primaire.

HÖFKER et al. (2001) ont suivi expérimentalement une installation dessicante utilisant des capteurs à air intégrés. L'installation est située à Stuttgart. Leurs résultats montrent qu'il est intéressant de by-passer une partie de l'air de retour (entre 20 et 40 %) sans le régénérer et ceci sans affecter le taux de déshumidification de la roue. Ceci est dû au fait que les coefficients de transfert de masse et de chaleur varient proportionnellement à la racine carrée de la vitesse d'air.

A Lisbonne au Portugal, une installation dessicante est installée depuis 1999 dans les locaux du département des énergies renouvelables à l'INETI. Elle a une capacité de froid de 35 kW et utilise 51 m^2 de capteurs à concentration stationnaires. Elle utilise le Chlorure de Lithium comme matériau dessicant. **MENDES et al. (2003)** ont suivi l'installation pour trois années et ont proposé des améliorations pour augmenter son efficacité du point de vue énergétique. En fait, initialement l'installation dessicante comprenait au lieu de l'humidificateur direct (celui coté de l'air de soufflage) une pompe à chaleur dont le condenseur était placé à l'entrée de la roue dessicante côté régénération. Comme le climat local est humide (l'humidité absolue dépasse 14 g/kg air sec), un tel système a été proposé pour éviter des problèmes d'humidité relative à l'intérieur du local. Côté confort les conditions du local sont très satisfaisantes, cependant côté performance énergétique, l'efficacité des capteurs est

assez basse ainsi que le taux de couverture solaire (aux alentours de 25%). Ceci est dû au fait que la plupart de l'énergie de régénération est procurée par le condenseur de la pompe à chaleur obligeant ainsi l'installation solaire à fonctionner en mode de stockage ce qui augmente la température du ballon de stockage ainsi que la température du fluide entrant les capteurs. Comme solution à ce problème, un humidificateur direct a été proposé en série avec la pompe à chaleur. Son utilisation réduit le temps d'utilisation de cette dernière mais induit une humidité relative dans le local dépassant 60%.

En France, la première installation à dessiccation a été installée à la maison des énergies de l'ASDER (puissance de 7 kW et une surface de capteur de 16 m²), ce qui fait l'objet de ce travail et on reviendra donc sur les détails du fonctionnement dans un prochain chapitre.

I.2 Notion de climatisation :

I.2.1 Définition :

La climatisation est l'ensemble des procédés qui consistent à contrôler simultanément les caractéristiques de l'air dans un milieu en l'occurrence la température, l'humidité relative, et la pureté. Son principal but est de créer des conditions de confort thermique pour l'être humain et les machines [1].

I.2.2 Les caractéristiques de l'air humide :

L'air constituant l'atmosphère qui entoure la planète terre est généralement un mélange de gaz et de particules qui sont répartis comme nous montre le tableau dans la page suivante :

Composants	Pourcentage volumique
Azote (N ₂)	78 %
Oxygène (O ₂)	21 %
Argon (A)	0,93 %
Vapeur d'eau (H ₂ O)	0- 4 %
Gaz carbonique (CO ₂)	0,033 %
Néon (Ne)	0,0018 %
Krypton (Kr)	0,000114 %
Hydrogène (H)	0,00005 %
Oxyde d'azote (N ₂ O)	0,00005 %
Xénon (Xe)	0,0000087 %
Ozone (O ₃)	0-0,000001 %

Tableau I.1 Composition volumique de l'air

On constate que l'air est essentiellement constitué de l'azote et du dioxygène ; les autres gaz, qui représentent 1% du volume, sont appelés gaz rares. A l'état naturel, l'air n'est pas dépourvu de vapeur d'eau même si cette dernière est parfois invisible. Il contient toujours une quantité variable d'humidité : on parle d'air humide. Il s'agit donc tout simplement d'un mélange d'air sec et de la vapeur d'eau. L'air humide se définit par les caractéristiques suivantes :

- La température sèche ;
- La température humide ;
- La température de rosée ;
- L'enthalpie ;
- L'humidité relative ;
- L'humidité spécifique ;
- Le volume spécifique.

I.2.2.1 Température sèche (T_s) :

C'est la température du mélange d'air sec et de la vapeur d'eau mesurée par un thermomètre à bulbe sec, elle s'exprime en degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$) [2].

I.2.2.2 Température humide (T_h) :

Cette température s'obtient en saturant l'air adiabatiquement. Pratiquement, en entourant l'élément sensible d'un thermomètre classique d'une ouate imprégnée d'eau et en soumettant ce thermomètre à un courant d'air, on obtient la température humide de l'air. L'unité de mesure est le $^{\circ}\text{C}$ [3].

$$T_s \geq T_h$$

I.2.2.3 Température de rosée (T_r) :

C'est la température à laquelle la vapeur d'eau contenue dans l'air commence à se condenser au contact d'une surface froide. Cette température est inférieure ou égale à la température humide, et elles ont la même unité [3].

I.2.2.4 Enthalpie (H) :

C'est la quantité de chaleur contenue dans une unité de masse d'air. L'unité de mesure de celle-ci est le KJ/Kg d'air [3].

I.2.2.5 Humidité relative (ϕ) :

L'humidité relative encore appelée degré hygrométrique, est le rapport de la masse de vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec par la masse de vapeur d'eau contenue dans ce même kilogramme d'air saturé à la même température. Elle n'a pas d'unité et s'écrit généralement en pourcentage [3].

I.2.2.6 Humidité absolue (w) :

C'est la masse de vapeur d'eau contenue dans un kilogramme d'air sec. Elle s'exprime en kilogramme ou gramme d'eau par kilogramme d'air sec (Kg / Kg as) [2].

I.2.2.7 Volume spécifique (v) :

C'est le volume occupé par un kilogramme d'air. Il s'exprime en m^3/Kg d'air [3].

I.2.2.8 Masse volumique (rho) :

C'est la masse d'un mètre cube d'air. La masse volumique est l'inverse du volume spécifique. Elle s'exprime en kg/m^3 d'air [3].

Toutes les caractéristiques suscitées peuvent être déterminées par calcul, mais en génie climatique on utilise généralement le diagramme psychrométrique ou de l'air humide. On y retrouve un ensemble de courbes représentant chaque caractéristique de l'air ; chaque point qui y est représenté a pour coordonnées les caractéristiques suscitées.

Le diagramme psychrométrique a des zones qui peuvent être représentées de la façon suivante :

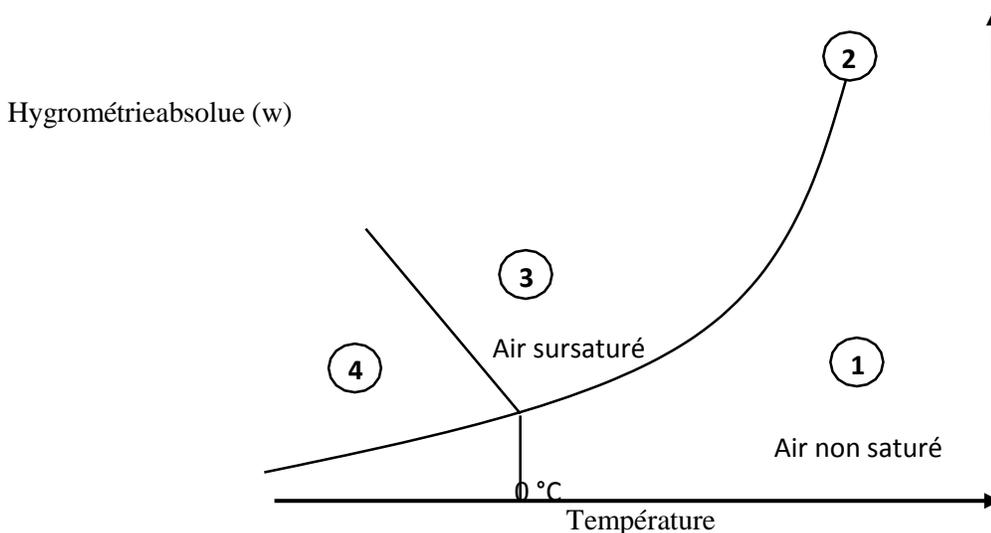


Figure I.1 Différentes zones spécifiques d'un diagramme psychrométrique

Zone 1 : Air non saturé.

Courbe 2 : séparation des zones comportant un air non saturé et un air sursaturé, Cette courbe est appelée courbe de saturation.

Zone 3 : Air saturé plus de l'eau en suspension (brouillard), on parle d'air sursaturé,

Zone 4 : Air saturé plus de l'eau en suspension. La température étant négative, l'eau est cristallisée (neige ou grêlons).

Pour un point A placé sur le diagramme la détermination des caractéristiques se fait en suivant les lignes de la façon suivante :

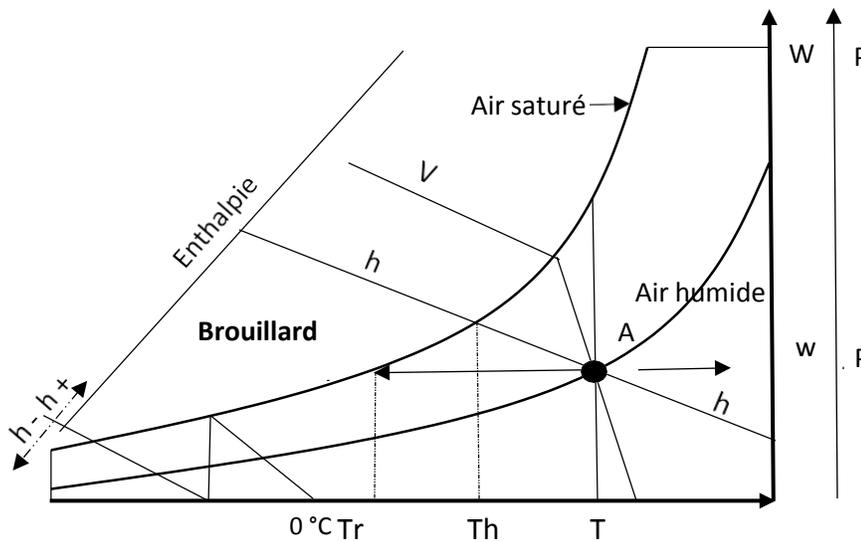


Figure I.2 Détermination des caractéristiques d'un point

T : température sèche (en °C) ;

Th : température humide (en °C) ;

Tr : température de rosée (en °C) ;

Rh \hat{o} : humidité relative (en %) ;

W : humidité absolue ou teneur en eau (en Kg/Kg as) ;

V : volume spécifique (en m³/Kg) ;

h : enthalpie (en KJ/Kg).

I.2.3 Notion de confort thermique en climat tropical humide :

Cette notion est assez difficile à définir de façon précise car elle est très subjective. Une étude du confort thermique en climat tropical humide permet de définir des conditions d'ambiances acceptables par un sujet vivant en zone tropicale sèche. L'ambiance thermique est un facteur de conditions de travail jouant un rôle important sur la santé, la sécurité et le confort des travailleurs.

On exprime assez facilement et spontanément les sensations éprouvées face à l'ambiance thermique à laquelle on est soumis : sensation de chaleur, d'étouffement et de froid, associés à des effets caractéristiques tels que la transpiration, le frissonnement mais le confort thermique est une notion complexe dépendant de nombreux paramètres. On dira tout simplement qu'un individu est en situation de confort thermique lorsqu'il ne ressent de sensation ni de chaud, ni de froid [2].

La figure ci-contre (**température en abscisse, humidité absolue en ordonnée**) nous montre une zone de confort en région tropicale sèche.

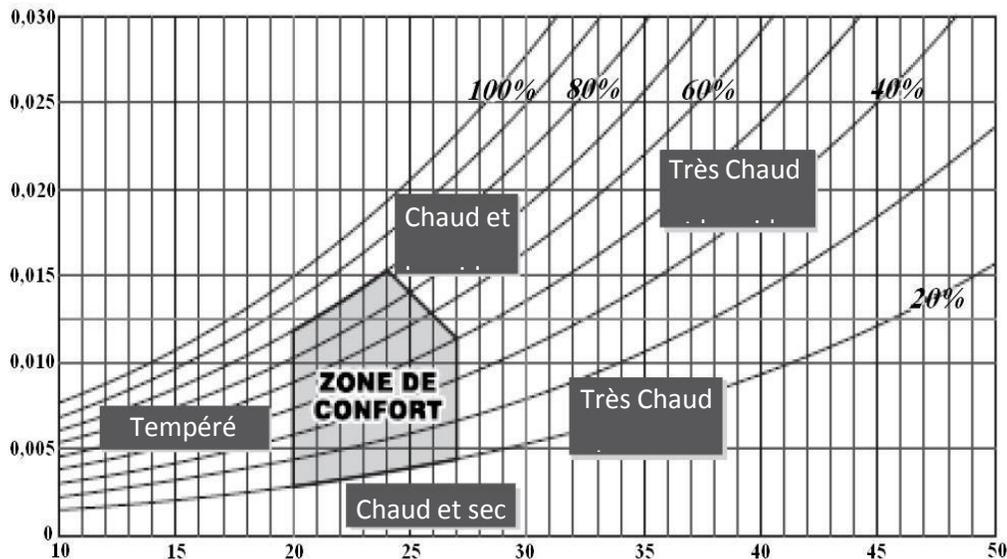


Figure I.3 Zone de confort thermique Source : Claessens et al. 1996)

On peut constater que la température et l'humidité relative de confort proposées sont :
 $20^{\circ} \text{ C} < \text{Température} < 27^{\circ} \text{ C}$ $20\% < \text{Humidité} < 80\%$

I.3 Principes de la production de froid :

Dans les installations de climatisation, le plus souvent, il est fait appel à une machine frigorifique qui permet d'évacuer vers l'extérieur l'excès de chaleur des locaux et ainsi de les refroidir. Dans la pratique courante une machine frigorifique prépare de l'air froid, ou de l'eau froide, pour compenser les apports de chaleur du soleil, des occupants, des matériels de bureautique, etc., afin de maintenir la température de consigne à la valeur souhaitée dans les locaux[4].

I.3.1 Cycle frigorifique :

On peut utiliser une transformation qui absorbe de l'énergie thermique (dite endothermique) comme un changement de phase (vaporisation, fusion, sublimation) ou une détente de gaz. Pour obtenir un fonctionnement continu, il faut réaliser un cycle et donc ajouter au phénomène endothermique un processus qui rejette de l'énergie thermique (dit exothermique). Le froid est produit par l'évaporation d'un liquide (fluide frigorigène) qui absorbe la quantité de chaleur équivalente à sa chaleur de vaporisation. Un apport d'énergie est nécessaire au fonctionnement de système frigorifique : l'apport d'énergie peut être sous forme mécanique ou thermique.

Au cours de la transformation d'un système fermé, la variation de son énergie est égale aux quantités d'énergie échangées avec le milieu extérieur sous formes d'énergie thermique (chaleur) et d'énergie mécanique (travail) [4].

Le cycle frigorifique est fermé, l'état final du système est le même que son état initial donc :

$$W \text{ apporté} + Q \text{ absorbé} + Q \text{ fourni} = 0$$

Avec :

W apporté : quantité d'énergie mécanique apportée au compresseur (positif)

Q absorbé : quantité d'énergie absorbée à l'évaporateur (positif)

Q fourni : quantité d'énergie thermique fourni par le condenseur à l'extérieur (négatif).

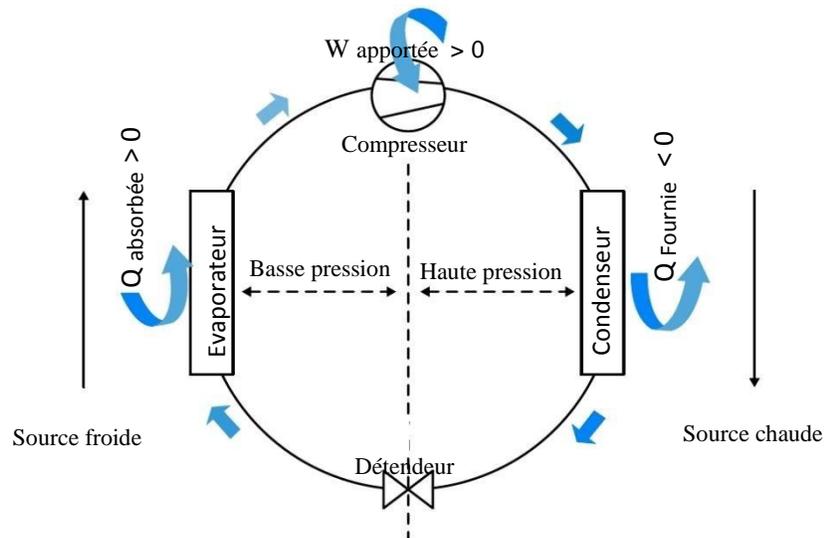


Figure I.4 Le cycle frigorifique a compression mécanique

Le cycle frigorifique est réversible, C'est-à-dire qu'au lieu d'utiliser le froid absorbé à l'évaporateur, on utilise le chaud émis au condenseur.

Le climatiseur réversible fonctionne alors en pompe à chaleur (PAC), c'est-à-dire en mode chauffage. Cette technique permet de valoriser des sources de chaleurs gratuites. Au condenseur, on récupère la quantité de chaleur prélevée à la source froide et l'équivalent thermique de l'énergie mécanique fournie au compresseur :

$$W \text{ apporté} + Q \text{ absorbé} = - Q \text{ fourni}$$

La quantité de chaleur fournie au condenseur est égale à la quantité de chaleur absorbée à l'évaporateur plus la quantité d'énergie transmise par le compresseur.

Le système frigorifique réversible demande un circuit frigorifique particulier. Grâce à une vanne 4 voies intercalée dans le circuit, il est possible de permuter la fonction des échangeurs. Pour passer du mode froid au mode chaud, l'évaporateur devient condenseur alors que le condenseur devient évaporateur [4]

Cycle frigorifique (dit de Carnot) :

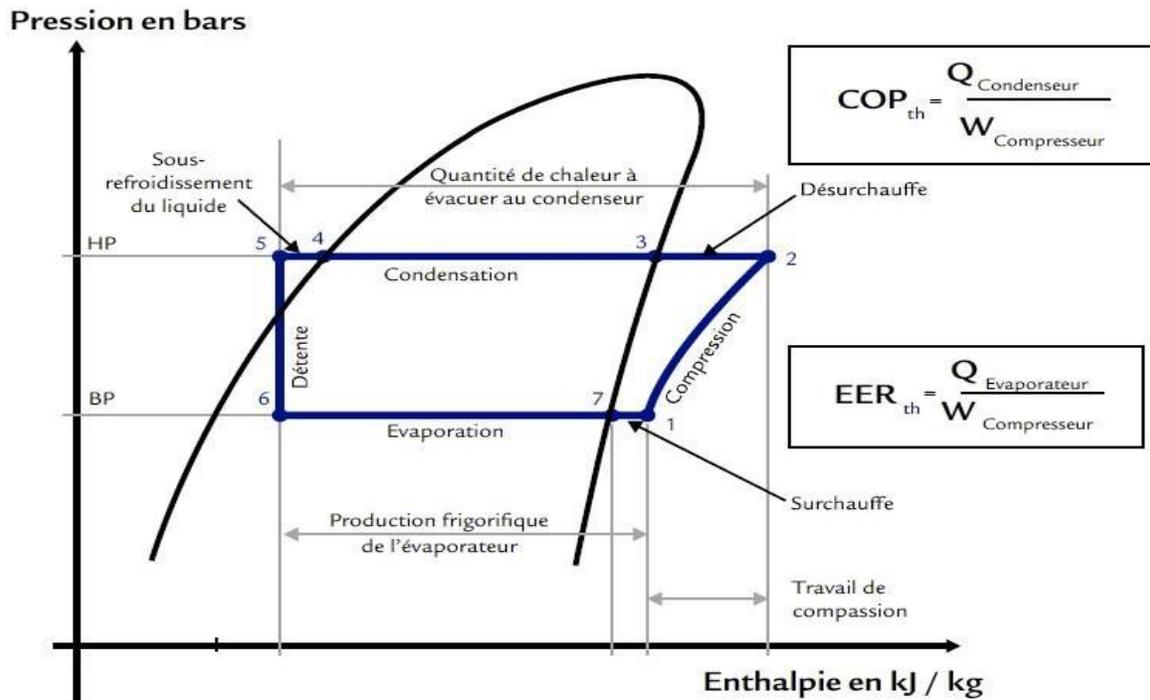


Figure II.5 Le cycle frigorifique (Carnot).

- L'évaporateur produit du « froid » par évaporation du fluide frigorigène (trajet 6-1).
- Le compresseur élève la pression du fluide (trajet 1-2).
- Le condenseur produit du « chaud » par condensation du fluide (trajet 2-5).
- Le détendeur abaisse la pression du fluide (trajet 5-6).

I.3.2 Coefficient de performance d'une pompe à chaleur (COP) :

$$COP = \frac{\text{Quantité d'énergie thermique utile évacuée au condenseur}}{\text{Quantité d'énergie fournie au compresseur}}$$

et :

$$COP_{théorique} = \frac{Q_{condenseur}}{W_{compresseur}}$$

D’après le premier principe de la thermodynamique, une variation d’énergie d’un système est égale au travail fourni plus le transfert thermique reçu. Dans notre cas, nous pouvons simplifier l’équation pour obtenir :

$$W = Q_{\text{chaud}} - Q_{\text{froid}}$$

Nous pouvons enfin remplacer par son expression dans la formule du paragraphe précédent :

$$\text{COP} = \frac{Q_{\text{chaud}}}{Q_{\text{chaud}} - Q_{\text{froid}}}$$

Grâce au modèle de Carnot, nous pouvons aussi utiliser les températures des deux sources (intérieure et extérieure) pour calculer le coefficient de performance.

$$\text{COP}_{\text{froid}} = \frac{T_{\text{froid}}}{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}} \qquad \text{COP}_{\text{chauffage}} = \frac{T_{\text{chaud}}}{T_{\text{chaud}} - T_{\text{froid}}}$$

Les coefficients types :

La nature de la machine ainsi que la température de la source froide influence grandement le coefficient moyen de performance. Voici les valeurs auxquelles vous devez vous attendre.

Type de PAC	COP (environ)
Air/air	3
Air/eau	3
Sol/eau	4
Eau/eau	5

Tableau I.2 coefficient moyen de performance différent types

I.3.3 Coefficient d’efficacité frigorifique (EER Energy Efficiency Ratio) :

L’EER représente l’efficacité énergétique du système frigorifique fonctionnant en mode rafraîchissement (ou de la pompe à chaleur fonctionnant en mode froid) :

$$\text{EER} = \frac{\text{Quantité d'énergie frigorifique utile absorbée à l'évaporateur}}{\text{Quantité d'énergie fournie au compresseur}}$$

et :

$$\text{EER}_{\text{théorique}} = \frac{Q_{\text{évaporateur}}}{W_{\text{compresseur}}}$$

I.4 Distribution du froid :

Pour la distribution du froid, deux techniques sont utilisées.

I.4.1 Distribution en détente directe :

La climatisation à détente directe utilise directement le fluide frigorigène pour évacuer la chaleur vers l'extérieur et transmettre le froid à l'intérieur des pièces à rafraîchir. L'évaporateur où le fluide frigorigène est évaporé est situé là où le refroidissement est recherché. Par exemple en climatisation, il est dans le circuit de l'air à refroidir [4].

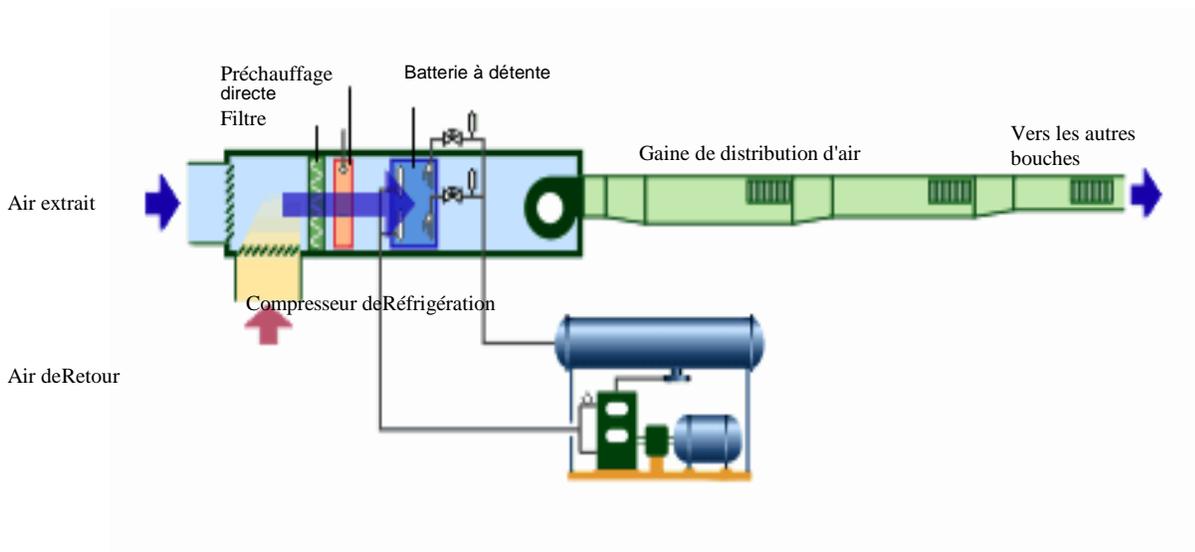


Figure I.6 Climatisation "à détente directe" [5].

I.4.2 Distribution en détente indirecte (à eau glacée) :

La climatisation à eau glacée (eau à des températures de l'ordre de 6 à 12°C) utilise un fluide intermédiaire, l'eau, pour transporter et transmettre l'énergie frigorifique aux terminaux de climatisation. Elle peut aussi utiliser un autre fluide frigoporteur comme l'eau glycolée ou la saumure [4].

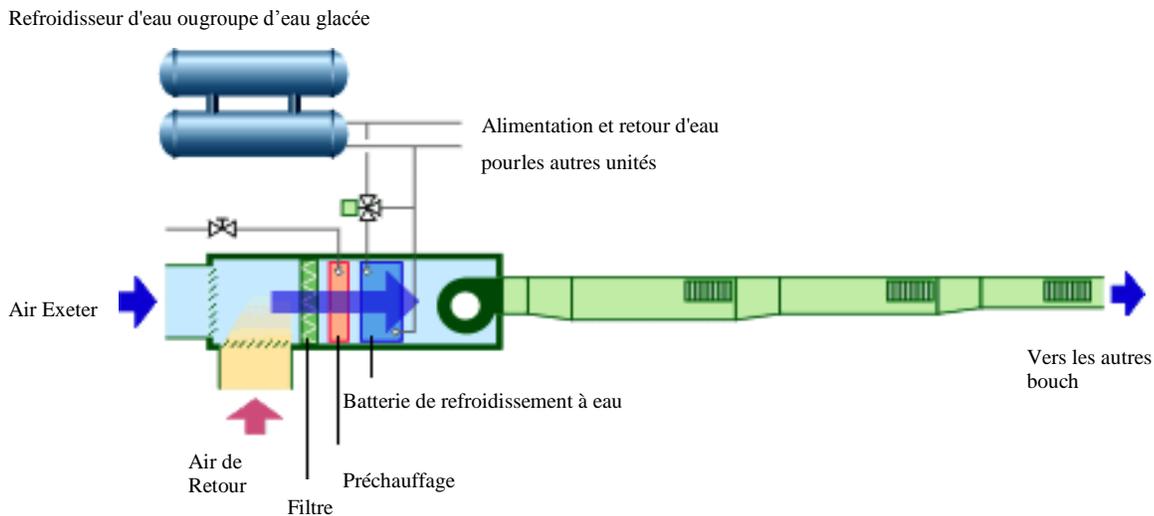


Figure I.7 Climatisation "à eau glacée"

[5].

CHAPITRE II

Energie solaire

II. Energie solaire :

Grâce au soleil, d'énormes quantités d'énergies atteignent la surface de la Terre après avoir parcouru une distance d'environ 150 millions de kilomètres. Avec une puissance moyenne d'environ 1.000 W/m^2 , cette énergie solaire est 10.000 fois supérieure à la demande énergétique globale de la population et ce pour les 5 milliards d'années à venir [6]. Cette source inépuisable à l'échelle humaine est toute fois inégalement répartie à l'échelle de la planète avec un maximum à l'équateur.

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

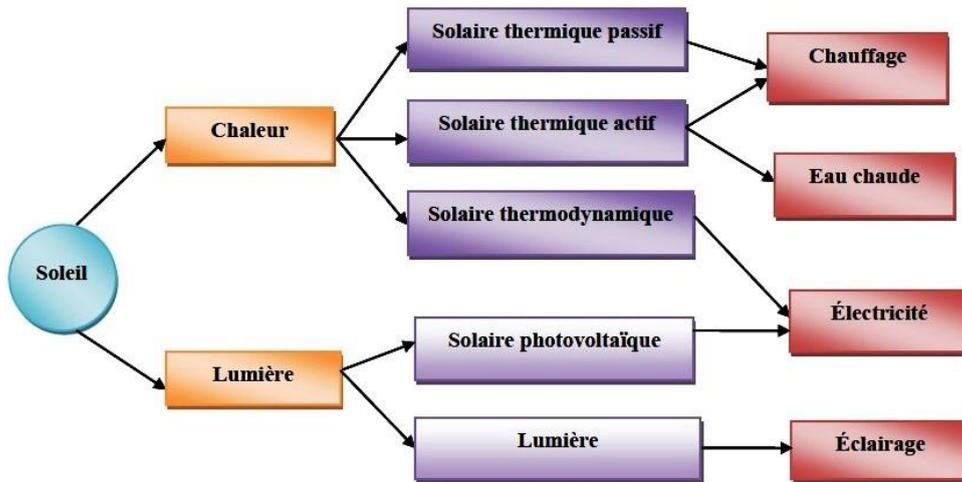


Figure II-1 : Les applications de l'énergie solaire [7]

L'énergie solaire peut être utilisée pour produire de la lumière grâce à l'effet photovoltaïque, produire de l'eau chaude sanitaire et production de froid en récupérant la chaleur solaire grâce à des capteurs solaires thermiques.

II.1 Potentiel solaire :

Le soleil est composé principalement d'hydrogène et d'hélium. Il tire son énergie des réactions thermonucléaires se produisant en permanence dans son noyau, dont la température atteint 20.10^6 degrés, qui décroît vers l'extérieur jusqu'à un palier d'environ 5800 K à la surface du soleil [6].

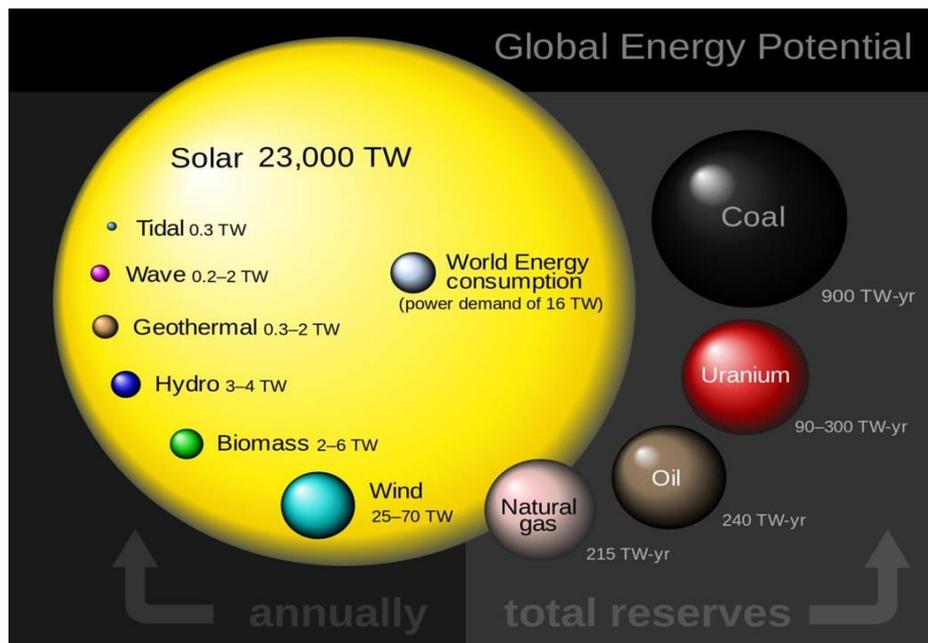


Figure II-2 : Disponibilité de l'énergie solaire [6]

Les réactions thermonucléaires transforment l'hydrogène en hélium avec une émission d'énergie qui donne naissance à un rayonnement électromagnétique se propageant à une vitesse de 300 000 km/s, dont le spectre couvre toutes les fréquences possibles et dont l'intensité est maximum dans la gamme du visible [6].

La puissance rayonnée à la surface du soleil est environ $3,85.10^{26}$ W. Cependant, une infime partie qui est de $1,9.10^{17}$ W est reçue par la terre [6].

II.1.1 Au monde :

Énergie solaire est inégalement répartie à la surface de la Terre et sujette à des variations saisonnières. Près de l'équateur, l'ensoleillement annuel peut atteindre 2.300 kWh/m²/an soit deux fois l'ensoleillement moyen en Europe (1.100 kWh/m²/an) [7].

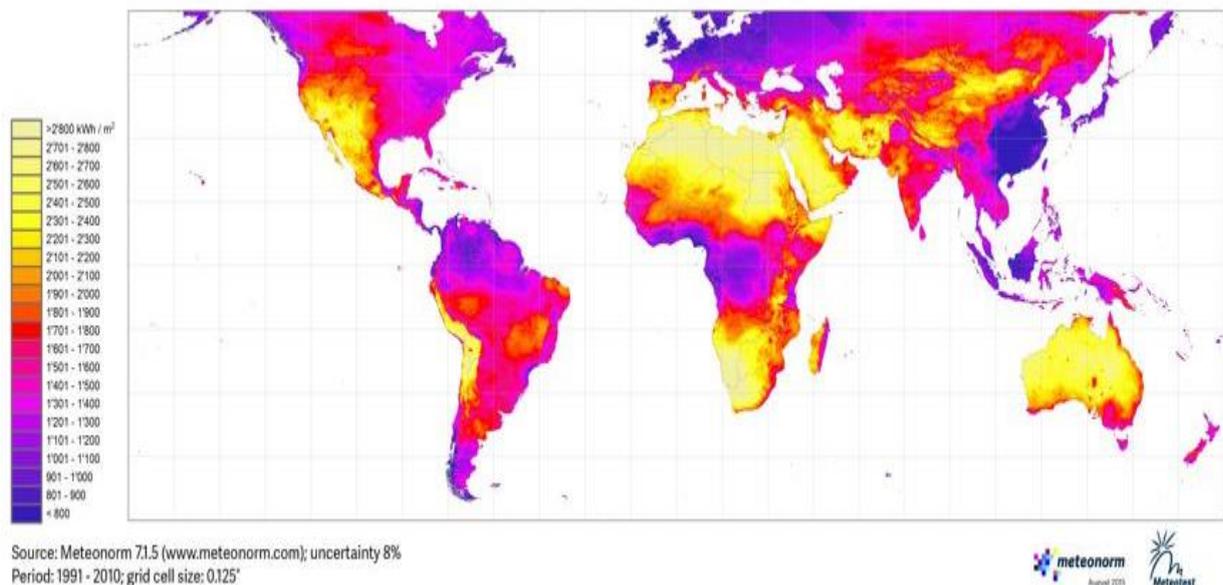


Figure II-3 : L'ensoleillement dans le monde [8]

La carte ci-dessus montre les valeurs annuelles moyennes de l'irradiation globale, en kWh/m². L'énergie solaire disponible diffère d'une zone géographique à l'autre, mais aussi au fil de l'année. Dans les zones désertiques proches de l'équateur, les valeurs d'irradiation annuelle peuvent atteindre les 2 200 kWh/m² par an (Figure 12) [8].

La température à la surface de la terre dépend directement de l'angle avec lequel les rayons du soleil pénètrent dans l'atmosphère. Lorsque cet angle d'incidence est faible, c'est-à-dire lorsque les rayons rasant le sol, l'énergie solaire se disperse. Au contraire, la chaleur est maximale lorsque les rayons atteignent le sol avec un angle de 90° [8].

Le potentiel de l'énergie solaire en fait une source d'énergie renouvelable prometteuse. On peut profiter de sa chaleur et de sa lumière pour récupérer des calories et produire de l'électricité tout en émettant moins de pollution comparativement aux sources fossiles.

Par rapport aux autres sources renouvelables, le solaire offre un avantage particulier : il est exploitable sur l'ensemble de la surface du globe. Cependant, l'équipement de production doit être installé à proximité du lieu de consommation afin de minimiser les pertes. Ajoutons qu'il est totalement modulable : la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.

II.1.2 En Algérie :

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a Conclu, que l'Algérie dispose d'un des plus grands gisements solaires au monde, la durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara) en moyenne 9 à 11 heures par jour et très peu de nuages. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays (Figure 01) [9].

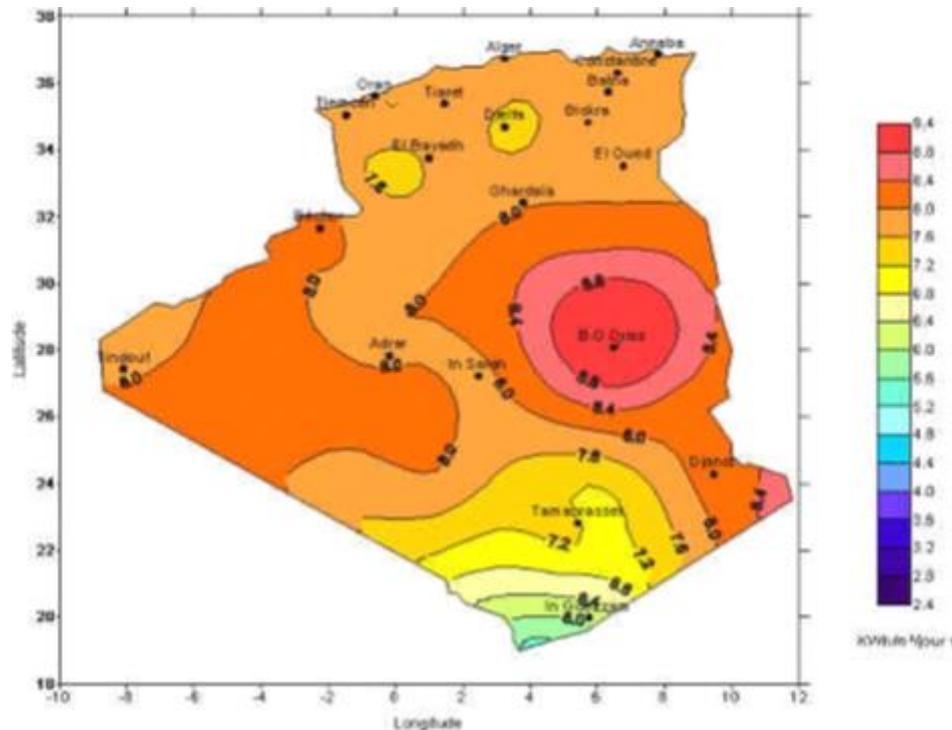


Figure II-4 : l'insolation journalière dans l'Algérie [10]

Avec une superficie de 2.381.741 km² Avec un territoire composé de 86% de désert saharien, l'Algérie est le pays le plus vaste du côté de la méditerranée. En effet, l'Algérie est l'un des

pays de la méditerranée qui dispose d'un potentiel énergétique solaire très élevé elle reçoit 169.000 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [8].

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel du pays, et aux plus grands champs solaire du monde. la qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde [10].

Cette richesse d'énergies renouvelables, donne à notre pays une longévité de Consommation énergétique propre 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. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020 [11].

II.2 Exploitation de l'énergie solaire :

Le capteur solaire transforme l'énergie du soleil (gratuite et disponible) en une énergie utile produire de l'eau chaude ou de l'électricité. Un capteur solaire ou panneau solaire est un élément d'une installation solaire destiné à recueillir l'énergie solaire pour le convertir en énergie thermique et le transférer à un fluide caloporteur (air, eau) ou en énergie électrique. On distingue principalement deux types de capteurs solaires: le capteur solaire photovoltaïque et le capteur solaire thermique.

II.2.1 Capteur solaire photovoltaïque :

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technique associée. L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique [12].

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs produits à partir d'une matière première très pure, comme le silicium. Ces matériaux émettent des électrons lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière. Ceux-ci sont éjectés du matériau et ils circulent dans un circuit fermé, produisant ainsi de l'électricité [12].

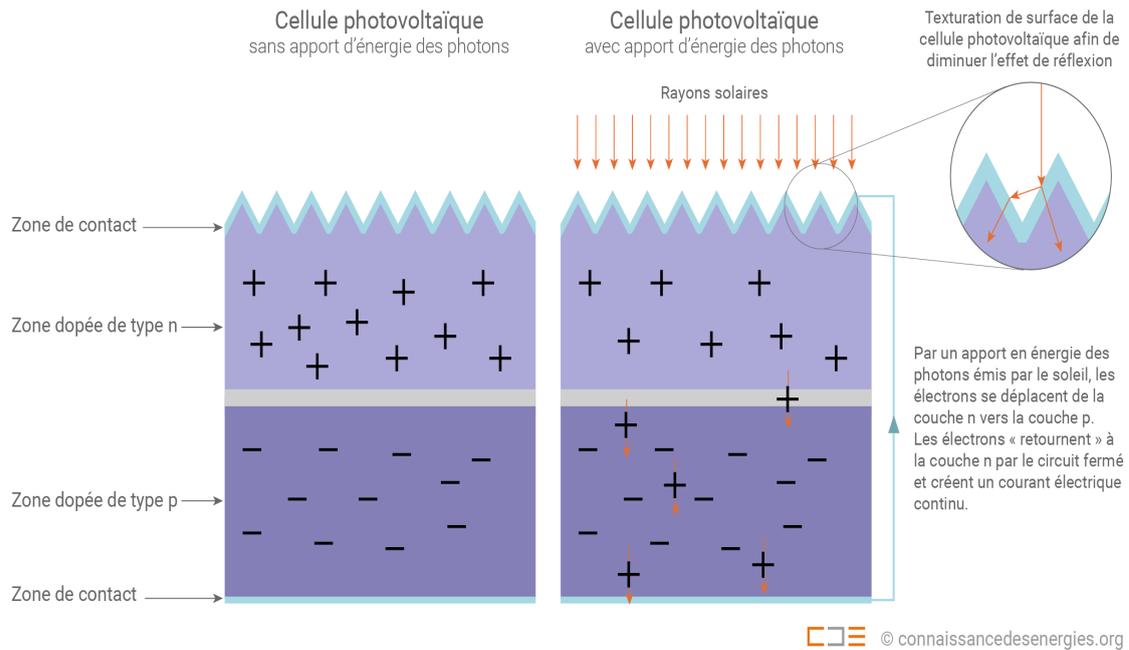


Figure II-5 : Principe de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque [13]

II.2.2 Capteur solaire thermique :

Un système solaire thermique exploite le rayonnement du Soleil afin de le transformer directement en chaleur (énergie calorifique). On distingue trois types de technologies permettant d'exploiter l'énergie solaire thermique.

II.2.2.1 Solaire thermodynamique :

Un système solaire à concentration thermodynamique exploite le rayonnement du Soleil en orientant, au moyen de miroirs, les flux de photons. Ce système thermique concentré permet d'atteindre des niveaux de température bien supérieurs à ceux des systèmes thermiques classiques non concentrés [14].

Alors que les chauffe-eau domestiques produisent une eau à une cinquantaine de degrés, il est possible, par la concentration, de chauffer des fluides à des températures de l'ordre de 250 à 1 000°C. Il devient alors envisageable de les utiliser dans des processus industriels comme la génération d'électricité (on parle parfois « d'électricité solaire thermodynamique »). D'autres utilisations directes ou indirectes des fluides chauds sont possibles comme le dessalement de l'eau de mer, le refroidissement ou encore la génération d'hydrogène [14].

II.2.2.1.1 Capteur cylindro-parabolique :

La technologie des capteurs cylindro-paraboliques est actuellement la plus éprouvée des techniques de concentration solaire. Ce type de capteur se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil. Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal, où circule un fluide caloporteur, La température du fluide peut monter jusqu'à 500°C [14].

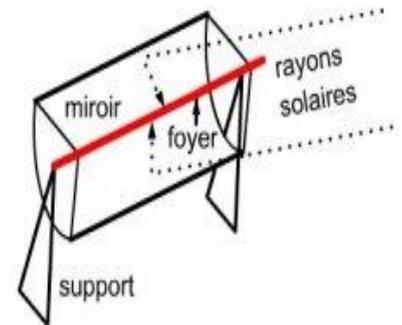


Figure II-6 : Capteur cylindro-parabolique[15]

II.2.2.1.2. Capteur solaire parabolique :

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils suivent le soleil sur 2 axes afin de concentrer le rayonnement solaire sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est souvent supérieur à 2000 avec une température de 750°C [16].

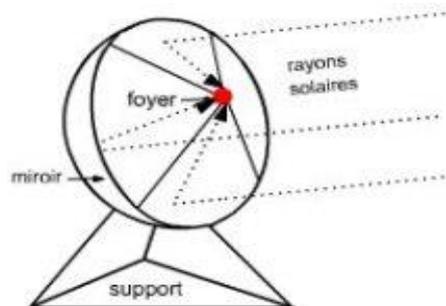


Figure II-7 : Capteur solaire parabolique [16]

III.2.2.1.3. Capteur solaire à miroirs de Fresnel :

Le principe d'un concentrateur de Fresnel réside dans ses miroirs plans (plats) dits "réflecteurs compacts linéaires". Chacun de ces miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube absorbeur. Un fluide caloporteur est chauffé jusqu'à 500 °C en circulant dans ce tube horizontal [17].



Figure II-8 : Miroirs de Fresnel [17]

Principal avantage de cette technologie, les miroirs plats sont bien meilleur marché que les miroirs paraboliques [17].

II.2.2.2 Solaire thermique actif :

Traditionnellement, ce terme désigne les applications à basse et moyenne température. Des capteurs solaires thermiques sont installés sur les toits des bâtiments. Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. La chaleur est ensuite utilisée afin de produire de l'eau chaude sanitaire ou bien encore chauffer des locaux.

Il existe plusieurs types de panneaux solaires thermiques selon la nature du fluide caloporteur qui transporte la chaleur.

II.2.2.2.1 Capteurs solaires plans à air :

Les capteurs solaires thermiques à air sont assez rares et sont utilisés afin de chauffer. Leur principe est basé sur celui des capteurs à eau. En effet à la place d'avoir de l'eau dans les tuyaux, c'est de l'air qui circule. Cet air va à son passage dans le panneau solaire s'échauffer au contact des absorbeurs. Une fois chaud, l'air va être ventilé dans l'habitat pour le chauffage ou encore pour le séchage des productions dans les hangars agricoles.

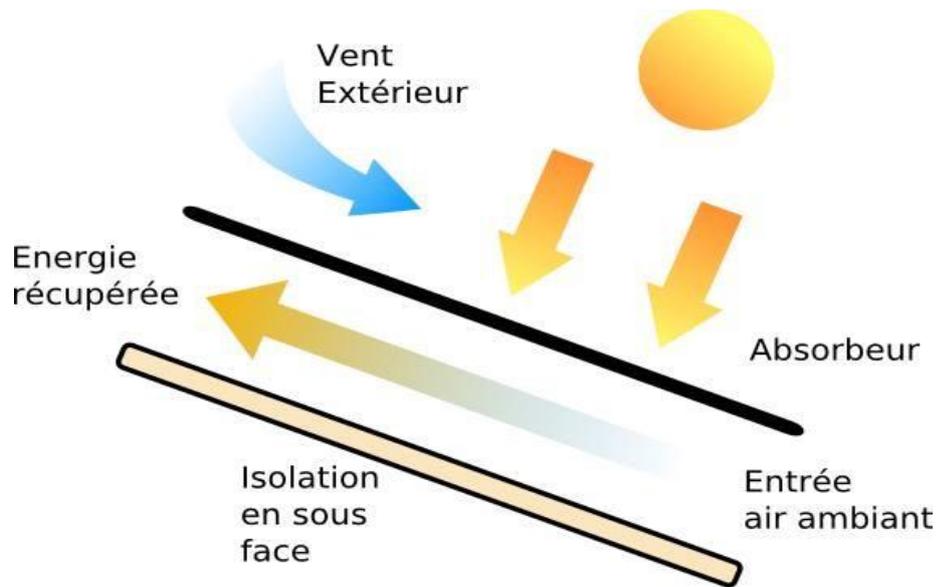


Figure II-9 : Capteur solaire thermique à air [18]

II.2.2.2.2. Capteurs solaires plans à eau :

- **Les capteurs plans vitrés :**

C'est le modèle le plus répandu. Il est constitué d'une caisse isolée couverte par un vitrage. A l'intérieur est placé l'absorbeur, un serpentin contenant le fluide à réchauffer. Pour que le serpentin absorbe mieux la chaleur, il est bordé par des ailettes noires, la couleur noire transformant mieux la chaleur absorbée. Dans ce genre de modèle, l'absorbeur est protégé contre les déperditions thermiques par un matériau isolant (la plupart du temps, de la laine de roche) [14].

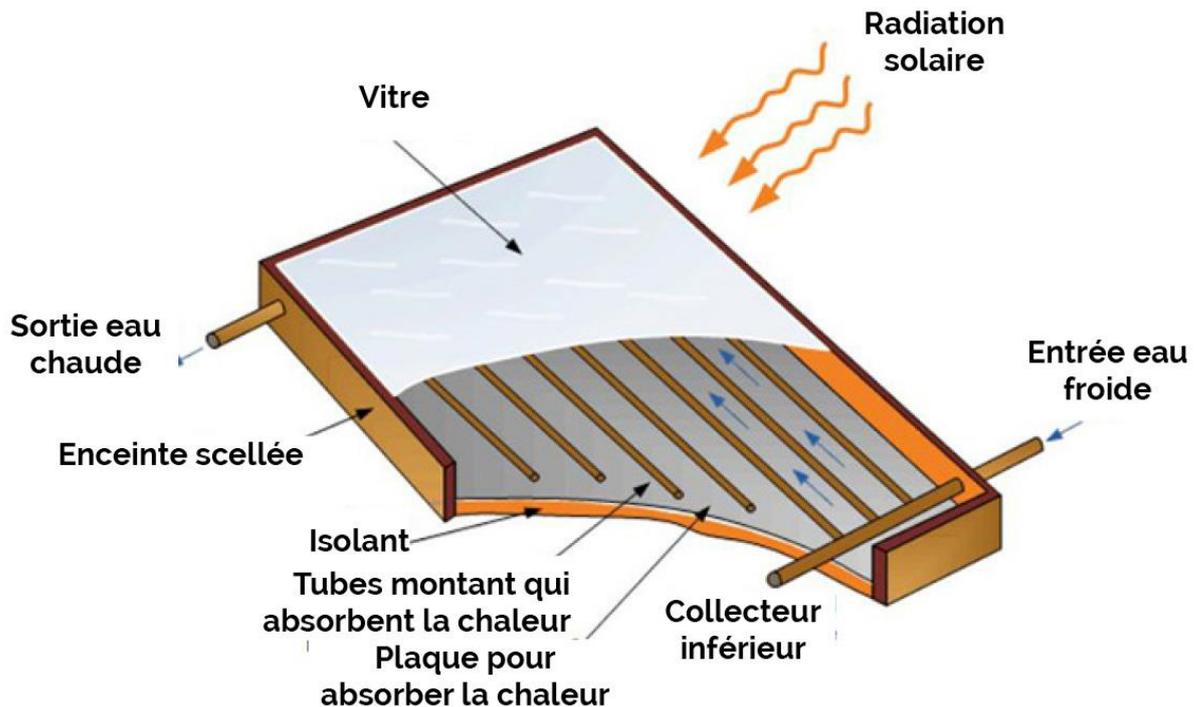


Figure II-10 : Schéma d'un capteur solaire vitré [7]

Ce capteur absorbe le rayonnement solaire et le transforme en chaleur transmise à un fluide caloporteur. La chaleur ainsi captée est ensuite transférée vers un réservoir de stockage. Il se présente sous forme de caissons de différentes dimensions, ou sous forme d'éléments séparés à intégrer directement dans l'architecture des bâtiments. Ses dimensions peuvent varier de quelques mètres carrés (individuel) à plusieurs centaines de mètres carrés (installations collectives). Ce système peut atteindre une efficacité de 90% [14].

Le capteur plan à liquide produit du chauffage et de l'eau chaude sanitaire (ECS) pour les bâtiments en pays tempérés ou froids. Il est le plus répandu et le mieux adapté pour répondre à ces besoins par le biais de l'énergie solaire.

- **Les capteurs plans non vitrés :**

Nettement moins répandu que le capteur vitré, il est constitué d'un simple absorbeur constitué d'un réseau de tubes accolés soit en plastique soit en caoutchouc de couleur noire. L'eau à chauffer circule dans les tubes. La température pouvant être atteinte (sans vent) environ 45°C [14].

Pour des applications à basse température, le capteur simplifié sans vitrage et sans isolation est très satisfaisant. N'étant pas équipé d'une isolation, il ne peut fonctionner à haute température. Il est donc recommandé lorsque sont recherchées des températures de services inférieures à 30°C, et de ce fait particulièrement adapté au chauffage des piscines. D'autres applications moins courantes ont cependant recours à ce type de capteur [7] :

- Préchauffage d'air neuf.
- Séchage de plantes ou de fourrage

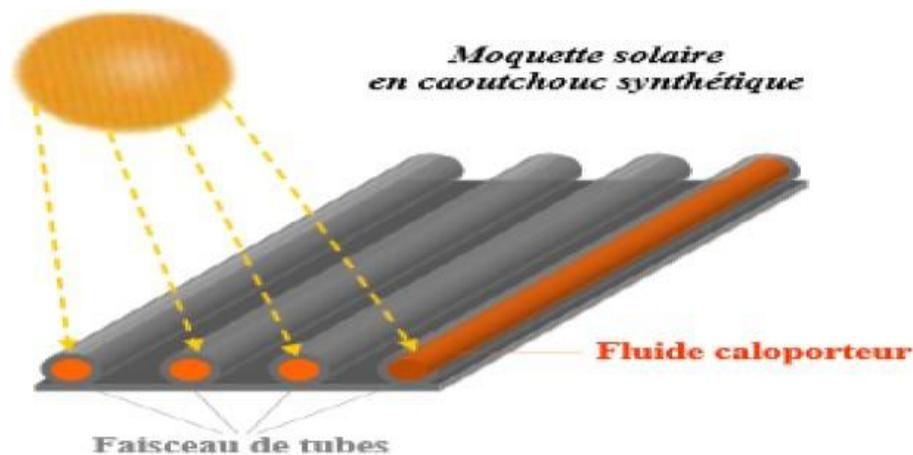


Figure II-11 : Descriptif d'un capteur non vitré [7].

Ce capteur consiste en un réseau de tubes noirs en matière plastique, accolés les uns aux autres. Pour chauffer l'eau d'une piscine, les capteurs peuvent être insérés dans le circuit de filtration. Ils sont ainsi directement parcourus par l'eau retournant au bassin.

Le rendement du capteur moquette est très bon pour produire des températures proches de la température de l'air ambiant. Les quelques degrés supplémentaires apportés à l'eau de la piscine permettent d'en allonger le confort et la durée d'utilisation de plusieurs semaines, Le capteur moquette ne permet pas la production d'eau chaude sanitaire (ECS), sauf en pays chauds. Pour des chauffer des piscines d'été individuelles ou collectives, ces capteurs représentent des investissements idéal en Rhône Alpes car à moindre coût, ils répondent parfaitement à des besoins spécifiques saisonnier.

➤ **Avantage :**

- ❖ Coût faible.
- ❖ Facilité de mise en œuvre.
- ❖ Excellents rendements pour des températures proches de l'air extérieur.
- ❖ Aucune maintenance.

➤ **Inconvénient :**

- ❖ Peu adaptés lorsque le besoin n'est pas en phase avec la ressource ou lorsque les températures des applications sont trop élevées.

✓ **Les capteurs solaires à tubes sous vide :**

Les capteurs solaires à tubes sont plus performants que les capteurs plans en termes de rendement à faible ensoleillement. Ils absorbent les rayons directs, réfléchis ou diffus et ce à tout moment de la journée quelque soit l'orientation du soleil. Ils permettent la production d'eau chaude sanitaire et de chauffage.



Figure II-12 : Capteur solaire thermique à tubes sous vide [19]

Le capteur sous vide est constitué d'une série de tubes de verre sous vide à l'intérieur desquels se trouve un absorbeur avec un circuit hydraulique, qui capte l'énergie solaire et la transfère au fluide caloporteur. Grâce aux propriétés isolantes du vide, les déperditions de chaleur sont faibles. Ainsi, on peut obtenir des gains de température de 100°C et plus [15].

Ces capteurs sont idéals pour un montage rapide et fiable à l'emplacement souhaité par le client verticalement ou horizontalement, sur le toit ou en façade. Ils assurent par ailleurs un rendement élevé du à l'isolation sous vide. Leur fonctionnement est optimisé même dans le cas de faibles températures extérieures et d'une courte durée d'ensoleillement. Les capteurs solaires à tubes ne s'altèrent pas avec le temps et le verre est généralement autonettoyant.

➤ **Avantage :**

- ❖ Bonne productivité solaire pour des surfaces de toiture réduites (rendement de 30% supérieur aux capteurs plans).
- ❖ Technologie adaptée pour la climatisation solaire par absorption (qui nécessite des températures de plus de 80°C) [15].

➤ **Inconvénients :**

- ❖ Coût (très élevée) [15].

II.2.2.3 Solaire thermique passif :

Toujours dans le domaine de la basse température, on peut également citer les installations solaires passives. Par opposition aux applications précédentes, celles-ci ne requièrent pas de composants dits actifs (les capteurs solaires). Ces applications reposent sur des concepts de génie civil et climatique impliquant une architecture adaptée et l'emploi de matériaux spéciaux. L'utilisation passive de l'énergie du Soleil permet de chauffer, d'éclairer ou de climatiser des locaux.

L'idée est d'exploiter ce principe pour récupérer le maximum d'énergie solaire l'hiver et de ne pas laisser pénétrer celle-ci l'été pour éviter les surchauffes. Pour bénéficier de cette technique, il faut capter cette énergie solaire l'hiver et en intersaison par de grandes baies vitrées, ensuite il faut qu'elle soit absorbée par de la maçonnerie lourde, des meubles, des pots de fleurs, et surtout empêcher qu'elle ne s'échappe en utilisant des fenêtres à double-vitrage renforcé (gaz argon) et aussi en isolant les murs, le sol (isolation sous la chape) [7].

La disposition des pièces principales de la maison doit être conçue afin de bénéficier d'un ensoleillement optimal. Les ouvertures (fenêtres, véranda, baie vitrée) des pièces à vivre devraient être principalement orientées vers le Sud. Il est conseillé d'orienter les pièces comme la buanderie ou le garage du côté nord puisque cette orientation est assez déficitaire et réservée à la lumière des ateliers des peintres. Trois configurations principales dominent l'architecture solaire passive :

Système à gains directs par les vitrages.

- ❖ Système à mur Trombe.
- ❖ Système couplant les deux précédents : une serre accolée à une maçonnerie [8].

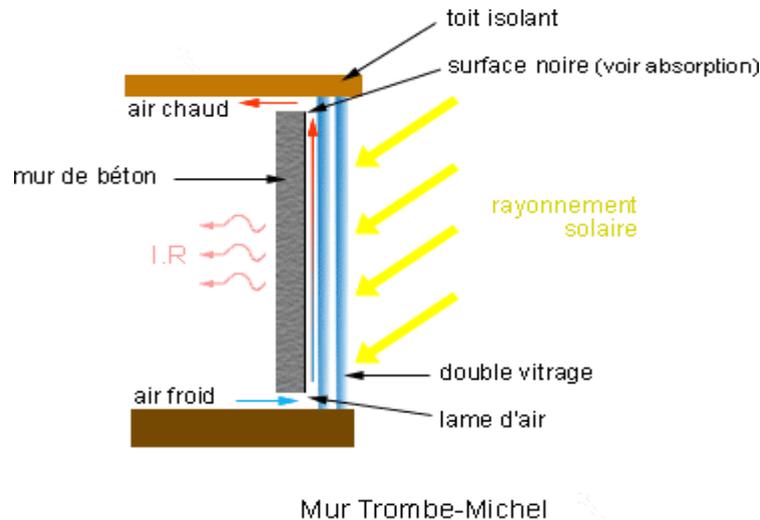


Figure II-13 : Fonctionnement d'un mur Trombe [20]

Le mur trombe est une solution très intéressante permettant de réduire significativement les besoins de chauffage. (Apport de calories en moyenne équivalant à 50 kWh/m²/an) [8]. Le principe de fonctionnement d'un mur trombe est assez simple : tout se fait grâce à des ouvertures hautes et basses (généralement appelées «clapets») réalisées dans le mur capteur qui permettent à l'air de réaliser un cycle dans lequel il passe du froid au chaud.

En effet, l'air froid qui s'échappe de la maison par les clapets bas va se réchauffer au contact de la vitre qui prend le soleil, et remonter dans les clapets hauts pour rentrer réchauffer dans la pièce, puis repartir dans les clapets bas...

En l'absence de rayonnement solaire, le flux convectif s'inverse pouvant provoquer un refroidissement accéléré de la pièce. Pour éviter cela, il est alors nécessaire de disposer des clapets à fermeture manuelle ou automatique. A noter que pour éviter surchauffe en été et déperdition de chaleur en hiver ou la nuit, il est préférable d'installer un volet isolant sur la façade du mur trombe [7].

II.3 Importance des techniques de refroidissement solaire :

L'augmentation de la consommation mondiale d'énergie et l'augmentation de la pollution de l'environnement due à l'utilisation de fluides de refroidissement nuisibles contribuent de manière significative à la destruction de la couche d'ozone et au réchauffement climatique. Ces raisons ont incité les chercheurs à trouver des solutions alternatives telles que les systèmes de refroidissement par dessiccation pour réduire la facture énergétique et protéger l'environnement. Les avantages les plus importants de ces systèmes sont (Daou et al. 2006) :

- L'utilisation de l'eau comme fluide de refroidissement, qui ne contribue pas à la destruction de la couche d'ozone ;
- L'utilisation pour la régénération des sources d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire, ou d'autres sources de chaleur, comme le gaz naturel, ce qui permet la réduction de la consommation d'énergie électrique ;
- le coefficient de performance est bon si la source d'énergie utilisée pour le séchage de l'air est gratuite ou à très faible prix, comme c'est le cas de l'énergie solaire ;
- Ces systèmes travaillent à des pressions proches de la pression atmosphérique, ce qui facilite le montage et l'entretien ;
- Ces systèmes donnent de l'air frais en utilisant des humidificateurs, ce qui contribue au dépoussiérage de l'air.

CHAPITRE III

Le Système Evaporatif a Dessiccation

III.1 Description des technologies de climatisation solaire :

Il existe plusieurs voies d'utilisation de l'énergie solaire pour produire du froid. La première est basée sur l'emploi de l'électricité, la deuxième sur l'utilisation d'un procédé thermo mécanique, enfin la troisième sur des cycles basé sur la sorption d'un gaz. Toutes les techniques utilisées sont listées dans la **Figure III.1**, en bleu les technologies actuellement en test à l'échelle réelle, et gris les technologies commercialement disponibles [21].

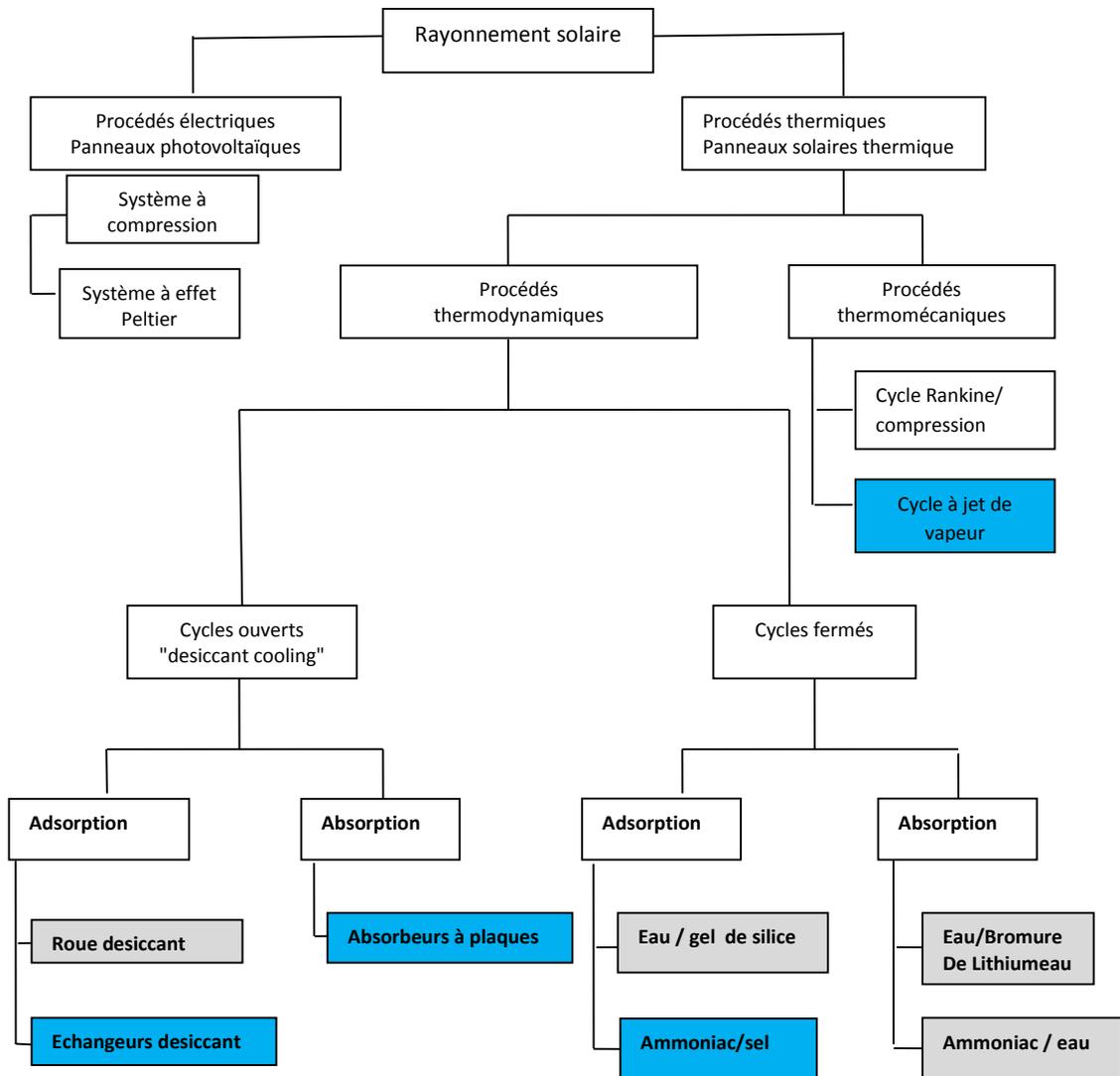


Figure III.1: Tableau des différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire [21].

I.2.1 Techniques basées sur l'emploi de l'électricité :

Les technologies de production de froid solaire peuvent être des systèmes frigorifiques qui sont basés sur l'utilisation de l'électricité. Dans ces cas là, l'énergie solaire est transformée en électricité grâce à des capteurs photovoltaïques puis est utilisée dans le système. Il existe deux systèmes:

I.2.1.1 Les systèmes à compression: On utilise un cycle classique de compression pour produire du froid. Ces Système classique utilisé actuellement dans le froid.

I.2.1.2 Les systèmes à effet Peltier: L'effet Peltier, appelé aussi effet thermoélectrique, est un phénomène physique de déplacement de la chaleur en présence d'un courant électrique parcourant deux matériaux conducteurs de natures différentes en contact. Ce phénomène ne permet pas d'avoir une forte puissance froide développée et n'est donc pas envisageable.

Ces deux techniques sont limitées par l'emploi de capteurs photovoltaïques ayant un faible rendement nominal (environ 12%) et un coût important, ce qui ne permet pas actuellement leur développement. La puissance appelée par un compresseur nécessite une grande surface de capteurs car leur puissance spécifique est d'environ 100 à 130 W/m². De plus le stockage de l'électricité est coûteux et volumineux. Enfin, aujourd'hui, le prix de rachat de l'électricité solaire par EDF avantage la réintroduction de l'électricité dans le réseau et non l'utilisation in situ [22].

I.2.2 Techniques basées sur un processus thermomécanique :

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

I.2.2.1 Le cycle Rankine: La chaleur récupérée met en mouvement un fluide qui lui-même actionne une turbine produisant de l'électricité. Cette électricité peut être utilisée dans un cycle classique à compression.

I.2.2.2 Le cycle à jet de vapeur: La chaleur est utilisée pour produire un jet de vapeur à très grande vitesse. Ce jet provoque dans son entourage un vide puissant qui permet de vaporiser

de l'eau à faible température dans l'évaporateur et de refroidir l'ambiance. La vapeur ainsi créée rejoint ensuite le flux primaire "moteur" et est refroidie dans le condenseur.

Ces techniques, et notamment le cycle à jet de vapeur, en sont encore au stade recherche pour être utilisées avec l'énergie solaire [22].

I.2.3 Techniques basées sur la sorption d'un gaz :

La sorption est le phénomène physique par lequel une substance se fixe, ou est incorporée dans une autre substance, qui est dans un état physique différent. Nous étudierons plus précisément ce phénomène dans le deuxième chapitre. Les technologies utilisant ce phénomène physique sont à l'heure actuelle les seules techniques commercialement disponibles. Plusieurs publications établissent un état de l'art de ces technologies [23] [21].

I.2.3.1 La machine à absorption :

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

La solution saline (Cf. **Figure I.2**) à faible concentration d'absorbant est chauffée dans le désorbeur (ou générateur) grâce à la chaleur motrice, et libère de l'eau sous forme gazeuse, qui va se condenser dans le condenseur. La solution saline est ainsi concentrée. Le réfrigérant se vaporise dans l'évaporateur et est absorbée par la solution concentrée dans l'absorbeur. L'absorption est un phénomène exothermique, qui est défavorisée par une haute température. C'est pourquoi un dispositif (généralement une tour de refroidissement humide) est utilisé pour évacuer la chaleur générée dans l'absorbeur et dans le condenseur.

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

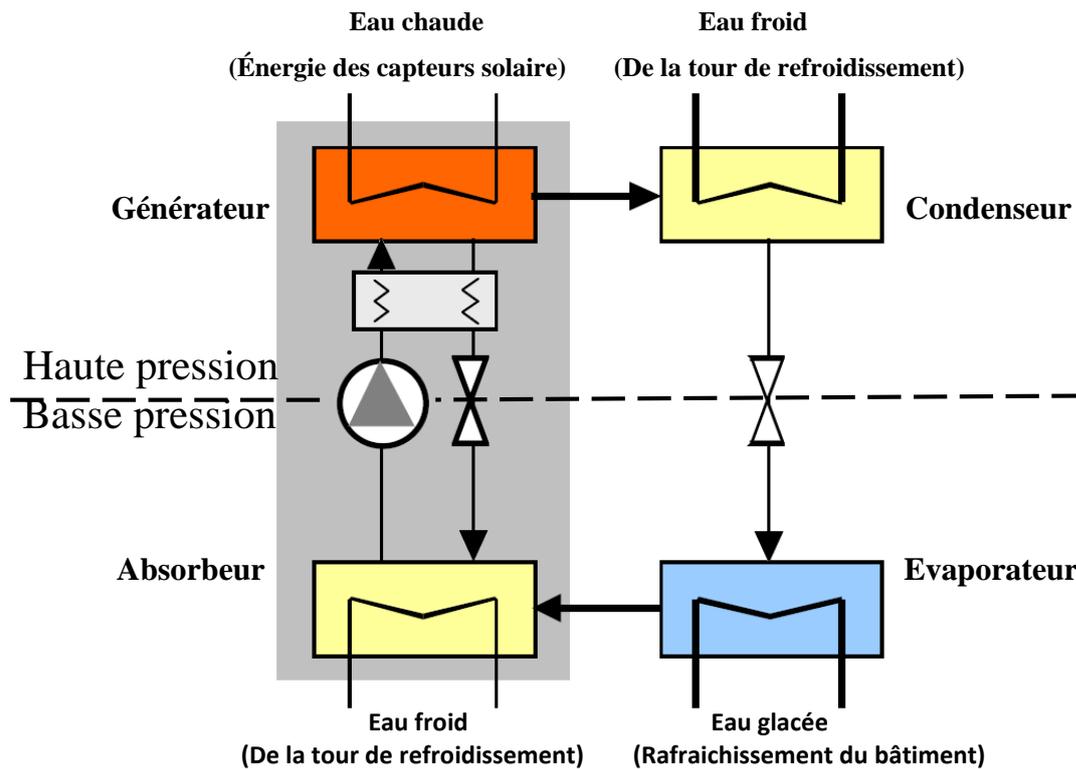


Figure III.2 : Schéma de fonctionnement du cycle absorption à simple effet

Dans les cas de climatisation solaire, où la température de la source froide est supérieure à 5°C, la paire eau/bromure de lithium est généralement utilisée. Avec un système (H₂O/LiBr), la cristallisation de la solution doit être évitée par un contrôle de la température de refroidissement. La température de la source chaude est comprise entre 80 et 100°C. Dans des conditions optimales de fonctionnement, le coefficient de performance thermique est de l'ordre de 0,7 [24]. D'importants travaux ont été menés pour améliorer l'efficacité des machines à absorption. Ils ont conduit aux machines double effet qui permettent d'obtenir un COP_{th} compris entre 1 et 1,2 avec des températures de génération demandées de l'ordre de 130°C à 160°C, c'est-à-dire nécessitant des capteurs à concentration suivant le rayonnement solaire. L'utilisation de ces machines double effet avec l'énergie solaire reste une application possible et intéressante en termes d'efficacité [25], mais marginale (1 ou 2 opérations recensées [26]) en raison des températures de fonctionnement demandées.

Les machines à absorption simple effet sont actuellement disponibles auprès de nombreux fabricants pour différentes capacités allant de 15 kW à plusieurs centaines de kilowatts. On assiste aujourd'hui à d'importants travaux de recherche et développement se focalisant sur le

développement de petites machines à absorption compatibles avec l'énergie solaire destinées in fine au marché résidentiel.

I.2.3.2 La machine à adsorption :

Lorsque le gaz ne se fixe pas dans un liquide, mais sur un matériau hautement poreux, on parle d'adsorption. Cette faculté de matériaux tels que les gels de silice, ou les Zéolites est utilisée dans des machines les couplant à la vapeur d'eau pour réaliser le cycle de refroidissement (présenté à la **Figure III.3**). L'utilisation de matériaux solides oblige alors à avoir un fonctionnement cyclique et non continu comme pour l'absorption. Deux masses de matériaux adsorbants sont alternativement chauffées par la source chaude pour désorber la vapeur d'eau qui va ensuite se condenser dans le condenseur. Puis l'eau est ensuite évaporée dans l'évaporateur où le froid est alors produit. Cette vapeur d'eau s'adsorbe ensuite sur le matériau adsorbant et le cycle recommence.

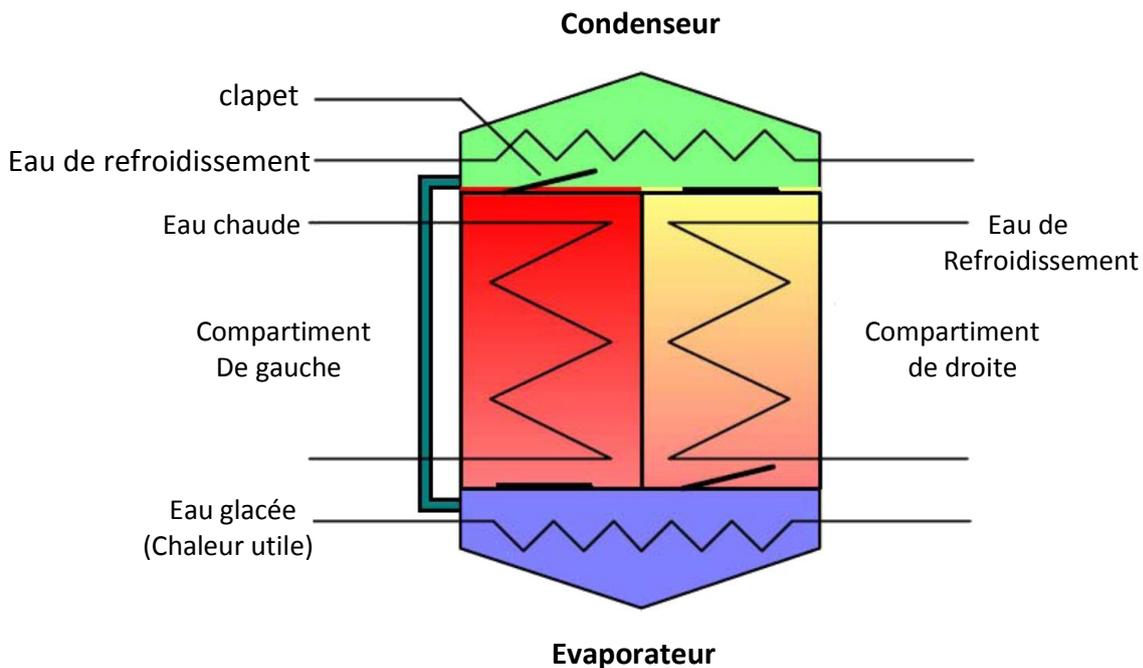


Figure III.3 : Schéma de fonctionnement d'une machine à adsorption

Les machines à adsorption sont peu développées et concernent pour l'instant seulement des puissances importantes, à partir de 70 kW. Le COP_{th} est d'environ 0.6 [24]. Des recherches sont actuellement conduites pour améliorer le caractère cyclique générateur de beaucoup d'instabilité, ainsi que pour améliorer leur compacité et proposer des petites puissances [27].

I.2.3.3 Le desiccant cooling :

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

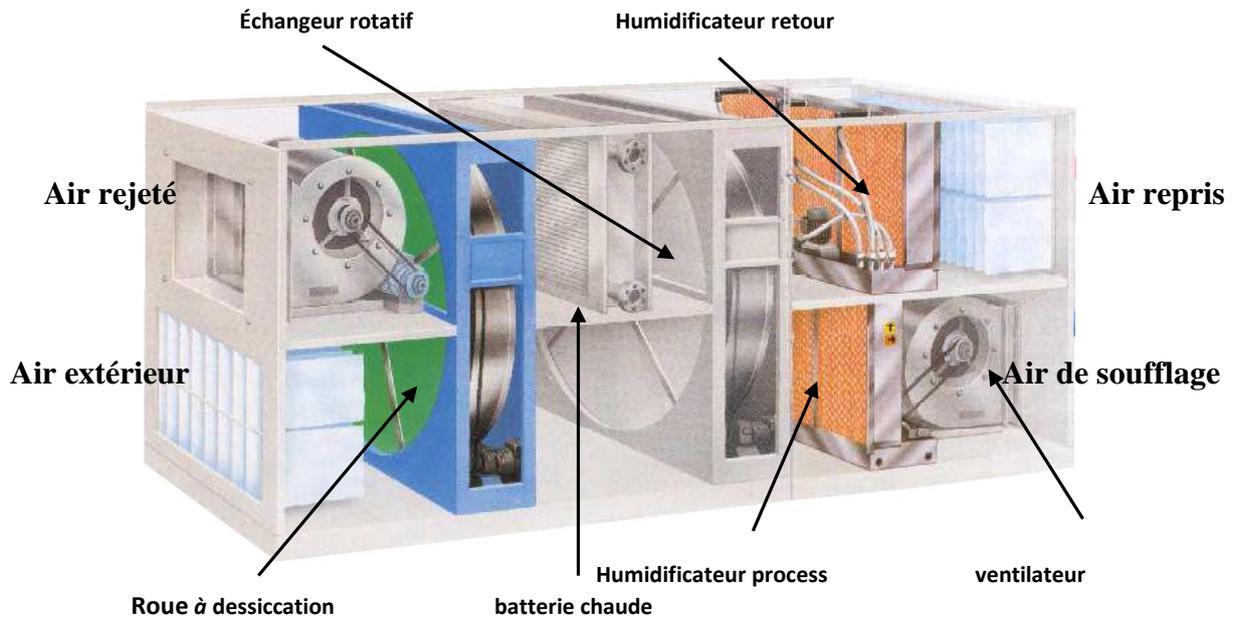


Figure III.4 : Schéma de système à dessiccation solide avec capteurs solaires (DEC solide), utilisant des roues à sorption et de récupération de chaleur (source: Fraunhofer ISE). Ci dessous : étapes de fonctionnement d'une unité DEC (source:Munters).

Le desiccant cooling est donc un cycle ouvert, qui s'appuie principalement sur l'utilisation de l'eau et de son potentiel de changement de phase pour refroidir l'air soufflé dans un local. Pour maximiser l'effet de la chaleur latente de vaporisation de l'eau, le flux d'air ventilé est tout d'abord desséché dans une roue à dessiccation (roue composée d'une matrice circulaire de fibre de verre ou d'aluminium sur laquelle est déposé le matériau dessicatif) ou dans un lit dans lequel est vaporisée une solution desiccant, puis refroidi dans un échangeur, et enfin humidifié adiabatiquement dans un laveur d'air. Le fonctionnement d'un tel système (cf. **Figure III.4**) nécessite un flux d'air de régénération qui permet de refroidir l'air du process dans l'échangeur, puis de régénérer le matériau dessicatif après avoir été réchauffé par la source chaude du système. La température de régénération nécessaire peut varier de 50 à 80°C. Le COP_{th} est d'environ 0.5 [24]. La puissance de refroidissement est limitée par le débit de renouvellement

d'air. Ce système doit donc être utilisé pour des bâtiments où les besoins sont restreints, ou pour une application de rafraîchissement simple.

De nouveaux types d'échangeurs [28], ainsi que la technologie à sorbant liquide [29] sont actuellement en cours de développement.

I.3 Principe du cycle évaporatif à dessiccation en phase solide :

Le desiccant cooling 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, (cf. **Figure III.5**). 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%.

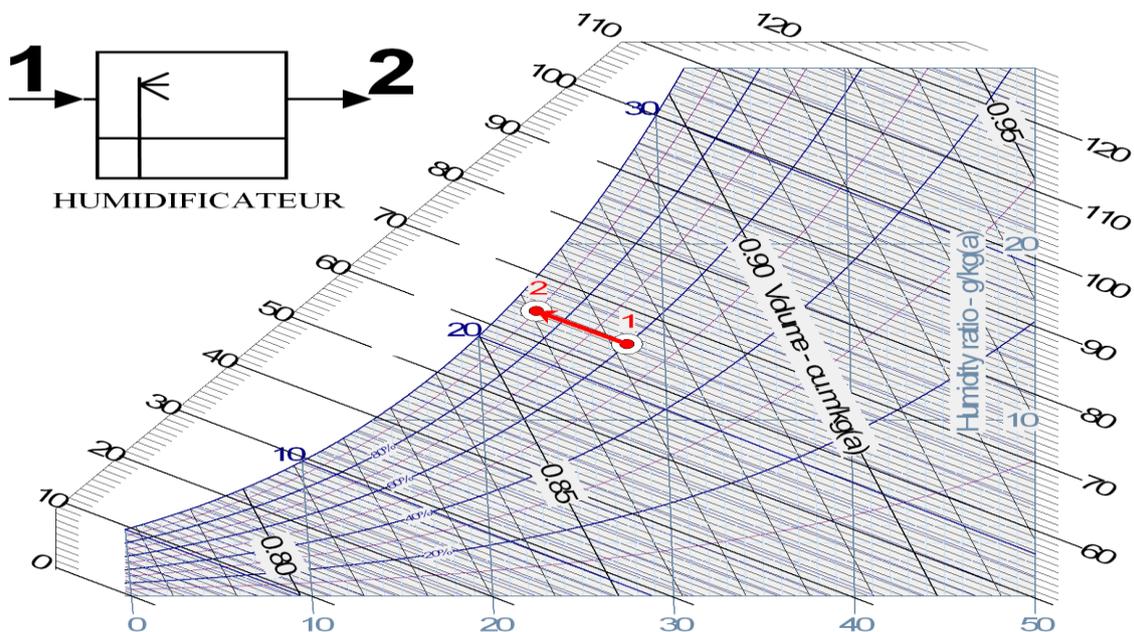


Figure III.5 : Système à humidification directe avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide

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 directe, 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 I.6**, la centrale complète est représentée. Seuls les éléments surlignés en rouge sont mis en route pour le fonctionnement du mode indirect.

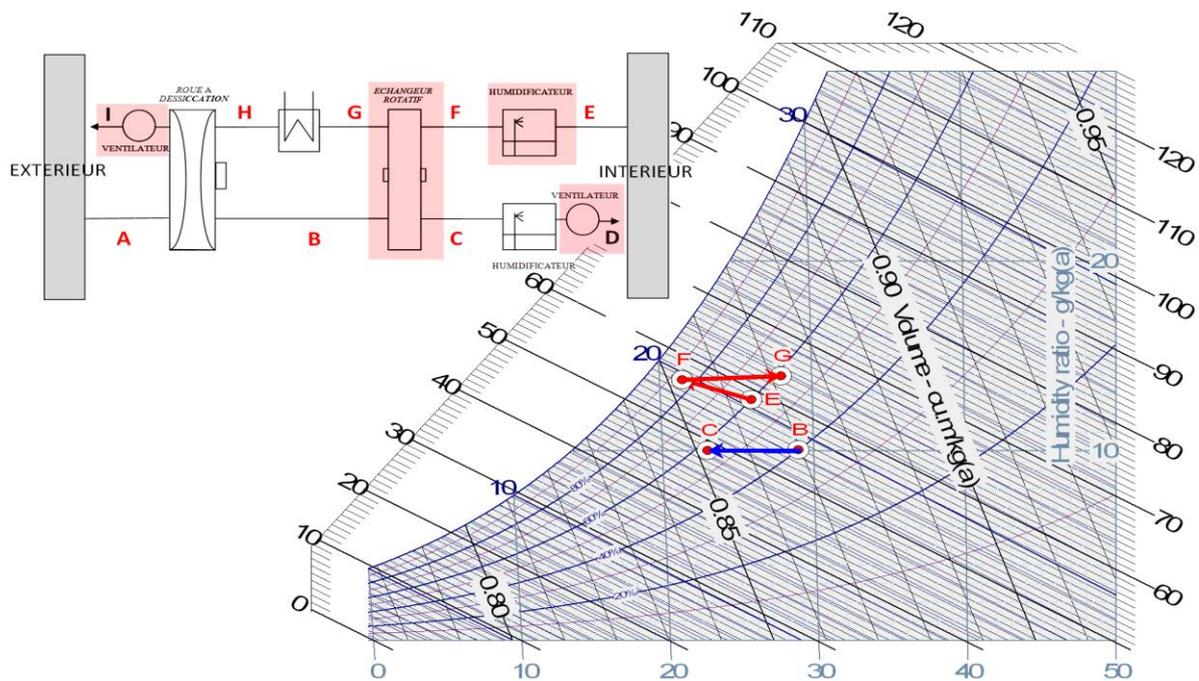


Figure III.6 : Mode humidification indirecte avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide

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 (Cf. **Figure III.7**). Après être refroidi sensiblement comme

dans le mode humidification directe, 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.

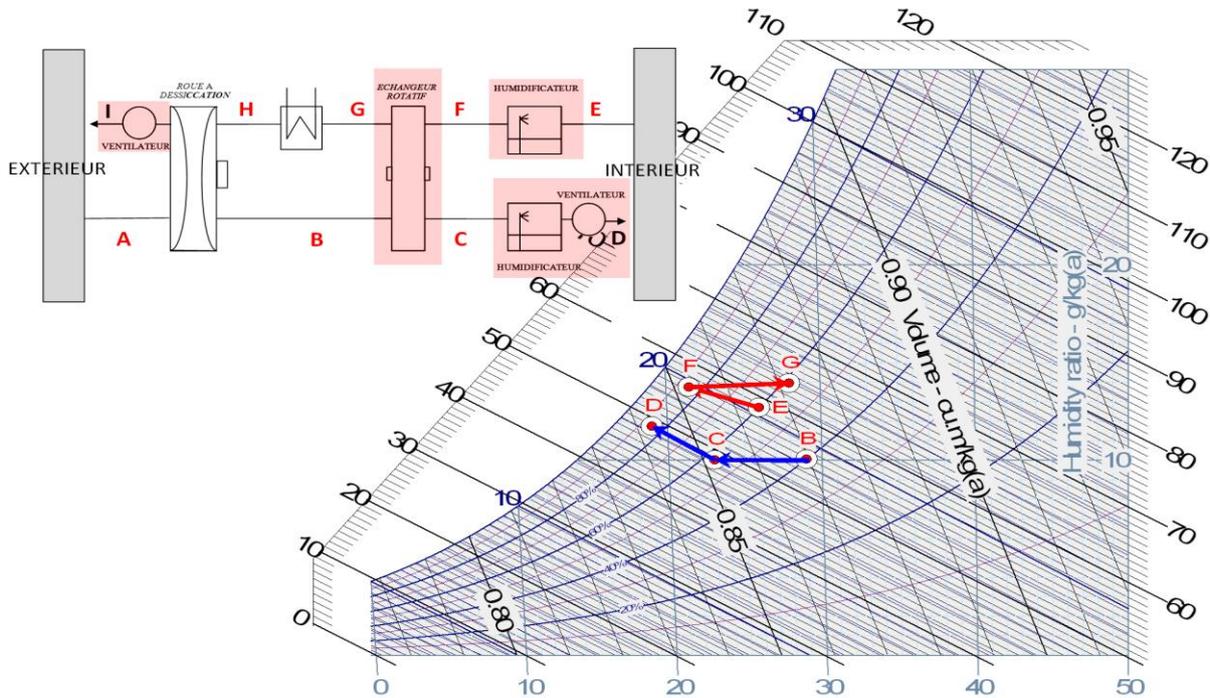


Figure III.7 : Mode humidification combinée avec l'évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide

- Le mode desiccant cooling (cycle de Pennington, [30]) permet de refroidir l'air de ventilation, tout en réduisant ou en maintenant l'humidité spécifique extérieure. Le fonctionnement de ce mode est représenté à la **Figure III.8**. 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→B) puis refroidi dans l'échangeur sensible (B→C), et enfin humidifié adiabatiquement dans un laveur d'air(C→D). Le fonctionnement d'un tel système utilise la veine de reprise, préalablement refroidi dans l'humidificateur (E→F) afin de refroidir l'air du process dans l'échangeur sensible (F→G). Cet air est ensuite réchauffé à travers un échangeur de chaleur air/eau, ou batterie chaude (G→H). La température de régénération varie de 50 à 90°C, en fonction du type de roue utilisée et de la puissance froide nécessaire. Sur la **Figure III.8**, 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 dessiccatif (c'est-à-dire de faire baisser la teneur en eau du matériau) en le réchauffant (H→I) et en entraînant l'humidité avec lui.

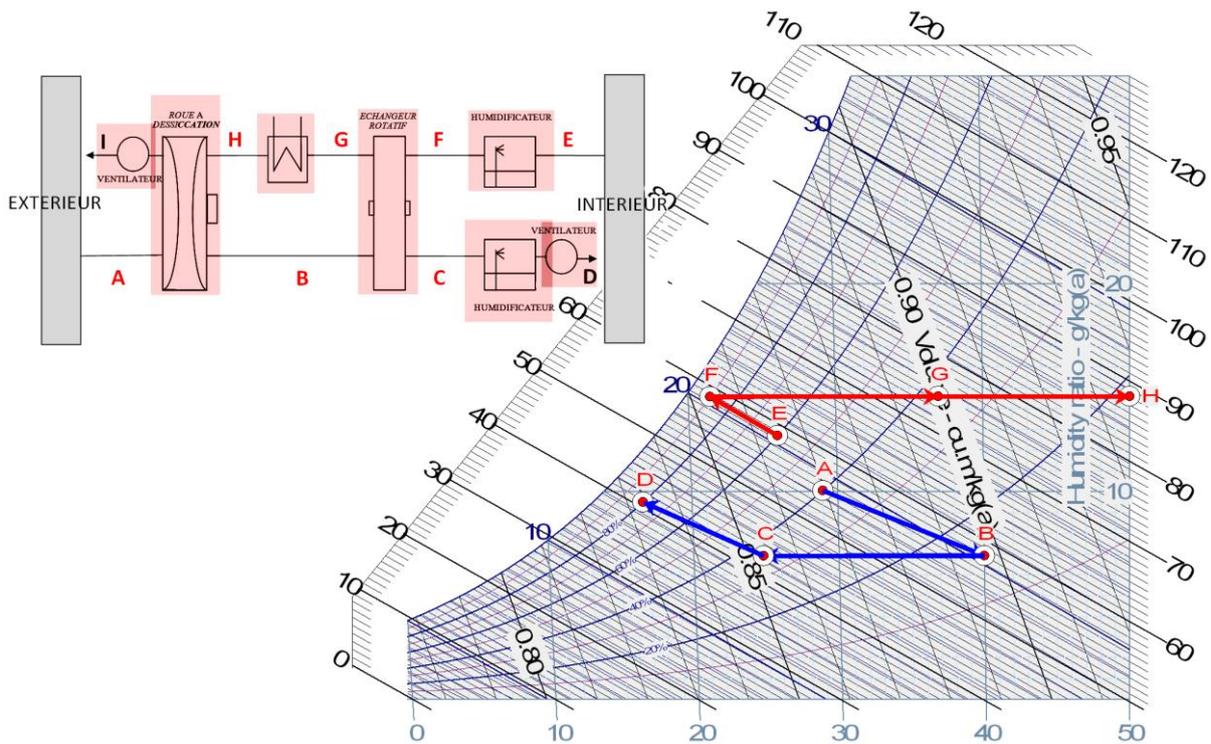


Figure III.8 : Mode desiccant cooling (cycle Pennington) et son évolution correspondante sur le diagramme de l'air humide

Une centrale desiccant cooling peut donc fonctionner selon les 4 modes de fonctionnement énoncés ci-dessus, ainsi qu'en mode ventilation simple. Ces cycles sont en "tout air neuf". La puissance développée par chaque mode est différente et est fortement influencée par les conditions d'air (température et humidité) de l'air extérieur et intérieur, puisque le potentiel de refroidissement évaporatif est conditionné par la température humide de l'air considéré. La régulation d'une telle centrale est donc primordiale pour obtenir de bonnes performances et utiliser les différents modes à bon escient.

Le cycle de Pennington est le cycle le plus utilisé pour une application en climat tempéré [22].

III.4 Phénomène de sorption :

III.4.1 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 solutions 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 tout produit de masse totale m :

- Une masse m_e 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:

$$w = \frac{m_e}{m_s} \quad \text{en base sèche}$$

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

La capacité de sorption d'un matériau est liée à la pression de vapeur saturante $P_{v,sat}$ à la surface du produit. L'activité de l'eau a_w dans un produit est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau P_{ve} du mélange constitué par l'air humide et la pression de vapeur saturante $P_{vsat,e}$ 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 (φ_a) de l'air ambiant est alors égale à 100 fois l'activité de l'eau.

L'activité de l'eau dans un produit dépend principalement de sa teneur en eau w et de sa température T_d . 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 a_w ou de l'humidité relative de l'air en équilibre HR_a 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.

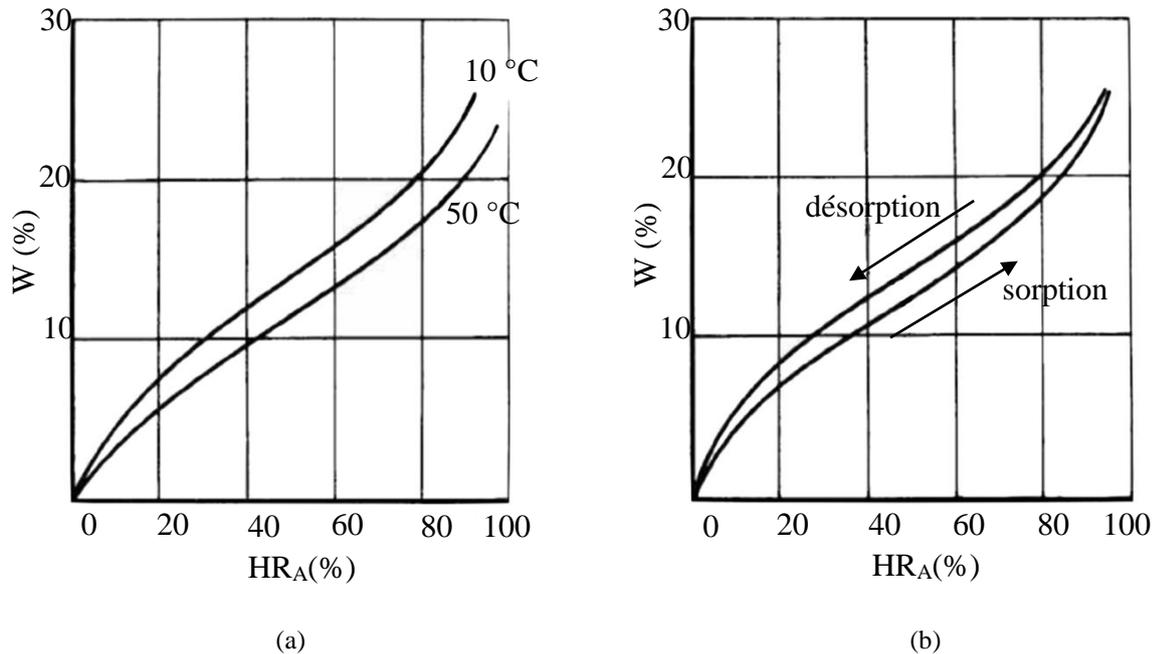


Figure III.9 : (a) Influence de la température sur la sorption (exemple) (b) Isothermes de Sorption – désorption (exemple)

Figure III.9 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 (Cf. **Figure III.9**). 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 (L_s) 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 [22].

III.5 Matériaux dessicants :

III.5.1 Généralités :

Les sorbants sont des matériaux qui ont une capacité d'attirer, de contenir et de conserver d'autres substances liquides ou gazeuses. Les matériaux dessicants sont une classe particulière des sorbants et qui ont une grande affinité pour l'eau.

En réalité tous les matériaux sont dessicants c'est-à-dire qu'ils attirent et contiennent de la vapeur d'eau. Le bois, les fibres naturelles, les argiles et plusieurs matériaux synthétiques attirent et libèrent de l'humidité comme les dessicants commerciaux mais ce qui leur manque c'est la capacité de contenir de l'humidité. Par exemple, les fibres de laine attirent 23% de leur masse à sec de l'eau et le nylon peut contenir 6% de sa masse en eau. Par contre, un dessicant commercial attire de l'eau de 10 à 1100% de sa masse. Cette capacité varie en fonction de l'humidité de l'entourage. De plus, les dessicants continuent à attirer de la vapeur même dans le cas où l'ambiance est sèche, c'est une caractéristique qui n'est pas commune aux autres matériaux.

Tous les matériaux dessicants ont un comportement similaire: ils attirent la vapeur jusqu'à ce qu'un certain état d'équilibre avec l'ambiance soit atteint. L'humidité est extraite du dessicant en le chauffant à des températures qui varient entre 50°C et 260°C tout en l'exposant à un courant d'air extracteur. Après le séchage du dessicant, il faut le refroidir pour qu'il puisse à nouveau attirer de la vapeur. La sorption génère de la chaleur sensible égale à la chaleur latente de la vapeur d'eau plus une chaleur additionnelle de sorption qui varie de 5 à 25% de la chaleur latente. Cette chaleur est transférée au dessicant et à l'air ambiant. Ce phénomène d'attraction et de captage de l'humidité est appelé adsorption (sorption physique) ou absorption (sorption chimique) selon que le dessicant subit un changement chimique ou non pendant l'attraction de l'humidité. Pendant l'adsorption il n'y a pas de changement d'état du dessicant par contre dans l'absorption on a un changement d'état. Le sel de table est un exemple d'absorbant puisqu'il devient liquide en absorbant de l'humidité.

III.5.1 Types de matériaux dessicants :

Les matériaux dessicants peuvent être des liquides ou des solides. Les absorbants sont liquides et les adsorbants sont solides.

III.5.1.1 Les absorbants :

Dans un déshumidificateur à absorption l'air entre en contact avec une solution liquide dessiccante. Le liquide a une pression de vapeur plus faible que l'eau à la même température. Cette faible pression attire la vapeur d'eau de l'air qui est déshumidifié. La pression de vapeur d'une solution liquide est proportionnelle à sa température et inversement proportionnelle à sa concentration.

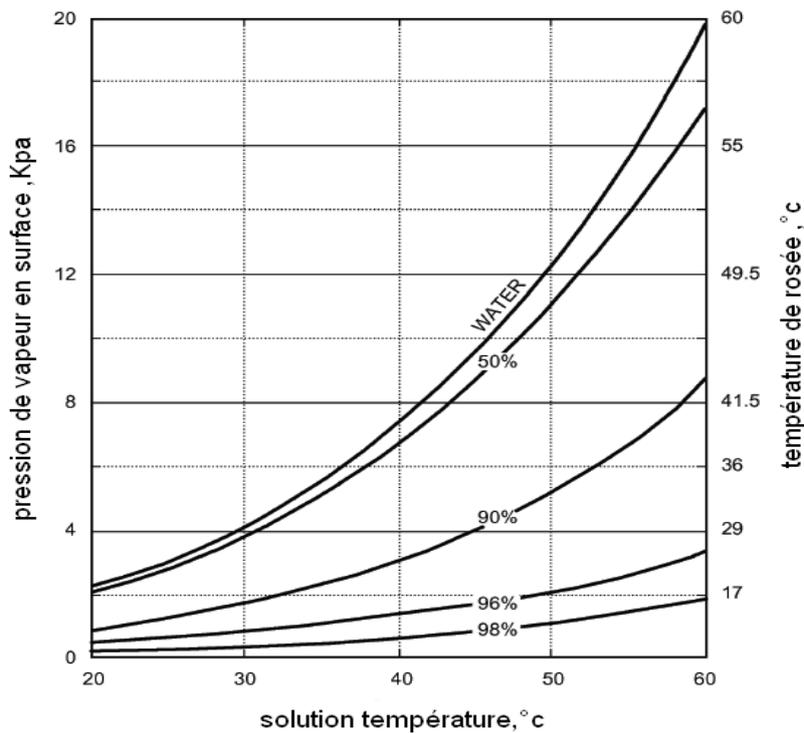


Figure III.10 : Pression de vapeur à la surface pour différentes solutions d'eau- triéthylène glycol [31]

La **figure III.10** montre l'effet de l'augmentation de la température sur la pression de la vapeur en surface pour différentes solutions d'eau et de triéthylène glycol. Plus la teneur en glycol augmente plus la pression à la surface diminue. De même la **figure III.11** montre l'effet de la température sur la pression de vapeur du chlorure de lithium.

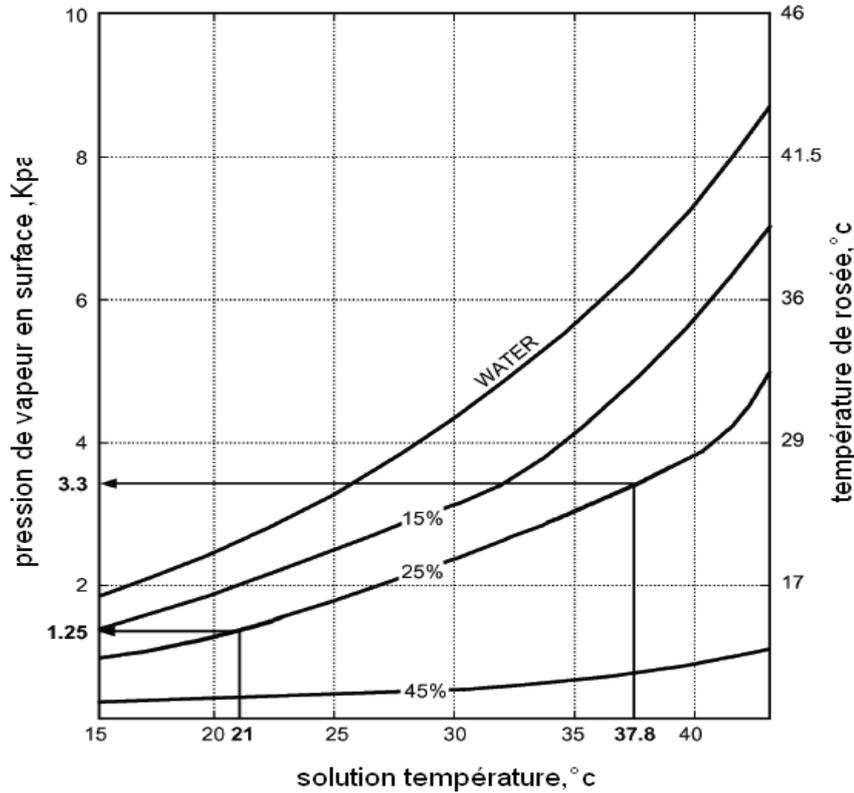


Figure III.11 : Pression de vapeur à la surface pour différentes solutions d’eau- Chlorure de Lithium [31]

Le Chlorure de Lithium a une très grande affinité pour l’eau. Chaque molécule peut capter deux molécules d’eau, même dans l’état sec. Pour plus de deux molécules d’eau par molécule de LiCl, le matériau devient liquide et continue à absorber de l’eau. Si la solution est en équilibre avec l’air à une humidité relative de 90%, près de 26 molécules d’eau sont attachées à une molécule de LiCl. Ce qui présente une absorption d’eau plus de 1000% de la masse à sec du dessiccant. En pratique le processus d’absorption est limité par la surface du dessiccant qui est exposée et par le temps de contact avec l’écoulement.

III.5.1.2 Les adsorbants :

Les adsorbants sont des solides avec une énorme surface interne par unité de masse. Ils ont généralement des surfaces spécifiques supérieures à 100 m²/g, atteignant même quelques milliers de m²/g (SUN et al.). Les adsorbants attirent l’eau à cause d’un champ électrique à leur surface. Quand la totalité de la surface est couverte de molécules, l’adsorbant peut également capter de l’eau parce que la vapeur se condense dans la première couche et remplit les capillarités du matériau. Comparés aux absorbants, la capacité des adsorbants de capter de l’eau

est faible. Par exemple le zéolite synthétique peut adsorber 17% de sa masse en eau quand l'air est à 21°C et à une humidité relative de 20%. Par contre le chlorure de lithium peut absorber 130% de sa masse dans les mêmes conditions. Mais les adsorbants solides ont d'autres caractéristiques favorables. Ils peuvent être fabriqués avec des tolérances précises et avec des diamètres de pores contrôlés. La molécule d'eau a un diamètre effectif de 3,2 Angström. Ainsi un matériau de pores de diamètre 4 Angström adsorbe l'eau et laisse intacte les molécules de diamètre supérieur. Cette caractéristique a une grande application industrielle. Les adsorbants industriels les plus courants sont les suivants (ASHRAE, 09, SUN et al.) : **Les charbons actifs, les zéolites, les gels de silice et les alumines activées**. Les zéolites se distinguent des trois autres types par leurs structures cristallines conduisant à des micropores régulières de taille uniforme (ils sont aussi appelés tamis moléculaires).

III.5.1.2.a Les charbons actifs :

Les charbons actifs sont de loin les adsorbants les plus fabriqués et utilisés industriellement. Ils peuvent être obtenus à partir d'un grand nombre de matériaux carbonés (bois, charbon, noix de coco, résidus pétroliers, etc.), par des processus de carbonisation suivis de processus d'activation dûment contrôlés. Ils sont fréquemment utilisés pour la récupération des vapeurs de solvant et d'hydrocarbures, la décoloration de sucres, etc.

III.5.1.2.b Les zéolites :

Les zéolites sont des alumino-silicates cristallins et poreux, résultant des enchaînements de tétraèdres de SiO_4 et AlO_4 . De nombreuses structures différentes de zéolites existent selon la manière dont sont arrangés ces tétraèdres et selon le rapport Si/Al. Deux des zéolites les plus courantes sont les zéolites A et X. Le rapport Si/Al dans les zéolites est toujours supérieur à 1, mais n'a pas de limite supérieure. En règle générale une zéolite riche en Aluminium a une grande affinité pour l'eau et d'autres molécules polaires par contre une zéolite pauvre en Aluminium est plutôt hydrophobe et adsorbe de préférence les hydrocarbures.

III.5.1.2.c Les gels de silice :

Les gels de silice ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) peuvent être obtenus par précipitation de silice en faisant réagir un solution de silicate de sodium avec un acide minéral (sulfurique ou chlorhydrique).

Le gel obtenu est ensuite lavé, séché et activé. La structure des pores est créée par l'agglomération des particules sensiblement sphériques de dimension à peu près uniforme comprise entre 2 et 20 nanomètre. Ces gels adsorbent de préférence les molécules polaires comme l'eau et l'alcool.

III.5.1.2.d Les alumines activées :

Elles sont obtenues par déshydratation thermique du tri hydrate d'alumine. Comme les gels de silice, les alumines activées sont très hydrophiles et sont couramment utilisés pour le séchage.

III.5.3 La durée de vie des matériaux dessiccants :

La durée de vie des matériaux dessiccants dépend largement de la quantité et du type d'écoulement qu'ils dessèchent. Les produits commercialisés ont une durée de vie qui varie de 10000 à 100000 heures avant qu'il soit nécessaire de les remplacer. Deux mécanismes diminuent la capacité d'adsorption des dessiccants :

- Changement des propriétés de sorption du dessiccant après plusieurs réactions avec des contaminants.
- Perte de surface effective à cause de la dégradation hydrothermique.

Les absorbants thermiques sont plus réactifs avec les composants de l'air autre que la vapeur que les adsorbants. Par exemple, certains composés sulfurés peuvent réagir avec le chlorure de lithium pour former le sulfate de lithium, non dessiccant. Si la concentration des composés sulfurés dans l'écoulement d'air est inférieure à 10 mg/kg et le dessiccant est utilisé 24h par jour, la capacité de réduction sera de 10 à 20% après trois années d'usage. Par contre si la concentration est de 30mg/kg, cette réduction aura lieu en une année.

Les adsorbants sont moins sensibles aux réactions avec les contaminants. Par contre, ils sont sensibles aux contraintes dues au changement rapide de la teneur en humidité. Ainsi, le silica - gel en contact avec un courant d'air à basse température et une humidité relative de 95% et puis soumis à une régénération (6 fois par heure et 24 heures par jour), subit une fragilisation à la surface qui réduit sa capacité de 10% par année [31].

CHAPITRE IV

Simulation d'une installation de climatisation solaire

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va discuter la faisabilité de l'installation à dessiccation solaire dans les conditions climatiques réelles. Pour ce-là, on a choisi l'environnement TRNSYS afin d'étudier le comportement dynamique de ce système dans le climat de OUARGLA

IV.2 Présentation de l'installation étudiée :

Le dessiccant est un cycle ouvert qui repose principalement sur l'utilisation d'eau et son potentiel de changement de phase pour refroidir l'air soufflé dans la pièce. Afin de maximiser l'effet de la chaleur latente de l'évaporation de l'eau, le flux d'air frais (air de process) doit être séché dans la roue de dessiccation, puis refroidi dans l'échangeur et enfin humidifié dans l'humidificateur.

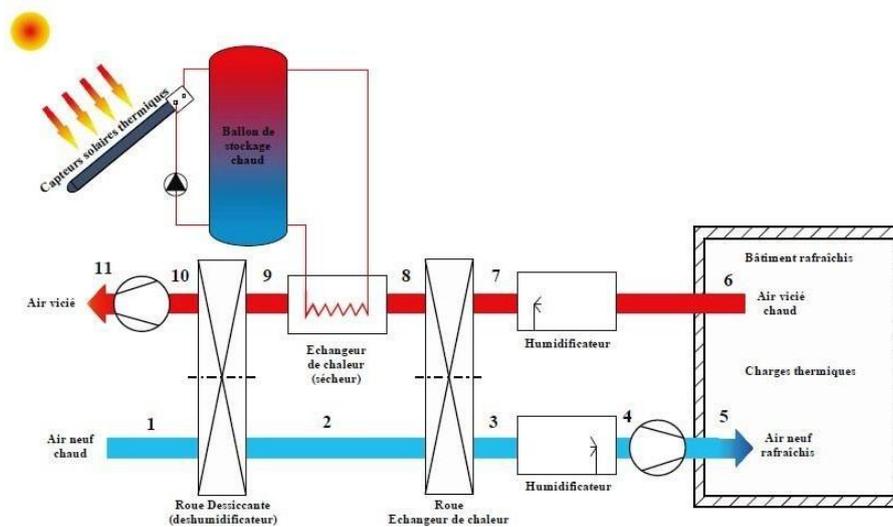


Figure IV.01 : Schéma d'un système à dessiccation solide avec roue à sorption

IV.3 Les composants de l'installation à dessiccation :

IV.3.1 Roue dessiccation « Rd » :

La Roue dessiccation « 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. L'efficacité de la roue et donne par :[32]

$$\epsilon_{rd} = \frac{T_{psRd} - T_{peRd}}{T_{reRd} - T_{peRd}} \frac{T_2 - T_1}{T_9 - T_1}$$

Avec :

T_{peRd} : Température de l'air frais (process air) entrant à la Rd.

T_{psRd} : Température de l'air frais (process air) sortant à la Rd.

T_{reRd} : Température de l'air de régénération (régénération air) entrant à la Rd.

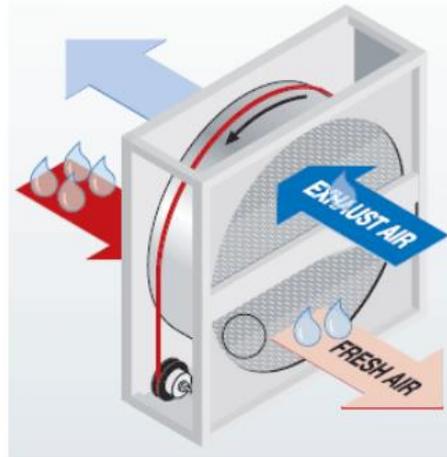


Figure IV-02 : Roue dessiccation

Le procédé de déshumidification de l'air par adsorbants solides se caractérise par l'utilisation des propriétés d'un agent ayant une grande affinité avec l'eau. Ces systèmes peuvent être utilisés jusqu'à des hygrométries très basses (-60°C de point de rosée).

IV.3.2 Roue sensible « RS » :

L'échange de chaleur dépend de l'écart de température entre les fluides des deux côtés de la roue, du rapport des débits des fluides et de la nature des fluides.

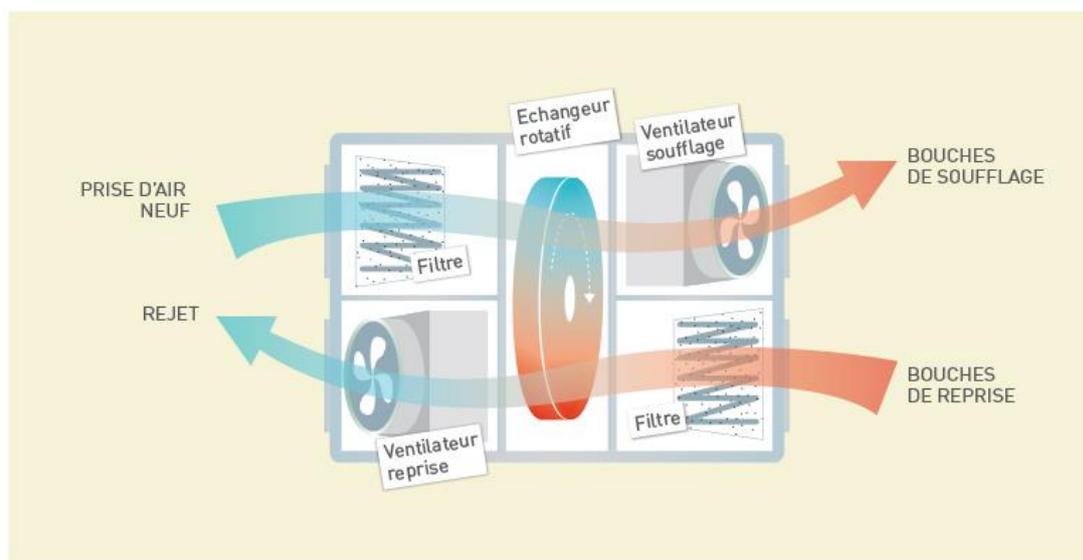


Figure IV-03 : Roue sensible (échangeur rotatif)

Dans notre cas, les fluides sont de 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

$$\epsilon_{rs} = \frac{T_{peRs} - T_{psRs}}{T_{peRs} - T_{reRs}} = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_7}$$

Avec :

T_{peRs} : Température de l'air frais (process air) entrant à la RS.

T_{psRs} : Température de l'air frais (process air) sortant à la RS.

T_{reRs} : Température de l'air de régénération (regeneration air) entrant à la RS.

Le principe général des récupérateurs par accumulation ou encore appelé récupérateurs à régénération est de récupérer la chaleur contenue dans l'air extrait en faisant transiter cet air au travers d'un matériau accumulateur. Ce matériau accumulateur est ensuite soumis au flux d'air neuf et lui cède sa chaleur.

Le matériau accumulateur peut être imprégné ou non d'un produit hygroscopique de manière à permettre les échanges tant de chaleur sensible que d'humidité.

IV.3.3 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 dessicant dans la RD. Plus la température de l'air sortant sera élevée, plus la régénération est meilleure. Cette batterie est alimentée par l'eau chauffée à l'énergie solaire dans les panneaux solaire [32].

IV.3.4 Capteur solaire :

Un capteur solaire est un échangeur de chaleur qui transforme les radiations solaire à une énergie interne transmise par un fluide (généralement eau, air ou huile).

IV.4 Description général sur les conditions réelles :

IV.4.1 Description structurelle du local :

La structure que nous allons étudier est un local électrique 30 kV qui sera installé Près du Bâtiment de Contrôle dans le site de production de Haoud Berkaoui (Algérie).

IV.4.2 Conditions Des Sites :

- Localisation : Haoud Berkaoui - Wilaya de Ouargla (Algérie)
- Latitude : 31° 93' N (environ)
- Longitude : 5° 40' E (environ)

- Altitude : + 226 m (par rapport à la mer)
- Vitesse du vent : 180 km/h max

IV.4.3 Conditions de projet à l'extérieur :

	TEMPERATURE BULB SEC [°C]	TEMPERATURE BULB HUMIDE [° C]	HUMIDITE' RELATIVE [%]
Eté, extérieure	50	32,1	30
Hiver, extérieure	-5	-5,2	95

Tableau IV.1 : les plages de température et humidité de site [34]

Malgré les conditions ci-dessus, les unités de climatisation doivent pouvoir continuer à Fonctionner à la température extérieure de 55 °C.

STRUCTURES	COEFFICIENT DE TRANSMISSION [Watt/ m2 K]
Mur extérieur	0,76
Toit	0,49
Fenêtre	3,50
Porte extérieure	3,00

Tableau IV.2 : Coefficients de transmission thermique [34]

ZONES DU BATIMENT	CHALEUR SENSIBLE
l'illumination	18 [Watt/m2]
Equipements Tableau Electrique	4000 [Watt]

Tableau IV.3 : Chaleur produite par l'illumination et les équipements [34]

IV.4.4 Description du système de climatisation :

Le système de climatisation sera composé par n° 2 x 100% unités split de climatisation d'air avec une prise d'air extérieure commune. Les unités intérieures sont montées sur le plafond et comprennent un conduit pour la distribution de l'air, tandis que les unités externes seront

placées sur un piédestal à l'extérieur. A défaut d'un climatiseur, l'unité de réserve se démarra automatiquement.

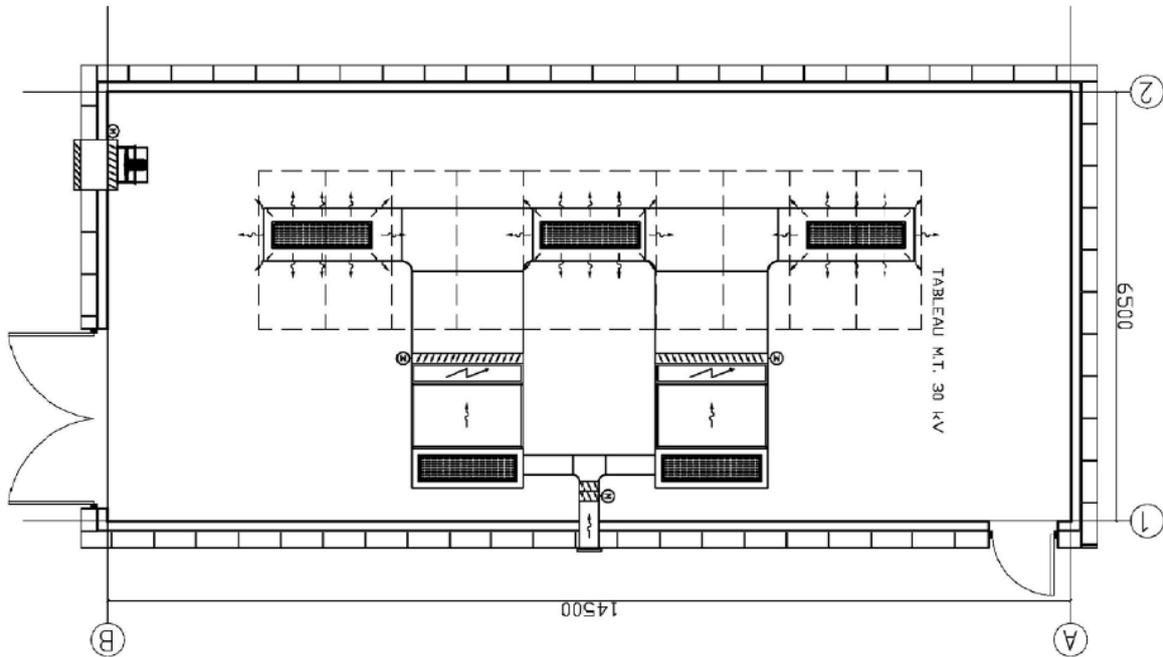


Figure IV-04 : Disposition préliminaire du système HVAC



Figure IV-05 local électrique 30 kV, site de production de Haoud Berkaoui (Algérie)

IV.4.5 Données techniques :

Nombre des zones : 1

Surface de plancher : 95 m²

Puissance total de refroidissement total : 20,0 kW

_ Puissance sensible : 15,5 kW

_ Puissance latent : 4,5 kW

Débit d'air de soufflage : 3.800 m³/h (environ 1.049 l/s)

IV.5 Simulation avec TRNSYS :

IV.5.1 Aperçu sur TRNSYS :

Le logiciel TRNSYS (Simulateur de système transitoire prononcé «transis») a été développé à l'origine par l'Université du Wisconsin dans les années 1970 TRNSYS est un programme de simulation de systèmes transitoires avec une structure modulaire. Il reconnaît un langage de description de système dans lequel l'utilisateur spécifie les composants qui constituent le système et la manière dont ils sont connectés. La bibliothèque TRNSYS comprend de nombreux composants couramment trouvés dans les systèmes d'énergie thermique et électrique, ainsi que des routines de composants pour gérer l'entrée de données météorologiques ou d'autres fonctions de forçage dépendant du temps et la sortie des résultats de simulation. La nature modulaire de TRNSYS donne au programme une flexibilité considérable et facilite l'ajout au programme de modèles mathématiques non inclus dans la bibliothèque standard TRNSYS. TRNSYS est bien adapté aux analyses détaillées de tout système dont le comportement dépend du passage du temps. TRNSYS est devenu un logiciel de référence pour les chercheurs et ingénieurs du monde entier. Les principales applications comprennent : les systèmes solaires (systèmes solaires thermiques et photovoltaïques), les bâtiments bas consommation et les systèmes HVAC, les systèmes d'énergie renouvelable, la cogénération, les piles à combustible. [33].

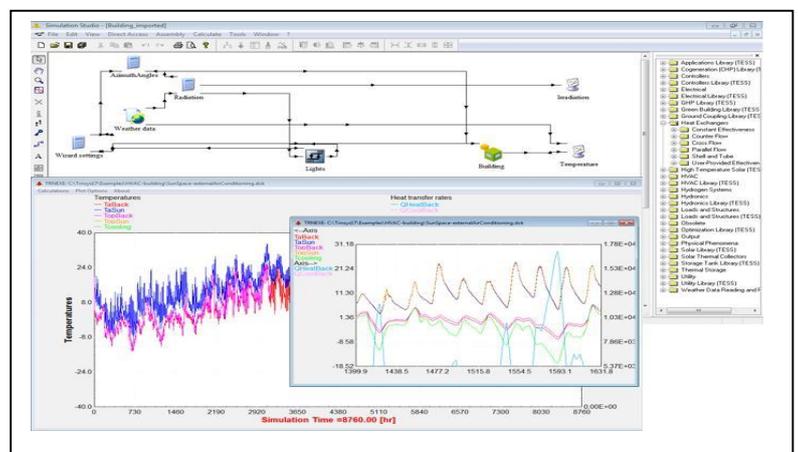


Figure IV-06 : Configuration et composant de TRNSYS

Dans TRNSYS, les composants d'un système sont appelés « Types » et chaque type a un ensemble de paramètres, les entrées (inputs) et les sorties (output) qui décrivent et définissent la manière dont il permettra de relier d'autres types [33]. Pour chaque composant, en double-cliquant dessus, on peut observer les onglets :

- ❖ **PARAMETER** dans lequel on entre les paramètres (constants pendant la simulation).
- ❖ **INPUTS** qui indique les valeurs d'entrées, variables durant la simulation et qui sont issu d'un autre composant.
- ❖ **OUTPUT** qui indique les valeurs de sorties que l'on obtient par ce composant.
- ❖ **EXTERNAL FILES** dans lequel on précise si nécessaire les chemins d'accès des fichiers externes appelés par le composant.

A. TRNSYS Simulation studio :

TRNSYS Simulation Studio est un progiciel de simulation complet contenant plusieurs outils, de programmes de moteurs de simulation et des programmes de connexion graphique pour compléter et un tableur. Il est un outil intégré qui peut être utilisée dans la conception d'un projet pour sa simulation.

Le studio de simulation comprend également un gestionnaire de sortie où vous contrôlez les variables qui sont intégrées, imprimées et / ou tracées, et un gestionnaire de log /erreur qui vous permet d'étudier en détail ce qui s'est passé lors d'une simulation.

B. TRNBuild :

TRNBuild est une interface pour créer et éditer l'ensemble des informations non exigées par la géométrie du modèle de construction TRNSYS. TRNBuild permet une certaine souplesse à l'utilisateur étendue dans l'édition des propriétés des matériaux des murs et couches, de créer des profils de ventilation et d'infiltration, l'ajout des gains en définissant des plafonds ou planchers radiants et les occupants pour le calcul de confort.

Cette composante modélise le comportement thermique d'un bâtiment divisé en différentes zones thermiques. Afin d'utiliser ce composant, un prétraitement séparé doit d'abord être exécutée.

Le programme lit dans TRNBuild et traite un fichier contenant la description du bâtiment et génère deux fichiers qui seront utilisés par le composant type 56 pendant la simulation TRNSYS. Le fichier contenant la description du bâtiment traitée par TRNBuild peut être généré par l'utilisateur avec n'importe quel éditeur de texte ou avec le programme TRNBuild interactif.

IV.5.2 Métronome :

Métronome est une combinaison unique de sources de données fiables et d'outils de calcul sophistiqués. Il donne accès aux années typiques et aux séries chronologiques historiques. Métronome génère des années typiques précises et représentatives pour n'importe quel endroit sur Terre. Vous pouvez choisir parmi plus de 30 paramètres météorologiques différents. La base de données comprend plus de 8 000 stations météorologiques, cinq satellites géostationnaires et une climatologie des aérosols calibrée à l'échelle mondiale. Sur cette base, des modèles d'interpolation sophistiqués, basés sur plus de 30 ans d'expérience, fournissent des résultats avec une grande précision dans le monde entier.

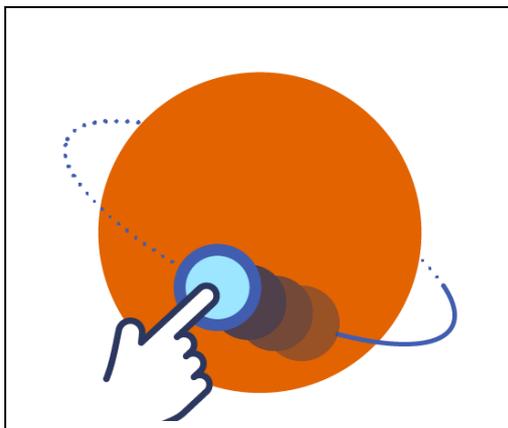


Figure IV-07 : Vue sur Meteonorm

IV.5.3 L'installation de dessiccation sur TRNSYS :

On va étudier la faisabilité de l'installation à dessiccation dans les conditions climatiques réelles. Pour cela, on a choisi d'étudier le comportement dynamique de ce système dans le climat de OUARGLA.

La plate-forme TRNSYS 17 a été l'environnement final de simulation. Cela nous a permis d'intégrer les composants. La simulation de l'installation est structurée de trois parties principales :

- La boucle de production de chaleur.
- La production de froid.
- Le couplage avec le bâtiment.

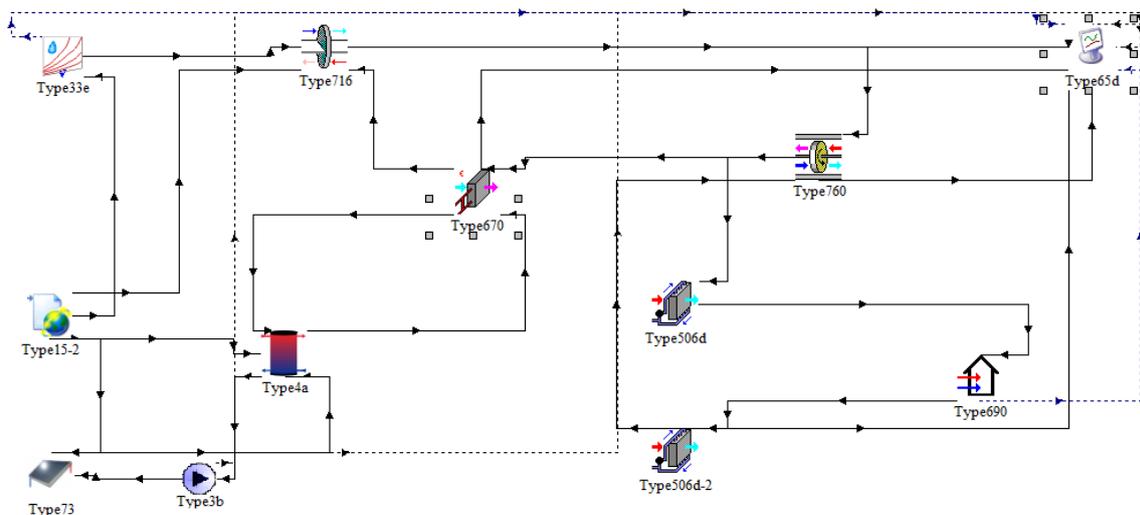


Figure IV-08 : Système de climatisation solaire sous environnement TRNSYS

Avant de présenter les résultats de la simulation, il est nécessaire de rappeler les principaux composants appelle « type » dans TRNSYS :

TRNSYS Model : Type 73 Ce composant modélise les performances thermiques d'un capteur plat théorique. Le tableau de collecteur total peut se composer de collecteurs connectés en série et en parallèle. La performance thermique de l'ensemble de la matrice de capteurs est déterminée par le nombre de modules de la série et les caractéristiques de chaque module. Ce modèle prévoit les analyses théoriques d'une plaque plane. Le modèle en régime permanent Hottel-Whillier est utilisé pour évaluer la température performance.

TRNSYS Modèle : Type 15 Ce composant sert à lire des données à intervalles de temps réguliers à partir d'un fichier de données météorologiques externe, interpoler les données (y compris le rayonnement solaire pour les surfaces inclinées) à des pas de temps de moins d'une heure, et faire il est disponible pour les autres composants TRNSYS. Le modèle calcule

également plusieurs termes utiles, y compris le secteur la température de l'eau, la température effective du ciel et les fonctions de forçage de la saison de chauffage et de refroidissement.

TRNSYS Modèle : Type 3b Ce modèle de pompe calcule un débit massique à l'aide d'une fonction de contrôle variable, qui doit avoir une valeur comprise entre 1 et 0, et une capacité de débit maximale fixe (spécifiée par l'utilisateur). Dans ce cas de Type 3, la puissance de la pompe peut également être calculée, soit comme une fonction linéaire du débit massique, soit par une relation définie par l'utilisateur entre le débit massique et la consommation d'énergie. Une partie spécifiée par l'utilisateur de la puissance de la pompe est convertie en énergie thermique du fluide.

TRNSYS Modèle : Type 506d Humidificateurs et un dispositif de refroidissement pour lequel l'utilisateur fournit les conditions de l'air d'entrée et l'efficacité et le modèle calcule les conditions d'air de sortie.

TRNSYS Modèle : Type 670 Echangeur de chaleur air/eau.

TRNSYS Modèle : Type 4a Ballon de stockage pour fournir instantanément du fluide chaud à la température requise au système.

TRNSYS Modèle : Type 716 Roue dessiccation qui est pour le rôle de déshumidifier l'air entrant et aussi nous fournit la température de régénération nécessaire.

TRNSYS Modèle : Type 760 Récupération rotatif de chaleur air / air.

TRNSYS Modèle : Type 65d Traceur graphique

TRNSYS Modèle : Type 33e Les données psychrométriques

TRNSYS Modèle : Type 690 Ce composant modélise une capacité localisée à nœud unique à l'aide d'une équation différentielle. Il prend ensuite des entrées de charge de chauffage, de charge de refroidissement sensible et latente et, en utilisant la connaissance de la capacité forfaitaire, transforme ces charges en une température modulante.

IV.6 Résultats et discussions :

L'étude s'effectue sur un locale électrique au niveau de la région HAOUED BERKAOUI OUARGLA dans la période d'été à partir du **05 mai jusqu'à le 07 septembre**. La charge de refroidissement est estimée à 20 kW dont la charge de refroidissement sensible est de 15.5 kW et la charge de refroidissement latente est de 4.5 kW

Le débit d'air de processus et de régénération est de 9000 kg/h.

La surface de panneau solaire 6m².

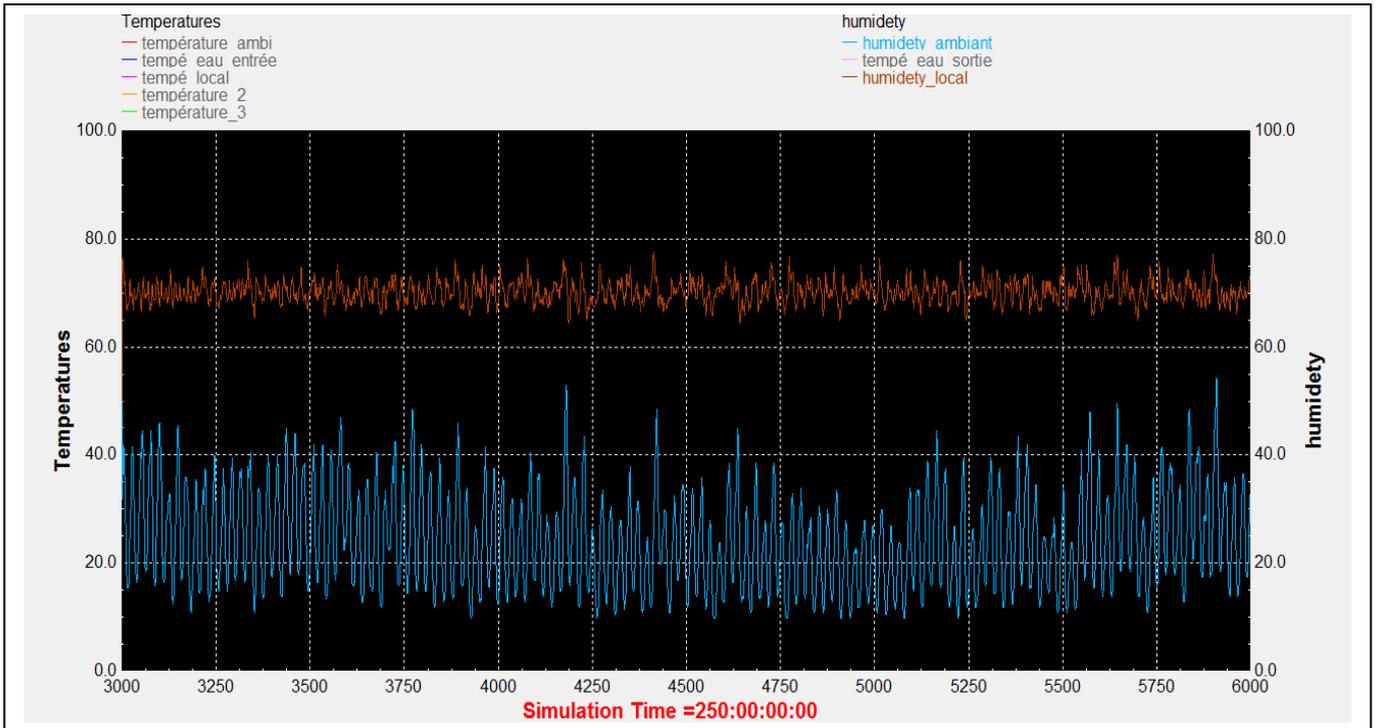


Figure IV-09 : la variation d'humidité ambiante et l'humidité de local électrique

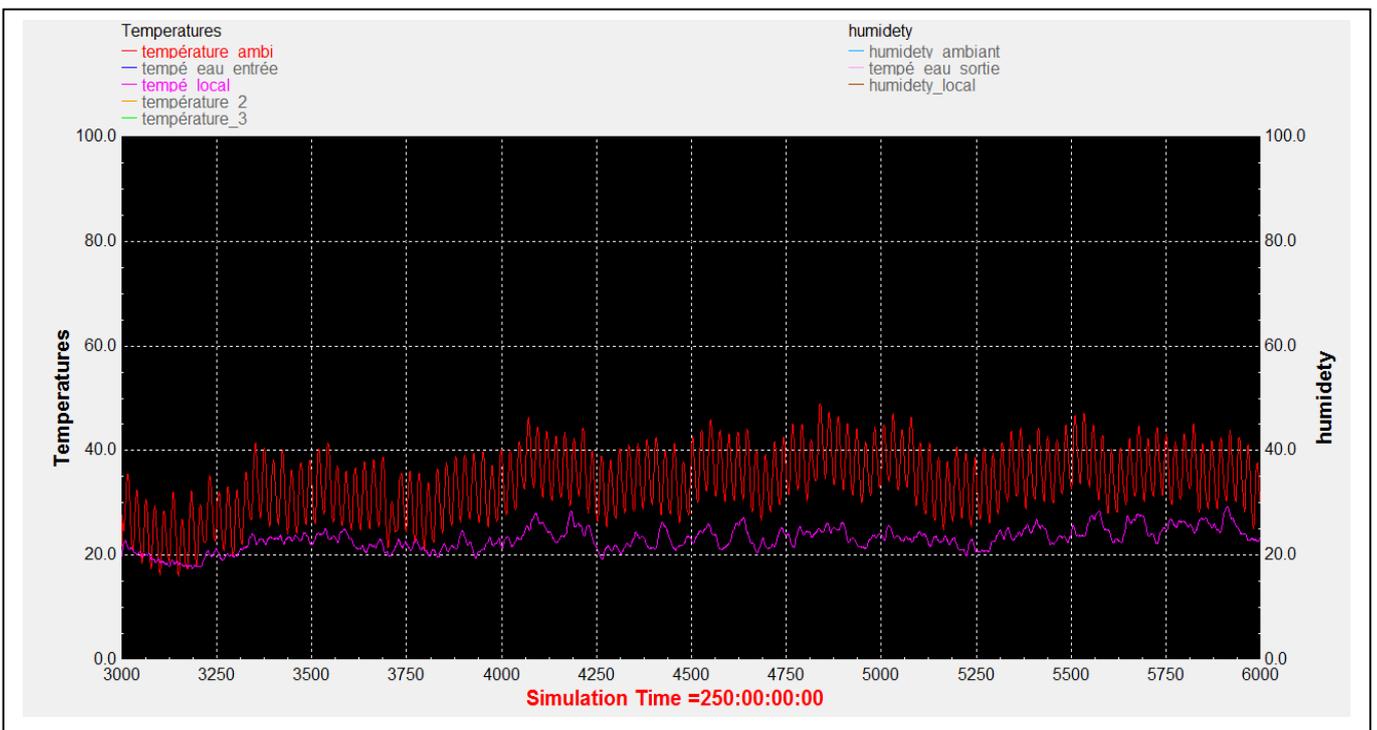


Figure IV-10 : la variation de température ambiante et la température de local électrique

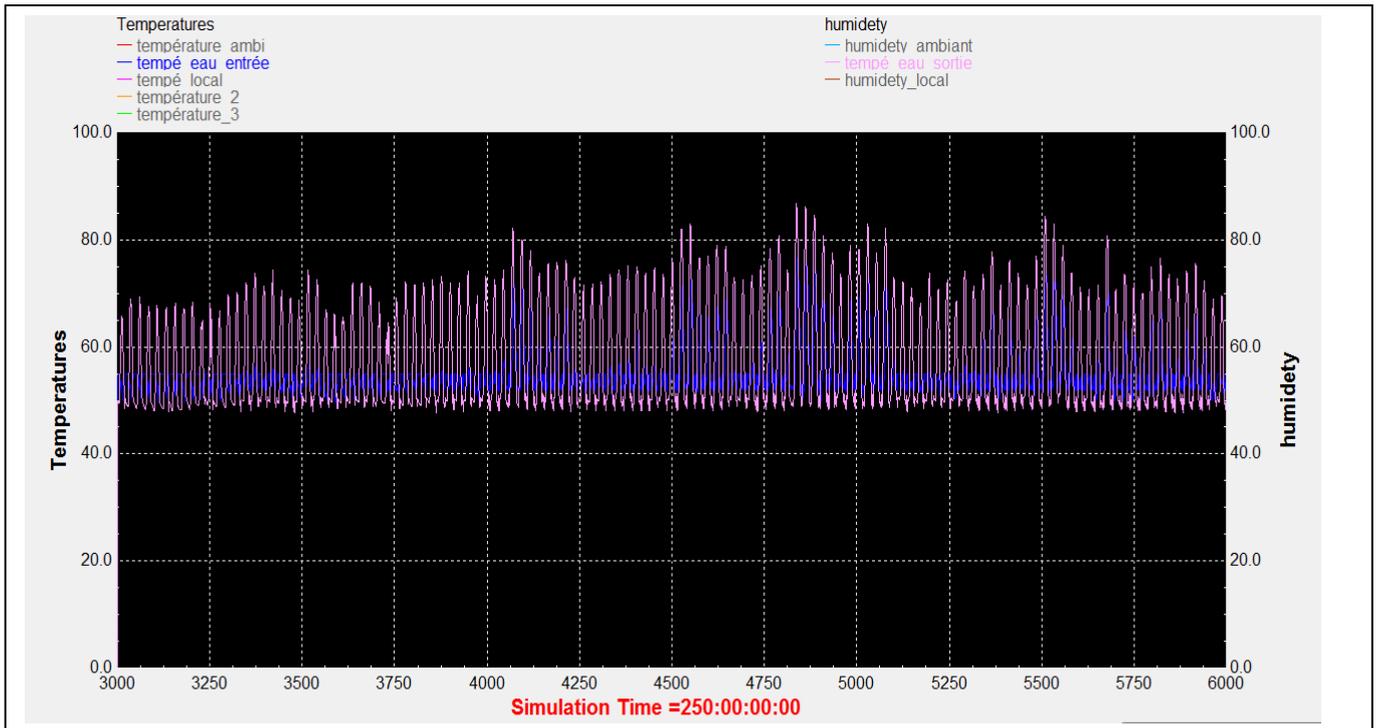


Figure IV-11 : la variation de la température d'eau entrant et sortant a le capteur solaire

IV.6.1 L'influence de température ambiante sur l'efficacité de la RS :

Le débit d'air est fixé à 6000 kg/h, on a choisie Cinque point déférant de la même journée et ont calculé l'efficacité de la RS

Temps	T2	T3	T7	ϵ
201 :05 :00	26.08	24.75	24.05	0.6551
201 :07 :00	27.19	25.44	24.51	0.6529
201 :10 :00	31.05	27.07	24.96	0.6546
201 :13 :00	34.05	28.36	25.36	0.6547
201 :16 :00	35.91	29.12	25.56	0.6560
201 :18 :00	35.57	29.03	25.60	0.6559

Tableau IV-04 : Paramètre de simulation pour débit d'air fixé

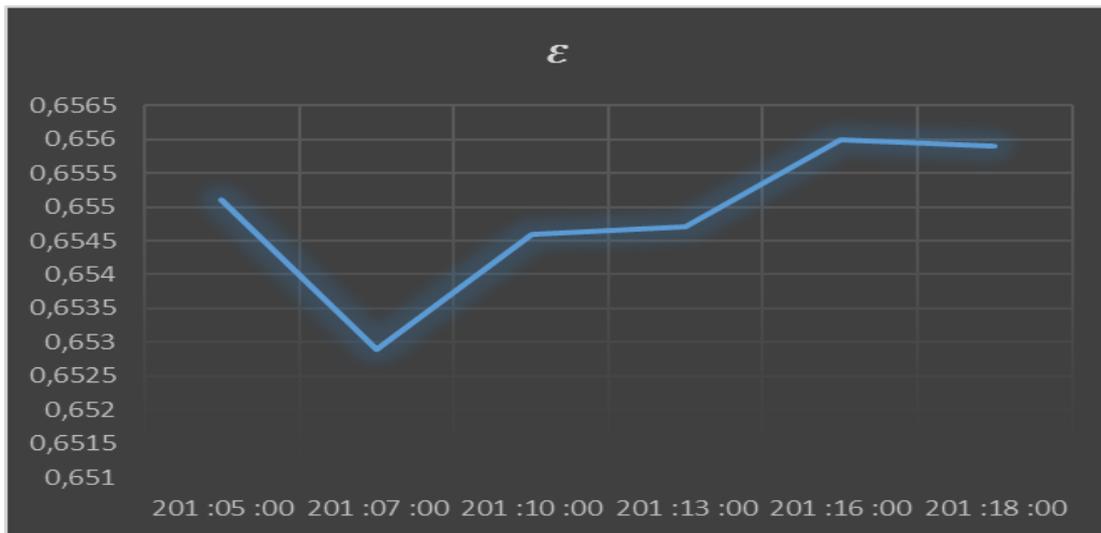


Figure IV.12 : La variation de l'efficacité ϵ RS durant une journée avec un débit d'air fixé

La figure IV-12 montre la variation de l'efficacité ϵ RS en fonction des moments différents de la même journée **201(20 juillet 2020)**. On remarque l'augmentation de l'efficacité ϵ RS après le lever du soleil c'est à dire augment avec augmentation de la température ambiante.

IV.6.1 L'influence de débit d'air variable sur :

Dans cette étape on va étudier l'influence de débit d'air avec différentes valeurs sur l'efficacité de la RS, Température de local et l'humidité de local pour cela on a fixé la température et l'humidité d'ambiante, alors on a choisi la journée et l'heure suivant **201 :13 :00 (midi du 20 juillet 2020)** température ambiante 46.2 °c et l'humidité relative 13.5%

Débit d'air [kg/h]	T2	T3	T7	ϵ	T local	H local [%]
4000	32.41	27.66	27.57	0.98	36.15	47.85
5000	33.47	27.71	26.13	0.784	32.45	54.62
6000	34.05	28.36	25.36	0.65	29.82	59.62
7000	34.34	29.04	24.91	0.56	27.86	63.61
8000	34.56	29.67	24.61	0.49	26.34	66.79

Tableau IV.04 : Paramètre de simulation pour débit d'air variable

A. l'efficacité de la RS

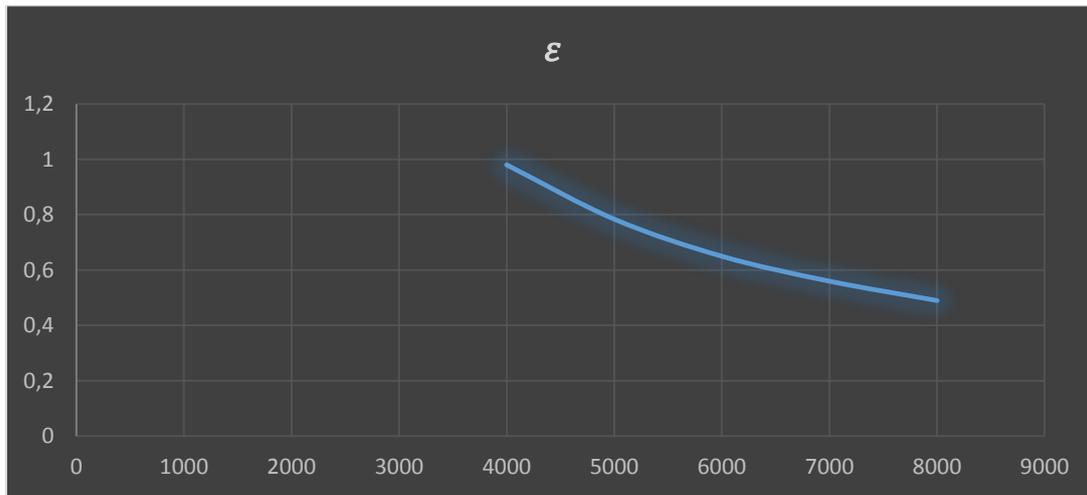


Figure IV.13 : La variation de l'efficacité ϵ RS en fonction du débit d'air

La figure IV-13 montre la variation de l'efficacité ϵ RS en fonction des différents débits d'air dans la même journée **201 :13 :00(midi 20 juillet 2020)** la température et l'humidité ambiante et fixé 46.2°C et 13.5 %. On remarque que l'efficacité ϵ RS diminue après l'augmentation de débit d'air (L'air n'a pas assez de temps pour l'échange de chaleur)

B. Température de local

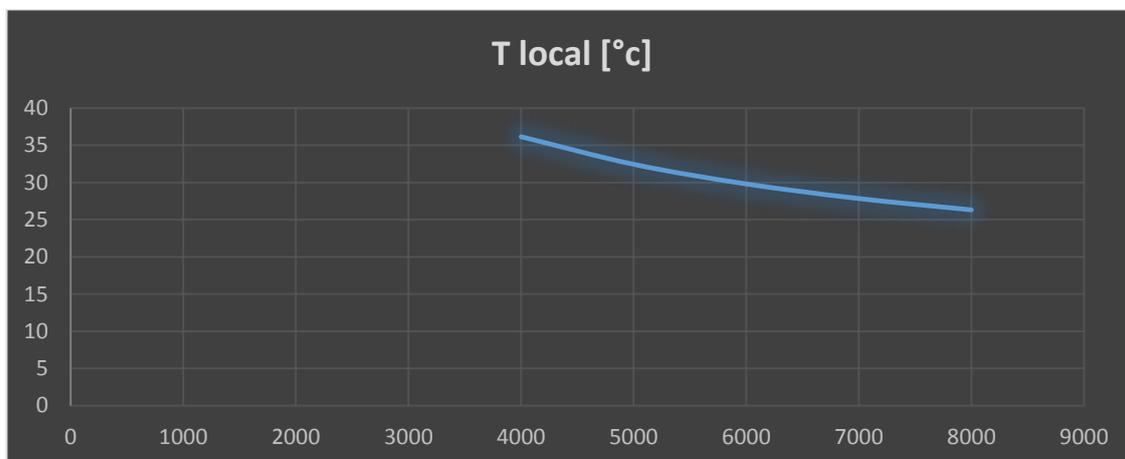


Figure IV.14 : La variation de température du local en fonction du débit d'air

La figure **IV-14** montre la variation de température du local en fonction des différents débits d'air dans la même journée **201 :13 :00(midi 20 juillet 2020)** la température et l'humidité ambiante et fixé 46.2°C et 13.5% . on remarque que la température de local diminue jusqu'à 26.33°C C'est ce que nous voulons. (Lorsque on augmente le débit d'air le niveau de bruit augmente mais puisque on a dans un local électrique nous ne prenons pas en compte ce critère)

C. Humidité de local

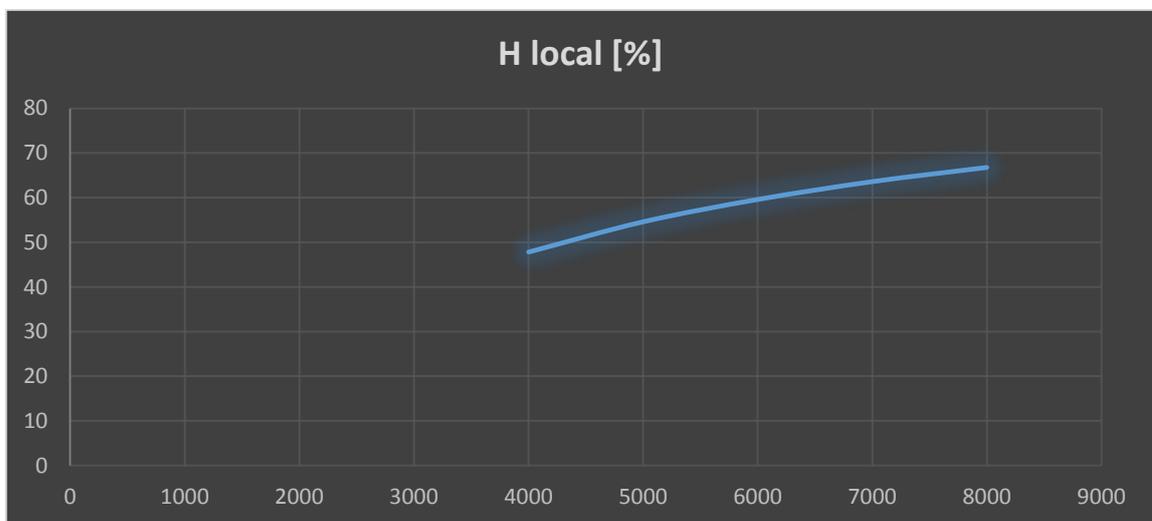


Figure IV.15 : La variation d'humidité relative du local en fonction du débit d'air

La figure **IV-15** montre la variation d'humidité relative du local en fonction des différents débits d'air dans la même journée **201 :13 :00(midi 20 juillet 2020)** la température et l'humidité ambiante et fixé 46.2°C et 13.5% . on remarque que l'humidité relative augmente.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons fourni une présentation détaillée 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. En plus de l'utilisation de l'énergie solaire, ce processus est «propre» car il présente l'avantage d'utiliser uniquement de l'eau comme agent de refroidissement.

Ce système présente de nombreux avantages, notamment, l'absence d'élément utilisant d'énorme quantité d'énergie électrique et de fluides frigorigènes nocif. Par rapport aux systèmes évaporatifs classique, il présente l'avantage de fonctionner sous des conditions plus rudes, grâce à la présence de la roue dessiccante. Le couplage avec un capteur solaire permis d'éliminer toute source d'énergie polluante ou autre.

L'objectif de ce travail, est l'étude de la faisabilité de l'installation à dessiccation dans les conditions climatiques réelles. Pour ce la, on a choisi l'environnement TRNSYS afin d'étudier le comportement dynamique de ce système dans le climat de OUARGLA

Après avoir les résultats et analysés la simulation, nous sommes constaté que plus le débit d'air est fort, plus que la température du local électrique diminue et Plus la température ambiant est élevée plus que l'efficacité de l'échangeur rotatif augment

A la fine nous constaté que le système de rafraîchissement solaire à dessiccation solide est capable de fonctionné et fournée la température que nous voulons dans la marge des conditions de confort sous le climat de OUARGLA

RÉFÉRENCE

BIBLIOGRAPHIQUE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ALTHOUSE Andrew d. et al. (2004), Modern refrigeration and air conditioning, 9ème édition,
- [2] KEMAJOU Alexis, (2007), De l'initiation à la maîtrise de la climatisation et du Conditionnement de l'air, MASSEU, 387 pages.
- [3] JEAN Desmons Aide-mémoire Génie climatique (2015) - 4ème édition.
- [4] JACK. Bossard.et al. (2015) Pratique de la climatisation en 24 fiches-outils
- [5] Site Web: <http://www.energieplus-lesite.be> (le:16/03/2021)
- [6] Meziani Fazia « Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG Mémoire de magister », université MOULOUD MAMERIE TIZI-OUZOU.
- [7] SAIFI Nour El Imane, « Etude d'une installation de climatisation solaire », Mémoire de magister, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent 2016.
- [8] A-A. HANIA. « Algérie énergie solaire et hydrogène », Office des publications universitaire, Ben Aknoun, Algérie, 2007.
- [9] M, Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (2012).
- [10] Mostefa Kara, k, « l'Algérie et l'Afrique face au défi climatique et énergétique », l'agence nationale des changements climatiques membre principal du GIEC (2005).
- [11] S.BENTOUBA. «10th International meeting on enegeticalphysics», Journal of scientific Research N 0 vol. 1 (2010).
- [12] CONNAISSANCE DES ENERGIES, solaire photovoltaïque, juin 2015.
- [13] CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives), « Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque », juin 2015.

Références Bibliographiques

- [14] TEMOUN Asmaa, « Etude et réalisation d'un banc d'essai d'un capteur solaire thermique plan », Mémoire de magister, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.
- [15] OME report, «Solar thermal in the Mediterranean region / solar thermal action plan», International Journal of energies (Dec. 2012).
- [16] Quoilin Sylvain, « Les Centrales Solaires à Concentration » Université de Liège Faculté des sciences appliquées Mai 2007.
- [17] Romain Guillo, « Fresnel Les centrales solaires à miroir de Fresnel », Ecosources
- [18] HESPUL Solaire thermique capteur vitré.
- [19] F.MYKIETA, « capteur solaire thermique à tubes sous vide », HELIOFRANCE, Septembre 2006.
- [20] David Wilgenbus, « La production directe de chaleur pour l'habitat », Fondation La main à la pâte, 31 Juillet 2001.
- [21] HENNING H.M. Solar assisted air conditioning of buildings - an overview. Applied Thermal Engineering, 2007, vol. 27,pp. 1734-1749.
- [22] THIBAUT VITTE. Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment: Proposition d'une stratégie de régulation du système Thèse de doctorat, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2007, 189 p.
- [23] FAN Y., LUO L., SOUYRI B., Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. Renewable and sustainable energy reviews, 2007, vol. 11, pp. 1759-1775.
- [24] BALARAS C.A., GROSSMAN G., HENNING H.-M., FERREIRA C.A.I., PODESSER E., WANG L., WIEMKEN E. Solar air conditioning in Europe – an overview, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, vol. 11 pp. 299 314.

Références Bibliographiques

- [25] TIERNEY M.J. Options for solar-assisted refrigeration—Trough collectors and double-effect chillers, *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, pp. 183-199.
- [26] LOKURLU A, MULLER G. Experiences with the worldwide first cooling system based on parabolic through collectos (SOLIPTEM PTC 1800) combined with double effect chillers, in: 1st Internaional conference for solar air cooling, Oct. 2005, Koster Banz, Allemagne, pp. 298-302.
- [27] FAN Y., LUO L., SOUYRI B., Review of solar sorption refrigeration technologies: Development and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2007, vol. 11, pp. 1759-1775.
- [28] MOTTA M., HENNING H-M., KALLWELLIS V., Performance Analysis of a novel desiccant and evaporative cooling cycle, in the 3rd International Conference on Heat Powered Cycles, Chypres, Octobre 2004.
- [29] PIETRUSCHKA D., EICKER D., HUBER M., SCHUMACHER J. Small liquid sorption cooling for building ventilation system. in 1st International conference for solar air cooling, oct. 2005, Koster Banz, Allemagne, pp. 96-100.
- [30] PENNINGTON N.A., Humidity changer for air conditioning, US Patent, 1955, 2 700 537.
- [31] ASHRAE, “Fundamentals”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, (SI Edition), 2009.
- [32] Abdel karim HADJI « Etude de la technique de rafraichissement solaire par dessiccation solide dans la région de Biskra» Pour obtention du diplôme de Magister Université de Biskra juin 2014
- [33] Mr BELKESSAM Hafidh « Contribution à la valorisation de l'utilisation de l'énergie solaire pour des besoins de climatisation et de conditionnement d'air » Pour obtention du diplôme de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM 2013-2014.
- [34] Mechanical dossier (HBK) exploitation et maintenance. systeme HVAC -local électrique 30KV .vol:F

Annexes

Annexe

Calculs thermiques LOCALE électrique 30kv HBK OUARGLA

DESIGN COOLING			
COOLING DATA AT Jul 1500			
COOLING OA DB / WB 50,0 °C / 32,1 °C			
ZONE LOADS	Details	Sensible (W)	Latent (W)
Window & Skylight Solar Loads	1 m ²	171	-
Wall Transmission	168 m ²	2353	-
Roof Transmission	95 m ²	1007	-
Window Transmission	1 m ²	114	-
Skylight Transmission	0 m ²	0	-
Door Loads	11 m ²	722	-
Floor Transmission	95 m ²	0	-
Partitions	0 m ²	0	-
Ceiling	0 m ²	0	-
Overhead Lighting	2052 W	2052	-
Task Lighting	0 W	0	-
Electric Equipment	4000 W	4000	-
People	2	150	110
Infiltration	-	0	0
Miscellaneous	-	500	0
Safety Factor	10% / 10%	1107	11
>> Total Zone Loads	-	12176	121
Zone Conditioning	-	12123	121
Plenum Wall Load	0%	0	-
Plenum Roof Load	0%	0	-
Plenum Lighting Load	0%	0	-
Return Fan Load	938 L/s	0	-
Ventilation Load	111 L/s	3226	4326
Supply Fan Load	1049 L/s	195	-
Space Fan Coil Fans	-	0	-
Duct Heat Gain / Loss	0%	0	-
>> Total System Loads	-	15543	4447
Central Cooling Coil	-	15543	4448
Central Heating Coil	-	0	-
>> Total Conditioning	-	15543	4448
Key:	Positive values are clg loads Negative values are htg loads		