

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

**UNIVERSITE ABOU BAKER BELKAID TLEMCEM**  
Faculté De Technologie  
Département de Génie Mécanique

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**  
En vue de l'obtention du diplôme de Master en génie mécanique  
Spécialité : Génie Thermique et Energies Renouvelables (GTER)

THEME

# Etude et conception d'un système de climatisation utilisant l'énergie solaire

Présenté par :

FELLAH Ilyas  
DJAIDER Rafik

Devant le jury composé de messieurs :

Présidents : M.E.A GHARNAOUT	MCA	Faculté de technologie
Examineur : C. SELADJI	MCA	Faculté de technologie
Examineur : K. ALIANE	MCA	Faculté de technologie
Encadreur : Y. KHADRAOUI	Pr	Faculté de technologie
Co-Encadreur : A. ALIANE	MAA	Faculté de technologie

Année Universitaire : 2011-2012

# Dédicaces

Avant tout je dis El Hamdou Lillah qui m'a aidé à terminer ce travail. Je dédie ce modeste travail à tous les gens que je connais et à tous ceux qui me sont très chers :

A Mes chers parents

Que je respecte beaucoup, car ils m'ont tout donnée et aisée dans ma vies personnel et professionnel et je souhaite que je rembourse tous ce sacrifices.

A Ma petite famille

A Mes frères et ma sœur chacun par son propre nom surtout, merci pour l'aidé, merci pour l'encouragement et merci pour tout.

A tous mes amis et collègues.

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

**FELLAH Ilyas**

# Dédicaces

A tous ceux qui me sont très chers je dédie ce modeste  
travail

A mes chers parents, qui m'ont toujours encouragé et  
poussé à réussir, pour tout ce qu'ils m'ont donné, leur  
aide éternel, et leur amour

Au toute ma famille

A tous mes amis et collègues

Et a tous mes professeurs

Je dédie ce modeste travail.

**DJAIDER Rafik**

# Remerciements

Un grand merci à Dieu de nous avoir donné le courage et la patience et qui a éclairé notre chemin pour achever ce travail.

Plus particulièrement, nous remercions Messieurs KHADRAOUI Yahia et ALIANE Abdenmour pour la confiance qu'ils nous ont accordée, leurs remarques constructives, leurs orientations et leurs conseils.

Nous adressons nos vifs remerciements à messieurs M.E.A GHARNAOUT, C. SELADJI, K. ALIANE, pour leur considération du sujet et d'avoir accepté de lire ce mémoire.

Et à tous ceux qui m'ont aidé à élaborer ce travail, pour leurs soutiens et leurs encouragements.

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

Merci...

Fellah Ilyas

Djaider Rafik

## CHAPITRE I : Etude bibliographique

I.1 Introduction	3
I.2 Historique	3
I.3 Le froid dans une planète en réchauffement	4
I.3.1 Évolution des températures	5
I.3.2 La consommation d'énergie	5
I.3.3 Pourquoi le rafraîchissement solaire	6
I.3.4 Avantage de la climatisation solaire	6
I.4 La climatisation solaire	7
I.5 Le marché mondial de la climatisation traditionnel	9
I.6 État de l'art dans le domaine	12
I.6.1 Vue d'ensemble des technologies de production de froid solaire	12
I.6.2 Description des technologies de climatisation solaire	12
I.6.2.1 Techniques basées sur l'emploi de l'électricité	12
I.6.2.2 Technique basée sur un processus thermomécanique	13
• Technique basée sur la sorption d'un gaz	14
A. La machine à absorption	14
B. La machine à adsorption	15
• Le desiccant cooling	15
I.6.2.3 Trigeneration Thermo-solaire	16
I.6.3 Description du système solaire	17
I.6.3.1 Les capteurs solaires	18
I.6.4 Différentes gestions de l'appoint et du stockage	18
I.6.5 Installations actuelles en Europe	20
I.6.6 Comparaison des techniques de climatisation solaire commerciales	21

I.6.7 Avantages et inconvénients qualitatifs	21
I.7 Recherche et développement à propos de la climatisation solaire	22
I.7.1 Systèmes à absorption (ammoniac/eau)	22
I.7.1.1 Introduction	22
I.7.1.2 Recherches souhaitées	23
I.7.2 Nouvelles avancées en technologies d'absorption (Eau/LiBr)	24
I.7.2.2 Travaux futurs	24
I.7.2.1 Technologie d'absorption adiabatique à feuilles plates	24
a. Démarches de développement	25
I.7.3 Réfrigérateurs d'adsorption	26
I.7.3.1 État de l'art de la recherche et développement	26
a. Transfert de La chaleur et de masse	26
I.7.3.2 Les couples binaires modérés	26
I.7.4 Systèmes à dessiccation	27
I.7.4.1 Développement des matériaux	27
I.7.4.2 Futures recherches et développements	27
I.8 Étude technico-économique	28
I.8.1 Méthodologie de l'évaluation comparative	28
I.8.2 Évaluation technique des systèmes de climatisation solaire	28
I.8.2.1. Capteurs solaires photovoltaïques	29
a. Évaluation des performances des différents capteurs	30
b. Evaluation des performances des cellules photovoltaïques	30
I.8.3 Équipement de refroidissement	31
I.8.3.1 L'énergie auxiliaire de la machine	31
I.8.4 Évaluation comparative des technologies de réfrigération solaire	32
I.9 Conclusion	33

## CHAPITRE II : Description des installations de climatisation solaire

II.1 Introduction	36
II.2. Procédé de refroidir	36
II.3 Les systèmes à compression mécanique	37
II.3.1. Machine frigorifique à compression de vapeur mono étagé	37
a) Diagramme de Mollier	37
b) Cycle frigorifique élémentaire	38
c) Bilan thermique de cycle	40
Calcul de coefficient de performance	40
II.3.2 Éléments de la machine frigorifique	41
a. Le compresseur	41
b. A la pression 13 bars	41
c. A la pression atmosphérique	41
d. L'évaporateur	42
e. Le condenseur	42
f. Les équipements annexes	43
1. Accumulateurs :	43
2. Collecteur :	43
3. Tuyauterie :	43
II.3.3 Les réfrigérants	43
II.4 Machine à absorption	44
II.4.1 Description de cycle à absorption Eau/LiBr	45
II.4.2 L'efficacité énergétique :	46
II.4.3 Diagramme d'Oldham	47
II.5 Machine à adsorption	48
II.5.1 Description du cycle à Adsorption	49

II.5.2 Diagramme de Oldham	49
II.5.3 Couples fluide frigorigène/adsorbant	51
II.5.4 L'utilisation de l'énergie solaire dans une machine à Adsorption	51
II.5.5 Avantage de l'adsorption	51
II.5.6 Inconvénients de l'adsorption	51
II.5.7 L'efficacité énergétique ou $COP_{\text{froid}}$	52
II.6 Le dessiccation	53
II.6.1 La roue dessicatrice	55
II.7 Les capteurs solaires	56
II.7.1 Type des capteurs solaires	56
II.7.2 Efficacités des différents capteurs solaires	60
II.8 Comparaison technico-économique	61
II.8.1 Remarque	63
II.9 Conclusion	64

### **CHAPITRE III : Eléments de calcul d'une installation de climatisation à absorption solaire**

III.1 Introduction	65
III.2 Principe de fonctionnement de la machine à absorption	65
III.3 Performance de la machine à absorption	67
III.4 Choix des fluides de travail	67
III.4.1 Le mélange eau/ammoniac ( $H_2O/NH_3$ )	67
III.4.2 Le mélange bromure de lithium/eau ( $LiBr/ H_2O$ )	67
III.5. Analyse thermodynamique	68
III.5.1 Introduction	68
III.5.2 Cycle standard sans échangeur interne	69
III.5.2.1 Équation d'état des fluides de travail	69



a. L'enthalpie de l'eau dans le condenseur	69
b. L'enthalpie de la vapeur saturée quittant l'évaporateur	70
c. L'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffé	70
d. La chaleur massique d'une solution de LiBr	70
e. L'enthalpie d'une solution de LiBr	70
f. La concentration en LiBr	70
Remarque	71
g. La courbe caractéristique de l'eau donne	71
h. Le taux de circulation	71
III.5.2.2 Bilans enthalpique	72
a. La puissance thermique du condenseur	72
b. Le bilan thermique de l'absorbeur	73
c. Le bilan thermique du bouilleur	73
d. La puissance thermique de l'évaporateur	74
e. La pompe de solution	74
III.5.2.3 Cycle de la machine à absorption	74
a. Pression de fonctionnement	75
b. Titre et température de la solution à l'entrée de l'absorbeur	75
c. Titre et température de la solution à l'entrée du désorbeur	76
III.5.2.4 Estimation de coefficient de performance	78
III.5.3 Cycle standard a échangeur interne	78
III.5.3.1 Bilan thermique d'échangeur de solution	79
Bilan enthalpique effectué sur l'échangeur	80
III.6 Capteurs solaires thermique sous vide	80

III.6.1 Calcul du rendement d'un capteur solaire sous vide par la méthode Française	81
III.6.2 Calcul de coefficient de performance du système solaire capteur sous vide machine à absorption	82
III.7 Conclusion	82

## **CHAPITRE IV : Modélisation dynamique du tunnel de test des voitures de la SNTF**

IV.1 Introduction	83
IV.2 Description du logiciel	83
IV.2.1 Les entrées « inputs »	83
IV.2.2 Traitement des données	83
IV.2.3 Les sorties « outputs »	84
IV.3 Utilisation du logiciel TRNSYS	84
IV.3.1 METENORM	84
IV.3.2 TRNSYS Simulation Studio	85
IV.3.3 TRNBuild	85
IV.4 Avantages du logiciel	85
IV.5 Inconvénients de logiciel	85
IV.6 Conditionnement du tunnel de test des voitures de voyageurs de la SNTF	85
IV.6.1 Voiture de voyageurs de la SNTF	86
IV.6.1.1 Histoire	86
IV.6.1.2 Le parc roulant	87
IV.6.1.3 Fiche technique du réseau de la SNTF	87
IV.6.2 Système de conditionnement d'air des voiture de la SNTF	87
IV.6.2.1 Description de l'installation de conditionnement d'air	88
IV.6.3 Dimensionnement et paramètre de tunnel	91

IV.7	Approche de modélisation	93
IV.7.1	Configuration et addition des composants	94
IV.7.1.1	Conditions météorologiques	94
IV.7.1.2	Machine à absorption	94
IV.7.1.3	Système solaire	94
IV.7.1.4	Construction de tunnel	95
IV.7.1.5	Composant d'affichage	95
IV.8	Résultats et interprétations	95
a.	Interprétations	97
IV.8.1	Simulation des conditions de test en hiver	97
a.	Raccordement des composants	97
b.	Résultats	98
c.	Interprétations	99
IV 8.2	Simulation des conditions de test en été	99
a.	Raccordement des composants	99
b.	Résultats	100
c.	Interprétation	100
IV.9	Conclusion	100
<b>V.</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>101</b>

## Introduction générale

L'énergie est devenue un bien rare et cher sous l'apparition d'une crise mondiale d'énergie qui est conséquence de la croissance économique et de la croissance démographique (respectivement 1% et 3,1% par an en moyenne)[1], ainsi que La demande d'énergie dans le monde devrait progresser de 2,0% par an sur la prochaine décennie (contre 2,5% sur les dix dernières années), et connaître ensuite une hausse ralentie de 1,6% par an entre 2020 et 2030, ont souligné les experts du géant pétrolier, dans un rapport de prospective[2].

La situation énergétique mondiale continuera à être dominée par les combustibles fossiles, qui représenteront quasiment 90% de l'approvisionnement énergétique total en 2030[1].

La poursuite de la production énergétique dans les conditions actuelles, essentiellement fondée sur les énergies fossiles, conduirait à épuiser les ressources actuellement connues de pétrole, gaz, charbon en quelques générations.

Les émissions annuelles de gaz à effet de serre, responsables du réchauffement climatique, et plus particulièrement au CO<sub>2</sub> provenant de la combustion des énergies fossiles, ainsi que l'émission de dioxyde de soufre et les oxydes d'azote qui sont les principales causes des pluies acides, ces polluants proviennent en grande partie des centrales thermiques qui utilisent du charbon, d'autre part l'appauvrissement de la couche d'ozone dû à l'émission des gaz contenant du chlore et du brome, ils sont principalement causées par l'utilisation de presque tous les systèmes de réfrigération et de climatisation qui émet particulièrement émettrices des chlorofluorocarbones (CFC).

Le recours à la climatisation solaire s'est donc massifié, face à une demande croissante en besoins de froid (pics de demande en électricité, notamment en période estivale) et aux problèmes écologiques de certains réfrigérants utilisés par le système à compression, l'utilisation de l'énergie solaire pour le rafraîchissement est un concept séduisant, puisque les besoins en froid coïncident la plupart du temps avec la disponibilité du rayonnement solaire.

En raison des importantes sources d'énergie fossiles dont notre pays dispose et de l'absence de politiques environnementales, le développement des énergies renouvelables a connu beaucoup de retard. Selon le Ministère de l'Energie et des Mines, la capacité nationale d'électricité dépasse les 8400 MW avec 2,4 MW crête seulement pour des énergies renouvelables (Année 2007) [3]. Aujourd'hui, compte tenu des enjeux que représentent ces sources d'énergies durables, leur promotion constitue un des grands axes de la politique énergétique et environnementale du pays. D'autre part, l'Algérie possède des atouts majeurs: un potentiel considérable des énergies renouvelables et une contribution plus conséquente des énergies renouvelables dans le bilan national. Particulièrement notre pays a un des gisements solaires des plus élevés au monde, en effet de part sa position géographique dispose de plus de 2500 heures d'ensoleillement en moyenne par an sur une très grande partie de son territoire [4].

Ce travail aura pour objectif le calcul d'une installation de climatisation par absorption fonctionnant à base solaire à partir d'une application développée en simulation numérique (logiciel TRNSYS).

Après cette brève introduction nous, nous abordant dans le premier chapitre un état de l'art dans le domaine de la climatisation solaire.

Dont le deuxième chapitre est réservé pour la description de différentes installations de climatisation solaire.

Dans le troisième chapitre, les détails de calcul des paramètres et des grandeurs thermodynamiques dans des points caractéristiques de cycle d'une installation à absorption sont présentées ainsi que et le calcul de ces composants (absorbeur, bouilleur, détendeur, évaporateur et condenseur).

Le cinquième chapitre sera enfin caractérisé pour la simulation du système par le logiciel TRNSYS.

## I.1 Introduction

Durant la dernière décennie, une demande de confort accrue et des températures élevées en été ont conduit à un fort développement de la climatisation dans les bâtiments tertiaires.

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

## I.2 Historique [5]

L'histoire de la climatisation trouve ses racines à l'époque des Romains. En effet les romains avez eu la judicieuse idée de faire usage d'un tunnel sous terrain pour provoquer une arrivée d'air extérieur, c'est ainsi que virent le jour les premiers climatiseurs. Ils arrivaient ainsi à conserver une température ambiante hiver comme été.

Au 16<sup>ème</sup> siècle virent le jour des systèmes naturels de rafraîchissement, obtenus par ruissellement d'eau, ce qui provoqué par évaporation une diminution de la température de l'air. Mais c'est en 1902 que la notion de climatisation moderne apparut grâce à l'invention d'un homme appelle Willis H carrier.

<b>1834</b>	Jacob PERKINS, de Londres, construit la première machine de réfrigération à compression mécanique avec de l'éther comme réfrigérant ;
<b>1859</b>	le Français Ferdinand CARRE réalise la première installation industrielle (machine à absorption d'eau + NH <sub>3</sub> ) ;
<b>1930</b>	grâce à l'étude théorique du chimiste belge Frédéric SWARTS, le grand essor de l'industrie du froid s'installe, avec la mise au point par une société américaine d'un nouveau fluide frigorigène « Le DICHLORODIFLUOROMETHANE (R12) » ;
<b>1950</b>	Général Motors met en place des glaces teintées sur ses véhicules pour réduire la température intérieure engendrée par rayonnement. En France, le chauffage de l'habitacle des véhicules se généralise ;

<b>1955</b>	les premiers systèmes de conditionnement d'air font leur apparition sur des véhicules américains type Chevrolet. L'ensemble du système était pré-assemblé par Frigidaire à l'usine de Dayton (Ohio) et mis en place sur environ 3500 véhicules durant la même année ;
<b>1960</b>	les concepteurs aboutissent à combiner le système de réfrigération à celui de chauffage ;
<b>1970</b>	les constructeurs européens adoptent la climatisation dans leurs véhicules ;
<b>1980</b>	apparition des premiers systèmes de climatisation automatisés sur les véhicules.

Au milieu des années 90, près de 90% des véhicules américains sont climatisés, contre seulement 20% en Europe.

<b>1991</b>	la SAAB 9000 turbo est le premier véhicule à recevoir du fluide frigorigène R 134 sans chlore dans son installation de climatisation ;
<b>1995</b>	certain pays, dont la France et l'Allemagne, interdisent les produits à base de chlore dans les systèmes de réfrigération ;

### **I.3 Le froid dans une planète en réchauffement**

Le changement climatique est aujourd'hui une réalité. Compte tenu de l'inertie du système climatique, le réchauffement va s'amplifier durant les décennies à venir - ceci advenant même si les émissions anthropiques de gaz à effet de serre pouvaient cesser. Les conséquences seront sensibles dans notre environnement et nos modes de vie.

Dans le domaine de l'énergie, le changement climatique aura des conséquences sur la demande, avec une baisse de la consommation énergétique en hiver, mais une hausse en été en raison des besoins en climatisation.

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

### I.3.1 Évolution des températures

Si la température moyenne à la surface de la terre a augmenté de 0,6-0,7°C de 1900 à 2000, la température moyenne en 2005 a été supérieure de 0,8°C à celle de 1900. À elles seules, les trois dernières décennies ont vu une augmentation moyenne de 0,6°C (soit 0,2°C par décennie), ce qui montre une inquiétante accélération du processus [6].

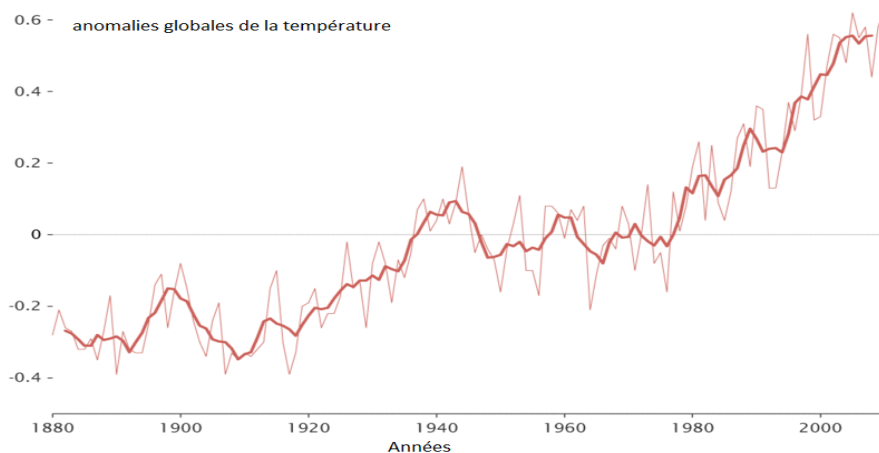


Figure I.1: l'évolution des températures à la surface du globe de 1880 à 2010 [7].

### I.3.2 La consommation d'énergie [8]

Selon l'Agence internationale d'énergie (International Energy Agency–IEA), la consommation énergétique dans le monde pourrait augmenter de 60% [8] jusqu'en 2030, voire doubler ou tripler jusqu'en 2050. Parallèlement, il y a un besoin croissant de rafraîchissement et de climatisation suite aux températures estivales de plus en plus élevées. Pour donner un exemple : les ventes en 2008 de climatiseurs électriques de petites tailles (5kw froid) ont été proches de 82 millions d'unités dans le monde.

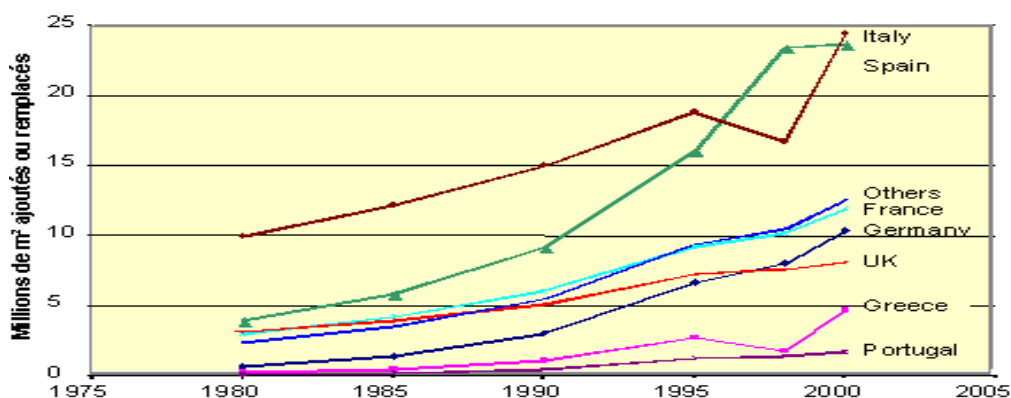


Figure I.2: Augmentation de la surface climatisée centralisée par pays entre 1980 et 2000 [9].



### I.3.3 Pourquoi le rafraîchissement solaire

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

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

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

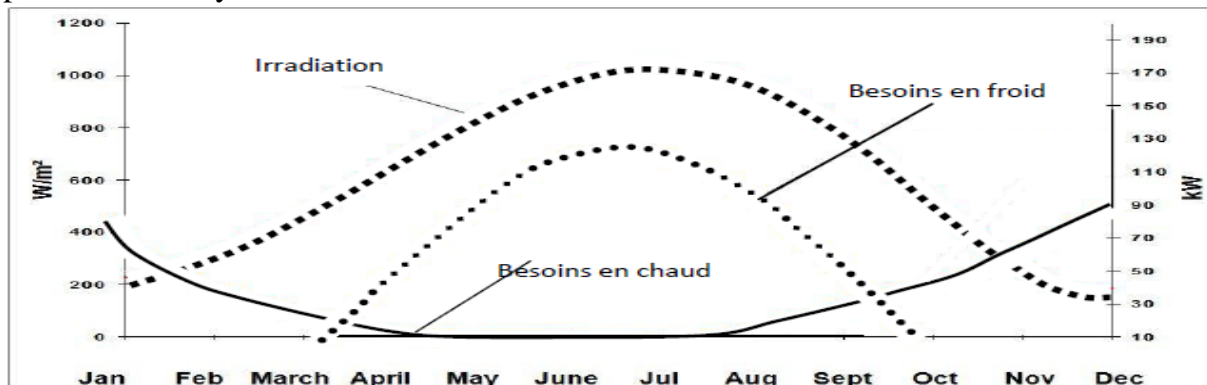


Figure I.3: Adéquation entre demande et ressource solaire [10].

### I.3.4 Avantage de la climatisation solaire

Les systèmes de rafraîchissement solaire ont l'avantage de supprimer la plupart des nuisances d'une climatisation classique :

- ✚ la consommation d'électricité peut être jusqu'à 20 fois inférieure à celle d'un système classique à compression,
- ✚ les fluides frigorigènes employés sont inoffensifs puisqu'il s'agit d'eau et de solutions salines,
- ✚ la nuisance sonore du compresseur est supprimée. Ils 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 CO<sub>2</sub>.

## I.4 La climatisation solaire

Utiliser l'énergie solaire pour produire de froid peut revêtir plusieurs aspects mais l'objectif final est toujours de limiter l'utilisation d'une climatisation classique réputée pour ses impacts négatifs sur l'environnement. D'un point de vue théorique et fondamental, il existe de très nombreuses manières de produire du froid avec l'énergie solaire, toutes les techniques utilisées sont listées dans la figure (I.4) ; en bleu les technologies actuellement en test à l'échelle réelle, et gris les technologies commercialement disponibles

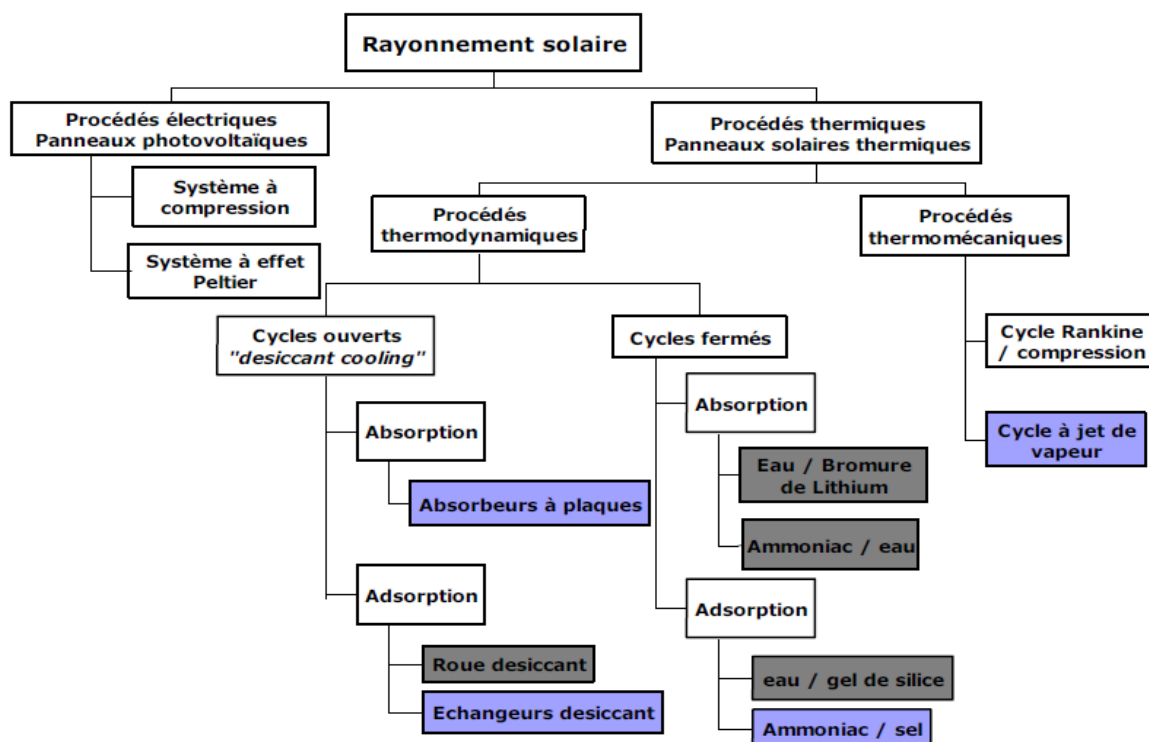


Figure I.4: Organigramme des différentes technologies de production de froid à partir de l'énergie solaire [17].

Un climatiseur traditionnel produit du froid en comprimant un fluide dit (frigorigène) ou (réfrigérant) qui a la capacité d'absorber de grosse quantité de chaleur (calorie) lorsqu'il passe de sa phase liquide à sa phase gazeuse au niveau de l'évaporateur figure I.5. Un climatiseur consomme par conséquent de l'électricité pour actionner le compresseur et du fluide frigorigène. En effet, bien qu'il soit en circuit fermé, les fuites de fluide ne sont pas rares.

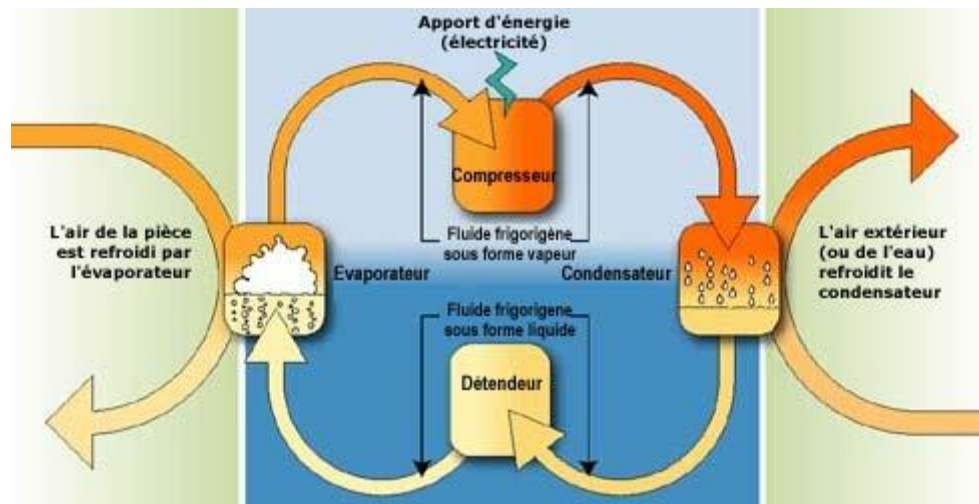


Figure I.5: Fonctionnement d'un climatiseur traditionnel.

Dans le cas de la climatisation solaire, l'énergie calorifique délivrée par le système solaire est utilisée par des machines de production de froid ou de traitement d'air pour produire de l'énergie frigorifique permettant d'assurer le rafraîchissement des locaux figure I.6.

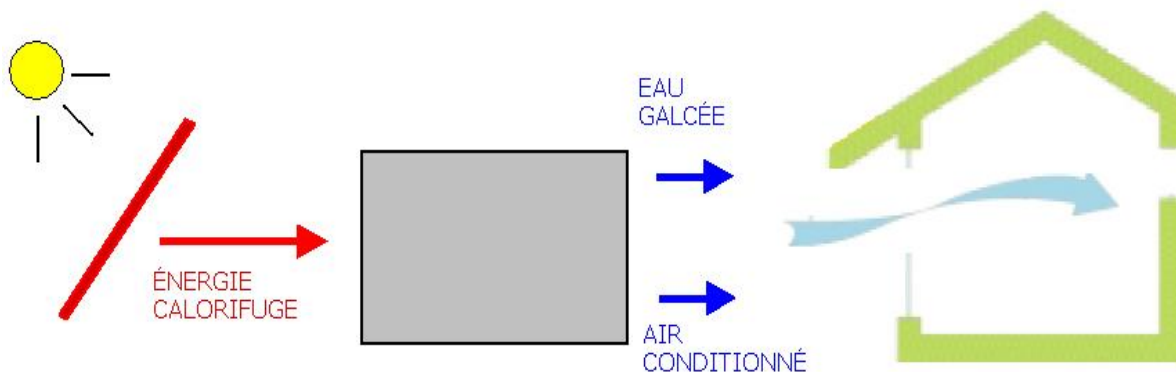


Figure I.6: Schéma de la climatisation solaire.

Les systèmes de rafraîchissement solaire ont l'avantage de supprimer la plupart des nuisances de 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 solution saline et la nuisance sonore du compresseur est supprimée. De plus, l'absence de compresseur mécanique évite la vibration d'où le fait que ces machines demandent un entretien limité et présentent une grande longévité.

### I.5 Le marché mondial de la climatisation traditionnel [11]

Le marché mondial de la climatisation est toujours en expansion et a été estimé à 39,7 millions d'appareils vendus en 2000. Ce résultat se répartit entre 29,9 millions d'unités RAC (Room Air Conditioners, c'est à dire climatiseurs individuels) et 9,8 millions d'unités CAC (Central Air Conditioners, c'est à dire climatisation centralisée). Le marché Américain reste le premier avec 13,2 millions d'unités vendues en 2000 avec une croissance de 3,1%. Le marché Chinois explose avec 9,2 millions d'unités vendues. Le marché Japonais a connu une croissance de 9% entre 1999 et 2000, passant ainsi à 7,7 millions d'unités vendues en 2000. En 2000, le marché mondial de la climatisation était estimé à 35 milliards de US\$.

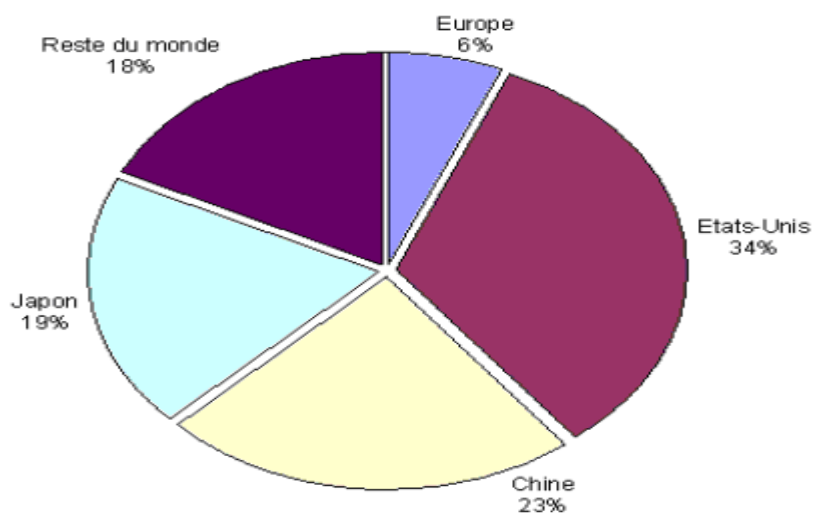


Figure I.7: Marché mondial de la climatisation (en volume) en 2000 [11].

La forte augmentation observée depuis quelques années de la demande en rafraîchissement et en climatisation des bâtiments a ouvert un nouveau marché, celui de la climatisation solaire voire figure (I.8). Actuellement, c'est le marché des climatiseurs électriques qui est en forte croissance. Par exemple en 2008, les ventes de ce type de climatiseurs de petites puissances, inférieures à 5 kW froid, ont été proches de 82 millions d'unités dans le monde,

De plus, il est intéressant de constater qu'une très bonne adéquation existe tant au niveau journalier, qu'au niveau annuel entre les besoins du bâtiment et la ressource solaire comme le montre la figure I.3.

Actuellement, les techniques de climatisation solaire commercialisées sont les suivantes et peuvent être classées selon le mode de conversion de l'énergie solaire :

✚ -Conversion de l'énergie solaire en électricité :

Installation photovoltaïque + système à compression

✚ -Conversion de l'énergie solaire en chaleur :

Installation à absorption (cycle fermé)

Installation à adsorption (cycle fermé)

Installation à dessiccation (cycle ouvert)

Le rafraîchissement solaire assisté

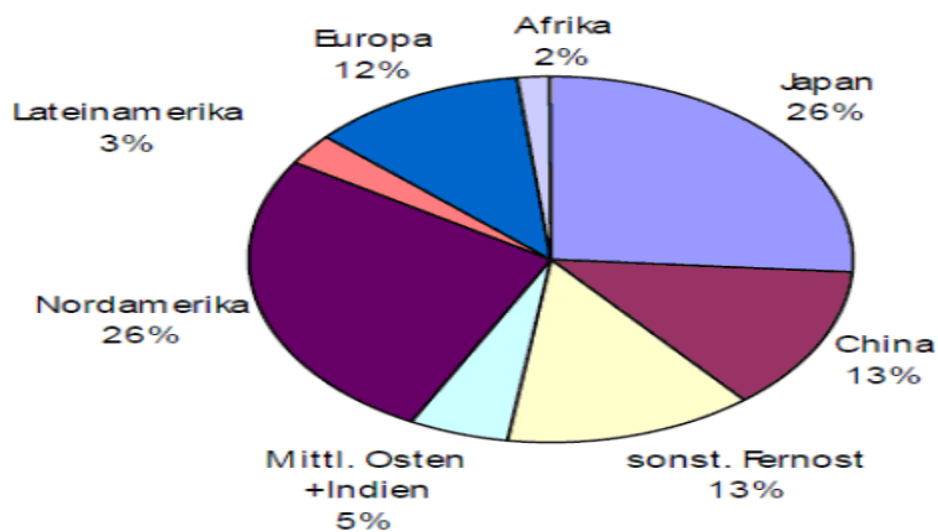


Figure I.8: Marché totale et potentiel de la climatisation solaire en 2003(estimation) [11].

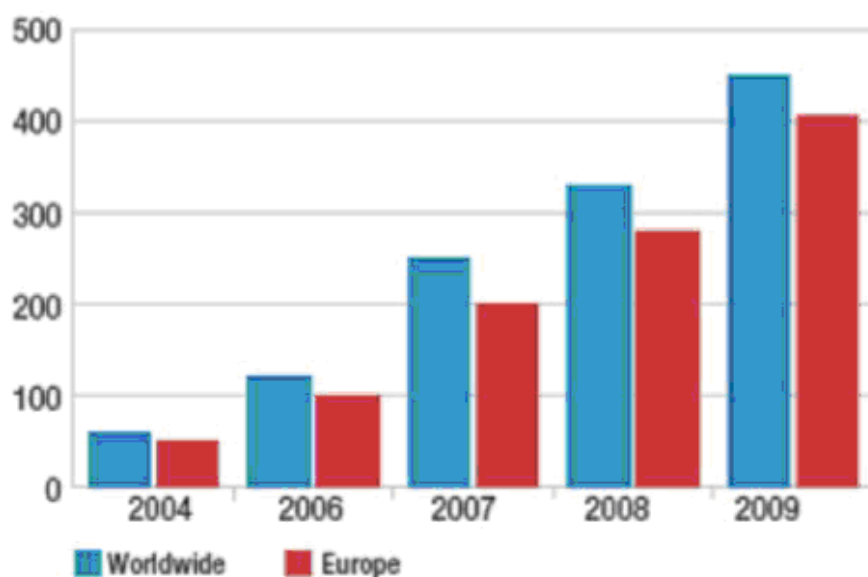


Figure I.9 : Système de la climatisation solaire installé au Europe/monde [11].

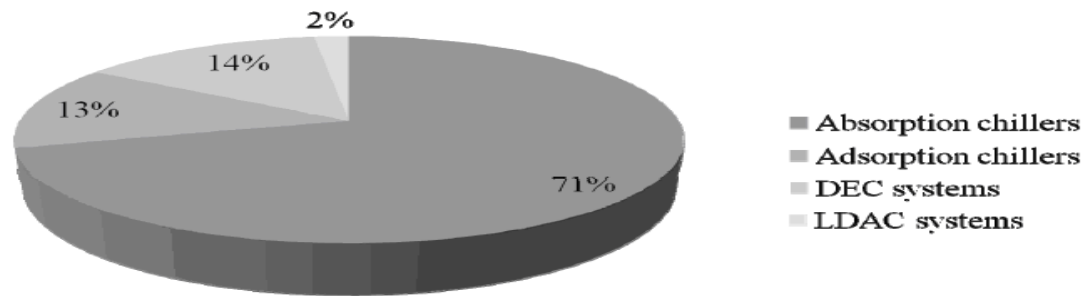


Figure I.10: Part de marché des machines de climatisation solaire [11].

### a. Les technologies de rafraîchissement solaire sont-elles compétitives ?

Malgré un marché potentiel très important pour le rafraîchissement solaire, les technologies existantes ne sont pas encore compétitives du point de vue économique, comparées aux systèmes classiques utilisant l'électricité ou même les systèmes de climatisation au gaz naturel. Ceci est lié à la fois au coût d'investissement élevé du système solaire et au faible coût de l'énergie pour les systèmes classiques.

Mais des réductions de coût pour les différents composants (capteurs solaires, groupes de production de froid...) et une amélioration de leurs performances devraient changer cette donne, même s'il est encore aujourd'hui difficile de prédire la date à laquelle ces techniques de rafraîchissement solaire atteindront leur maturité économique.

D'autre part, ces technologies solaires et les sources conventionnelles d'énergie ne peuvent être comparées qu'en intégrant, dans les deux cas, les coûts externes (environnementaux et sociétaux). Le caractère imprévisible (mais sans aucun doute à la hausse) du coût des énergies conventionnelles sur une longue période doit aussi être intégré dans l'analyse économique.

D'une façon générale, on peut remarquer que pour les technologies solaires : leur coût décroît avec le passage à une production en grande série, elles sont déjà matures techniquement aujourd'hui, elles sont beaucoup plus satisfaisantes du point de vue environnemental que les systèmes conventionnels de climatisation.

Ces différents atouts montrent que ces technologies doivent être soutenues, aussi bien par une aide à l'investissement que par une taxe énergétique reflétant le coût

environnemental des énergies conventionnelles. Dans de nombreux pays, les subventions disponibles permettent de rendre la solution solaire économiquement plus satisfaisante.

## **I.6 État de l'art dans le domaine [13]**

### **I.6.1 Vue d'ensemble des technologies de production de froid solaire [13]**

Les enjeux et les avantages de la climatisation solaire ont été développés dans le titre précédent (le froid dans une planète en réchauffement). Un système de climatisation solaire est donc formé d'une machine produisant le froid, d'un système solaire (composé de capteurs solaires et d'un dispositif de stockage), d'un réseau de distribution, et éventuellement d'un dispositif d'évacuation de la chaleur. Dans le paragraphe présent, nous allons d'abord présenter tous les procédés permettant de produire du froid à partir de l'énergie solaire, avec une emphase portée sur les procédés commercialement disponibles, à savoir les systèmes à absorption, à adsorption et le desiccant cooling.

### **I.6.2 Description des technologies de climatisation solaire [13]**

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 thermomécanique, enfin la troisième sur des cycles basé sur la sorption d'un gaz, Toutes les technique utilisées sont listées dans la figure (I.4), en bleu les technologies actuellement et en test à l'échelle réelle, et gris les technologies commercialement disponibles.

#### **I.6.2.1 Techniques basées sur l'emploi de l'électricité [13]**

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

- ✚ Les systèmes à compression : On utilise un cycle classique de compression pour produire du froid. Système classique utilisé actuellement dans le froid
- ✚ 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 %) [13], et un coût important, ce qui ne permet pas actuellement leur développement. La puissance appelée par un compresseur nécessite une grande surface de capteur car leur puissance spécifique est d'environ 100 à 130 W/m<sup>2</sup>. De plus le stockage de l'électricité est coûteux et volumineux. Le plus grand avantage d'employer les panneaux solaires pour la réfrigération est la construction simple et l'efficacité globale élevée une fois combiné avec un système conventionnel de compression de vapeur. Un schéma de principe d'un tel système est donné dans figure (I.11).

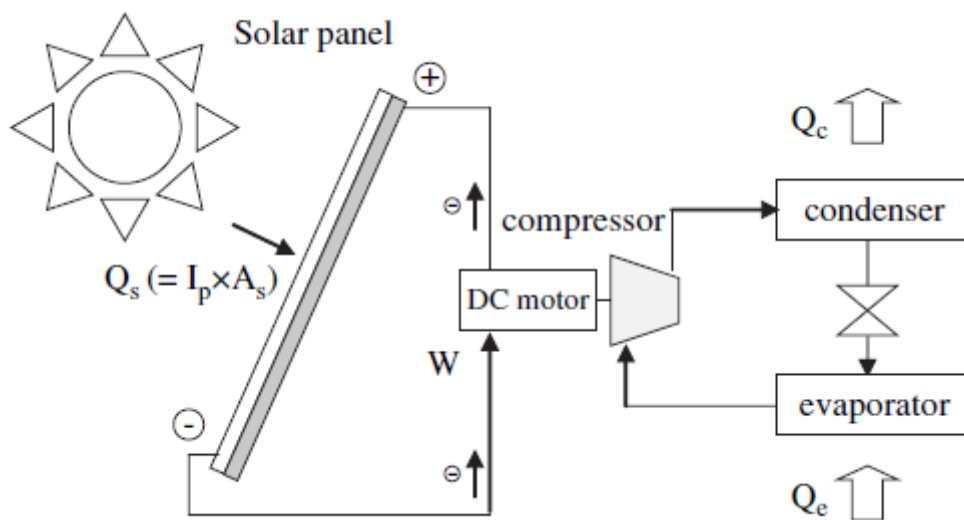


Figure I.11 : Schéma de principe d'un climatiseur solaire électrique de compression [13].

### I.6.2.2 Technique basée sur un processus thermomécanique [13]

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 :

- ✚ Le cycle de 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.



- ✚ 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 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 technique, et notamment le cycle à jet de vapeur, en sont encore au stade recherche pour être utilisées avec l'énergie solaire

- **Technique basée sur la sorption d'un gaz [13]**

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.

- A. La machine à absorption [13]**

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.

Dans le 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 (H<sub>2</sub>O/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. 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<sub>th</sub> 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 mais marginale 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'important 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.

### **B. La machine à adsorption [13]**

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. L'utilisation de matériaux solides oblige alors à avoir un fonctionnement cyclique et non continu comme pour l'absorption. Deux masses de matériaux absorbant sont alternativement chauffées par la source chaude pour désorber la vapeur d'eau qui av 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.

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. 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.

- **Le desiccant cooling [13]**

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).

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

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

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

### **I.6.2.3 Trigeneration Thermo-solaire [13]**

Des systèmes de climatisation solaire peuvent être employés dans un système thermo-solaire de trigeneration, c.-à-d., un système hybride qui fournit au trigeneration intégré l'exploitation de l'énergie solaire afin de produire en même temps l'électricité, le chauffage et le refroidissement en employant trois technologies différentes, en particulier cogénération avec des moteurs de combustion actionnés par des combustibles fossiles, concentration solaire et réfrigérateurs d'absorption.

L'énergie thermique d'un champ solaire intègre l'énergie récupérée du cogénération avec une économie significative d'énergie primaire exigée (carburant) et la réduction d'émissions de polluants ; cet avantage est appliqué pour le chauffage d'hiver et le traitement d'été. (obtenu, comme mentionné, par l'équipement de réfrigération d'absorption). L'arrangement général d'une usine thermo-solaire hybride de trigeneration est montré dans figure I.12.

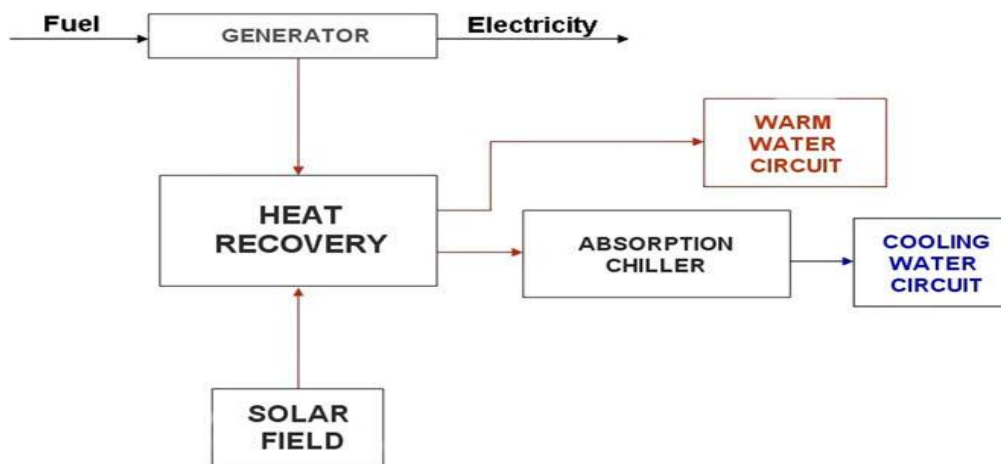


Figure I.12 : Arrangement de général d'une usine thermo-solaire hybride de trigeneration [13].

En ce qui concerne l'opération d'usine de trigeneration, au cours de diverses périodes de l'année, le chauffage et la demande de refroidissement est souvent très haute et la chaleur récupérée de l'huile de graissage, des vestes d'eau et des gaz d'échappement du moteur n'est pas assez pour couvrir la demande, par conséquent une intégration d'énergie thermique est nécessaire : ceci peut être réalisé avec un liquide chauffé par le rayonnement solaire qui est direct capturé par les concentrateurs solaires paraboliques ou les collecteurs plats à hautes températures. La chaleur obtenue ainsi, suivant les indications de Figure (I.12), est employée pour alimenter le circuit chaud de l'eau, qui alimente au chauffage des Unités terminales (hiver) ou un réfrigérateur d'absorption pour la production de l'eau effrayante (climatisation d'été).

### I.6.3 Description du système solaire [13]

L'énergie thermique nécessaire au fonctionnement de ces technologies provient du rayonnement solaire. Un champ de capteurs est utilisé afin de collecter l'énergie solaire. Sa surface varie de quelques mètres carrés pour les plus petites installations à 2700 m<sup>2</sup> de capteurs pour la plus grosse installation de refroidissement solaire (société SARANTIS) en Grèce.

La captation de l'énergie solaire est une technique connue depuis l'antiquité. Les premiers dispositifs rudimentaires employés utilisaient des miroirs qui concentraient les rayons lumineux sur un four. Les capteurs solaires thermiques sont un genre spécifique d'échangeurs de chaleur qui transforment le rayonnement solaire en chaleur, et transfèrent

cette chaleur vers un fluide caloporteur. La chaleur ainsi récupérée est soit utilisée directement, soit transférée vers un dispositif de stockage de chaleur.

### **I.6.3.1 Les capteurs solaires [13]**

Il existe deux types de capteurs solaires: Les capteurs fixes et les capteurs solaires à poursuite, qui utilisent un système motorisé pour suivre la course du soleil. Ces derniers produisent des hautes températures qui ne sont pas considérées dans les technologies de climatisation solaire actuelles. Les capteurs solaires sont caractérisés par un rendement, le rapport entre l'énergie solaire reçue sur la surface du capteur et l'énergie transmise au fluide. Ce rendement varie en fonction de la différence entre la température moyenne du fluide caloporteur et la température extérieure, ainsi que du rayonnement solaire terrestre.

Les capteurs solaires fixes sont composés d'un absorbeur, chargé d'emmagasiner la plus grande quantité d'énergie solaire grâce à une absorptivité grande et une émissivité faible. De plus, du verre entre l'air extérieur et l'absorbeur permet de laisser passer la quasi-totalité du rayonnement courte longueur d'onde tout en ayant une transmissivité nulle pour les grandes longueurs d'onde provenant de l'absorbeur. Le verre crée ainsi un effet de serre tout en évitant également les pertes par convection.

On distingue quatre types effet capteurs solaires fixes différents:

- Les capteurs à air
- Les capteurs plans
- Les capteurs à concentration fixes
- Les capteurs sous vide

Ces types de capteurs seront détaillés dans le deuxième chapitre

### **I.6.4 Différentes gestions de l'appoint et du stockage [13]**

Les circuits d'eau de la boucle solaire sont divisés en deux, car la boucle primaire, du côté des capteurs solaires, est composé d'un mélange en glycol et ne peut être mélangée à la boucle secondaire qui comprend également le volume d'eau de stockage. L'échange de chaleur se fait donc grâce à un échangeur noyé dans le ballon de stockage.

Un appoint fonctionnant grâce à de l'énergie payante est souvent nécessaire. Cet appoint intervient grâce à un échangeur (ou un épingle électrique dans le cas d'un appoint électrique) noyé dans la partie supérieure du ballon, un capteur mesure la température de puisage, et ordonne le fonctionnement de l'appoint. Une deuxième solution est de placer l'appoint après le puisage. Un capteur mesure la température en sortie de ballon, et ordonne le fonctionnement de l'appoint qui porte le fluide à la température souhaitée grâce à un échangeur de chaleur secondaire. Ces différentes configurations sont récapitulées à la Figure(I.13).

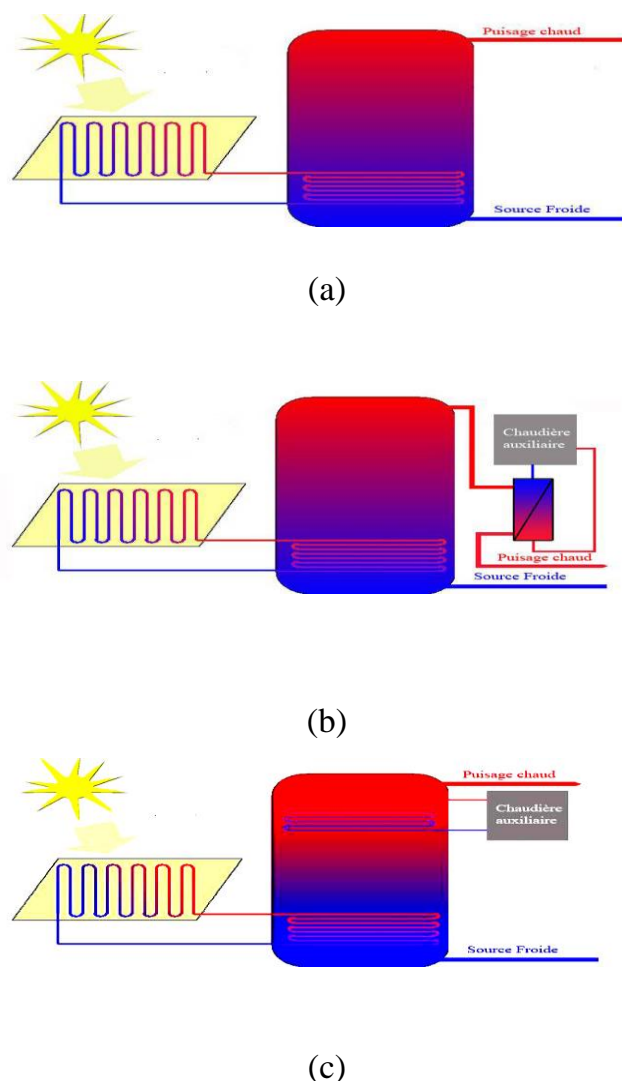


Figure I.13 : Différents schémas de circuits solaire (a) sans appoint (b) avec appoint intégré au stockage (c) avec appoints intégré en série [13].

La solution (a) ne contient pas d'appoint, elle nécessite donc un gros volume de stockage afin de pallier à un manque d'ensoleillement. De plus elle ne permet qu'un rafraîchissement des locaux, et non la garantie d'une température de consigne comme c'est le

cas pour la climatisation. Les solutions (b) et (c) contiennent un appoint placé différemment. La solution (c) permet de lisser la demande de l'appoint, sa puissance maximale est ainsi minimisée. Cependant, en réchauffant l'intégralité du volume de stockage, on augmente également la température de la boucle primaire, limitant ainsi l'efficacité des capteurs. La solution (b) évite cela, mais la chaudière, ainsi que l'échangeur doivent être dimensionnés en conséquence.

### I.6.5 Installations actuelles en Europe [17]

Le projet CLIMASOL a recensé 53 installations de climatisations solaires présentes en Europe en 2004. Ces installations sont uniquement basées sur le phénomène de sorption d'un gaz, c'est-à-dire des machines à absorption, adsorption ou des centrales desiccant cooling. Le tableau suivant récapitule la répartition par pays et par technologie.

Type	Allemagne	Grèce	Espagne	Portugal	Italie	Autriche	France	Total
Desiccant	7		1	1		1	1	11
Absorption	7	3	18		1	1	3	33
Adsorption	8	1						9
Total	22	4	19	1	1	2	4	53

Tableau I.1: Répartition des installations de climatisation solaire répertoriées par le projet CLIMASOL [17].

La technologie par absorption est majoritaire, avec plus de 50% des installations utilisant celle-ci. Les systèmes par adsorption et desiccant cooling sont quasiment égaux en nombre. On note que l'Allemagne est le pays comportant le plus d'installations, harmonieusement réparties, même si le climat ne prédispose pas à l'utilisation de climatisation solaire. Le nombre d'installations en Espagne est également élevé mais il ne s'agit principalement que de solutions utilisant une machine à absorption [17].

### I.6.6 Comparaison des techniques de climatisation solaire commerciales

Trois techniques sont aujourd'hui commercialement disponibles. Il est donc intéressant de les comparer, et de voir les avantages et les inconvénients propres à chaque technologie. Il ne s'agit pas de définir de manière définitive un positionnement des solutions, mais plutôt d'avoir des outils permettant de comparer les résultats de ces systèmes afin de voir les conditions les plus favorables à leur implantation respectives.

La comparaison s'effectue sur des considérations technologiques, ainsi qu'avec des indicateurs de performances énergétiques. Le Tableau(I.2) indique les avantages et les inconvénients au niveau technologique, de manière purement qualitative.

### I.6.7 Avantages et inconvénients qualitatifs

	Avantages	Inconvénients
Absorption	Coefficient de performance thermique élevé Technique de climatisation solaire majoritaire et reconnue	Tour de refroidissement nécessaire Température de régénération élevée Risques de cristallisation
Adsorption	Température de régénération moyenne Simplicité et robustesse	Tour de refroidissement nécessaire Seules les puissance élevées sont disponibles Volume des machines Caractère cyclique déstabilisateur Coût
Desiccant cooling	Température de régénération faible à moyenne Composants connus et largement utilisés Coûts d'investissement faibles	Système tout air neuf non adapté à tous les bâtiments Maintenance soignée obligatoire Peu performant dans les climats chauds et humides ( $COP_{th}$ dépendant des conditions intérieures et extérieures)

Tableau I.2: Avantages et inconvénients des technologies de climatisation solaire commercialement disponibles [24].



## **I.7 Recherche et développement à propos de la climatisation solaire [14]**

### **I.7.1 Systèmes à absorption (ammoniac/eau)**

#### **I.7.1.1 Introduction**

La technologie de la réfrigération à absorption à base de couple NH<sub>3</sub>-EAU a été développée au début du 20<sup>ème</sup> siècle pour des applications commerciales. De grandes capacités de réfrigération ont été réalisées pour des applications industrielles. L'adaptation de cette technologie pour de petites capacités ( $\leq 10\text{KW}$ ) conduit à de grandes et lourdes constructions.

Ces dernières années, il y a une tendance d'appliquer les nanofluides binaires aux systèmes à absorption pour améliorer l'efficacité du transfert de chaleur et de masse [14].

Les améliorations suivantes sont souhaitables et recommandables pour les futures recherches.

- ✚ La réduction du coût de production d'unités de réfrigération à absorption :

Le problème principal pour la pénétration du marché des systèmes de climatisation solaire est le coût d'investissement primaire. Toutes les mesures doivent être prises pour réduire ces premiers coûts pour le client.

- ✚ Réduction de la consommation électrique des commandes auxiliaires :

Une installation frigorifique à absorption de capacité inférieure à 10 kilowatts a besoin de courant électrique pour les commandes auxiliaires :

450 W pour la pompe du fluide de fonctionnement

60 W pour la pompe dans le circuit du générateur

60 W pour la pompe dans le circuit de saumure

500 W pour l'eau de refroidissement dans le circuit de l'eau dans la tour de refroidissement

350 W pour le ventilateur de la tour de refroidissement

50 W pour la commande

Ce qui fait un total de 1970 W. Le potentiel pour réduire cette quantité se situe dans l'énergie électrique nécessaire pour le pompage des fluides. La puissance pour le pompage des fluides dans les circuits internes et externes a pu être développée par un processus thermodynamique approprié hors de la chaleur motrice. La réduction de la consommation d'énergie électrique du ventilateur de la tour de refroidissement a pu être réalisée par la commande de vitesse de l'hélice menée par la température de l'eau de refroidissement.

### **I.7.1.2 Recherches souhaitées**

#### 1) Rejet de la chaleur:

Les nouvelles possibilités pour le rejet de la chaleur des machines à sorption sont limitées. En dépit des inconvénients bien connus (consommation d'eau, consommation de courant électrique, opération d'hiver, problèmes hygiéniques) la tour de refroidissement humide est du point de vue thermodynamique une des meilleures options techniques.

#### 2) Le développement d'un réfrigérateur à absorption refroidi avec l'air:

Un but intéressant du développement technique est le remplacement de l'eau pour le rejet de la chaleur. Les endroits chauds et secs n'ont pas en tous cas une eau disponible et de qualité pour le rejet de la chaleur humide. Le tableau I.3 montre très généralement les données principales typiques pour quatre endroits pour une opération sèche de rejet de la chaleur. Tous les cas dans le tableau(I.3) ont une température de début d'évaporation de 0°C. Les données de processus de ces quatre applications des unités de réfrigération à absorption prouvent que le rejet sec de la chaleur a besoin des températures plus élevées du milieu de chauffage et fonctionne à des pressions de processus sensiblement plus élevées. Donc de nouveaux composants seraient nécessaires ainsi que l'adaptation de la conception des installations.

Endroit	Température extérieure d'air.	Bas Température de processus.	Haut Température de processus.	Pression de condensation	Température de milieu de chauffage.	Concentration d'eau
	°C	°C	°C	bar	°C	%
Naples	30	40	98	16,0	105/95	47/41
Athen	33	43	112	18,0	117/109	43/37
Johannesburg	28	38	96	15,5	101/93	48/42
Abu Dhabi	41	51	118	22	123/115	40/34

Tableau I.3 : Données de processus en cas de rejet sec de la chaleur pour quatre endroits (étape simple, opération continue, évaporation à 0°C, NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O) [14].

## I.7.2 Nouvelles avancées en technologies d'absorption à bromure de lithium pour la réfrigération solaire

### I.7.2.1 Technologie d'absorption adiabatique à feuilles plates

#### a. Démarches de développement

Le type d'absorbeur à couche descendant (appelé aussi à feuilles plates) actuellement utilisé dans des réfrigérateurs à absorption à bromure de lithium est caractérisé par un certain nombre de problèmes : transfert de petite masse, transfert à basse température et de large volume.

1) Le jet adiabatique à absorbeur développé et breveté par Ryan comme solution, à quelque inconvénient:

a) Faible débit de liquide, la présence de beaucoup d'unités de pulvérisation. En conséquence, un absorbeur encombrant.

b) Diamètre variable des gouttelettes et une proportion significative avec des diamètres au-dessous de le 150  $\mu$ .

c) Une partie substantielle de l'écoulement de la masse pompé est inutile pour l'absorption à cause de des diamètres des gouttelettes.

d) Demande de puissance élevée dans la pompe qui conduit la solution.

2) Afin d'essayer de résoudre ces problèmes, Warnakulasuriya et Worek[] ont développé un jet avec des gouttelettes de 400 microns de diamètre. Ce dispositif a fourni le transfert de masse Le plus élevée que le jet de Ryan et a multiplié les performances des absorbeurs à couche descendante environ quatre fois.

3) Un absorbeur à gicleur conçu et construit, Ultérieurement ne comportant aucune perte de pression, le transfert de masse est amélioré mais la masse de solution est resté non contrôlé.

4) L'étape suivante a été de développer un absorbeur à feuilles plates se reposant sur une surface inclinée capable à utiliser un débit plus élevé pour avoir un transfert de masse plus grand.

La conclusion tirée que le coefficient de transfert de masse fourni par le jet à feuilles plates était cinq fois plus grand que par l'absorbeur de Warnakulasuriya et de Worek [27]. L'amélioration du transfert de masse obtenu avec l'absorbeur de feuille plate constitue un développement significatif en technologie d'absorption. Cette nouvelle génération d'absorbeur est plus efficace que le jet de gouttelette de Ryan et les absorbeurs de Warnakulasuriya et de Worek et que n'importe quel absorbeur commercial en service aujourd'hui.

### **I.7.2.2 Travaux futurs**

La future recherche du groupe ...visera Les points suivants:

- Réduire le coût du capteur.
- Réduire le coût d'équipements et d'auxiliaires employés par les machines à absorption.
- Augmenter l'efficacité du réfrigérateur à absorption.

### **I.7.3 Réfrigérateurs d'adsorption**

#### **I.7.3.1 État de l'art de la recherche et développement**

L'utilisation de la technologie à adsorption est une nouvelle technologie comparée à la technologie à absorption. Ainsi, beaucoup de recherches et de développements continuent toujours dans le domaine du transfert de chaleur et de masse et du développement des composants.

##### **a. Transfert de La chaleur et de masse**

Étant donné que les réfrigérateurs à adsorption fonctionnent périodiquement, le COP est limité par la capacité de chaleur sensible de l'adsorbant. Par conséquent, la portée de la recherche est de réduire le poids des réfrigérateurs. Ceci mènera à de plus hauts COPS. En même temps la taille des réfrigérateurs est au centre d'intérêt.

La recherche continue maintenant dans le domaine des mousses et des éponges pour le développement compact d'adsorbant afin d'augmenter la fraction des surfaces enduites par adsorbant à la masse de substrat.

Afin d'augmenter le coefficient de transmission de chaleur entre le substrat et l'adsorbant deux techniques sont au centre de la recherche. Une option est de coller l'adsorbant sur l'échangeur de chaleur. D'ailleurs, des travaux entrepris visent à cristalliser directement l'adsorbant sur le substrat de l'échangeur de chaleur.

#### **I.7.3.2 Les couples binaires modérés**

- Eau/sorbant sélectif (water/selective-water-sorbents (SWS))
- Eau /phosphate d'aluminium (ALPO)
- Eau / silice- phosphate d'aluminium (SAPO)
- Eau /métal- phosphate d'aluminium (MAPO)

Les matériaux « Eau/sorbants sélectifs, (SWS) » sont une composition d'un adsorbant et un sel, qui signifie en principe que l'adsorption et l'absorption se produisent en même temps, alors que le substrat est toujours solide.

(AIPO) consiste à des alternatives unités ( $\text{AlO}_2^-$  et  $\text{PO}_4^+$ ), formant une structure semblable comme des zéolites. Le cadre d'anion est électriquement neutre en conséquence l'électronégativité élevée mène à de bonnes caractéristiques d'adsorption.

(SAPO) ont une structure semblable comme (AIPO). Ils sont basés sur des unités d' $\text{AlO}_2^-$  et de  $\text{PO}_4^+$  mais certains des ions d' $\text{Al}_3^+$  sont substitués par  $\text{Si}_4^+$ . En outre, l'encastrement des tétraèdres de  $\text{FeO}^4$  est possible et déjà étudié (MAPO).

#### **I.7.4 Systèmes à dessiccation [15]**

##### **I.7.4.1 Développement des matériaux**

Les matériaux déshydratants avaient joué un rôle crucial dans le développement de la climatisation déshydratante. Les matériaux déshydratants utilisés généralement incluent le charbon actif, l'alumine active, le passoir moléculaire, le gel de silice, le chlorure de lithium, le chlorure de calcium, etc. Deux principes pour choisir les matériaux déshydratants appropriés sont :

1. les matériaux déshydratants devraient posséder une grande quantité d'adsorption saturée et peuvent être réactivés facilement.
2. les performances d'adsorption des matériaux déshydratants devraient s'approcher de la forme optimale pour l'application de climatisation.

##### **I.7.4.2 Futures recherches et développements**

1. le développement d'une absorptivité élevée, et d'une basse température de régénération et des coûts minimisés des matériaux de dessiccation. Les déshydratants composés en tant que chlorure de gel-lithium de silice peuvent répondre aux exigences de la déshumidification et de la régénération.
2. le développement de la régénération étagée ou des systèmes à plusieurs étages de déshumidification pour réduire les conditions de la réactivation et pour augmenter le taux d'utilisation thermique.
3. la détermination des opérations stratégiques optimales pour améliorer l'applicabilité de système. En raison de l'état de la variation de l'air ambiant et interne et avec la période, le temps, la saison et l'endroit.

4. L'étalonnage de processus de fabrication. La normalisation de conception des installations de climatisation et les analyses des outils diminueront non seulement le coût initial mais seront également salutaires au développement du marché.

En conclusion, l'amélioration du taux d'utilisation d'énergie, la réduction de coût et de taille, et l'étalonnage dans la conception et la production sont les questions clés faites face par la technologie dessiccation pour réaliser une application plus étendue.

## **I.8 Étude technico-économique [16]**

### **I.8.1 Méthodologie de l'évaluation comparative**

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

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

### **I.8.2 Évaluation technique des systèmes de climatisation solaire**

Les combinaisons possibles des technologies de refroidissement solaire sont présentées dans la figure I.14. Comme on le voit, les principaux éléments constitutifs d'un système de refroidissement solaire sont, le champ solaire, les équipements de refroidissement et les équipements de stockage. Dans la figure I.14 chaque technologie de captation de solaire est combinée avec la meilleure technologie de refroidissement qui pourrait s'interfacer avec elle en se basant sur les températures de fonctionnement.

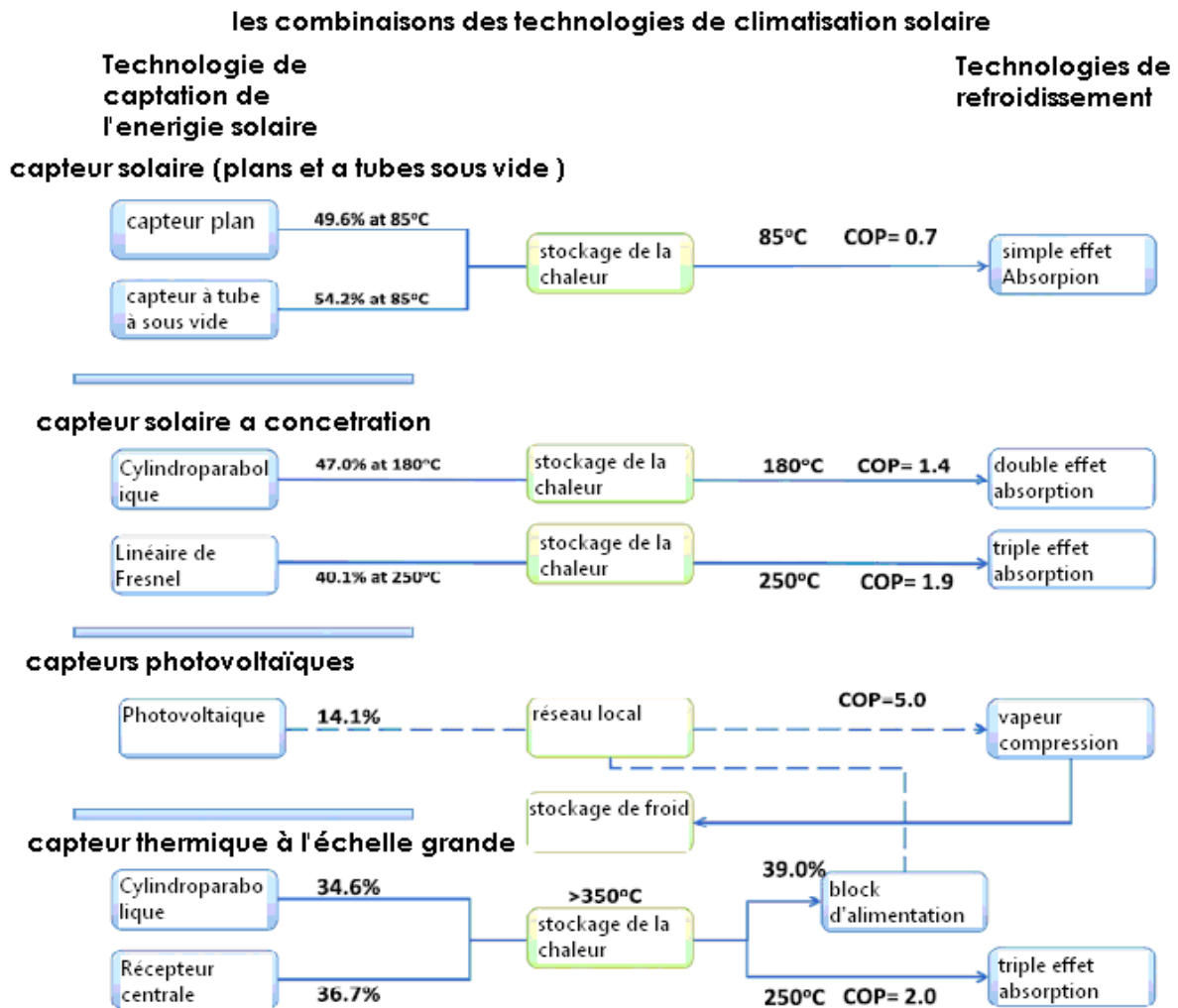


Figure I.14 : Les combinaisons des technologies solaires possibles [16].

### I.8.2.1. Capteurs solaires photovoltaïques

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

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

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



Bien que la performance des capteurs à concentration qui fonctionnent à des températures élevées (supérieures à 180 °C) est également affectée par les conditions ambiantes, les écarts de performance sont moins spectaculaires, ainsi les valeurs moyennes d'efficacité globaux fournis par les fabricants sont considérées comme suffisamment précises

### a. Évaluation des performances des différents

Le rendement thermique des CP et des CT déterminée en utilisant la relation suivante [16]:

$$\eta = A * (I_t * IAM * \eta_{00} - C_1 * (T_a - T_{\infty}) - C_2 * (T_a - T_{\infty})^2) \quad (I.1)$$

IAM : Est le modificateur de l'angle incident qui est une conséquence de la dépendance des propriétés optiques de l'angle d'incidence.

$$IAM = \frac{\zeta_{\alpha}(\theta)}{\zeta_{\alpha_0}} \quad (I.2)$$

L'irradiation solaire sur la surface inclinée du collecteur doit être évaluée pour chaque heure de l'année. Différents modèles sont disponibles pour estimer l'irradiation totale sur une surface inclinée, nous utilisons le modèle de Hay Davies [16] notée par l'équation (I.3) ci-dessous:

$$I_t = (I_b + I_b A) R_b + I_b (1 - A i) \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I_{\rho_g} \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (I.3)$$

Ou A (l'anisotropie d'indice) : est le rapport entre le faisceau l'irradiation à l'irradiation extraterrestre, à la fois sur une surface normale,

$R_b$  est un facteur géométrique calculée comme le rapport entre le rayonnement du faisceau sur une surface inclinée à celle sur une surface horizontale et il est proposée par le équation:

$$R_b = \frac{\cos \phi}{\cos \phi_z} \quad (I.4)$$

où  $\phi$  est l'angle d'incidence d'irradiation diffuse par rapport à la surface inclinée et  $\phi_z$  est l'angle solaire zénithal.

### b. Evaluation des performances des cellules photovoltaïques :

Performance des cellules photovoltaïques est affectée par la température de la cellule. Le rendement de conversion se trouve en évaluant les deux équations suivantes, la première équation représente la variation du rendement des cellules avec la température de la cellule, et la deuxième équation est utilisée pour évaluer la température de la cellule:

$$\eta = \eta(1 - \beta(T_{cell} - T_{STC})) \quad (I.5)$$

$$T_{cell} = T_a + \frac{\tau\alpha_0 * IAM * I_t - I_t * \eta}{2 * h_0} \quad (I.6)$$

### I.8.3 Équipement de refroidissement

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

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

#### I.8.3.1 L'énergie auxiliaire de la machine

Un autre facteur important pris en compte pour l'équipement de refroidissement est la puissance électrique auxiliaire nécessaire pour faire fonctionner les machines à absorption. L'énergie est principalement consommée par les ventilateurs de la tour refroidissement. Évidemment, cette demande d'énergie varie en fonction de la technologie de la machine et la performance du condenseur refroidi par air, l'énergie auxiliaire nécessaire par la machine est estimée par l'équation (I.7) [16]. L'équation estime la quantité d'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner la tour refroidissement par voie sèche. Ce pouvoir est lié à la quantité de chaleur rejetée par le refroidisseur et l'efficacité de la tour de refroidissement à différentes températures ambiantes.

$$P_{electric} = (\eta_{fluide_{cooler}} \left(1 + \frac{1}{COP}\right) * (0.04681 * DTI - 0.04019) \quad (I.7)$$

Chacune des configurations de refroidissement solaire comprend suffisamment de panneaux photovoltaïques pour produire de l'énergie auxiliaire nécessaire. Par conséquent mettant toutes les configurations sur un pied d'égalité puisque les besoins en énergie auxiliaire est différent. En d'autres termes, la quantité annuelle d'énergie auxiliaire est de 100% prise en charge par des cellules photovoltaïques connectés au réseau, dont le coût est inclus dans le coût final du système.

#### I.8.4 Évaluation comparative des technologies de réfrigération solaire

Le coût élevé de l'utilisation de l'énergie solaire a toujours été le principal obstacle à un large déploiement des technologies solaires. En moyenne, l'investissement de capitaux, Capex représente plus de 85% du coût de la production du froid, CCG. Les contributions des composants principaux du coût en capital sont représentées dans la figure I.15.

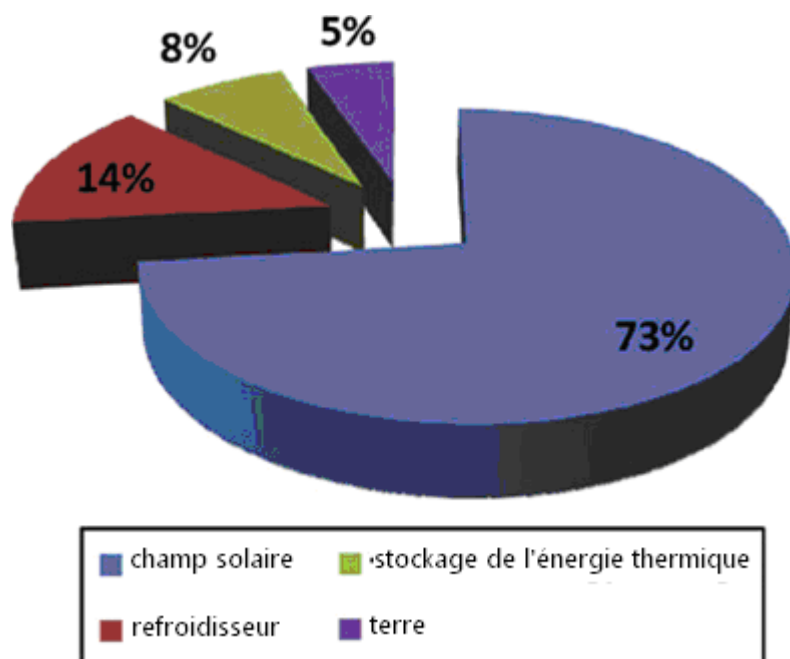


Figure I.15 : Moyenne des Capex, désert d'Abu Dhabi [16].

L'efficacité globale est le rapport entre la puissance de refroidissement et l'entrée solaire incidente sur la superficie totale des terres consommées par le champ solaire. Ainsi l'efficacité globale prend en compte à la fois la performance de l'ensemble du système ainsi que l'utilisation des terres. L'efficacité globale représente donc la quantité de refroidissement que chaque technologie produit par chaque mètre carré de terrain, et non de capteur. Ainsi

elle représente les facteurs des différents types de capteurs solaires. Figure I.16 représente l'efficacité globale de toutes les technologies de refroidissement considéré.

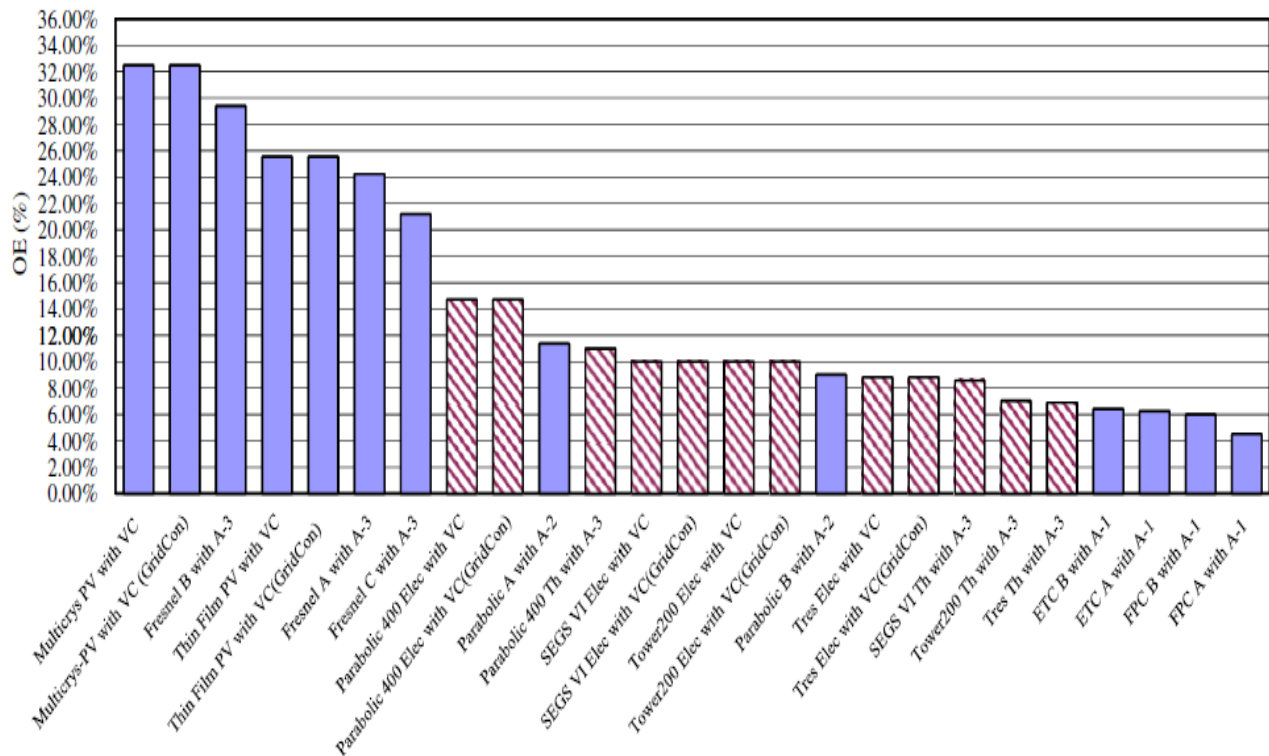


Figure 1.16: Moyenne annuelle d'efficacité globale (barres hachurées représentent des options à grande échelle, où: Tres, SEGS VI, Tour Est 200, et 400 paraboliques sont les nom de ces installations [16].

## I.9 Conclusion

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

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

Pour des capteurs solaires moins chers travaillant aux alentours de 90 °C, une machine à absorption à eau/bromure de lithium ou une machine à absorption ammoniac-eau avec un COP entre 0,6 et 0,8 peuvent être envisagées. Le prix d'un capteur solaire varie

considérablement dans cette gamme de température. Le prix d'un capteur de 50% d'efficacité à 90 °C varie entre 300 et 600 €/m<sup>2</sup>.

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

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

## II.1 Introduction [17]

Climatiser un local, au sens le plus large et général, consiste à maîtriser de façon volontaire, les caractéristiques physico-chimiques de l'atmosphère qui y règne afin de rendre celle-ci plus agréable aux occupants ou plus adaptée aux travaux qui y sont effectués.

Donc le but de La climatisation consiste à traiter l'air afin d'avoir une agréable température ainsi qu'un taux d'humidité optimal, et d'assurer une bonne circulation d'air purifié, et essentiellement de satisfaire le confort thermique des utilisateurs.

## II.2. Procédé de refroidir [17]

La chaleur ne peut passer spontanément d'un corps froid vers un corps chaud. C'est l'énoncé de Clausius du second principe de la thermodynamique.

Si l'on veut effectuer le transfert de chaleur, dans le sens antinaturel, d'un milieu froid vers un milieu chaud, il faut, nécessairement, d'un part, imaginer et mettre en oeuvre un système thermique particulier mis en oeuvre est susceptible de transférer effectivement de la chaleur d'un milieu à température inférieure ou la chaleur est prélevée (source froid) vers un milieu à température supérieure ou la chaleur est rejetée (puits chaud).

Lorsque le but recherché est l'extraction de chaleur à un corps, ou à un milieu, pour le refroidir ou le maintenir à une température inférieure à celle de l'ambiance, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de produire du froid, le système thermodynamique qui effectue cette opération prend naturellement le nom machine frigorifique

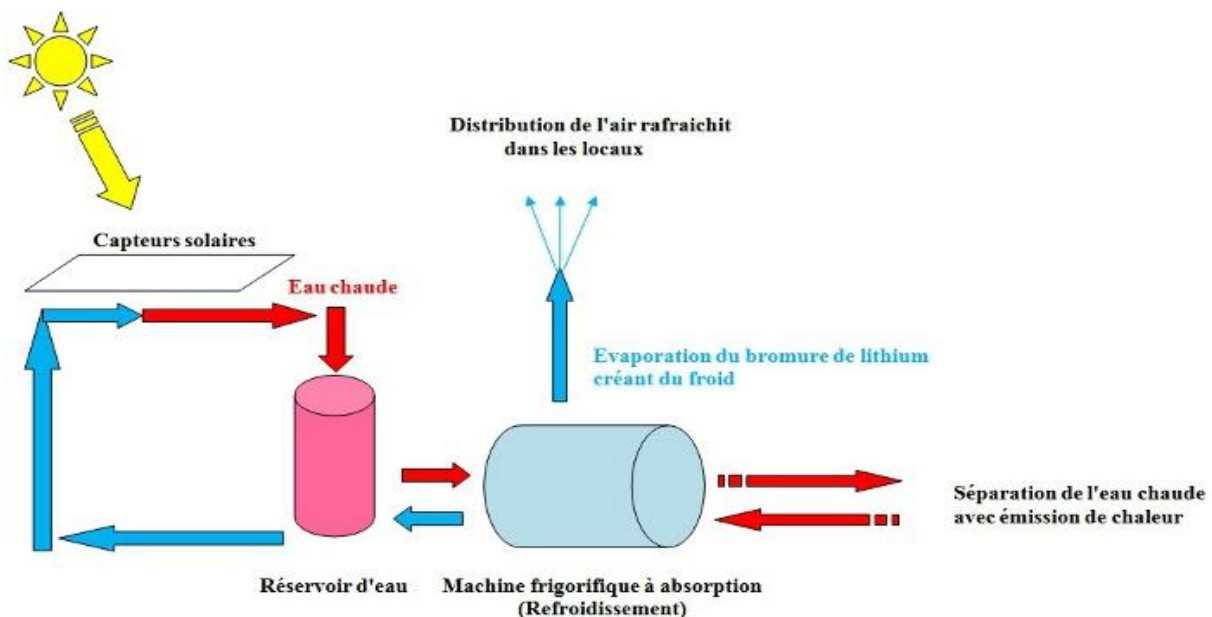


Figure II.1: Les principes de la climatisation solaire.

### II.3 Les systèmes à compression mécanique

Les machines frigorifiques à compression mécanique sont les plus répandues

Ils sont constitués des éléments suivants (Figure II.2).

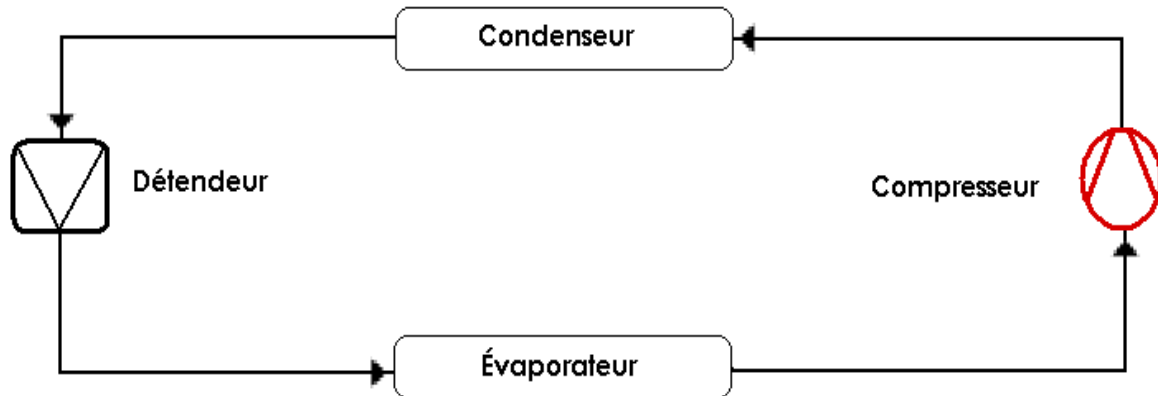


Figure II.2: Schéma de principe d'une machine à compression mécanique mono-étagée.

On utilisant le capteur photovoltaïque, on peut produire l'électricité qui alimente le moteur électrique, ce dernier permet de fonctionner la machine à compression de vapeur pour produire le froid.

#### II.3.1. Machine frigorifique à compression de vapeur mono étagé

##### a) Diagramme de Mollier [18]

Le diagramme de Mollier du fluide considéré a pour axes la pression  $P$  et l'enthalpie  $H$  (par unité de masse). Sur ce diagramme, des séries de courbes sont déjà tracées : isotherme, isentropiques, isochores ainsi que la courbe de saturation limitant le domaine de coexistence de deux phases (liquide et gaz). Le diagramme de Mollier permet de schématiser ce cycle en fonction des paramètres mesurés et d'en déduire les autres variables d'état en tout point de cycle.

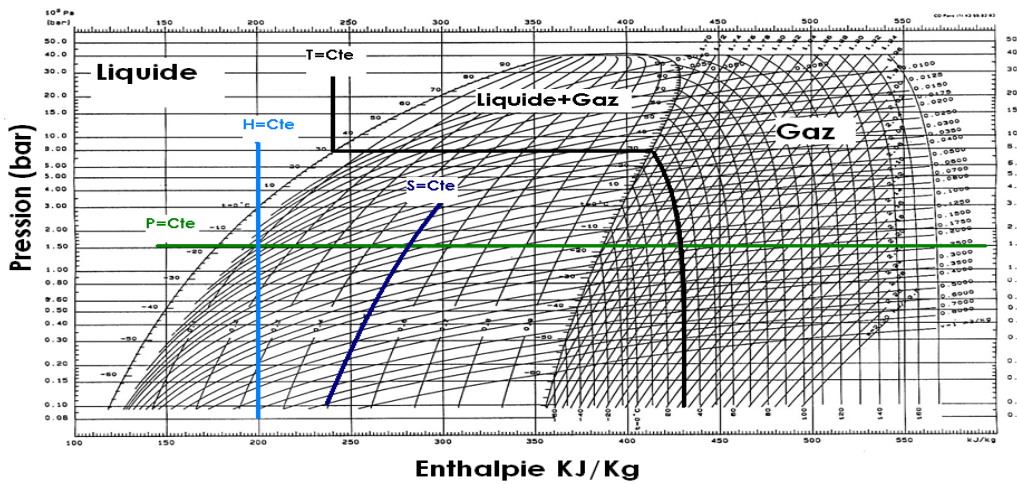


Figure II.3: Diagramme de Mollier du fluide R134a [18].

Les réfrigérateurs à compression utilisent le cycle de Hirn qui comprend 2 transformations isobares, une transformation adiabatique et une transformation isenthalpique. Un tel cycle représenté de façon très simple dans un diagramme de Mollier.

**b) Cycle frigorifique élémentaire [11]**

Le cycle frigorifique d’une machine frigorifique est habituellement représenté dans le diagramme thermodynamique enthalpie (h)-pression (p) appelé diagramme enthalpique ou diagramme de Mollier des frigoristes.

Le cycle est fermé, le fluide frigorifique évolue sous l’action du compresseur dans les quatre éléments constituant la machine frigorifique.

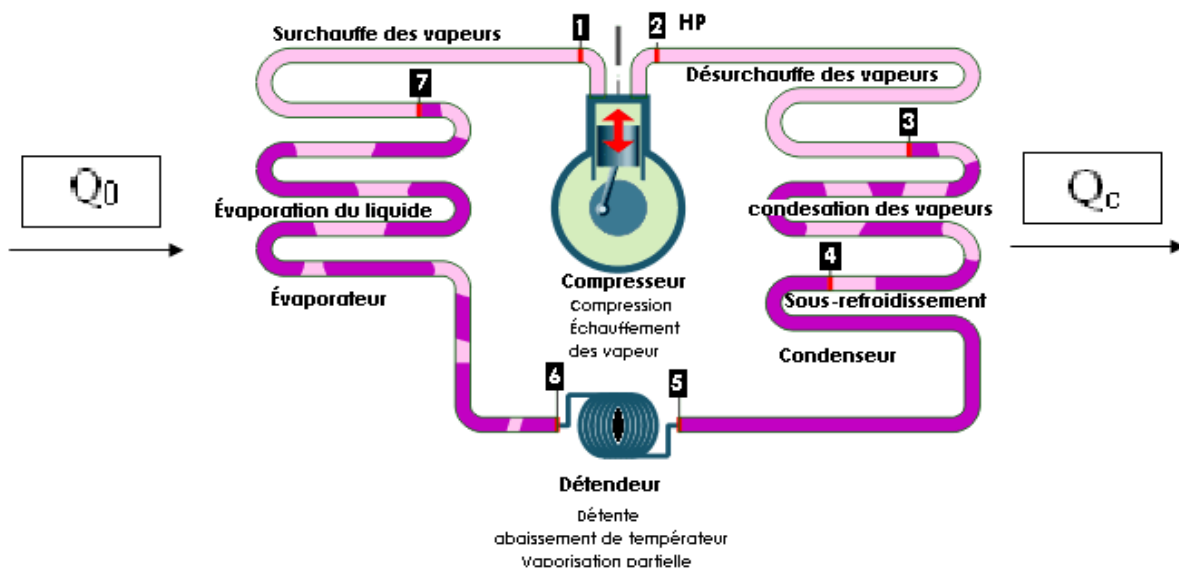


Figure II.4: Schéma d’une machine frigorifique à compression de vapeur mono étage [11].



Suivant le schéma de la machine frigorifique de la figure II.4, le fluide frigorigène circulant dans le circuit frigorifique suit les évolutions suivantes :

- ✚ Entre 1 et 2 : compression des vapeurs de fluide frigorigène qui passent d'un niveau de basse pression (BP) à un niveau de haute pression (HP).
- ✚ Entre 2 et 3 : désurchauffe des vapeurs de fluide frigorigène haute pression.
- ✚ Entre 3 et 4 : condensation des vapeurs de fluide frigorigène haute pression.
- ✚ Entre 4 et 5 : sous refroidissement du fluide frigorigène liquide HP.
- ✚ Entre 5 et 6 : détente du fluide frigorigène liquide HP qui devient un mélange de liquide BP et d'une faible quantité de vapeurs BP.
- ✚ Entre 6 et 7 : évaporation du fluide frigorigène liquide BP qui devient des vapeurs de fluide frigorigène basse pression.
- ✚ Entre 7 et 1 : surchauffe des vapeurs de fluide frigorigène BP.

Les différentes évolutions du fluide frigorigène de la machine frigorifique sont représentées sur le diagramme enthalpique, il s'agit du cycle frigorifique de la machine communément appelée cycle de référence ou cycle pratique par les frigoristes.

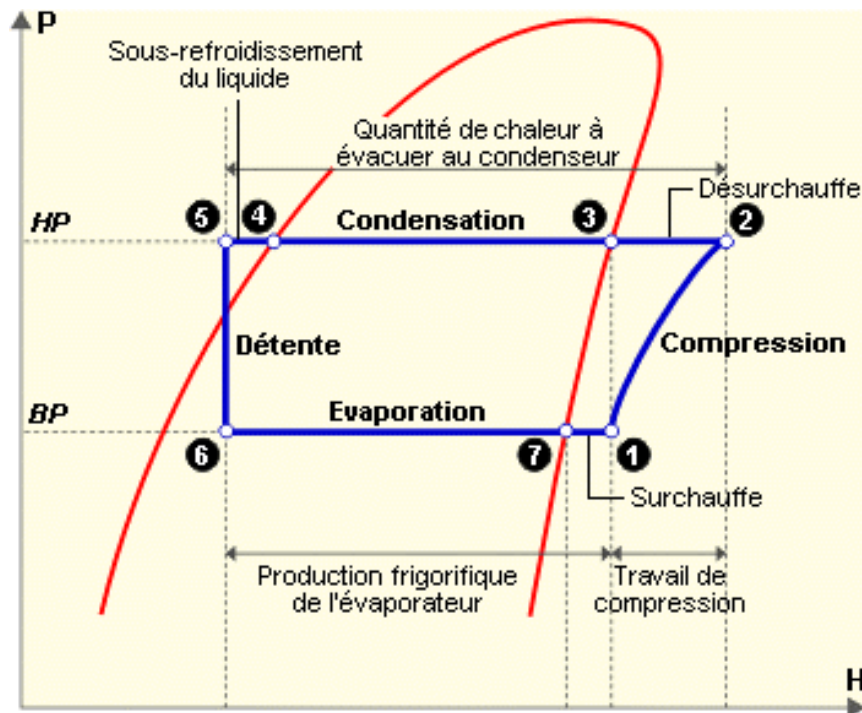


Figure II.5: Diagramme enthalpique du cycle frigorifique [11].

Le cycle frigorifique de référence est un compromis qui permet d'effectuer l'étude et le dimensionnement des machines frigorifiques avec une précision acceptable.

### c) Bilan thermique de cycle [11]

A partir du premier principe de la thermodynamique, il y a une conservation de l'énergie : c'est-à-dire que la quantité de chaleur rejetée au fluide froid dans le condenseur  $Q_c$  par le fluide frigorigène doit être égale à la somme de la chaleur absorbée à l'évaporateur  $Q_0$  pour produire le froid et plus le travail  $W_{th}$  consommé ou bien l'énergie reçue pour faire fonctionner le compresseur voir la figure II.5.

D'où l'équation :

$$Q_c + Q_0 = W_{th} \quad (\text{II.1})$$

Le choix d'échelle en abscisse (enthalpie  $h$  en [kJ/kg]) est très pratique pour l'exploitation quantitative du diagramme de Mollier, car il permet de lire directement des énergies  $h_i$  aux différents points  $i$  (1, 2, 3, 4, 5, 6,7) du cycle de la machine.

On vérifie ainsi le premier principe sur l'échelle en abscisse, car on constate que : Le travail dépensé au compresseur :

$$W_{th} = h_2 - h_1 \quad (\text{II.2})$$

La quantité de chaleur dégagé par le condenseur :

$$Q_c = h_5 - h_2 \quad (\text{II.3})$$

La quantité de froid produite par l'évaporateur :

$$Q_0 = h_1 - h_6 \quad (\text{II.4})$$

### Calcul de coefficient de performance

Dans les machines frigorifique, on remplace le terme rendement de la machine par son coefficient de performance COP, car se dernier sa ce peut supérieur à l'unité.

Le coefficient de performance de l'installation de réfrigération est défini par la relation

Suivante:

$$COP_{froid} = \frac{\text{froid produit}}{\text{travail produit}} \quad (\text{II.5})$$

### II.3.2 Éléments de la machine frigorifique [11]

La machine frigorifique est basée sur la propriété des fluides frigorigènes de s'évaporer et de se condenser à des températures différentes en fonction de la pression.

Pour expliquer le fonctionnement de la machine frigorifique, nous prendrons les caractéristiques du R22 parce que c'est le fluide le plus couramment utilisé en climatisation. Mais ce n'est plus celui que l'on choisira dans les installations nouvelles.

#### a. A la pression atmosphérique [11]

Le R22 est liquide à  $-45^{\circ}\text{C}$  et se met à « bouillir » aux alentours de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Si du fluide R22 à  $-45^{\circ}\text{C}$  circule dans un serpentin et que l'air à  $20^{\circ}\text{C}$  passe autour de ce tuyau, l'air se refroidira : il cédera sa chaleur au fluide qui lui s'évaporerait. C'est le rôle de l'évaporateur de la machine frigorifique.

#### b. A la pression 13 bars [11]

Si la vapeur de fluide à 13 bars et à  $65^{\circ}\text{C}$  circule dans un serpentin et que de l'air à  $20^{\circ}\text{C}$  passe autour de ce tuyau, le fluide frigorigène se refroidira et à partir de  $33^{\circ}\text{C}$ , il se liquéfiera, il se condensera, En se condensant, il va libérer énormément de chaleur.

C'est le rôle du condenseur de la machine frigorifique.

Il est important de préciser qu'un cycle de réfrigération à compression de vapeur comprend quatre éléments principaux qui sont :

- Le compresseur, l'évaporateur, le condenseur, le détendeur

#### c. Le compresseur [11]

Le compresseur va tout d'abord aspirer le gaz frigorigène à basse pression et à basse température (1). L'énergie mécanique apportée par le compresseur va permettre d'élever la pression et la température du gaz frigorigène. Une augmentation d'enthalpie en résultera.

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

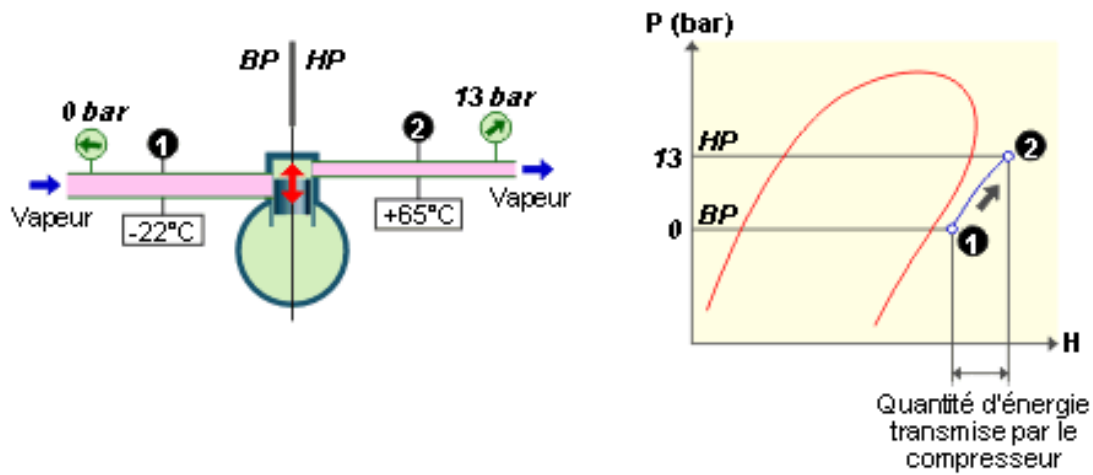


Figure II.6: Fonctionnement de compresseur [11].

d. L'évaporateur [11]

Le fluide frigorigène liquide entre en ébullition et s'évapore en absorbant la chaleur du fluide extérieur. Dans un deuxième temps, le gaz formé est encore légèrement réchauffé par le fluide extérieur, c'est ce qu'on appelle la phase de surchauffe (entre 7 et 1).

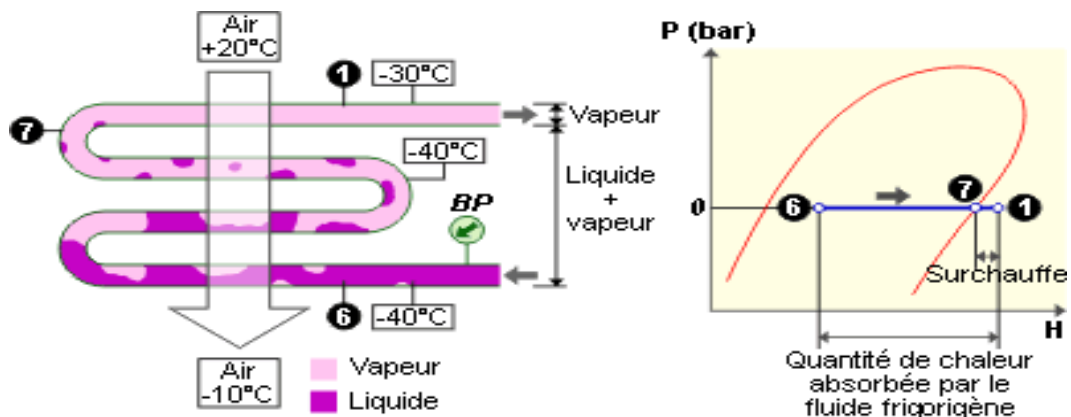


Figure II.7: Fonctionnement de l'évaporateur [11].

e. Le condenseur [11]

Le gaz chaud provenant du compresseur va céder sa chaleur au fluide extérieur. Les vapeurs de fluide frigorigène se refroidissent ("désurchauffe"), avant l'apparition de la première goutte de liquide (point 3). Puis la condensation s'effectue jusqu'à la disparition de la dernière bulle de vapeur (point 4). Le fluide liquide peut alors se refroidir de quelques degrés (sous-refroidissement) avant de quitter le condenseur.

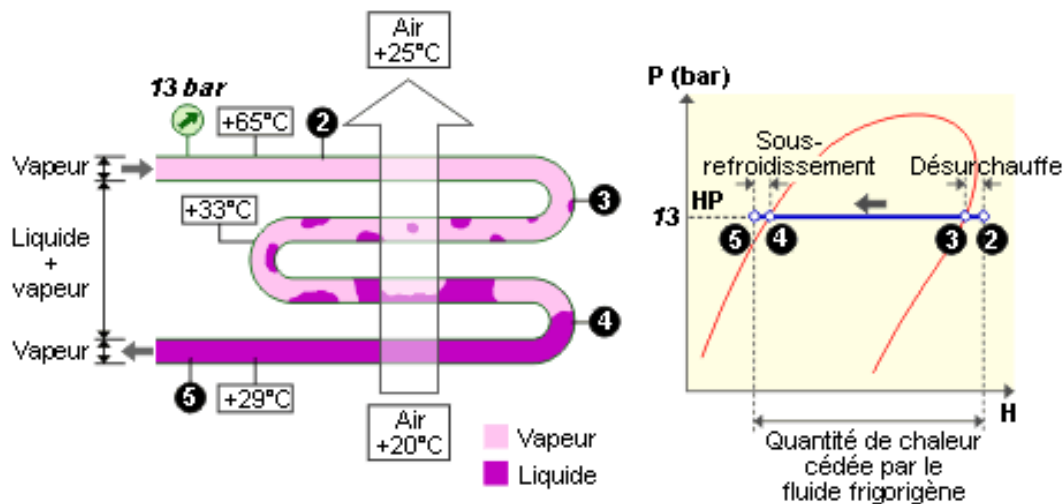


Figure II.8: Fonctionnement du détendeur [11].

## f. Les équipements annexes [19]

### 1. Accumulateurs :

C'est un équipement de sécurité à l'aspiration du compresseur pour éviter les coups de liquide.

### 2. Collecteur :

C'est un équipement de stockage du fluide frigorigère à la sortie du condenseur.

### 3. Tuyauterie :

Une installation frigorigère présente trois tuyauteries principales qui sont la tuyauterie d'aspiration au compresseur, la tuyauterie de refoulement et la tuyauterie du liquide à l'évaporateur.

Ces conduites doivent en général :

- Permettre une circulation aisée du fluide,
- Ne pas présenter de charge excessive qui augmente inutilement la charge du compresseur,
- Rester d'un prix raisonnable.

## II.3.3 Les réfrigérants [20]

La méthode de production de froid avec compression de vapeur fait appel à une substance que l'on appelle réfrigérants. C'est une substance chimique dont la température d'ébullition à la pression atmosphérique est inférieure à la température ambiante. Aujourd'hui l'utilisation des réfrigérants est remise en question, à cause de leur effet sur la

couche d'ozone. Certains seront retirés du marché pour être remplacés par de nouveaux composés moins agressifs vis-à-vis de la couche d'ozone.

Le tableau II.1, donne les principaux réfrigérants et leurs températures d'ébullition à la pression atmosphérique.

Réfrigérant	Température d'ébullition (°C)
Eau (H <sub>2</sub> O)	100
R11 (CF CL <sub>3</sub> )	23.3
R12 (CF <sub>2</sub> CL <sub>2</sub> )	-29.8
R22 (CHF <sub>2</sub> CL)	-40.7
R500	-33.3
R502	-45.6
Ammoniac NH <sub>3</sub>	-33.3

Tableau II.1 : Liste des principaux réfrigérants et leurs températures d'ébullition [20].

#### II.4 Machine à absorption [11]

Le principe base du fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption reste le même que celui d'une machine à compression mécanique (Figure II.9) :

- Circulation d'un fluide frigorigène
- Évaporation du fluide avec production de froid
- Compression du fluide demandant un apport d'énergie
- Condensation du fluide avec production de chaleur

La différence réside dans :

- Le moyen de comprimer le fluide :
  - Mécanique dans le cas d'une machine traditionnelle
  - Thermochimique dans le cas d'une machine à absorption
- L'énergie utilisé pour cette compression :
  - Electrique dans le cas d'une machine traditionnelle
  - Calorifique dans le cas de la machine à absorption

### II.4.1 Description de cycle à absorption Eau/LiBr

On trouve les machines à absorption utilisant le couple  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$ , réservées pour les températures positive, c'est-à-dire la climatisation, et celles utilisant le couple  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  qui ont la possibilité de fournir les températures négatives.

- Dans l'évaporateur, le réfrigérant (ici de l'eau) est pulvérisé dans une ambiance à très faible pression (vide poussé = 7 mb). L'évaporateur est parcouru par un circuit à eau. En s'évaporant, le réfrigérant soustrait sa chaleur à cette eau qui ainsi refroidie et peut ensuite alimenter des ventilo-convecteurs, une batterie froide de centrale de traitement d'air ou un plafond rayonnant ...
- La vapeur d'eau créée dans l'évaporateur est amenée à l'absorbeur. Il contient la solution absorbante (LiBr) qui est continuellement pompée dans le fond du récipient pour y être pulvérisée. Le LiBr absorbe la vapeur d'eau hors de l'évaporateur et y maintient ainsi la basse pression nécessaire à la vaporisation du réfrigérant. la solution est donc régénérée ou un brûleur de gaz (environ  $85^\circ\text{C}$ ) et une partie de l'eau s'évapore. La solution régénérée retourne à l'absorbeur.
- Enfin, la vapeur d'eau extraite du concentrateur est amenée dans le condenseur, ou elle est refroidie par une circulation d'eau froide. L'eau condensée retourne à l'évaporateur et le cycle frigorifique peut recommencer. Le fluide chaud sortant du désorbeur qui retourne à l'absorbeur préchauffe le fluide qui va vers le concentrateur grâce à l'échangeur de chaleur, économisant ainsi une partie de l'énergie nécessaire pour chauffer le fluide à régénérée

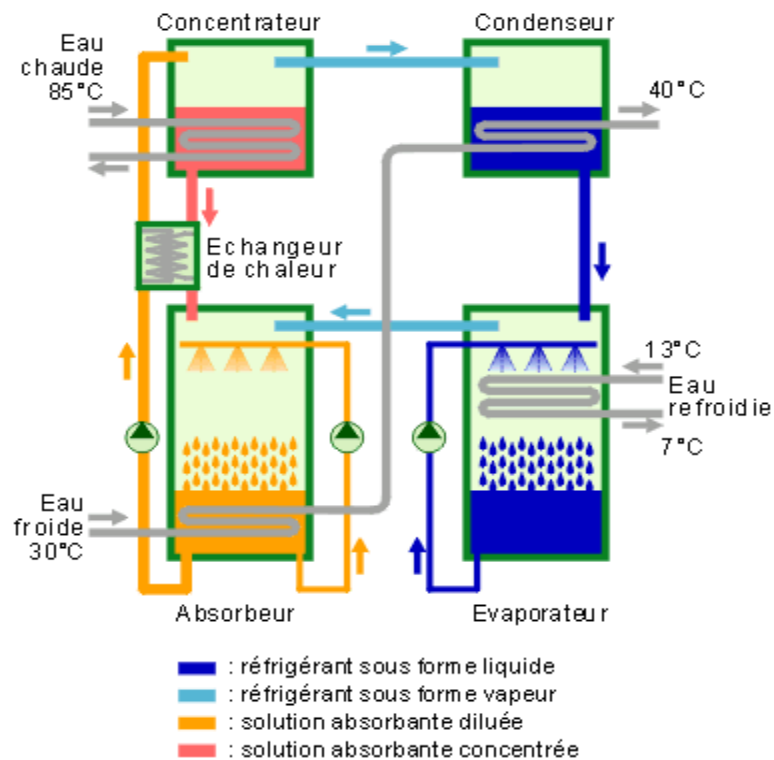


Figure II.9: Schéma de fonctionnement d'une machine à absorption pour le couple Eau/Bromure de Lithium (LiBr).

Le phénomène d'absorption génère de la chaleur. La circulation d'eau froide dans le fluide absorbant évite sa montée en température, ce qui diminuerait son efficacité. L'eau de refroidissement de l'absorbeur peut ensuite passer dans la batterie de refroidissement du condenseur pour ensuite retourner vers la tour de refroidissement.

#### II.4.2 L'efficacité énergétique :

$$\text{COP}_{\text{froid}} = \frac{\text{Puissance frigorifique}}{\text{Puissance apporté}} \quad \text{II.2}$$

$$\text{COP}_{\text{froid}} = \frac{Q_{\text{évp}}}{Q_{\text{désorbeur}} + W_{\text{circulation}}} \quad \text{II.3}$$

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

On note tout de suite que la valeur du  $\text{COP}_{\text{froid}}$  d'une machine à absorption est très inférieure à celui d'une machine à compression mécanique traditionnelle. Cependant, la valeur du  $\text{COP}_{\text{froid}}$  est essentiellement fonction de l'énergie apportée au désorbeur, l'énergie nécessaire au fonctionnement des circulateurs étant très faible ( $\approx 5\%$  de la puissance



frigorifique du groupe) par rapport à  $Q_{\text{désorbeur}}$ . Ces valeurs de  $\text{COP}_{\text{froid}}$  données ci-dessus sont à prendre entre guillemets car ils correspondent à des machines à absorption fonctionnant avec des énergies non renouvelables et non gratuites. Or dans le cas d'une machine frigorifique solaire à absorption cette énergie apportée au désorbeur est en majeure partie gratuite car venant de l'eau chaude solaire. Le cycle ainsi que ses performances présentées ci dessus se réfèrent aux des machines à absorption simple effet, il existe cependant des machines à absorption double effet dont le  $\text{COP}_{\text{froid}}$  est amélioré et peut atteindre 1,3 mais ces dernières nécessitent des températures d'eau au désorbeur entre 140°C et 160°C. Il y a des recherches en cours sur des machines à 3 voir 4 effets présentant des COP atteignant un valeur comprise entre 1,7 et 2,2. Ils nécessitent des températures encore plus élevées et n'ont pour l'instant aucune application solaire. Ce sont d'ailleurs, les machines simple effet qui sont très majoritairement employées pour les applications solaires, les autres nécessitant des températures au désorbeur trop élevées.

#### II.4.3 Diagramme d'Oldham

C'est le diagramme est le plus utilisé et le plus pratique pour une étude d'une machine à absorption ; l'axe des abscisse est gradué en  $(-1/T)$  et l'axe des ordonnées en  $(\text{Ln}(p))$ .

La figure II.10, montre un tel diagramme qui ressemble beaucoup au diagramme d'Oldham du couple ammoniac-eau. Néanmoins certaines différences apparaissent :

- Seule figure, à gauche, la pression de vapeur du frigorigène, l'eau en l'occurrence. La courbe de sel absorbant, le bromure de lithium, ne figure pas é droite ;
- On voit apparaître, en bas et à droite deux courbes de cristallisation de deux hydrate différents :  $\text{LiBr}, \text{H}_2\text{O}$  et  $\text{LiBr}, 2 \text{H}_2\text{O}$  ; à partir de ces courbe, vers le bas et la droite, la phase solide apparaissant, les mélanges ne sont plus utilisables dans le système frigorifique ;
- Il n'y'a pas de courbes correspondant aux teneurs de la phase gazeuse. Celle-ci est toujours constituée d'eau pure.

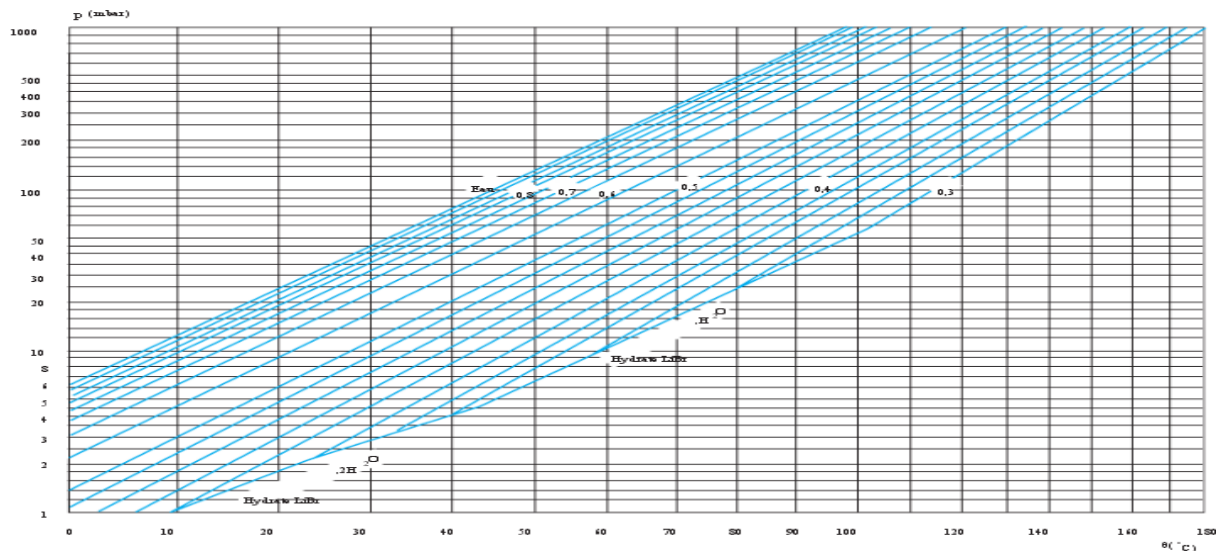


Figure II.10: Diagramme d'Oldham du couple Eau/ Bromure de Lithium (LiBr) [11].

## II.5 Machine à adsorption [11]

Le principe de base du fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption reste le même que celui d'une machine à « compression mécanique » ou que celui d'une machine à absorption, c'est à dire :

- Circulation d'un fluide frigorigène
- Evaporation du fluide avec production de froid
- Compression du fluide demandant un apport d'énergie
- Condensation du fluide avec production de chaleur

Cependant au niveau de la compression elle ne sera pas mécanique utilisant de l'électricité comme pour une machine à compression conventionnelle, mais elle sera thermochimique utilisant un apport calorifique ainsi qu'un sorbant comme pour les machines à absorption à la différence près, qu'ici le sorbant n'est pas un liquide mais un solide. Ceci nécessite quelques modifications au niveau du groupe de production de froid, en effet contrairement au liquide absorbant vu dans le paragraphe précédent, le solide adsorbant ne pourra évidemment pas se déplacer de l'évaporateur à l'absorbeur. Le fonctionnement du groupe sera donc adapté à cette contrainte physique. En l'occurrence, il sera composé, comme nous allons le voir, de 2 chambres d'adsorption.

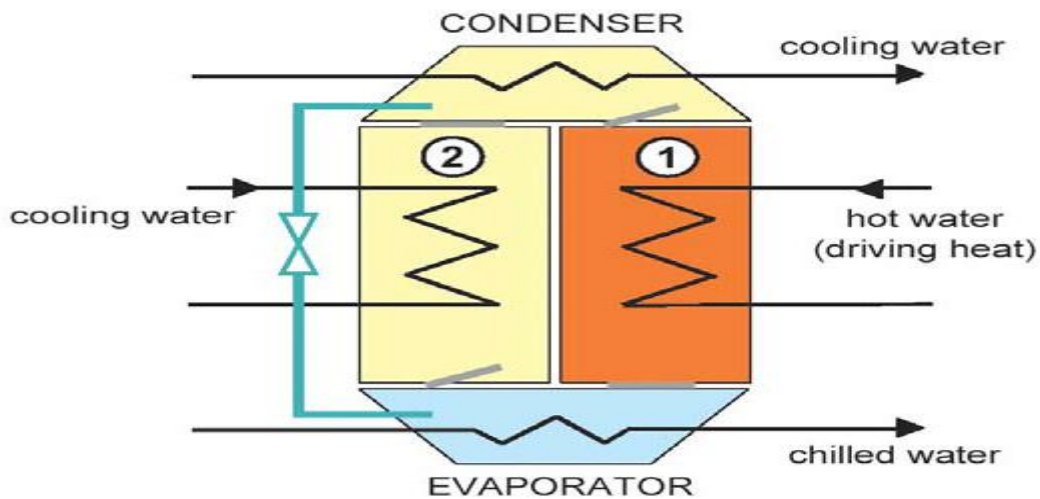


Figure II.11 : Schéma de groupe frigorifique à adsorption [11].

### II.5.1 Description du cycle à Adsorption [11]

Comme dans toute machine frigorifique, on soutire de la chaleur au niveau de l'évaporateur à la source froide (ici, l'eau à refroidir) et on la restitue au niveau du condenseur à la source chaude (ici l'eau de refroidissement). A la différence des machines frigorifiques traditionnelles, la compression ainsi que la détente sont thermiques.

### II.5.2 Diagramme de Oldham [11]

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

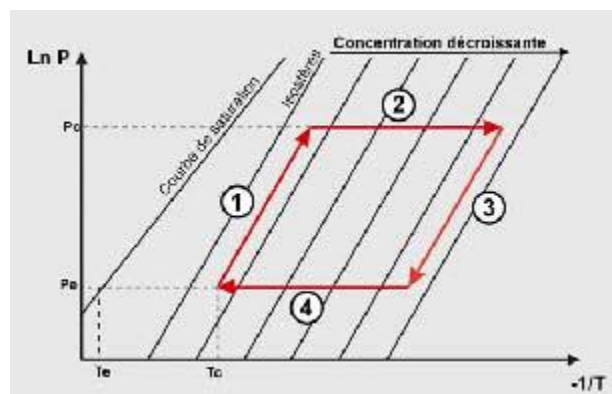


Figure II.12 : Diagramme d'Oldham de l'adsorption [11].

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

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

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

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

- **ETAPE 3 : Refroidissement et baisse de pression**

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

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

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

Dans un groupe de production frigorifique à adsorption, la production de froid se réalise donc de manière quasi continue. En effet comme on l'a vu, on refroidit à l'évaporateur de l'eau pendant 370 sec avant de devoir échanger le rôle de chaque chambre d'adsorption, ceci dure 30 sec avant qu'un cycle de production de froid redémarre pour 370 sec. Un cycle dure donc entre 6 et 7 minutes.

### **II.5.3 Couples fluide frigorigène/adsorbant [11]**

Les exemples des principaux couples fluides frigorigène/adsorbant sont Eau-Gel de silice (silica gel), Eau-charbon actif, eau-Zéolites, Ammoniac-chlorure de calcium, Ammoniac-zéolites, Alcool méthylique (méthanol)-charbon actif, Alcool méthylique-zéolites, etc. Cependant seulement les groupes à adsorption utilisant le couple Eau-Silica gel sont couramment disponibles sur le marché.

### **II.5.4 L'utilisation de l'énergie solaire dans une machine à Adsorption [11]**

Comme nous venons de le voir, les machines frigorifiques à adsorption nécessitent une source de chaleur permettant de régénérer l'adsorbant dans les chambres d'adsorption. Cette chaleur est généralement fournie par une chaudière au fioul, au gaz, un réseau de chaleur, une centrale de cogénération et elle peut donc l'être également par des capteurs solaires thermiques. La température de l'eau fournissant la chaleur de régénération est généralement comprise entre 55°C et 80°C. Les puissances frigorifiques des machines à adsorption disponibles et adaptées à une utilisation avec des capteurs solaires se situent entre 50 kWf et 430 kWf. C'est à dire qu'elles sont destinées à des installations de grandes ampleurs et n'ont actuellement aucune application individuelle.

### **II.5.5 Avantages de l'adsorption [11]**

- Les températures de l'eau chaude requises pour le fonctionnement du groupe à adsorption autorisent l'utilisation dans certains cas de capteurs plans.
- Le fluide frigorigène est inoffensif dans la quasi totalité des installations.

### **II.5.6 Inconvénients de l'adsorption [11]**

- Les groupes à adsorption sont plus chers, plus lourds et plus volumineux que les groupes à absorption et leur choix moins grand.

### II.5.7 L'efficacité énergétique ou $COP_{\text{froid}}$

$$COP_{\text{froid}} = \frac{\text{Puissance frigorifique}}{\text{Puissance apportée}} \quad (\text{II.4})$$

$$COP_{\text{froid}} = \frac{Q_{\text{évp}}}{Q_{\text{désorbeur}} + W_{\text{circulation}}} \quad (\text{II.5})$$

$COP_{\text{froid}}$  d'une machine à adsorption généralement rencontrés  $0,4 < COP_{\text{froid}} < 0,6$

On note tout de suite que la valeur du  $COP_{\text{froid}}$  d'une machine à adsorption est très inférieure à celui d'une machine à compression mécanique traditionnelle. Cependant, la valeur du  $COP_{\text{froid}}$  est essentiellement fonction de l'énergie calorifique apportée aux chambres d'adsorption pour la régénération de l'adsorbant.

Ces valeurs de  $COP_{\text{froid}}$  données ci-dessus sont à prendre entre guillemets car ils correspondent à des machines à adsorption fonctionnant avec des énergies non renouvelables et non gratuites. Or dans le cas d'une machine frigorifique solaire à adsorption cette énergie calorifique est en majeure partie gratuite car venant de l'eau chaude solaire. Le graphique ci dessous permet de visualiser l'évolution du COP pour une machine à adsorption et une machine à absorption en fonction de la température de l'eau chaude solaire assurant l'apport calorifique nécessaire au fonctionnement d'un groupe à absorption comme d'un groupe à adsorption.

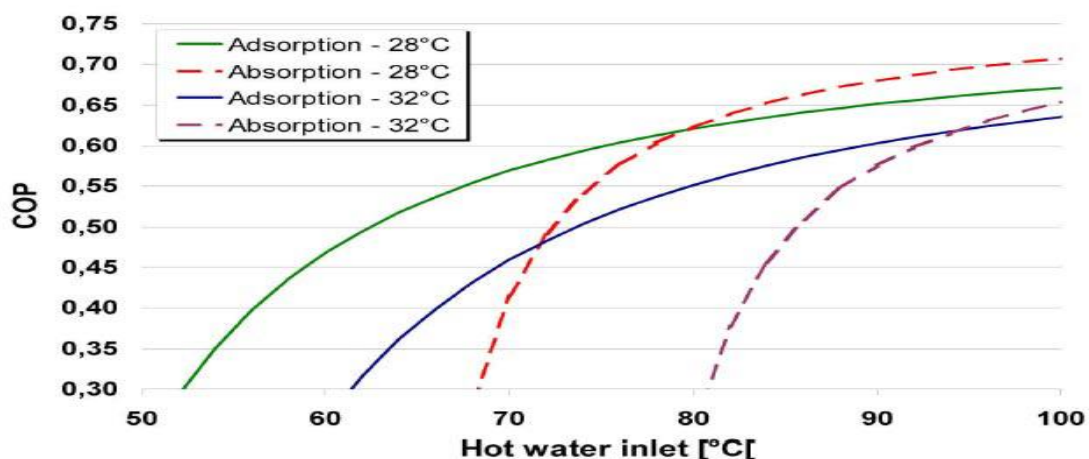


Figure II.13: l'évolution de COP pour une machine à adsorption et une machine à absorption [11].

Il y a 2 courbes tracées pour chaque type de groupe de production frigorifique. Elles correspondent chacune à une température donnée de l'eau de refroidissement du

condenseur. On voit dans les 2 cas que le COP est amélioré si l'on a une température d'eau de refroidissement plus basse au condenseur. En effet, la condensation se réalisera de manière plus complète.

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

## II.6 La dessiccation [11]

Les installations de rafraîchissement évaporatif potentialisé par dessiccation produisent directement de l'air frais, contrairement aux groupes frigorifiques à compression mécanique, à absorption ou à adsorption qui eux refroidissent un fluide intermédiaire (en l'occurrence l'eau alimentant par exemple des ventilo-convecteurs, des plafonds rayonnants ou un batterie froide à eau glacée de CTA).

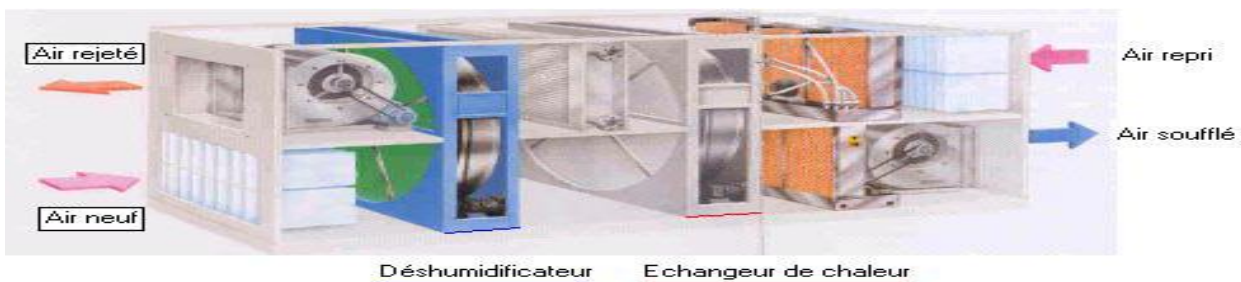


Figure II.14: Schéma d'une machine a dessiccation [11].

Une des particularités de ce système est qu'il est composé de deux gaines d'air ( air entrant, air sortant ) placées côte à côte. On trouve également, en plus par rapport à une centrale de traitement d'air classique une roue dessicatrice ou déshumidificatrice placée en tandem avec une roue thermique (échangeur de chaleur). Nous verrons leur utilité et leur fonctionnement plus loin.

Ces installations n'utilisent pas non plus de batterie froide conventionnelle (à détente directe ou à eau glacée) mais s'appuient sur l'idée de refroidir de l'air non saturé en vapeur







Le procédé de base permettant le conditionnement d'air est le suivant [11] :

L'air entrant, chaud et humide, traverse une roue à dessiccation en rotation lente, et est donc déshumidifié (1-2). L'air étant réchauffé par le phénomène d'adsorption, un premier refroidissement est obtenu au travers d'un échangeur thermique (roue métallique en nid d'abeilles, en rotation : (2-3). L'air est ensuite humidifié, et donc refroidi, dans un humidificateur (3-4), permettant d'ajuster le niveau d'humidité et de température souhaité pour l'air neuf.

L'air repris dans la pièce est humidifié pratiquement jusqu'au point de saturation (6-7), pour bénéficier au maximum du potentiel de refroidissement dans l'échangeur thermique (7-8). Enfin, la roue à dessiccation doit être régénérée (9-10), en utilisant de la chaleur à un niveau de température relativement faible ( $50^{\circ}$  à  $75^{\circ}\text{C}$ ), permettant ainsi de poursuivre le processus continu de déshumidification.

### II.6.1 La roue dessicatrice [11]

La roue dessicatrice a pour fonction de diminuer l'humidité de l'air entrant en la transférant vers l'air sortant grâce au phénomène d'adsorption, c'est à dire le mécanisme par lequel certains solides ont la capacité de piéger un gaz ou une vapeur. C'est en l'occurrence le cas du Gel de Silice qui va pouvoir adsorber et stocker dans sa structure moléculaire la vapeur d'eau contenue dans l'air entrant tout en voyant sa capacité d'adsorption au fur et à mesure diminuer jusqu'à être nulle, à saturation.

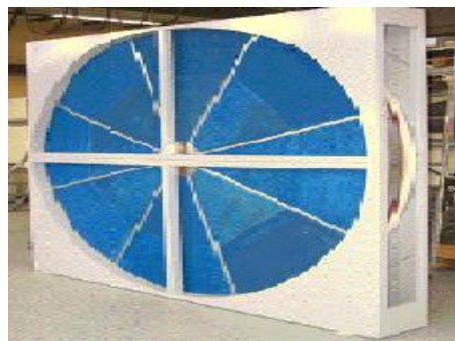


Figure II.16: Roue dessicatrice [11].

On doit alors régénérer le gel de Silice en le chauffant à une certaine température pour qu'il puisse "rendre" la vapeur d'eau comme dans le cas d'une machine frigorifique à adsorption: c'est la désorption, il récupère alors toutes ses propriétés d'adsorption. Cet apport calorifique de régénération va être fourni par l'air sortant (gaine supérieure) que l'on aura préalablement réchauffé dans une batterie chaude à une température pouvant osciller

entre 45 °C et 100 °C en fonction du degré de déshumidification désiré. Cette chaleur nécessaire au chauffage de l'air provient, dans les installations de rafraîchissement par roue à dessiccation habituelles de brûleurs à gaz, de réseaux de chaleur urbains, de centrales de cogénérations... mais donc également de l'ENERGIE SOLAIRE via l'eau chaude produite par des capteurs solaires thermiques.

## II.7 Les capteurs solaires [11]

Le rafraîchissement solaire se différencie de la production d'eau chaude par le niveau élevé de température à laquelle la chaleur utile doit être fournie. Pour les groupes de froid à sorption (absorption et adsorption), la température utile dépasse généralement 80°C ; les valeurs les plus basses étant d'environ 50°C. Pour les systèmes à dessiccation, la température de fonctionnement va de 55°C à 90°C. Compte-tenu des débits élevés nécessaires pour alimenter le système, une stratification du volume de stockage de l'eau chaude est difficile et la température de retour dans le capteur est donc relativement élevée, elle aussi. Ceci induit une limitation dans le choix du type de capteur.

En conséquence, les capteurs solaires plans et les capteurs à air sont bien adaptés pour les systèmes à dessiccation. Lorsque l'on utilise un groupe de froid à adsorption, l'utilisation de capteurs plans sélectifs est limitée aux régions à fort ensoleillement. Dans les régions moins ensoleillées, ou pour les groupes de froid nécessitant des températures de fonctionnement plus élevées comme les machines à absorption simple effet, des capteurs à hautes performances doivent être utilisés. Si on se limite aux capteurs fixes, des températures encore plus élevées peuvent être obtenues grâce à des capteurs sous vide à concentration optique. Il peut s'agir d'une option intéressante pour les systèmes utilisant des groupes de froid à absorption haut performance (double effet).

### II.7.1 Type des capteurs solaires [11]

Il existe deux type de capteurs solaires : Les capteurs fixes et les capteurs solaires à poursuite, qui utilise un système motorisé pour suivre la course du soleil. Ces derniers produisent des hautes températures qui ne sont pas considérées dans les technologies de climatisation solaire actuelles.

Les capteurs solaires fixes sont composés d'un absorbeur, chargé d'emmagasiner la plus grande quantité d'énergie solaire grâce à une absorptivité grande et une émissivité faible. De plus, du verre entre l'air extérieur et l'absorbeur permet de laisser passer la quasi-totalité du rayonnement courte longueur d'onde tout en ayant une transmissivité nulle pour les grandes longueurs d'onde provenant de l'absorbeur.

Le verre crée ainsi un effet de serre tout en évitant également les pertes par convection.

On distingue quatre types de capteur solaire fixes différents :

1. Les capteurs à air :

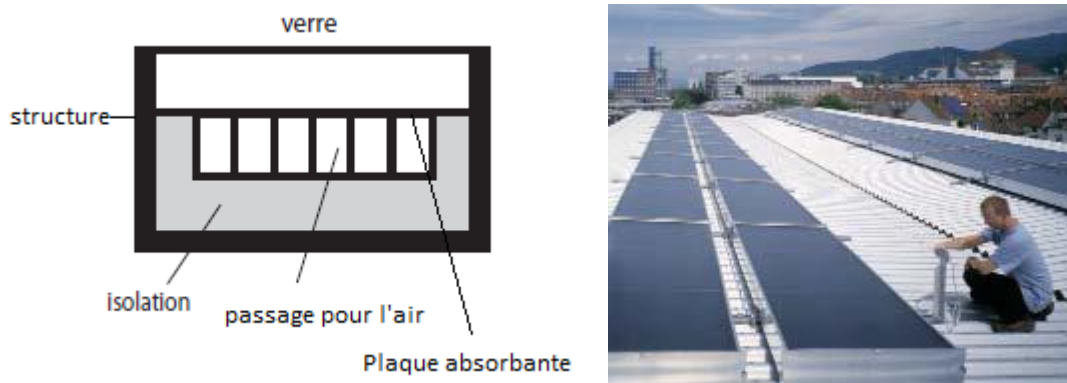


Figure II.17: Vue générale d'un capteur à air [17].

Ils sont utilisés pour le chauffage direct de l'air, généralement pour le préchauffage de l'air neuf. Ils sont utilisés lorsque la température désirée n'est pas très haute ( $\leq 70^{\circ}\text{C}$ ), car le rendement baisse fortement avec la hausse de la température de l'air caloporteur. L'avantage de ce capteur est leur faible coût ainsi que la faible complexité d'installation. Des ailettes sont destinées dans l'absorbeur pour augmenter le coefficient d'échange convectif entre l'air et l'absorbeur. Ces capteurs peuvent être utilisés dans une installation desiccant cooling.

## 2. Les capteurs plans :

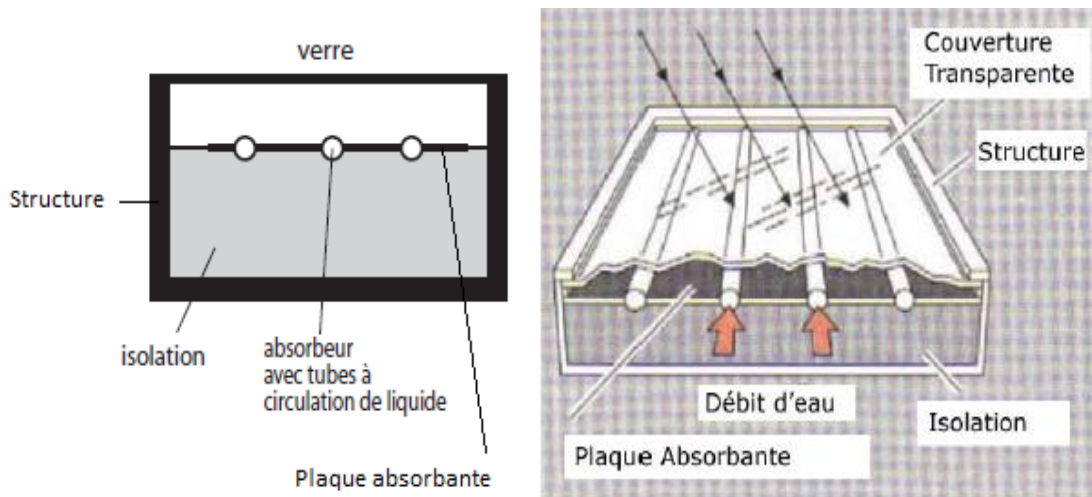


Figure II.18: Vue générale d'un capteur plan et sa coupe verticale [17].

Ces capteurs permettant de chauffer un liquide caloporteur (généralement un mélange eau-glycol). Ils sont utilisés généralement pour la production d'eau chaude sanitaire. Un absorbeur sélectif ainsi qu'une vitre en verre technique permettant de garder un bon rendement avec des températures dans l'ordre de 100°C.

## 3. Les capteurs à concentration fixes :

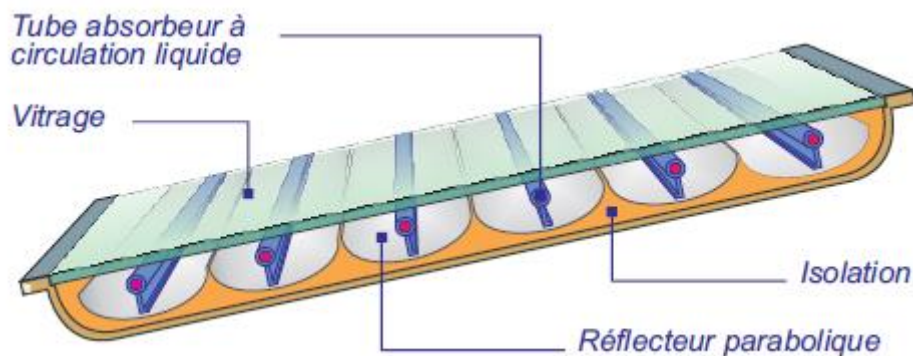


Figure II.19: Vue générale d'un capteur CPC [17].

Ces capteurs sont de même type que les capteurs plans, mais ils concentrent les rayons de soleil sur les absorbeurs à l'aide d'un réflecteur disposé en son face. Ces capteurs sont très efficaces lorsque l'ensoleillement direct est très fort, mais perdent rapidement en efficacité lors des ensoleillements moindres. Ils sont généralement prévus pour la production de chaleur.

## 4. Les capteurs sous vides CS:

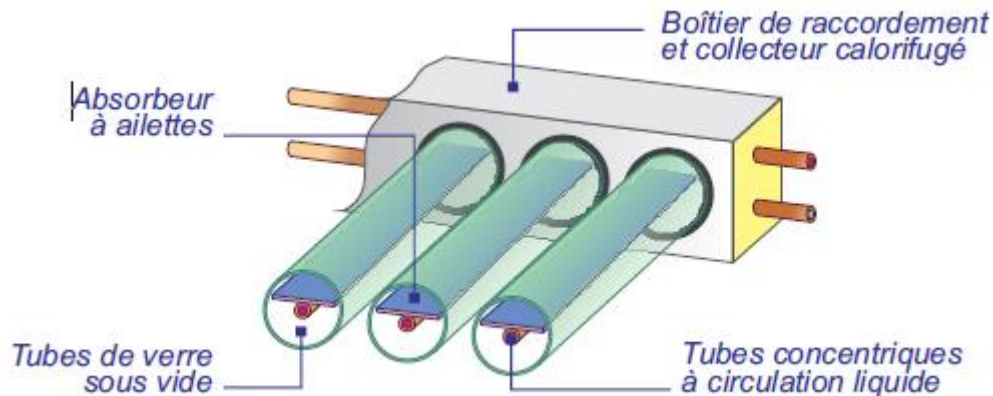


Figure II.20 : Vue générale d'un capteur sous vide [17].

Ces capteurs diffèrent de leur conception car ils sont composés de plusieurs tubes en verre dans lesquelles règne un vide poussé, limitant les échanges convectifs entre l'absorbeur (placé à l'intérieur de tube) et le verre. Plusieurs type de capteur sous vide existent :

- ✚ Circulation directe : Le fluide caloporteur passe successivement dans chaque tube pour y être chauffé. Le principe est simple, mais la fabrication est difficile à cause des liaisons verre/métal nécessaire pour la circulation de fluide caloporteur.

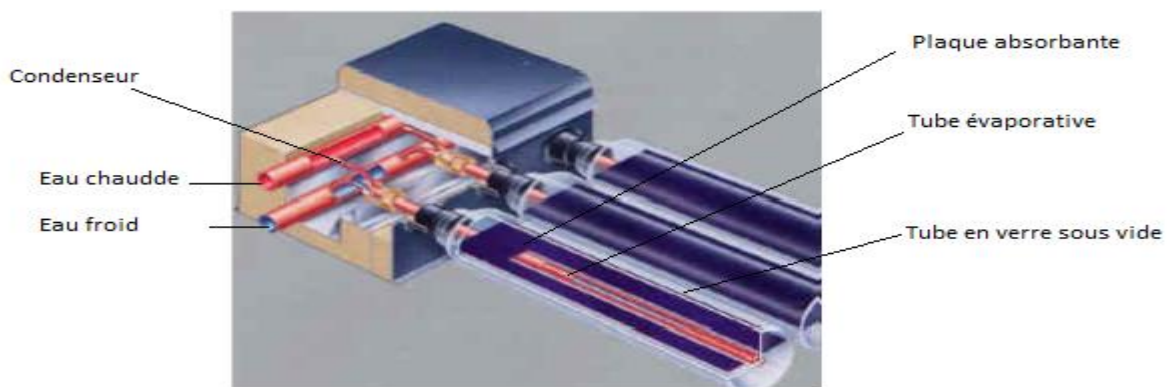


Figure II.21 : capteur solaire à circulation directe [11].

- ✚ Capteur à caloduc : Le liquide à l'intérieur de tube est vaporisé et se condensé dans un condenseur et relâche ainsi l'énergie de condensation à un fluide caloporteur circulant au sommet des tubes. Cette conception permet le remplacement aisé d'un tube, car le circuit du tube et le circuit de champ de capteur n'est pas connecté.



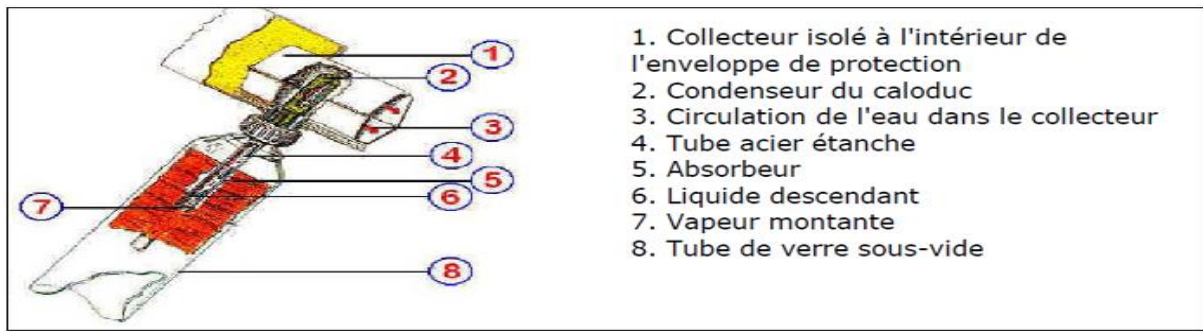


Figure II.22 : Schéma de fonctionnement du capteur sous vide à caloduc et sa liaison avec le collecteur [11].

✚ Capteur « sydney » : Ils sont réalisés avec deux tubes de verre l'un dans l'autre et entre lesquels on fait le vide après avoir déposé un absorbeur sélectif concentrique sur la paroi extérieure de tube intérieur. On place ensuite au centre des deux tubes, un tube de cuivre creux en U qui permet l'échange de chaleur, soit directement, soit par le biais d'un caloduc.

### II.7.2 Efficacités des différents capteurs solaires [17]

Chaque type de capteur est caractérisé par une courbe de fonctionnement qui montre l'efficacité en fonction de la différence de température entre le fluide et l'air ambiant, divisé par le rayonnement de solaire en  $W/m^2$  ( $\Delta T/G$ ). A partir des températures de source chaude de chaque technologie de climatisation solaire, il est possible de déterminer quel type de capteurs devra être utilisé. La figure II.23, montre cette répartition.

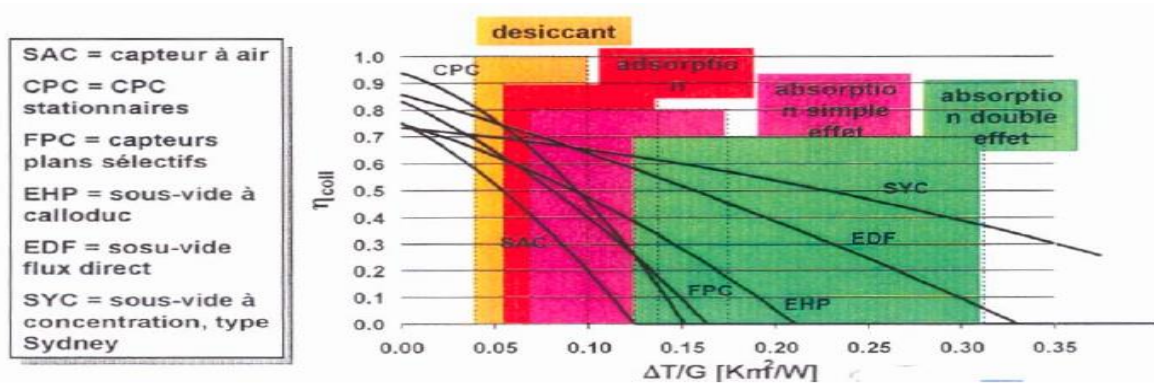


Figure II.23: Efficacités des différents capteurs solaires et applications aux différentes technologies de climatisation solaire [17].

Les capteurs CPC stationnaire ont la plus grande efficacité (proche de 95 %) lorsque le rapport ( $\Delta T/G$ ) est faible, suivi par les capteurs à sous vide à flux direct, puis les

capteurs plans et enfin les capteurs sous vide à caloduc, types sydney et les capteurs à air ont environ la même efficacité, à savoir environ 0.75 [17].

## II.8 Comparaison technico-économique

Critères de	Comparaison	Machines à compression de vapeur	Machines à absorption	Machines à adsorption	Machines desiccant cooling
	Type de systèmes	Système fermé à cause de l'échange de l'énergie avec l'extérieur	Système fermé à cause de l'échange de l'énergie avec l'extérieur	Système fermé à cause de l'échange de l'énergie avec l'extérieur	Système ouvert à cause de l'échange de l'énergie et de matière avec l'extérieur
		Utilisant un compresseur mécanique	Utilisant un compresseur thermique (absorbeur/générateur)	Utilisant un compresseur thermique (adsorbeur/générateur)	Utilisant un processus de traitement d'air
			La réaction entre le réfrigérant et le sorbant est de nature chimique	Le processus d'adsorption est un phénomène physique	Le processus déshumidification est un phénomène physique
			Le sorbant est liquide	Le sorbant est un solide poreux	Déshumidificateur est un solide
Aspect technique	Gamme de puissance froide	Dépendent de nombreux	15Kw-5Kw	50Kw-430Kw	20Kw-350kw

	paramètres			
COP nominal	dépendent de nombreux paramètres	0.5-0.8(Simple effet) 1.2 pour le couple eau-bromure de lithium (double effet)	0.5-0.7	0.5-1
Température de fonctionnement	65°C	80-110°C	60-90°C	45-95°C
Capteur solaire	N'existe pas	Tubes sous vide, capteurs plans	Tube sous vide capteurs plans	Capteur à air capteurs plans
Vibration	Machine fait beaucoup de bruit	Machine silencieuses Et sans vibration	Machine silencieuses Et sans vibration	Machine silencieuses Et sans vibration
Avantages	Coefficient de performance thermique élevé	1.Coefficient de performance thermique élevé. 2.Technique de climatisation solaire majoritaire et reconnue. 3.fluide frigorigène inoffensif ( eau par exemple), sel absorbant présent à l'état naturel et sans impact environnemental .	1.Température de régénération moyenne 2.Frigorigène et adsorbant sont inoffensifs.	1.Température de régénération faible à moyenne 2.Composants connus et largement utilisés



	Inconvénients		<p>1.Tour de refroidissement nécessaire</p> <p>2.Température de régénération élevée</p> <p>3.Risques de cristallisation</p>	<p>1.Tour de refroidissement nécessaire</p> <p>2.Volume important des machines</p>	<p>1.Maintenance soignée obligatoire</p> <p>2.Peu performant dans les climats chaude et humides (<math>COP_{th}</math> dépendant des conditions intérieurs et extérieurs )</p>
Aspect économique	Coût	Moins élevé	Elevé	Plus élevé	Elevé
	Commercialisation	Commercialisé et développée	Commercialisé et développée	Moins commercialisé et moins développée	Commercialisé et développée
	Consommation d'énergie	Consommation d'énergie électrique élevée	Consommation d'énergie électrique inférieure en utilisant l'énergie solaire	Consommation d'énergie électrique inférieure en utilisant l'énergie solaire	Consommation d'énergie électrique inférieure en utilisant l'énergie solaire

Tableau II.2: Comparaison entre les différentes machines de climatisation [18,19].

**II.8.1 Remarque [18]**

Les  $COP_{froid}$  pour des machines frigorifique à compression mécanique dépendent de nombreux paramètre dont le type de compresseur employé et la technologie qu'il utilise.

Le  $COP_{froid}$  d'une machine frigorifique est également grandement influencé outre par la technologie des composants qu'elle utilise, par la température de la source froide (c'est-à-dire la température de l'air ou de l'eau refroidie à l'évaporateur) et la température de la source chaude ( c'est-à-dire la température de l'air ou de l'eau refroidissant le condenseur).

Plus l'écart entre ces températures sera grand, plus le  $COP_{\text{froid}}$  chutera. En effet, plus on cherchera à avoir une température basse à l'intérieur de locaux alors qu'à l'extérieur la température sera grande et plus le COP diminuera.

Voici quelques fourchettes de  $COP_{\text{froid}}$  en fonction de type de compresseur. On parle de fourchette car comme on vient de le dire le COP varie énormément en fonction des conditions dans lesquelles la machine frigorifique fonctionne. On parle parfois de COP moyen sur une année pour ainsi intégrer cette variation du COP en fonction des conditions d'utilisation donc en fonction de la saison et de la période de l'année à laquelle on l'utilise.

	Compresseur à piston	Compresseur à vis	Compresseur centrifuge
$COP_{\text{froid}}$	2.0-4.7	2.0-7.0	4.0-8.0
Puissance frigorifique (KW)	10-500	300-2000	300-3000

Tableau II.3: Coefficients de performance et puissances frigorifiques de différents types de compresseurs [18].

## II.9 Conclusion

Quelle que soit la technique utilisée (absorption, adsorption ou desiccant cooling), la climatisation solaire permet d'exploiter une énergie renouvelable et gratuite.

Elle offre une solution de climatisation propre. Les fluides frigorifiques employés sont totalement inoffensifs pour l'environnement (à la différence des fluides utilisés dans les systèmes conventionnels).

Elle a aussi pour avantage de pouvoir fournir le plus de froid quand il fait le plus chaud, dans les périodes où le soleil est le plus disponible. Efficaces et silencieuses,

Ces technologies ont une durée de vie plus longue que les systèmes de réfrigération classiques (25 ans contre 10 ou 15 ans un système classique).

En revanche, elles sont encore en phase de développement et sont plus chères que les systèmes classiques.

### **III.1 Introduction [21]**

Aux énergies traditionnellement utilisées (notamment l'électricité), il est évidemment tentant de substituer une énergie gratuite, en l'occurrence celle qui provient de la récupération de la chaleur solaire.

En effet, le cycle thermodynamique retenu pour la production frigorifique devra tenir compte du faible niveau thermique de l'énergie exploitée.

En climatisation solaire les cycles thermodynamiques les plus utilisés sont les cycles à absorption.

### **III.2 Principe de fonctionnement de la machine à absorption [21]**

L'absorption est l'affinité entre deux fluides (liquide –liquide ou liquide –vapeur).

Le fluide de travail du système est une solution contenant un fluide de réfrigération (un réfrigérant) et un absorbant, qui ont l'un pour l'autre une forte affinité.

On apporte de la chaleur à une solution de réfrigérant et d'absorbant contenue dans le générateur, ce qui produit une évaporation du réfrigérant, qui se sépare du mélange en abandonnant une solution pauvre en réfrigérant. La vapeur produite pénètre dans le condenseur, où elle se liquéfie en cédant de la chaleur. L'ensemble générateur – condenseur constitue la partie haute pression de système.

Le réfrigérant liquide accumulé dans le condenseur peut ensuite être détendu de cette zone à haute pression vers un évaporateur à basse pression. L'énergie nécessaire à la vaporisation est empruntée au fluide circulant dans l'évaporateur qui va bien évidemment être refroidi.

Après évaporation du réfrigérant dans l'évaporateur et extraction de chaleur de l'accumulateur froid ou du milieu à réfrigérer, le réfrigérant pénètre dans l'absorbeur ; dans celui-ci, la vapeur du réfrigérant se recombine avec le mélange pauvre en réfrigérant en provenance de générateur.

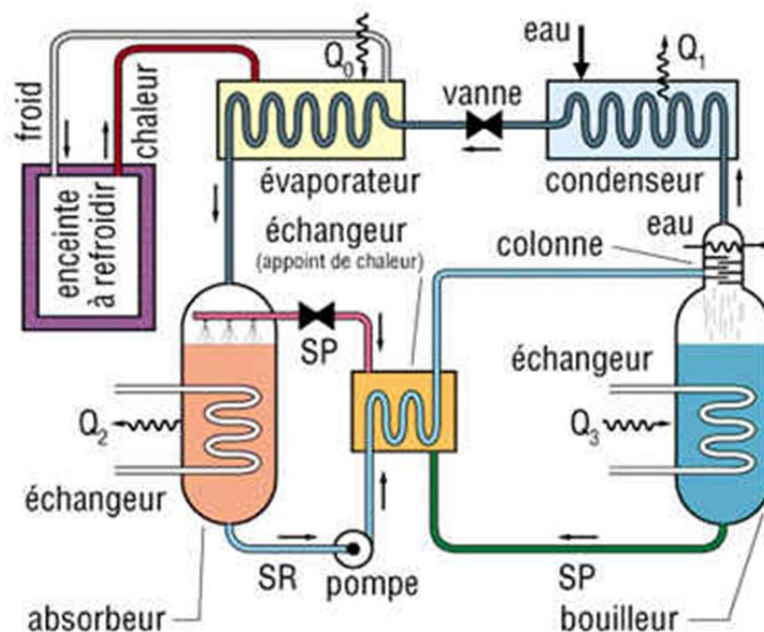
Comme cette recombinaison est exothermique, il faut extraire de la chaleur de l'absorbeur afin de maintenir sa température suffisamment basse pour conserver l'affinité élevée dont on a besoin entre le réfrigérant et la solution. La solution résultante, riche en réfrigérant, est recueillie au fond d'absorbeur et encore pompée dans le générateur pour y maintenir un niveau et une concentration imposés. C'est la pompe de circulation qui assure la différence de pression voulue dans le système.

La nécessité de faire circuler de façon continue, d'une part, la solution pauvre en réfrigérant, depuis le générateur à température élevée jusqu'à l'absorbeur à basse température, et d'autre part la solution riche en réfrigérant, à contre-courant, suggère l'installation d'un récupérateur, simple échangeur de chaleur qui minimise les pertes de chaleur associés aux transferts de fluide entre les deux composants. En l'absence de récupérateur, la charge thermique sur la source de chaleur et le rejet thermique associé à l'absorbeur seraient augmentés, d'où une diminution du coefficient de performance du système.

La machine à absorption est donc composée essentiellement de :

- Un bouilleur (appelé aussi générateur, désorbeur)
- Un condenseur
- Un absorbeur
- Un évaporateur
- Des détendeurs
- Une pompe pour le transfert de solution ainsi que la tuyauterie.

Dans ces machines frigorifiques à absorption on trouve les modèles dits « ouverts » d'où le bouilleur et le condenseur d'une part et l'évaporateur et l'absorbeur d'autre part, sont placés dans des enceintes distinctes. On trouve également des unités « hermétiques » où les quatre organes principaux sont regroupés dans la même enveloppe.



Source : Internet Yahoo encyclopédie

Figure III.1 : Cycle de la machine à absorption [21].

Au niveau du bouilleur on a une compression thermique.

Le liquide ne subit pas de sous refroidissement dans le condenseur.

La circulation du fluide dans les tuyaux n'engendre pas de pertes de charges.

### **III.3 Performance de la machine à absorption [21]**

Les performances de la machine à absorption sont déterminées par les températures de ces différentes composantes. Les températures du condenseur et de l'absorbeur dépendent essentiellement de la température disponible pour le rejet de chaleur. La température de l'évaporateur doit être suffisante pour produire le refroidissement. Avec ces trois températures prescrites, la température de générateur et par suite la chaleur nécessaire pour un fonctionnement convenable sont fixées par des considérations thermodynamique.

Le cycle à absorption fonctionne à trois niveaux de température. Nous trouvons en effet par ordre de température croissante :

- Le circuit d'eau glacée (température moyenne 8°C) ;
- Le circuit de refroidissement (température moyenne : 40°C) ;
- Le circuit de chauffage du bouilleur (température moyenne : 80°C).

### **III.4 Choix des fluides de travail [22]**

Ces machines utilisent comme fluide de travail un mélange binaire, dont l'un des composants est beaucoup plus volatile que l'autre. Ces deux combinaisons (absorbant-réfrigérant) ont déjà trouvés un emploi étendu dans les applications de conditionnement d'air :

#### **III.4.1 Le mélange eau/ammoniac ( $H_2O/NH_3$ )**

L'ammoniac étant le fluide frigorigène et l'eau c'est l'absorbant.

Dans la machine à absorption, ce mélange permet d'accéder aux températures négatives.

#### **III.4.2 Le mélange bromure de lithium/eau ( $LiBr/ H_2O$ )**

L'eau étant le fluide frigorigène et le bromure de lithium c'est l'absorbant.

Cette dernière combinaison semble la plus prometteuse pour les applications solaire parce que :

- Elle entraîne des coefficients de performances plus élevés aux températures de fonctionnement typiques des systèmes solaires.
- Elle nécessite des pressions de fonctionnement plus basses, permettant ainsi des puissances de pompage plus faibles.

Les principaux inconvénients du système eau/bromure de lithium sont :

- Risque de congélation de cette combinaison.
- Cherté de bromure de lithium.

Ces deux couples sont adaptés à être utilisés pour assurer la fourniture d'eau glacée et d'eau chaude sur un bâtiment classique.

Ces fluides doivent répondre aux conditions fondamentales suivantes :

- Avoir des propriétés thermodynamiques satisfaisantes.
- Avoir de bonnes propriétés de transfert de chaleur et de masse.

### **III.5. Analyse thermodynamique**

#### **III.5.1 Introduction [11]**

On effectue une analyse thermodynamique d'une machine à absorption à simple effet sans et avec un échangeur de solution, utilisant le couple ( $H_2O/LiBr$ ) comme fluide de fonctionnement.

Pour l'application des principes de la thermodynamique sur un cycle réel, on utilise les conditions et les hypothèses de base suivantes :

- Les températures dans les échangeurs (générateur, condenseur, évaporateur et absorbeur) sont supposées uniformes sur tout le volume considéré.
- La solution riche en fluide frigorigène à la sortie de l'absorbeur est un liquide saturé à la température et la concentration dans l'absorbeur. De même, la solution pauvre en fluide frigorigène quittant le générateur est à une concentration liée par une d'équilibre à la pression et à la température du générateur.
- Le fluide frigorigène sortant du condenseur est pris comme étant liquide saturé à la température et la pression correspondante.
- Le frigorigène, à la sortie de l'évaporateur, est à l'état de vapeur saturée à la température et à la basse pression de l'évaporateur.
- Les détenteurs sont supposées isenthalpique.

- Les échanges thermiques avec l'environnement et les pertes de charge sont supposés négligeables.

### III.5.2 Cycle standard sans échangeur interne[22]

#### III.5.2.1 Équation d'état des fluides de travail

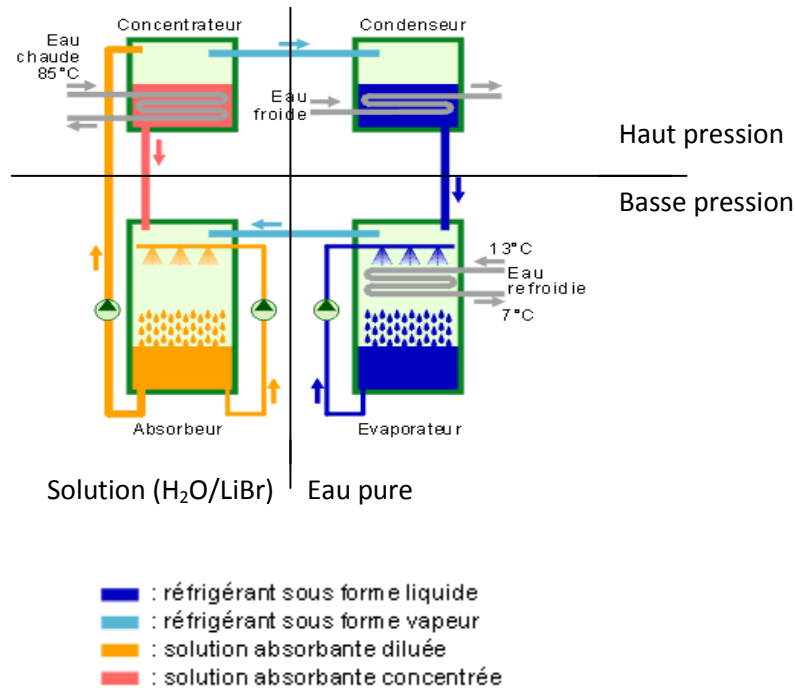


Figure III.2 : Structure d'une machine à absorption [10].

Pour mettre sur pied le bilan thermique d'un composant quelconque et pouvoir dimensionner les surfaces de transfert thermique qui lui sont associées, il est nécessaire de connaître avec précision les enthalpies des fluides de travail à l'état liquide et gazeux en fonction de la température et de la concentration, ce que les diagrammes thermodynamiques de dimensions réduites ne permettent pas.

Les relations ci-après ont été obtenues en ajustant des courbes sur les résultats expérimentaux. La température de référence pour les valeurs d'enthalpie est de 25°C. Pour le mélange H<sub>2</sub>O/LiBr, on a les équations suivantes :

#### a. L'enthalpie de l'eau dans le condenseur à la température Test

$$\begin{aligned}
 h_1 &= (T_1 - 25) && [\text{Kcal/Kg}] \\
 h_1 &= 4.185 * (T_1 - 25) && [\text{kJ/kg}]
 \end{aligned}
 \tag{III.1}$$

Puisque l'évolution 1-2 est une détente adiabatique on a alors :

$$h_1 = h_{21} \quad (III.2)$$

**b. L'enthalpie de la vapeur saturée quittant l'évaporateur**

$$h_3 = 1.80 * hT_3 + 2365 \quad (III.3)$$

**c. L'enthalpie de la vapeur d'eau surchauffé**

A la température  $T_7$  et à une pression égale à la pression de saturation de la température  $T_1$  on a :

$$h_{17} = 1.925 * T_7 - 0.125 * T_{71} + 2365 \quad (III.4)$$

**d. La chaleur massique d'une solution de LiBr de concentration X a pour valeur**

- Pour l'absorbeur :

$$C_p(X_A) = 2.01 * X_A^2 - 5.15 * X_A + 4 \quad [KJ/Kg^{\circ}C] \quad (III.5)$$

- Pour le bouilleur :

$$C_p(X_A) = 2.01 * X_A^2 - 5.15 * X_B + 4.23 \quad [KJ/Kg^{\circ}C] \quad (III.6)$$

**e. L'enthalpie d'une solution de LiBr de concentration x et à la température T°C**

-Pour l'absorbeur :

$$h_4 = 1744 * X_A^2 - 1911 * X_A + 285 + C_p(X_A) * (T_4 - 25) . \quad (III.7)$$

-Pour le bouilleur :

$$h_6 = 1744 * X_B^2 - 1911 * X_B + 285 + C_p(X_B) * (T_4 - 25) \quad (III.8)$$

**f. La concentration en LiBr**

Dans le bouilleur pour un intervalle de validité (65 à 100°C) :

$$X_B = X_6 = X_8 \quad \{\text{Pourcentage de LiBr d'un mélange pauvre en eau}\}$$

$$X_B = a * T_7^2 + b * T_7 + c \quad [\%] \quad (III.9)$$



Avec :

$$a = (1.762 * 10^{-4} * P_1^2) - (1.144 * 10^{-3} * P_1) - (2.957 * 10^{-3}) \quad (\text{III.10})$$

$$b = (2.996 * 10^{-2} * P_1^2) + (13.4502 * P_1) + 0.711145 \quad (\text{III.11})$$

$$c = (1.36693 * P_1^2) - (13.4502 * P_1) + 37.0937 \quad (\text{III.12})$$

Dans l'absorbeur pour un intervalle de validité (25 à 35°C) :

$$X_A = X_4 = X_5 \quad \{\text{Pourcentage de LiBr d'un mélange riche en eau}\}$$

$$X_A = (d * T_4^2) + (e * T_4) + f \quad [\%] \quad (\text{III.13})$$

Avec :

$$d = (2.579 * 10^{-2}) * P_2^2 - (8.88 * 10^{-2}) * P_2 + 4.797 * 10^{-2} \quad (\text{III.14})$$

$$e = (-1.38939 * P_2^2) + (5.05773 * P_2) - 1.96279 \quad (\text{III.15})$$

$$f = (21.7518 * P_2^2) - (90.5809 * P_2) + 83.4029 \quad (\text{III.16})$$

### Remarque

Les coefficients des équations polynomiales concernant les concentrations  $X_B$ ,  $X_A$  sont obtenues par la méthode de moindre carré avec l'algorithme de résolution de Householder.

### g. La courbe caractéristique de l'eau donne

1. La pression de condensation du fluide frigorigène  $P_c$  :

$$P_c = e^{(17.279 * T_c / 237.4765 + T_c) + 6.414} \quad [\text{Pa}] \quad (\text{III.17})$$

2. La pression d'évaporation du fluide frigorigène  $P_e$  :

$$P_e = e^{(17.279 * T_e / 237.4765 + T_e) + 6.414} \quad [\text{Pa}] \quad (\text{III.18})$$

### h. Le taux de circulation

La conservation de la masse dans le bouilleur n'exige que le débit massique de la solution de l'absorbeur soit égal à la somme des débits massique de solution provenant de bouilleur et de vapeur du condenseur :

$$m_5 = m_6 + m_7 \quad (\text{III.19})$$

La conservation de bromure de lithium dans le bouilleur impose :

$$X_5 * m_5 = X_6 * m_6 \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$X_5, X_6$  sont des pourcentages en LiBr au niveau des points 5 et 6.

A partir des équations (III.19) et (III.20), on peut déduire une expression de  $m_5, m_6$  en fonction de  $m_7$  et les titres en frigorigène  $X_5$  et  $X_6$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} m_5 = m_7 * \frac{x_6}{x_6-x_5} \\ m_6 = m_6 * \frac{x_5}{x_6-x_5} \end{array} \right\} \quad (III.21)$$

✚ A la sortie de l'absorbeur : on à une solution riche en eau

D'après l'équation (III.21), on obtient le taux de recirculation  $\zeta_4$  de l'absorbeur (masse de solution pompée vers le bouilleur par unité de masse de vapeur fournie a condenseur) :

$$\tau_4 = \frac{m_5}{m_7} = \frac{X_B}{X_B-X_A} \quad (III.22)$$

✚ A la sortie du bouilleur : Solution pauvre en eau

De même, un bilan massique de l'absorbeur donne le taux de recirculation  $\zeta_6$

$$\tau_6 = \frac{X_A}{X_B-X_A} \quad (III.23)$$

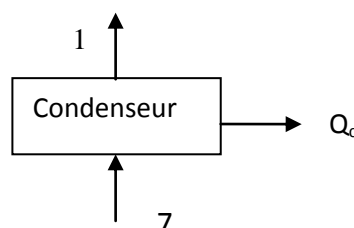
### III.5.2.2 Bilans enthalpique

Soient  $m_7, m_6, m_5$ , respectivement les débits massiques de frigorigène, de la solution concentrée et de la solution diluée.

#### a. La puissance thermique du condenseur

La vapeur de réfrigérant générée au bouilleur se liquéfie sur le faisceau d'échange. La condensation d'un corps pur se fait à pression constante, avec un dégagement de chaleur latente. La puissance du condenseur s'exprime ainsi :

$$Q_c = m_7 * (h_7 - h_1) \quad (III.24)$$



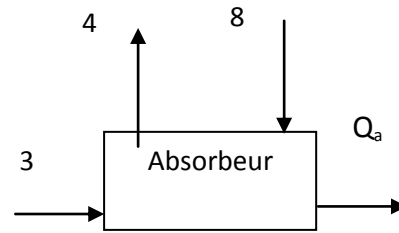
**b. Le bilan thermique de l'absorbeur**

La solution pauvre en réfrigérant provenant du générateur absorbe la vapeur de réfrigérant provenant de l'évaporateur

Le mélange obtenu à basse pression est repompé vers le générateur.

Deux phases d'échange de chaleur se déroulent

Lors du processus d'absorption :



- ✚ La solution pauvre en réfrigérant subit un refroidissement sans modification de concentration ;
- ✚ Le processus d'absorption du frigorigène modifie la concentration de mélange ; Dans l'absorbeur, le réfrigérant est absorbé par le LiBr. Cette réaction a un caractère très exothermique, ce qui fait qu'une grande quantité de chaleur doit être évacuée.

Les pertes thermiques sont négligées. La puissance thermique est donnée par :

$$Q_a = m_7 * (h_3 - h_8) + m_5 * (h_8 - h_4) \tag{III.25}$$

$$Q_a = m_7 * (\tau_6 * h_8 + h_3 - \tau_4 * h_4) \tag{III.26}$$

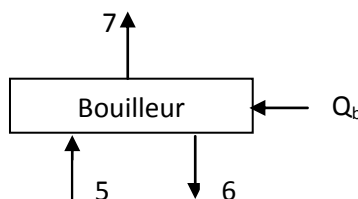
**c. Le bilan thermique du bouilleur**

Le liquide, riche en frigorigène, entre dans le générateur en (5), où il est partiellement vaporisé grâce à l'énergie apportée par le circuit d'eau chaude ; les deux phases résultantes sont : une vapeur de réfrigérant (7) et une solution concentrée de l'absorbant (8).

Notons que les températures d'évaporation du LiBr et de l'H<sub>2</sub>O sont très éloignées, c'est pourquoi il n'est pas nécessaire de rectifier le frigorigène généré contrairement au mélange NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O.

si on néglige les déperditions vers l'ambiance, et pour un régime permanent de fonctionnement le bilan d'enthalpie donne :

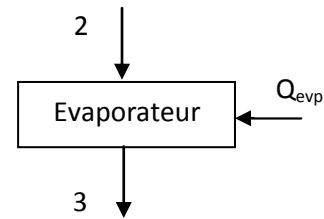
$$Q_B = m_7 * h_7 + m_6 * h_6 - m_5 * h_5 \tag{III.27}$$



**d. La puissance thermique de l'évaporateur**

L'énergie prélevée sur le circuit d'eau glacée du groupe à absorption, source froide de la machine, provoque un changement de phase du frigorigène liquide.

Le réfrigérant subit dans l'échangeur un changement de phase sans préchauffage sensible du frigorigène, ni surchauffe de la vapeur. La puissance de l'évaporateur s'exprime.



$$Q_{evp} = m * (h_3 - h_2) \tag{III.28}$$

**e. La pompe de solution**

Elle assure la circulation du mélange riche en réfrigérant du puits de solution vers le générateur, à travers l'échangeur. Elle est dimensionnée de manière à permettre le passage de basse à haute pression.

La puissance de la pompe :

$$W_{circulation} = m_5 * (h_4' - h_4) \tag{III.29}$$

Avec :

$$(h_4' - h_4) = \int_{P_{evap}}^{P_{cond}} v * dp \tag{III.30}$$

**III.5.2.3 Cycle de la machine à absorption [23]**

Le diagramme d'Oldham est le plus utilisé et le plus pratique pour une étude du cycle de la solution. Il donne la teneur de la solution en soluté en fonction de la température et de la pression.

C'est un diagramme  $(\ln(p), -\frac{1}{T})$  paramètre en teneur pondérale. La figure 3.4 présente un tel diagramme relatif au couple H<sub>2</sub>O/LiBr.

Dans ce diagramme les iso titres sont sensiblement des droites. La droite de teneur 0% correspond à l'équilibre liquide/vapeur de l'eau pure. La richesse de l'iso titre est définie par rapport à la teneur en bromure de lithium.

**a. Pression de fonctionnement**

Les température des sources  $T_m$  (environnement) et  $T_b$  (production de froid) fixent les deux pressions  $P_h$  et  $P_b$ , ces deux pression correspondent aux pression de vapeur saturant de l'eau (iso titre  $X_{LiBr}=0$ ) à la température  $T_m$  (point1) et  $T_b$ (point3).

Le titre  $X_c$  de la solution concentrée en sortie de désorbeur est donné par l'intersection de l'isotherme  $T_h$  et de l'isobare  $P_h$ (point6). D'une manière analogue, le titre  $X_d$  de la solution diluée en sortie d'absorbeur correspond à l'intersection de l'isotherme  $T_m$  et de l'isobare  $P_b$ (point4).

**b. Titre et température de la solution à l'entrée de l'absorbeur**

L'absorbeur reçoit la solution concentrée provenant du désorbeur ; après que celle-ci ait été détendue dans le détendeur (6-8). La détente implique une chute de température due à une vaporisation partielle de la solution. L'absorbeur reçoit donc un mélange de solution liquide et de vapeur (8), dont il n'est pas possible, à l'aide de ce diagramme de préciser ni la température, ni la masse relative des deux phases. A l'entrée de l'absorbeur, ce mélange est donc tout d'abord refroidi, d'une part par mélange avec la vapeur froide arrivant de l'évaporateur, d'autre part, directement par le fluide caloporteur. Ce refroidissement entraîne tout d'abord une réabsorption de la vapeur produite par la détente, puis, l'absorption de vapeur provenant de l'évaporateur. Le processus d'absorption commencera au point  $\delta_{sat}$  défini par l'intersection de l'iso titre  $X_c$  et de l'isobare  $P_b$ .

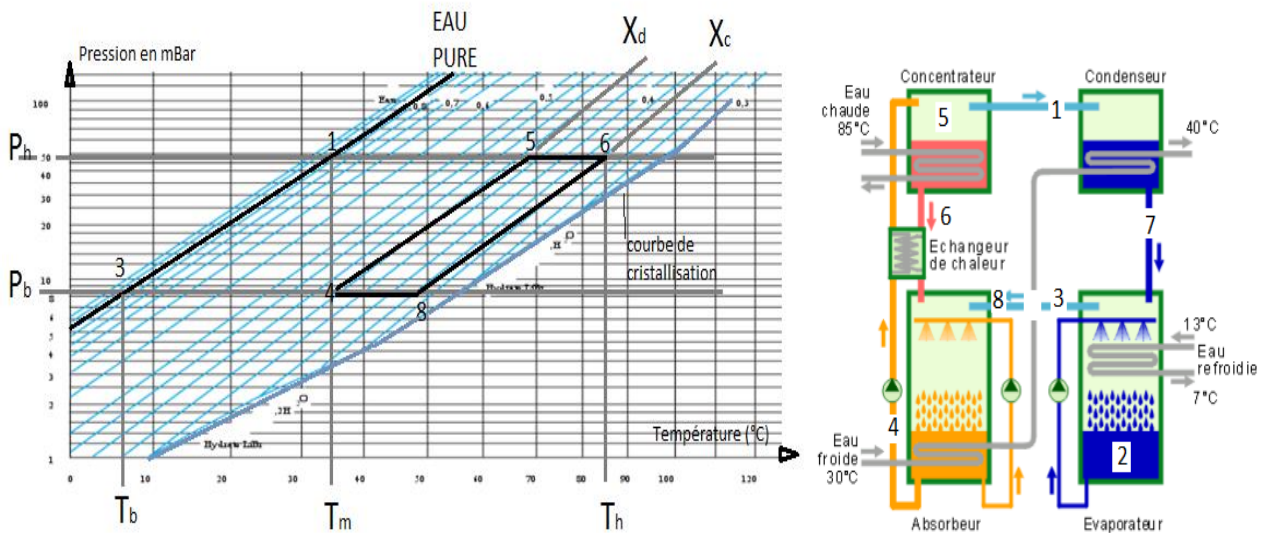


Figure III.3 : Représentation des points caractéristiques du cycle à absorption sur un diagramme d'Oldham, couple H<sub>2</sub>O/LiBr [22].

**c. Titre et température de la solution à l'entrée du désorbeur**

Le désorbeur reçoit la solution diluée issue de l'absorbeur, après que celle-ci ait traversé la pompe (4-4'). Ce liquide sous-refroidi, ne peut pas être représenté sur le diagramme d'Oldham, où figurent que des états d'équilibre liquide/vapeur. Si la compression est supposée isotherme, le titre et la température sont ici connus et restent identiques au titre et à la température du point 4. A son entrée dans le désorbeur, le liquide sera donc tout d'abord réchauffé jusqu'à la température  $T_{5sat}$  par l'intersection de l'iso titre  $x_c$  et l'isobare  $P_h$  la désorption commencera alors en point 5<sub>sat</sub> ainsi défini.

Si le diagramme d'Oldham permet d'avoir une bonne représentation de l'installation, il ne permet ni l'étude énergétique, ni le dimensionnement de la machine. Ces objectifs requièrent l'utilisation du diagramme de Merkel (concentration, enthalpique représenté dans la Figure (III.4).

Le diagramme de Merkel permet une étude complète de la machine à absorption, car en plus des informations données par le diagramme d'Oldham, il renseigne, ce qui est fondamental pour les calculs, sur l'enthalpie de la solution liquide et de la vapeur du soluté. C'est un diagramme (x, h) paramétré en pression et température pour la solution, en pression pour la vapeur. Il permet de connaître la teneur du mélange vapeur en équilibre avec la solution ainsi que les enthalpies de chaque point.

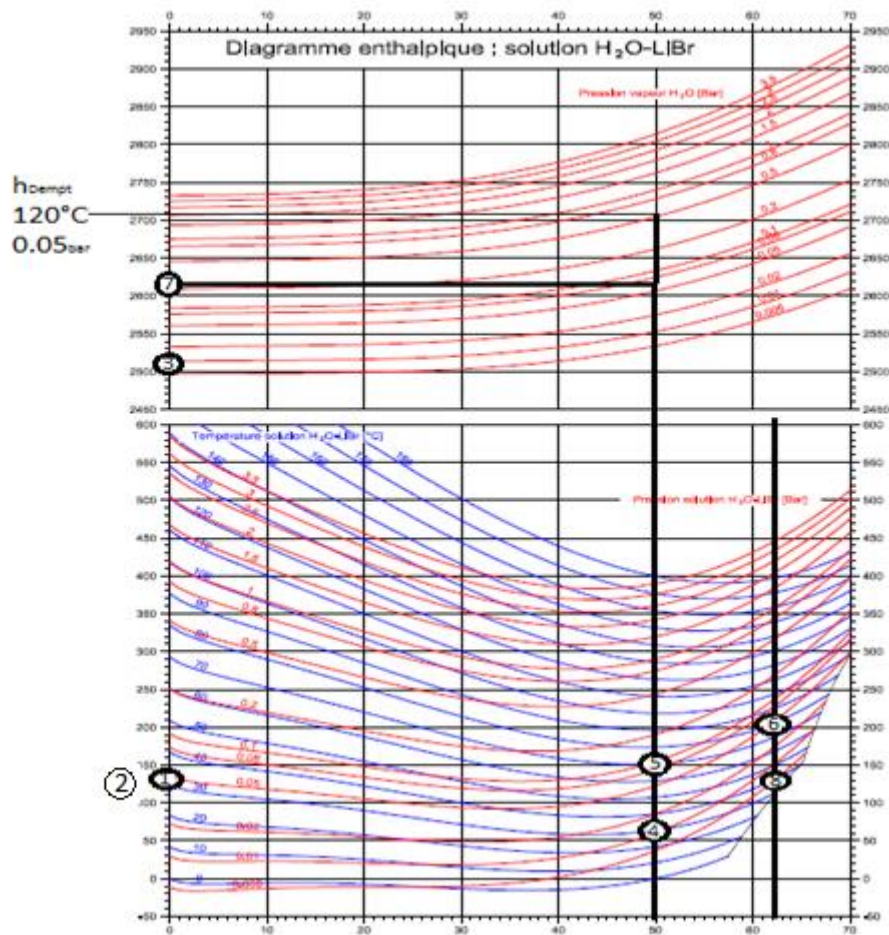


Figure III.4 : Diagramme de Merkel du couple H<sub>2</sub>O/LiBr [22].

Le tracé du cycle de la solution liquide est immédiat : il suffit de reporter les points : 1,3,4,5,6 et 8 définis précédemment . Le relevé des valeurs conduit alors aux résultats du tableau qui suit :

Point	1	2	3	4	4'=5	5 <sub>sat</sub>	6	7	8 <sub>sat</sub>	8
T(°C)	35	5	5	35	35	69	85	69	49	47
P(mbars)	56.3	8.7	8.7	8.7	56.3	56.3	56.3	56.3	8.7	8.7
X <sub>LiBr</sub>	0	0	0	54.84	54.84	54.84	62.22	0	62.22	62.22
X <sub>H2O</sub>	1	1	1	45.16	45.16	45.16	37.78	1	37.78	37.78
H(Kj/Kg)	146.6	146.6	2509.8	83.17	83.17	153.21	211.8	2628.3	144.95	211.8

Tableau III.1 : Les caractéristiques d'un cycle standard sans échangeur de chaleur [22].

### III.5.2.4 Estimation de coefficient de performance [22]

$$COP_{froid} = \frac{Q_{evp}}{Q_B + W_{circulation}} = \frac{m7*(h3-h2)}{m7*h7+m6*h6+m5*(h4'-h4-h5)}$$

$$COP_{froid} = \frac{m7*(h3-h2)}{m7*(h7+\frac{x5}{(x6-x5)}*h6-\frac{x6}{(x6-x5)}*(h4+h5-h4'))}$$

On pose :

$$\Delta x = x_6 - x_5 \quad (III.31)$$

On obtient :

$$COP_{froid} = \frac{\Delta x*(h3-h2)}{[\Delta x*h7+x5*h6-x6*(h4+h5-h4')]} \quad (III.32)$$

En reportant dans cette expression les valeurs issues du tableau 3.1, et en supposant l'énergie consommée par la pompe est négligeable ( $h4 \approx h4'$ ), on trouve une expression de  $COP_{froid}$  :

$$COP_{froid} = \frac{\Delta x*(h3-h2)}{[\Delta x*h7+x5*h6-x6*(h4+h5-h4')]} \quad (III.33)$$

On va faire une application numérique de la formule (3.33) en utilisant le tableau 3.1,

$$COP_{froid} = \frac{(62.22 - 54.84) * (2509.8 - 146.6)}{[(62.22 - 54.84) * 2628.3 + 54.84 * 211.8 - 62.22 * 83.17]}$$

$$COP_{froid} = 0.675$$

### III.5.3 Cycle standard a échangeur interne [22]

Toutes les machines simple effet actuelles comportent aujourd'hui un échangeur (appelé quelque fois transmetteur interne) entre la solution diluée sortant à  $T_m$  de l'absorbant et la solution concentrée sortant du bouilleur à  $T_h$ .



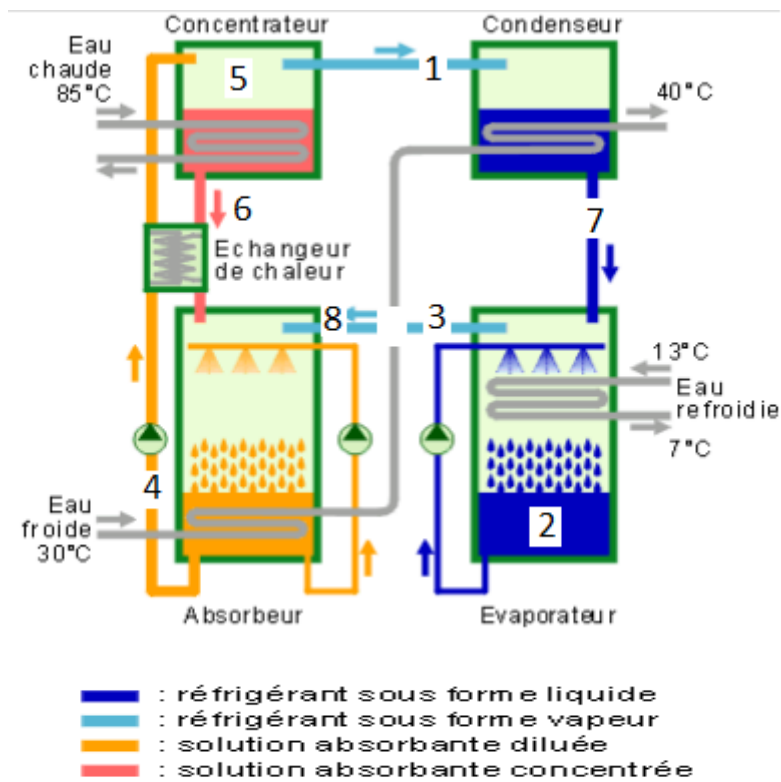


Figure III.5 : Représentation schématique d'une machine à absorption dotée d'un échangeur interne [11].

### III.5.3.1 Bilan thermique d'échangeur de solution [22]

L'échangeur de solution permet un transfert d'énergie du mélange pauvre en réfrigérant provenant du générateur au mélange riche en réfrigérant provenant de l'absorbeur. Cette diminution de puissance permet une double économie : les surfaces d'échange sont réduites et les quantités d'énergie rejetée par l'absorbeur et fournie par le bouilleur sont moindres.

L'efficacité de l'échangeur est donnée par la relation :

$$\varepsilon = T_6 - \frac{T_6'}{T_6 - T_4'} = 1 - e^{-NUT} \tag{III.34}$$

Cette efficacité est liée au nombre d'unités de transfert (NUT) avec :

$$NUT = K * \frac{S}{q_{min}} \tag{III.35}$$

Avec :

$q_{min}$  : minimum entre les débits de capacité :  $(m_8 * cp_8)$  et  $(m_4 * cp_4)$

Cette efficacité  $\varepsilon$  permet d'estimer la température de la solution concentrée avant détente  $T_6'$ .

**Bilan enthalpique effectué sur l'échangeur**

$$m_6 * (h_6 - h_6') = m_5 * (h_5 - h_4') \tag{III.36}$$

Qui amène :

$$h_5 = h_4' + \frac{m_6}{m_5} * (h_6 - h_6') \tag{III.37}$$

Le tableau qui présente les caractéristiques d'un cycle standard avec un échangeur d'efficacité  $\varepsilon = 0.8$ . Ces valeurs conduisent à un  $COP = \frac{COP_{froid}}{\varepsilon} = 0.8$ , soit un gain d'environ 16% par rapport à l'installation précédente sans échangeur de chaleur.

Point	1	2	3	4	5	6	6'	7	8
T(°C)	35	5	5	35	67	85	45	69	45
P(mbars)	56.3	8.7	8.7	8.7	56.3	56.3	56.3	56.3	8.7
X <sub>LiBr</sub> (%)	0	0	0	54.84	54.84	62.22	62.22	0	62.22
X <sub>H2O</sub> (%)	1	1	1	45.16	45.16	37.78	37.78	1	37.78
h(Kj/Kg)	146.6	146.6	2509.8	83.17	149.3	211.8	136.7	2628.2	136.7

Tableau III.2 : Les caractéristiques d'un cycle standard avec un échangeur d'efficacité  $\varepsilon$  à 0.8 [22].

**III.6 Capteurs solaires thermique sous vide [11]**

Un capteur solaire « sous vide » est composé :

- Une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre.
- Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire.
- Un tube en cuivre à l'intérieur d'un tube de verre.

Les tubes de verre sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermique convectives de l'absorbeur. Ceci permet ede chauffer l'eau à un température comprise entre 85°C et 100°C, ce qui permet d'arriver à des températures de rafraichissement bas si ce dernier est couplé à une machine à absorption par exemple.

Les applications des capteurs sous vide comprennent le chauffage de l'eau dans les résidences, les bâtiments commerciaux, ainsi que celui des piscines intérieur.



Figure III.6 : Capteur solaire sous vide.

Pour être efficace le vide doit être poussé  $< 10^{-3}$  Pa. Un tube devient inutile s'il n'est pas totalement hermétique et il faut le changer pour préserver la performance de l'ensemble du capteur. Afin de visualiser cette éventualité, les tubes sont munis d'un témoin (getter) en brayum, qui dépose une couche métallisée sur l'intérieur du tube pendant la fabrication. Cette couche argentée de brayum devient blanc en contact avec l'air et ainsi sert de témoin à la perte de vide.

### III.6.1 Calcul du rendement d'un capteur solaire sous vide par la méthode Française [23]

Dans la méthode française, le rendement d'un capteur est défini par l'équation suivante :

$$\eta = \eta_0 - k \frac{T_{myn} - T_{ext}}{P} \quad (III.38)$$

**Facteur optique :** Le facteur optique est le rapport entre l'ensoleillement absorbé par l'absorbeur et l'ensoleillement incident sur le vitrage. Ce facteur optique est le produit du facteur de transmission du vitrage par le coefficient d'absorption de l'absorbeur.

Le facteur optique est typiquement compris entre 0.5 et 0.8. Il s'agit du rendement maximal du capteur.

**K : Coefficient de déperdition du capteur (W/m<sup>2</sup>°C) :** Le facteur K est représentatif des pertes thermiques du capteur solaire. Ces pertes thermiques se font à la fois par conduction et par convection (échange de chaleur avec l'air environnant).

Plus le coefficient K est faible, moins il y a de perte thermique.

Type de capteur	Valeur du coefficient K
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5
Capteur sous vide	Entre 1 et 3

Tableau III.3 : Valeur du coefficient K pour différents types de capteurs [18].

### III.6.2 Calcul de coefficient de performance du système solaire : capteur sous vide machine à absorption

$$COP_g = COP_{\text{froid}} * \eta \quad (3.39)$$

Il est clair que le rendement de la machine frigorifique à base solaire est tributaire de rendement de capteur solaire.

### III.7 Conclusion

Des éléments de calcul d'une machine à absorption solaire ont été présentés. Le COP d'une machine à absorption à simple effet se trouve amélioré par l'introduction d'un échangeur intersolution entre le générateur et l'absorbeur. L'efficacité de la machine à absorption solaire est intimement liée aux performances du capteur solaire utilisé.

Il est intéressant de recourir au stockage de la chaleur pour faire fonctionner la machine en période à faible ensoleillement ou pendant la nuit. Comme il est intéressant de stocker le froid sous forme d'eau glacée pour la même raison.

## **IV.1 Introduction [7]**

Dans ce chapitre on examine une simulation dynamique d'une installation de climatisation à absorption à un capteur solaire sous vide.

Logiciel TRNSYS est aujourd'hui un outil de référence au niveau mondial dans le domaine de la simulation dynamique des bâtiments et des systèmes solaire.

La simulation dynamique permet, par exemple, de simuler le comportement énergétique transitoire d'un tunnel avec tous les composants de chauffage et de climatisation intégrés, en fonction de l'emplacement, de l'orientation ainsi que des matériaux de construction utilisés.

## **IV.2 Description du logiciel**

TRNSYS est un logiciel multi zone de simulation en régime dynamique, développé au laboratoire « solarenergy » à l'université Wisconsin Madison. TRNSYS (version 14.1) est traité en fortran (sous DOS), et structuré de manière modulaire avec 50 modules environ.

Ce logiciel est construit à partir de l'interconnexion de plusieurs composants dont il facilite l'insertion de sous programmes, en permettant à l'utilisateur de créer lui-même ses propres composants.

### **IV.2.1 Les entrées « inputs »**

Ce sont les données à introduire avec un niveau de définition minimum, qui seront nécessaires et pourront être stockées selon l'ergonomie du logiciel dans des bibliothèques que le concepteur peut utiliser. Elles concernent l'environnement physique (climat, site), le bâtiment (l'enveloppe), Les apports internes (occupant, éclairage, ect.) et les équipements (ventilation, chauffage et système de refroidissement).

### **IV.2.2 Traitement des données**

Le travail du logiciel consiste à structurer les données en fonction d'un « modèle de représentation du bâtiment » et de « modèle physico-mathématique » des phénomènes physiques retenus, puis à produire des résultats.

### IV.2.3 Les sorties « outputs »

C'est l'ensemble des informations fournies par le logiciel à l'issue d'une exécution. La déclaration « simulation » permet de définir le début, le pas du temps et la fin de simulation.

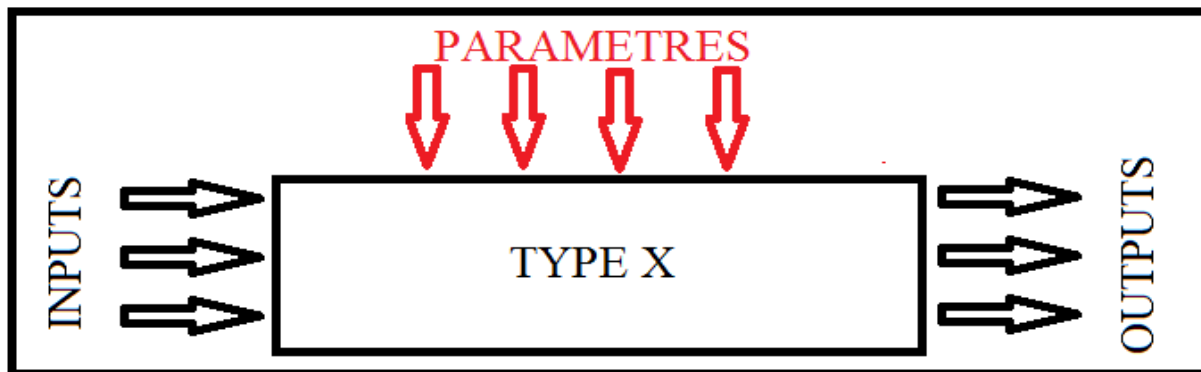


Figure IV.1 : Définition du type [24].

### IV.3 Utilisation du logiciel TRNSYS

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

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

#### IV.3.1 METENORM

Meteonorm contient une base de donnée climatique fournie par 7756 stations réparties dans le monde entier. Les valeurs horaires d'insolation globale, la température ainsi que d'autre paramètres météorologiques peuvent alors être générés à partir d'elles, par l'intermédiaire des algorithmes de calcul inclus dans le programme. L'utilisateur peut importer ses propres données de mesure ou interpoler des données météorologiques pour n'importe quel point de la surface du globe, à partir des stations connues les plus proches. Ces valeurs horaires peuvent être converties pour des surfaces d'inclinaison quelconque. L'influence d'un horizon éloigné peut être modélisée à l'aide d'un éditeur graphique.

### **IV.3.2 TRNSYS Simulation Studio**

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

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

### **IV.3.3 TRNBuild**

« TRNBuild » est un outil permettant d'introduire les caractéristiques d'un bâtiment multizone nécessaire à la simulation thermique de celui-ci. Ses propriétés sont introduites dans «TRNSYS Simulation Studio» via le module « type56 » ainsi, l'utilisateur décrit chaque zone thermique alternativement (les matériaux utilisés pour la construction des murs).

### **IV.4 Avantages du logiciel**

Grâce à son approche modulaire TRNSYS est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité. L'accès au code source permet aussi aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la bibliothèque d'origine. Cela en offrant une vaste documentation des sous programmes y compris l'explication, usage usuels et équations de base. Enfin la définition de la période de la simulation est très souple avec le choix du pas de temps du début à la fin de la simulation.

### **IV.5 Inconvénients de logiciel**

TRNSYS ne dispose pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder et introduire l'ensemble exhaustif de ses données définissant le bâtiment et le système.



## **IV.6 Conditionnement du tunnel de test des voitures de voyageurs de la SNTF**

Notre installation se compose de trois grande partie, dans la première est le groupe de production de chaleur motrice pour faire fonctionner la machine à absorption, elle possède d'un champ de capteur solaire à tube sous vide (voire le dimensionnement « IV.6.3»); la deuxième est la machine à absorption qui peut nous produire de froid et de la chaleur on les extraient de l'évaporateur et le condenseur respectivement ; Ainsi que la troisième partie est le tunnel d'essai thermique qui permet de réaliser des essais thermiques sur les dispositifs de production du froid et de la chaleur des voiture de voyageur de la SNTF sous température dirigée, notre étude consiste d'une part à augmenter la température intérieur de tunnel jusqu'à 45°C et voire si le groupe de chauffage est apte à bien fonctionner pour produire de froid à l'intérieur de voiture, et d'un autre part de baisser la température de tunnel jusqu'à -10°C pour tester les performances de groupe frigorifique,

### **IV.6.1 Voiture de voyageurs de la SNTF [25]**

La Société nationale des Transports Ferroviaires (SNTF) est la société nationale des transports ferroviaires algériens, responsable de la gestion du trafic et des lignes ferroviaires nationales. Elle est spécialisée dans le transport de voyageurs et de marchandises. Son réseau s'étend sur 3 572 kilomètres, essentiellement en écartement standard, et dessert, les grandes villes algériennes : Alger, Oran, Annaba, Constantine, Sétif, etc.

#### **IV6.1.1 Histoire**



Figure IV.2 : Gare SNTF d'Agha à Alger

Elle est issue de la restructuration en 1976 de la SNCFA.

- 1859 : construction de la 1ère ligne entre Alger et Blida



- 1906 : 3 400 km de lignes sont déjà construites
- 1907 : un 3<sup>e</sup> programme de création de lignes nouvelles est lancé
- 1946 : le réseau totalise 5 014 km de lignes exploitées par 5 compagnies
- 1963 : la Société Nationale des Chemins de Fer Algériens (SNCF) est créée
- 1976 : naissance de la Société Nationale des Transports Ferroviaires (SNTF)
- 1980 : programme de modernisation et d'extension du réseau
- 1990 : la SNTF devient un EPIC
- 2005-2009 : vaste programme de modernisation et de développement.

#### **IV.6.1.2 Le parc roulant**

En 2011 le parc roulant de la SNTF se composait de :

- 14 locomotives électriques.
- 154 locomotives diesels.
- 59 locomotives de manœuvre.
- 674 voitures.
- 13 000 wagons tout types
- 17 Autorail dieselhydraulique
- 64 Rames Automotrices électrique 25 Kv/CA monophasé

#### **IV.6.1.3 Fiche technique du réseau de la SNTF**

Longueur des lignes exploitées : 3 572 km Longueur des lignes non électrifiées : 3 289 km Longueur des lignes électrifiées : 283 km 440 voitures voyageurs 9 855 wagons de marchandises 222 engins moteurs 6 463 460 tonnes de fret par an 21 900 000 voyageurs par an. La SNTF prévoit un trafic fret de 15 millions de tonnes en 2010 contre 7 en moyenne actuellement.

#### **IV.6.2 Système de conditionnement d'air des voiture de la SNTF [26]**

Un système de conditionnement d'air est généralement composé de trois éléments :

- Le dispositif de traitement d'air : traite l'air du point de vue thermique et de la qualité et met l'air en mouvement.
- La régulation agit sur les différents paramètres pour maintenir les valeurs mesurées proches du confort désiré.

- Le réseau aéraulique assure les liaisons entre le dispositif de traitement d'air et les locaux desservis.

#### IV.6.2.1 Description de l'installation de conditionnement d'air

##### Principe :

L'air neuf est aspiré de l'extérieur sur la face de la voiture, sous une baie à travers une persienne à chicanes.



Figure IV.3 : Gaine de reprise [26].

L'air recyclé est repris à l'intérieur de la voiture à travers des grilles placées en long-pan dans l'espace voyageur. Pendant les périodes de préchauffage, c'est-à-dire tant que la température intérieure reste inférieure à  $+18^{\circ}\text{C}$ , la totalité de l'air traité est recyclé. La reprise d'air est assurée par un volet de recyclage commandé par un servomoteur (SMO) sous la dépendance de deux thermostat palant l'un THE : la température extérieure et l'autre THP : température de l'espace voyageurs. L'air passe dans un caisson de détente, il est ensuite filtré, puis éventuellement réchauffé ou refroidi suivant la demande de la régulation et pulsé dans les gaines de distribution sous châssis calorifugées, il est ensuite diffusé dans les gaines en long pan munies de diffuseurs dans l'espace voyageurs, ainsi que de dispositifs de soufflage sous les sièges. L'extraction de l'air vicié assurée par deux extracteurs électriques disposés en pavillon dans les W.C en dehors des périodes de préchauffage.

## Description des principaux éléments

1. Gaine e reprise : cette gaine assure la reprise d'air à l'intérieur contre la face de la voiture.
2. Unité de conditionnement d'air : L'unité comporte deux ensembles assemblés rigidement.

Le caisson de mélange comprend :

- Une sonde de pente (SP)
- Un thermostat d'air extérieur (THE)
- Un thermostat de préchauffage (THP)
- Un volet de recyclage commande par un servomoteur(SMO)
- Un pré filtre métallique et un filtre d'air accessibles pour le nettoyage par une trappe.

L'unité de traitement d'air constitué d'une tôleie partiellement calorifugée comprend

- un évaporateur

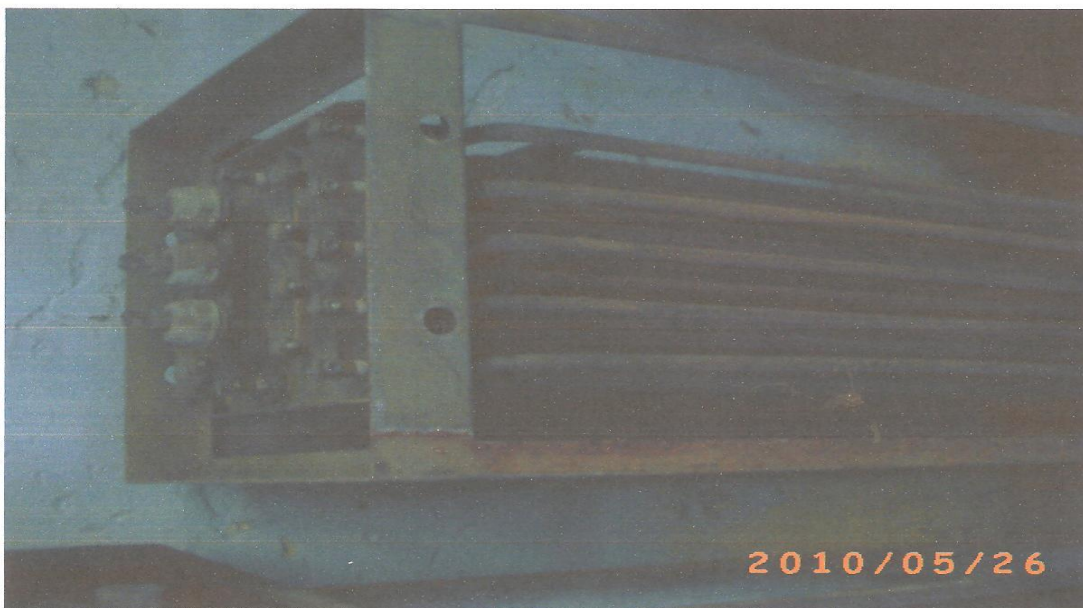


figure IV.4 : L'évaporateur de l'installation[26].

- un séparateur de gouttes.
  - Un réchauffeur d'air (RECA)électrique
  - Un thermostat de sécurité destiné à détecter une surchauffe éventuelle
  - Un groupe moto ventilateur (MV) Un pressostat d'ait (PA) destiné a vérifie le fonctionnement effectif du ventilateur.
3. Groupe de condensation : ce groupe ce compose d'un châssis mécano-soudé comportant les éléments suivant :

- Un compresseur hermétique



Figure IV.5 : Le compresseur de l'installation [26].

- Un condenseur batterie composé de tubes cuivre avec ailettes aluminium.

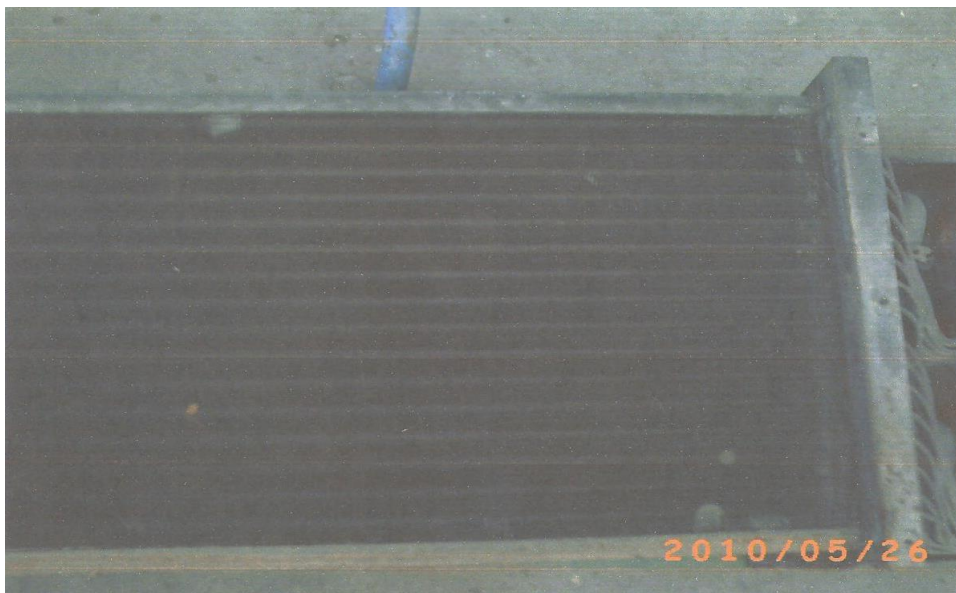


Figure IV.6 : Le condenseur de l'installation [26].

- Des moto ventilateur
  - Une bouteille accumulatrice de r12 avec voyant
  - Un filtre déshydrateur anti -acide a cartouche remplaçables
  - Des vannes d'isolement
  - Une vanne de charge de l'installation.
4. Gaines de distribution et de diffusion : les gaine de distribution sous châssis sont réalisées en acier galvanisé et calorifugées , elle alimentent les gaine de diffusion en long-pan , munie de diffuseur sous les baies dans l'espace voyageurs ainsi que de dispositifs de soufflage sous les sièges.



5. Régulation de température. La régulation automatique de la température intérieur est assuré par un régulateur (RGCD) asicié à une sonde exterieur , une so,de d'air soufflé une sonde de pente et quatre sonde d'ambiance
6. Sonde de contrôle d'air soufflé (SAS)
7. Thermostat de préchauffage
8. Thermostat d'air exterieur
9. Tableau de contrôle et de sécurité frigorifique.



Figure IV.7 : Tableau de sécurité frigorifique [26].

10. Extracteurs

### IV.6.3 Dimensionnement et paramètre de tunnel

Le tunnel contient les informations suivantes :

Volume de zone	1101.1	m <sup>3</sup>
Capacitance	1321.32	Kj/K
Température initiale	25	°C
Humidité relative initiale	50	%

Tableau IV.1 : Caractéristique de «Tunnel».



Figure IV.8 : Vue intérieur chambre d'essai thermique.

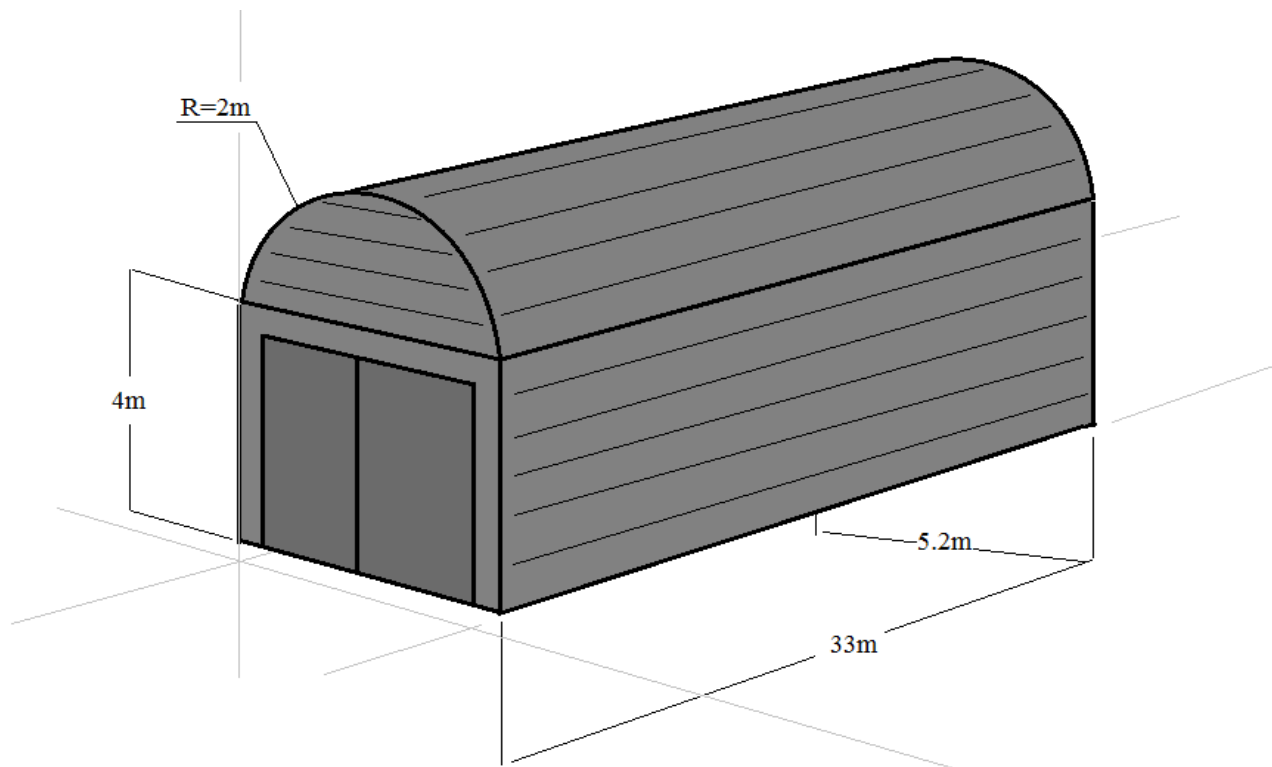


Figure IV.9 : Vue d'extérieur et dimensionnement du tunnel de simulation.

Ce tunnel contient 4 murs rectangles et un demi cylindrique (toit) et la dalle de sol.

Chaque mur à ses propres matériels de construction.

Les différents matériels de construction et les dimensions ainsi que les coefficients de

Déperdition de mur sont illustrés dans le tableau suivant :

	Groupe	Matériel	Conductivité Kj/h m <sup>2</sup> k	Capacité Kj/kg k	Densité Kg/m <sup>3</sup>	Épaisseur m
Les 4 murs et le toit sont de même Construction	Dalle	Dalle Si_20	0.47	1.01	450	0.1
	Verres et Métaux	Acier_inox	57.76	0.51	7900	0.003
	Mortier et plâtre	Enduit_extérieur	4.15	1	1700	0.002
Dalle de sol	Pierre et béton	Ardoise	7.59	0.75	2700	0.02
	Pierre et béton	Béton_lourd	7.58	0.92	2300	0.2

Tableau IV.2 : Paramètre et démentions des matériaux de construction de tunnel.

Pour des raisons de simulation des conditions opératoire du test l’or de teste du conditionnement du tunnel on a estimé le taux d’occupation de la voiture de voyageurs à 60 personnes alors que l’apport de groupe de climatisation de l’éclairage et des accessoires annexe à la voiture est estimés à 10000 Kj/hr.

### IV.7 Approche de modélisation

L’installation est composée d’une pompe, un capteur solaire sous vide, un ballon de stockage, un chauffage d’appoint, machine à absorption et le tunnel d’essai thermique.

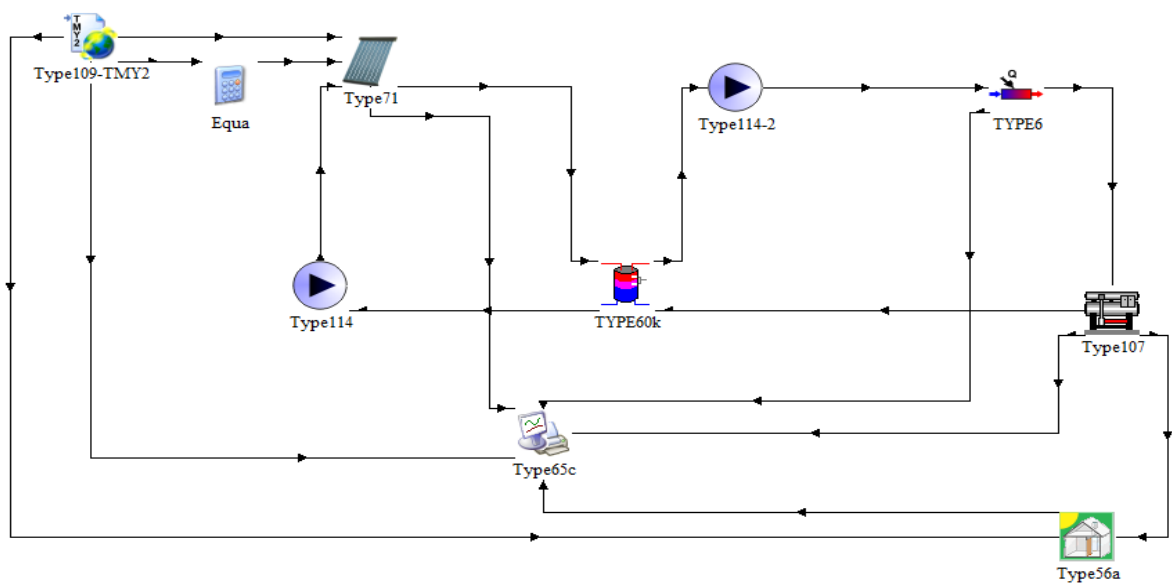


Figure IV.10 : Les composants de l’installation à simuler

## IV.7.1 Configuration et addition des composants

### IV.7.1.1 Conditions météorologiques

Au cours de notre modélisation on à conditionner le climat de notre ville Tlemcen ; pour conditionner le rayonnement incident en analogie de notre climat on utilise le Type 109-TMY2 ceci est également utilisé pour calculer le rayonnement incident sur le plan des capteurs solaire, ce composant permet ainsi de définir la pente et l'azimut de la surface inclinée de façon appropriée.

### IV.7.1.2 Machine à absorption

Ce composant défini par le « Type107 », elle permet de produire l'eau glacée pour de besoins de climatisation.

### IV.7.1.3 Système solaire

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

1. Pompe : Ce composant défini par le « Type114 », elle permet de pomper l'eau froide vers le capteur solaire sous vide, ainsi définit le débit pour le reste des composants de la boucle de débit.
2. Capteur solaire : Ce composant est défini par le « Type71 » ; il permet d'augmenter la température de fluide caloporteur, il permet aussi de lire un fichier teste contenant une liste d'IAM « modificateur d'angle d'incidence » transversales et longitudinales.

Information sur le type capteur sous vide utilisé dans notre simulation :

Nombres en série	2
Surface du champ [m <sup>2</sup> ]	20
Efficacité de capteur	0.7

Tableau IV.3 : Paramètre de capteur solaire sous vide utilisé dans notre simulation sous le type71.



3. Ballon de stockage : Ce composant défini par le « Type60k », il permet de stocker le fluide caloporteur à haute température.
4. Chauffage auxiliaire : Ce composant défini par le « Type6 », il permet d'ajouter la chaleur au fluide pendant la durée de fonctionnement de cette appareil.

#### **IV.7.1.4 Construction de tunnel**

Ce composant défini par le « Type56 », Ce composant modélise le comportement thermique d'un bâtiment ayant jusqu'à 25 zones thermique. La description du bâtiment est lue par ce volet d'un ensemble de fichiers externes ayant les extensions \*.Bui, \*.bld et \*.trn. Les fichiers peuvent être générés à partir des informations fournies par l'utilisateur en exécutant le programme appelé préprocesseur TRNBuild.

Pour construire le tunnel à refroidir, cliquer droit sur « Type56 » et choisissez sur le menu contextuel 'Edit Building'.

Ce tunnel contient une seul zone s'appelle « Tunnel1».

Les caractéristiques des matériaux de construction sont illustrées dans le tableau IV.2.

#### **IV.7.1.5 Composant d'affichage**

Le traceur de ligne « Type65 »: Il est utilisé pour afficher les variables du système sélectionné tandis que la simulation progresse. Cette composante est fortement recommandée et largement utilisée, car elle fournit de précieuses informations variables et permet aux utilisateurs de voir immédiatement si le système ne fonctionne pas. Les variables sélectionnées seront affichées dans une fenêtre séparée sur l'écran. Dans cette composante aucun fichier de donnée de sortie n'est généré.

### **IV.8 Résultats et interprétations**

L'étude a été faite sous un environnement TRNSYS. Il s'agit d'une boucle qui se constitue de plusieurs composants dont un panneau solaire à tubes sous vide, une machine à absorption, un tunnel selon le type56a dans le but de simuler l'évolution de la température du tunnel à partir des données fournies par le logiciel METEONORM. L'intérêt principal de cette simulation est d'étudier le conditionnement du tunnel en vue de tester les groupes de climatisation des voitures voyageurs de la SNTF en fonction de deux température typiques (-10°C en hiver et 45°C en été).

Les figures suivantes représentent respectivement, les températures annuelles émanant du condenseur (en orange), de l'évaporateur (en vert), et du capteur solaire (en bleu).

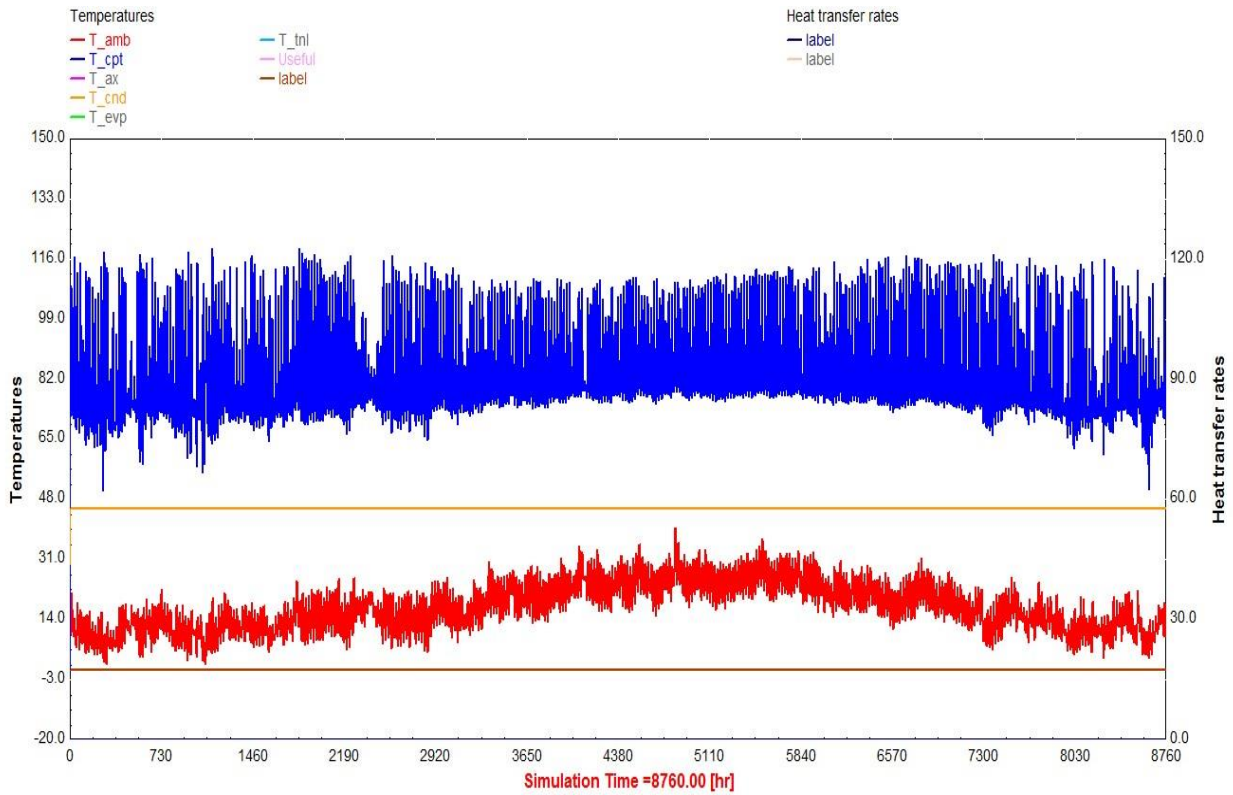


Figure IV.11: Variation annuelle de la température du condenseur.

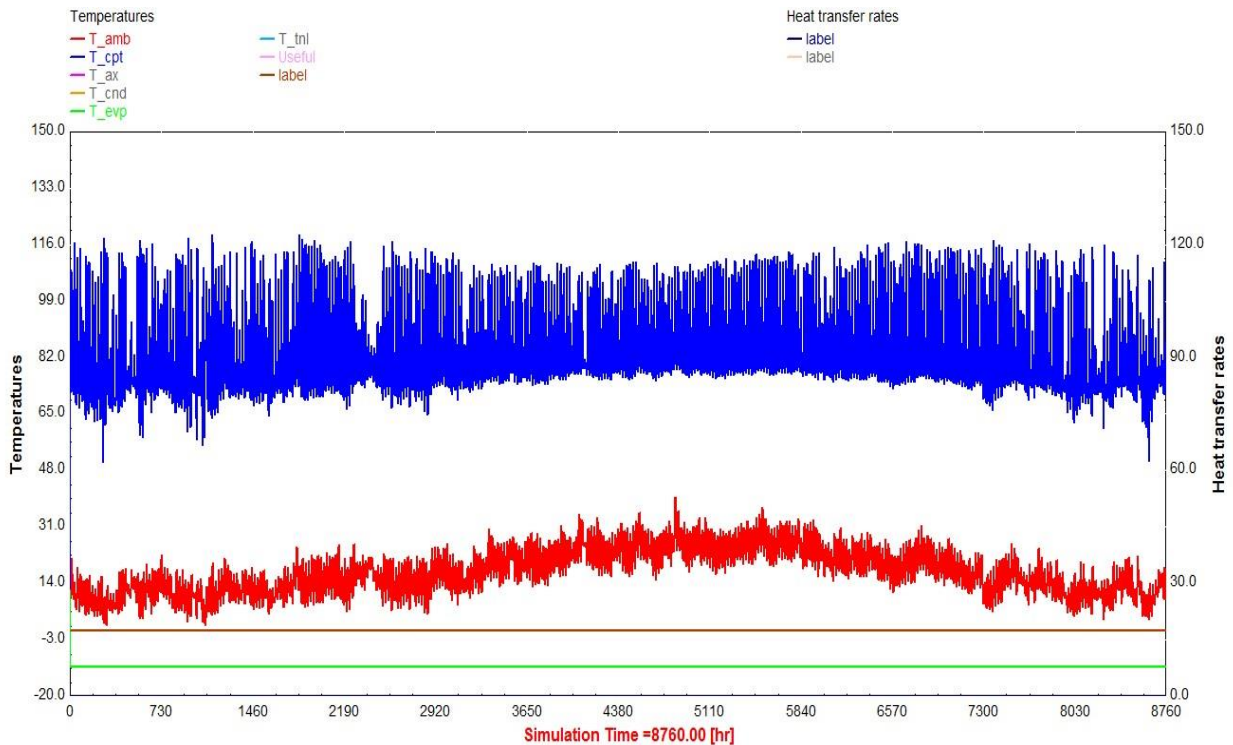


Figure IV.12: Variation annuelle de la température de l'évaporateur.

### **a. Interprétations**

Dans l'intervalle de temps 3000h-6500h, qui reflète la période estivale où les températures sont très importantes pouvant atteindre les 40°C, on voit bien l'intérêt de la réfrigération solaire du tunnel et son bon fonctionnement, figure IV.11.

Dans les deux intervalles 0h-3000h et 6500h-8760h illustrés par la figure IV.12, qui reflètent la période où les températures ne sont pas très importantes, le chauffage solaire devient nécessaire pour simuler des conditions estivales sévères.

On remarque aussi que la température 45°C est réalisable pendant toute l'année même en période à faible température, ainsi que la température -10°C est réalisable pendant toute l'année même en période estivale.

#### **IV.8.1 Simulation des conditions de test en hiver**

En vue de simuler des conditions sévères pendant l'hiver, la journée du premier janvier a été choisie comme journée type. La chaleur issue du condenseur sera véhiculée au tunnel pour la réalisation d'une atmosphère estivale.

### **a. Raccordement des composants**

Les composants sont connectés à l'aide de l'outil lien, qui est activé en appuyant sur le bouton Link. Ainsi l'on clique sur l'un d'entre eux pour choisir le point de départ, puis l'on va à la composante suivante si on désire créer un lien. Dans ce test, le tunnel est raccordé avec le condenseur de la machine à absorption. Cela veut dire que la chaleur émanant du condenseur doit être véhiculée au tunnel.

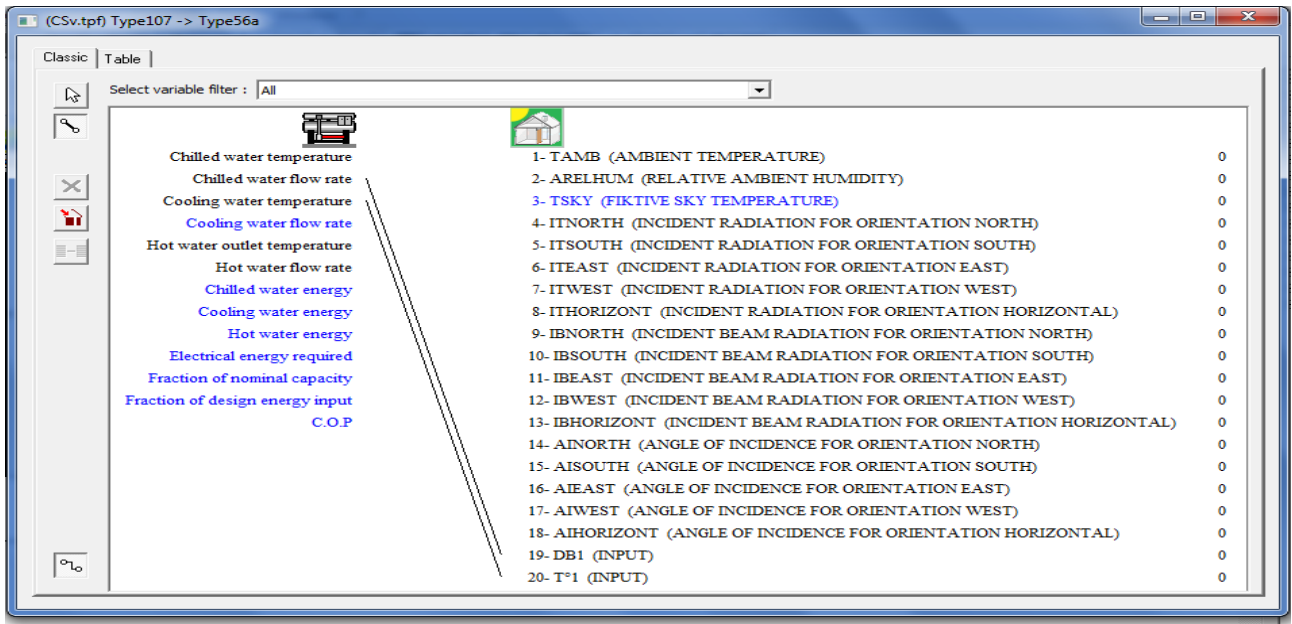


Figure IV.13: Lien entre type107 avec type56a du test du tunnel en hiver.

**b. Résultats**

Courbe (orange) : Température du condenseur.

Courbe (bleu claire) : Température du tunnel.

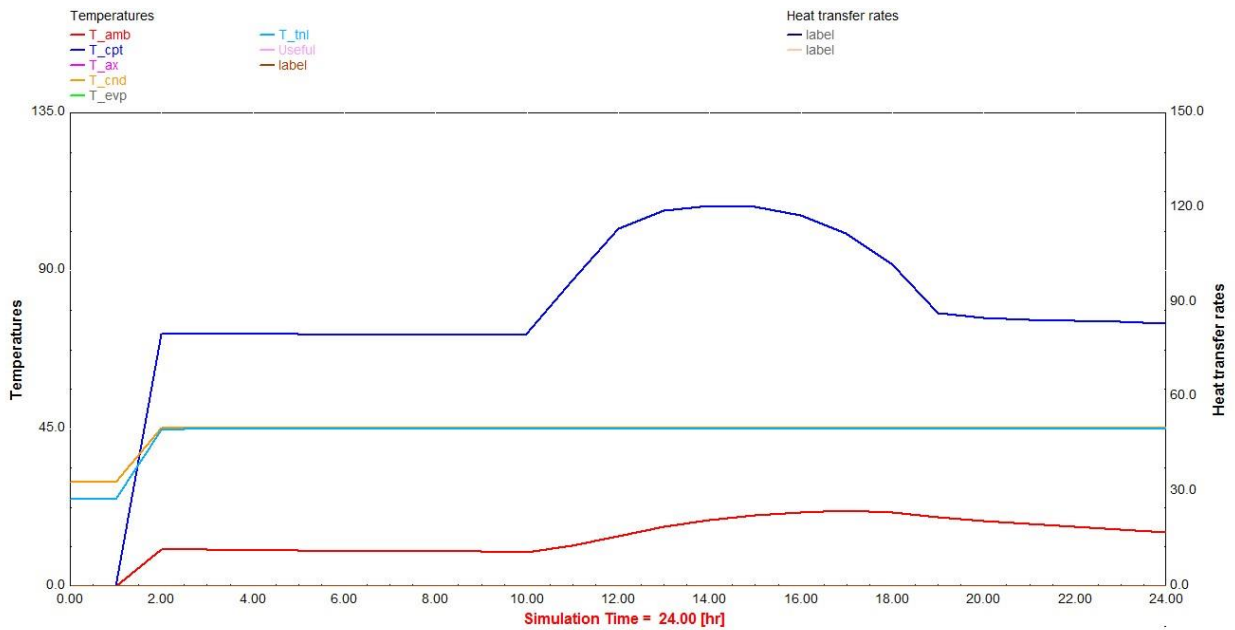


Figure IV.14: Représentation de la simulation en premier janvier avec température de consigne égale à 45°C.

**c. Interprétations**

Sur cette figure, on remarque bien qu'on est arrivé à mettre le milieu interne du tunnel à la température d'essai à +45°C même si la journée du premier janvier est caractérisée par de faibles températures.

**IV 8.2 Simulation des conditions de test en été**

En vue de simuler des conditions sévères pendant l'été, la journée du vingt juillet a été choisie comme journée type. L'évaporateur de la machine doit extraire de la chaleur du tunnel pour la création du froid nécessaire pour la réalisation d'une température hivernale.

**a. Raccordement des composants**

Dans ce test le tunnel est raccordé avec l'évaporateur de la machine à absorption pour extraire de la chaleur du tunnel de but de la création du froid.

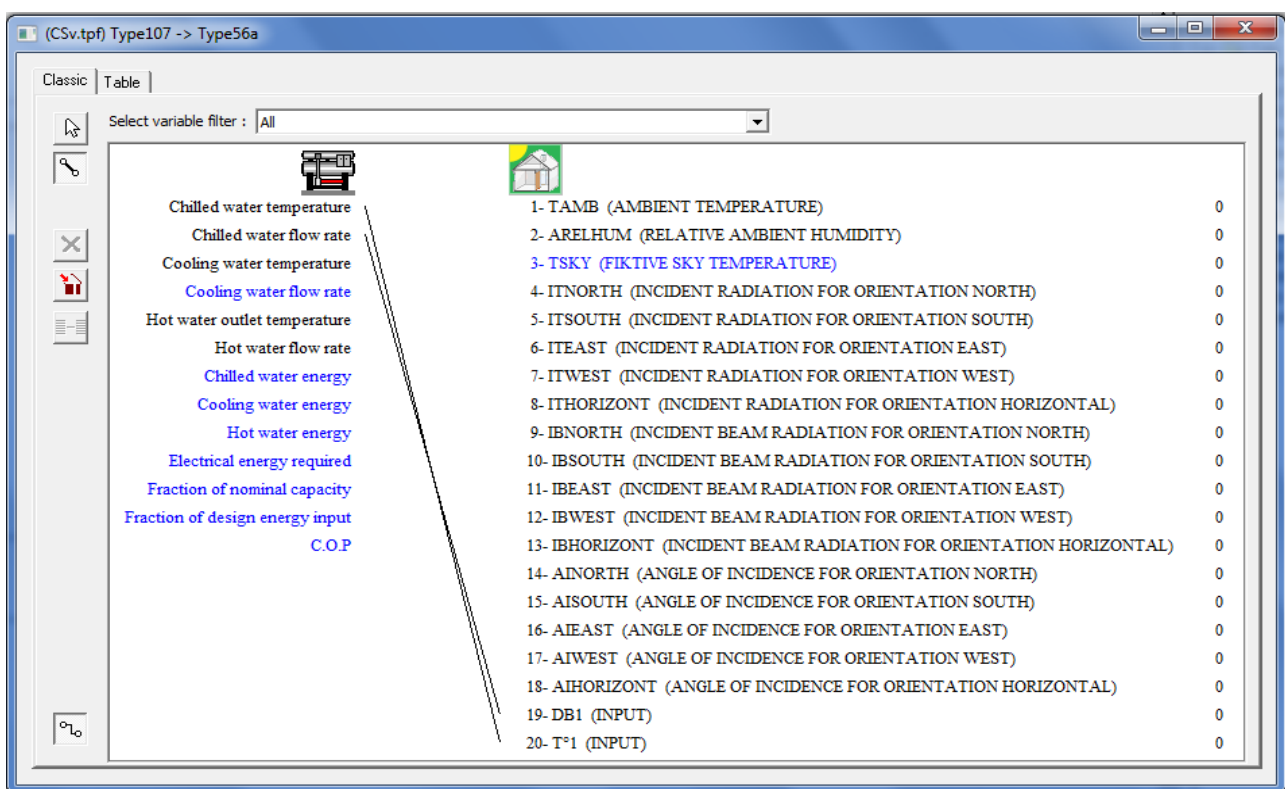


Figure IV.15: Lien entre type107 avec type56a du test du tunnel en été.

## b. Résultats

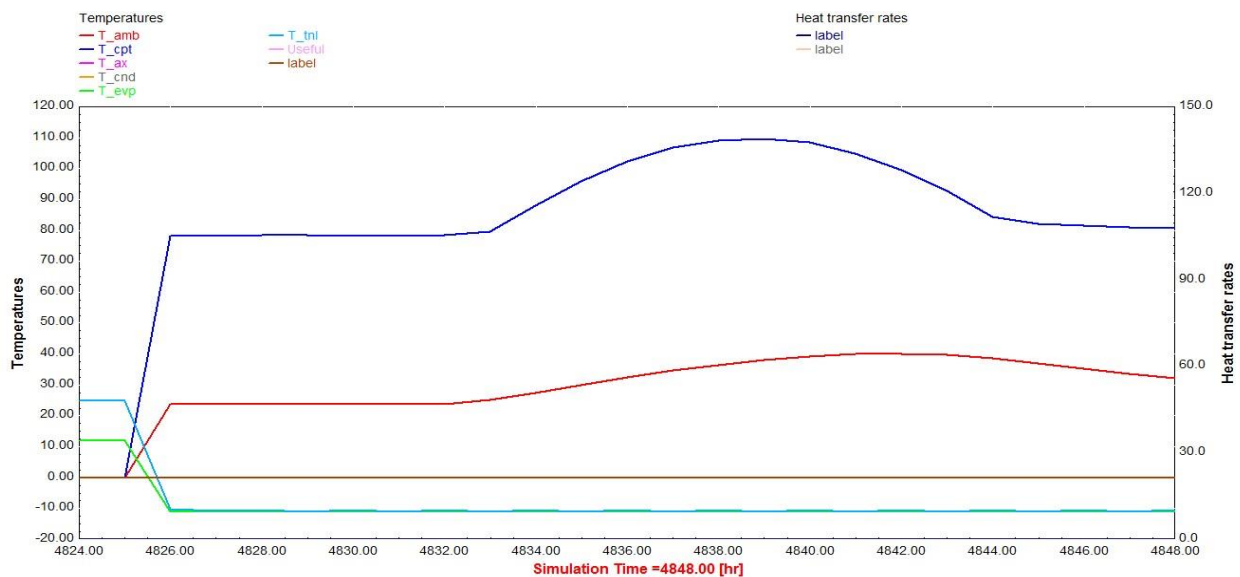


Figure IV.16: Représentation de la simulation en vingt juillet avec température de consigne égale à  $-10^{\circ}\text{C}$ .

## c. Interprétation

Sur cette figure, on remarque bien qu'on est arrivé à mettre le milieu interne de tunnel à la température d'essai  $-10^{\circ}\text{C}$  pour la journée du vingt juillet, représentant la journée la plus ensoleillée de l'année.

## IV.9 Conclusion

Pour clore ce projet, une application concernant le conditionnement d'un tunnel de test du groupe de climatisation des voitures de voyageurs de la SNTF a été présentée.

Le groupe de climatisation des voitures a été également présenté. La construction du tunnel monozone a été faite sous le module TRNbuild en considérant des matériaux de construction figurant dans la librairie intrinsèque du module.

Pour une simulation réaliste, la voiture a été considérée comme occupée de 60 personnes adultes. La chaleur induite par les composants auxiliaires du groupe de climatisation a été estimée arbitrairement à 10 000 kJ/h.

Des conditions climatiques sévères ont été simulées pour tester le groupe de climatisation des voitures. Une condition estivale sévère ( $+45^{\circ}\text{C}$ ) est réalisable en toute période de l'année, ainsi qu'une condition hivernale ( $-10^{\circ}\text{C}$ ).

## Conclusion générale

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

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

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

Le troisième chapitre a été consacré à présenter un modèle théorique de simulation du fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption couplée à un système de production d'eau chaude, en utilisant l'énergie solaire.

La machine à absorption présente une initiative prometteuse pour les applications de conditionnement d'air dans les régions ensoleillées, par exemple le sud d'Algérie, ceci grâce à la disponibilité de l'énergie solaire, en comparaison à d'autres machines frigorifiques.

La machine à absorption solaire peut être une bonne solution pour les sites isolés où le réseau électrique est inexistant, cette machine en plus de sa participation dans la protection de l'environnement, peut permettre à la population rurale de satisfaire des besoins vitaux tels que la conservation des aliments et la climatisation.

Finalement pour clore ce projet, une application concernant le conditionnement d'un tunnel de test du groupe de climatisation des voitures de voyageurs de la SNTF a été présentée.

Nous souhaitons que ce mémoire puisse servir d'outil de travail pour les étudiants et qu'il constitue une base pour d'autres projets dans ce domaine de la recherche.



# Liste des figures

Figure I.1	L'évolution des températures à la surface de globale de 1880 à 2010	5
Figure I.2	Augmentation de la surface climatisée centralisée par pays entre 1980 et 2000	5
Figure I.3	Adéquation entre demande et ressource solaire	6
Figure I.4	Organigramme des différentes technologies de Production de froid à partir de l'énergie solaire	7
Figure I.5	Fonctionnement d'un climatiseur traditionnel	8
Figure I.6	Schéma de la climatisation solaire	8
Figure I.7	Marché mondiale de la climatisation (en volume) en 2000	9
Figure I.8	Marché totale et potentiel de la climatisation solaire en 2003	10
Figure I.9	Système de la climatisation solaire installé en Europe/monde	10
Figure I.10	Part de marché des machines de climatisation solaire	11
Figure I.11	Schéma de principe d'un climatiseur solaire électrique de compression	13
Figure I.12	Arrangement générale d'une usine thermo-solaire Hybride de trigénération	17
Figure I.13	différents schéma de circuit solaire (a) sans appoint (b) avec appoint intégré au stockage (c) avec appoint intégré en série	19
Figure I.14	Les combinaisons des technologies solaires possibles	29
Figure I.15	Moyenne des Capex panne (coût de terrain considéré du désert d'Abu Dhabi)	32
Figure I.16	Annuelle moyenne d'efficacité globale	33
Figure II.1	Les principes de la climatisation solaire	36
Figure II.2	Schéma de principe d'une machine à compression mécanique mono-étagé	37
Figure II.3	Diagramme de Mollier du fluide R134a	38
Figure II.4	Schéma d'une machine frigorifique à compression de vapeur mono-étagé	38
Figure II.5	Diagramme enthalpique de cycle frigorifique	39
Figure II.6	Fonctionnement de compresseur	42
Figure II.7	Fonctionnement de l'évaporateur	42
Figure II.8	Fonctionnement de détendeur	43
Figure II.9	Schéma de fonctionnement d'une machine à absorption pour le couple Eau/Bromure de lithium LiBr	46
Figure II.10	Diagramme d'Oldham de couple Eau/LiBr	48
Figure II.11	Schéma de groupe frigorifique à absorption	49
Figure II.12	Diagramme d'Oldham l'adsorption	49
Figure II.13	L'évolution de COP pour une machine à adsorption Et une machine à absorption	52
Figure II.14	Schéma d'une machine à dessiccation	53
Figure II.15	Schéma de principe d'un système à dessiccation	54
Figure II.16	Roue déssiccatrice	55
Figure II.17	Vue générale d'un capteur à air	57
Figure II.18	Vue générale d'un capteur plan et sa coupe verticale	58



Figure II.19	Vue générale d'un capteur CPC	58
Figure II.20	Vue générale d'un capteur sous vide	59
Figure II.21	Capteur solaire à circulation directe	59
Figure II.22	Schéma de fonctionnement de capteur à tube sous vide à caloduc et sa liaison avec le collecteur	60
Figure II.23	Efficacité des différents capteurs solaires et applications aux différentes technologies de climatisation solaire	60
Figure III.1	Cycle de la machine à absorption	66
Figure III.2	Structure d'une machine à absorption	69
Figure III.3	représentation des points caractéristiques de cycle à absorption sur un diagramme d'Oldham de couple H <sub>2</sub> O/LiBr	76
Figure III.4	Diagramme de Merkel de couple H <sub>2</sub> O/LiBr	77
Figure III.5	Représentation schématique d'une machine à absorption dotée d'un échangeur interne	79
Figure III.6	Capteur solaire sous vide	81
Figure IV.1	Définition de type	84
Figure IV.2	Gare SNTF d'Agha à Alger	86
Figure IV.3	Gaine de reprise	88
Figure IV.4	L'évaporateur de l'installation	89
Figure IV.5	Le compresseur de l'installation	90
Figure IV.6	Le condenseur de l'installation	90
Figure IV.7	Tableau de sécurité frigorifique	91
Figure IV.8	Vue intérieure chambre d'essai thermique	92
Figure IV.9	Vue d'extérieur et dimensionnement du tunnel de simulation	92
Figure IV.10	Les composants de l'installation à simuler	93
Figure IV.11	Variation annuelle de la température de condenseur	96
Figure IV.12	Variation annuelle de la température de l'évaporateur	96
Figure IV.13	Lien entre type107 avec Type56a de test du tunnel en hiver	98
Figure IV.14	Représentation de la simulation en premier janvier avec température de consigne égale à 45°C	98
Figure IV.15	Lien entre type107 avec Type56a de test du tunnel en été	99
Figure IV.16	Représentation de la simulation en vingt juillet avec température de consigne égale à -10°C	100

# Liste des Tableaux

Tableau I.1	Répartition des installations de climatisation solaire répertoriées par le projet CLIMASOL	20
Tableau I.2	Avantages et inconvénients des technologies de climatisation solaire commercialement disponibles	21
Tableau I.3	Données de processus en cas de rejet sec de la chaleur pour quatre endroits	24
Tableau II.1	List de principaux réfrigérants et leurs températures d'ébullition	44
Tableau II.2	Comparaison entre les différentes machines de climatisation	63
Tableau II.3	Coefficient de performance et puissance frigorifique de différentes Types de compresseur	64
Tableau III.1	Les caractéristiques d'un cycle standard sans échangeur De chaleur	77
Tableau III.2	Les caractéristiques d'un cycle standard avec un échangeur d'efficacité 0.8	80
Tableau III.3	Valeur de coefficient pour différents types de capteurs	82
Tableau IV.1	Caractéristique de tunnel	91
Tableau IV.2	Paramètre et dimension des matériaux de construction de Tunnel	93
Tableau IV.3	Paramètre de capteur solaire sous vide utilisé dans notre simulation sous le type71	94

# Nomenclature

## Abréviations

Ai	(l'anisotropie d'indice) est le rapport entre le faisceau l'irradiation à l'irradiation extraterrestre, à la fois sur une surface normale,	
AIPO	Le couple binaire Eau /phosphate d'aluminium	
CA	Capteur solaire à air	
Capex	L'investissement de capitaux	
Capex <sup>2</sup>	Est le coût en capital	[\$/kW <sub>froid</sub> ]
CCG	Le coût de production de froid	
COP <sub>froid</sub>	Le coefficient de performance de l'installation de réfrigération	
COP <sub>g</sub>	Coefficient de performance de la machine à absorption.	
CP	Capteur solaire plans	
CPC	Capteur solaire à concentration fixe	
CS	Capteur à tube sous vide	
DC	Moteur à courant continu	
DTI	Est la différence entre la température de fonctionnement du condenseur et la température ambiante.	[°C]
FLH	Est le rendement de refroidissement utilisable exprimée par le nombre d'heures à pleine charge par an	[h/an].
MAPO	Le couple binaire Eau /métal-aluminium phosphates	
PV	Les cellules photovoltaïques	
SWS	Le couple binaire Eau/selectif-Eau-sorbants	
SAPO	Le couple binaire Eau / silice-aluminium phosphates	

## Lettres Latines

A	Est la surface d'ouverture du collecteur	[m <sup>2</sup> ].
A	Est le rapport entre l'investissement en capital et les Paiements annuels fixes.	
B	Est la dépendance à la température de l'efficacité	
C <sub>1</sub> et C <sub>2</sub>	Sont les constantes de performance du capteur fourni par le fabricant	[W/m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> ]
I	Est l'irradiation totale sur une surface horizontale	[W/m <sup>2</sup> ].
I <sub>b</sub>	Est l'irradiation de faisceau sur une surface horizontale	[W/m <sup>2</sup> ].
I <sub>d</sub>	Est l'irradiation diffuse sur une surface horizontale	[W/m <sup>2</sup> ].
I <sub>t</sub>	Est l'irradiation totale sur la surface de capteur, ceci doit être calculé pour les surfaces inclinées	[W/m <sup>2</sup> ].
K	Coefficient d'échange (W/m <sup>2</sup> )	
M	Est le coût de maintenance annuel	[Capex/an].
P	Eclairement solaire reçu par le capteur	[W/m <sup>2</sup> ].
P <sub>electric</sub>	Est la puissance électrique auxiliaire au [kW <sub>electric</sub> ] pour chacun [kW <sub>capacity</sub> ]	[kW].
S	Surface d'échange	[m <sup>2</sup> ].
T <sub>a</sub>	Est la température ambiante	[C°].
T <sub>c</sub>	Température de condensation	[C°].
T <sub>cell</sub>	Est la température des cellules.	
T <sub>e</sub>	Température d'évaporation	[C°].
T <sub>ext</sub>	Température extérieure	[C°].
T <sub>myn</sub>	Température moyenne du fluide caloporteur du capteur solaire	[C°].
T <sub>STC</sub>	Est la température à des conditions d'essai normalisées (25 C °)	[°C].
T <sub>∞</sub>	Est la température moyenne de fonctionnement	[C°].
Q <sub>a</sub>	Puissance thermique de l'absorbeur	[kW].
Q <sub>B</sub>	Puissance thermique de bouilleur	[kW].
Q <sub>c</sub>	Puissance thermique de condenseur	[kW].
Q <sub>désorbeur</sub>	La quantité de chaleur utile pour le désorbeur	[kW].
Q <sub>evp</sub>	La puissance thermique de l'évaporateur	[kW].
Q <sub>0</sub>	La chaleur absorbée par l'évaporateur	[kW].

$W_{\text{circulation}}$	La puissance de la pompe	[kW].
$W_{\text{th}}$	La consommation énergétique	[kW].

### Lettres grecques

$\beta$	Est l'angle d'inclinaison du capteur horizontale	[rad].
$\rho_g$	Est la réflectance au sol et est supposé être de zéro puisque nous supposons un champ dense solaire. de cellules qui est proposée par le fabricant.	[°C]
$\zeta\alpha_0$	Est le produit de transmission d'absorption pour les cellules photovoltaïques à incidence normale.	
$\emptyset$	Est l'angle d'incidence.	[rad].
$\emptyset_r$	Est l'angle de réfraction.	[rad].
$\eta_{\text{fluide-cooler}}$	Est le rapport entre la quantité d'électricité nécessaire pour faire fonctionner le refroidisseur de liquide et de la chaleur montant rejetée.	
$\eta$	Rendement du capteur solaire (sans dimension)	
$\eta_0$	Est l'efficacité optique du capteur à l'incidence normale sur la base de la zone A	[W/m <sup>2</sup> K].
$\eta$	Est le rendement de conversion photovoltaïque.	
$\tilde{\eta}$	Est le rendement nominal à des conditions de test standard.	
$\Sigma O$	Est le coût de fonctionnement annuel	[\$/kW <sub>frd</sub> ].
$\zeta$	Taux de circulation	
$\varepsilon$	L'efficacité de l'échangeur	

### Caractère spéciaux

€	unité d'Euro
\$	unité de dollar

## Bibliographies

[1] James HANSEN, Makiko SATO, Reto RUEDY, Ken LO, David W. LEA et Martin MEDINA-ELIZADE, "Global Temperature Change", Demarches de l'Académie national des Sciences, September 2006.

[2] <http://maghrebemergent.com/actualite/fil-maghreb/7988-la-consommation-energetique-mondiale-devrait-monter-de-40-dici-a-2030-bp.html> Une source des enjeux énergétiques mondiale (site consulté en avril 2012).

[3] Said DIAF, Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production d'électricité en Algérie, Bulletin des Energies Renouvelables N° 19-2011

[4] <http://www.sundous.com/Energie.html> consulté en avril 2012.

[5] Henri NOIREL, « Équipement de confort climatisation », Créé avec la collaboration du GAMA et du GNFA (Groupement Amical d'enseignants des Matériels Automobiles) 2002.

[6] <http://www.culturemedias2030.culture.gouv.fr/annexe/01-fiches-culture2030-1-.pdf> consulté en avril 2012 (Le site internet consulté en juin 2012).

[7] <http://blogs.tv5.org/climats/> (consulté en avril 2012 ).

[8] Andrea Voigt «Climatisation solaire : Une technologie prometteuse mais pas encore mature », Publié dans Clim Pratique.

[9] Jérôme ADNOT, ARMINES, "Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners", FINAL REPORT - APRIL 2003 .

[10] C. Hildbrand, J. Bony, M. Bunea, A. Kleijer et S. Citherlet, « POTENTIEL DE LA CLIMATISATION SOLAIRE PAR ADSORPTION EN SUISSE » ,2010.

[11] M Rémi CHELAN, ' la climatisation solaire ' , mémoire de fin d'étude d'Ingénierie du bâtiment, Ecole Nationale d'Ingénieurs De Saint-Etienne, 2004

- [12] Olivier Drücke, « L'énergie Solaire Thermique pour Applications de Froid et de Chaleur Industrielle »,2011.
- [13] D.S. Kima, C.A. Infante Ferreira, “Solar refrigeration options, a state of the art review, State of the Art “,international journal of refrigeration 31(2008)3–15.
- [14] Michael Krause, “State of the art Survey on new solar cooling developments (Solar Air-Conditioning and Refrigeration)”, October 2010 .
- [15] D. La, Y.J. Dai \*, Y. Li, R.Z. Wang, « Technical development of rotary desiccant dehumidification and air conditioning: A review »,Renewable and Sustainable Energy Reviews,2010, journal homepage: [www.elsevier.com/locate/rser](http://www.elsevier.com/locate/rser)
- [16] Marwan Mokhtar, Muhammad Tauha Ali, Simon Bräuniger, Afshin Afshari, Sgouris Sgouridis, Peter Armstrong, Matteo Chiesa, “Systematic comprehensive techno-economic assessment of solar cooling technologies using location-specific climate data”, Institute of Science and Technology, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2010.
- [17] Mr Thibaut Vitte, «Généralités et état de l'art à propos de la climatisation solaire », Thèse en Génie civil, Institut National des sciences Appliquées de Lyon,
- [18] ‘Technique de froid’, cours de base, avril 2012 (google).
- [19] <http://www.solairethermique.guidenr.fr/>, « capteur-solaire thermique » (Le site internet Consulté en avril 2012).
- [20] Mr Cheikh Ahmed Tidiane « Etude comparative de différents systèmes de impact environnemental » , mémoire de fin d'étude ingénieur de conception en électromécanique, école polytechnique de THIES, juillet 1999
- [21] M<sup>r</sup> Mamadou Karas KANE, « Conception d'un système de climatisation solaire par refroidisseur à absorption : application à des hôteliers », mémoire de fin d'étude d'ingénieur de conception en électromécanique, 2007.

[22] Mr Jean Castaing-Lavignottes, « Aspects thermodynamiques et technico-économique des systèmes à absorption liquide », Document Pdf, Institut Français du froid industriel , 2002

[23] Mr Nahla BOUAZIZI, hamdi BEN RAMDAN, Mohamed ACHACHAD, Ali BELGHITHI, “ modélisation d’une machine à absorption”, cours, Laboratoire d’Energétique et des Transferts Thermiques et Massiques ‘Département de Physique Tunisie , 2010.

[24] M TABET Ridha. Mémoire pour l’obtention du diplôme de Master, option : Génie Thermique et Energie Renouvelable, Contribution à la régulation de la température dans un bâtiment Climatisation solaire.

[25][http://fr.wikipedia.org/wiki/Soci%C3%A9t%C3%A9\\_nationale\\_des\\_transports\\_ferroviaires](http://fr.wikipedia.org/wiki/Soci%C3%A9t%C3%A9_nationale_des_transports_ferroviaires) (le site internet Consulté en juin 2012.).

[26] Mr YUCEF Ahmed. Mémoire pour l’obtention du diplôme de Magister, Option : Génie climatique et froid, Contribution à l’amélioration du système de climatisation des voitures de voyageurs de la SNTF.

[27] Warnakulasuriya and Worek, International Journal of Heat and Mass Transfer 51, 3362–3368, 2008.

[28] M<sup>r</sup> Werner KEILHOLZ, Paul SETTE, “ Les évolutions De TRNSYS – La Version 16”, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, mars 2005.



# Résumé

L'utilisation des énergies renouvelables suscite de plus en plus un intérêt certain dans le monde. La diminution des réserves mondiales en pétrole et en gaz et les problèmes environnementaux ont amené beaucoup de pays à s'intéresser aux énergies renouvelables et propres telles que l'énergie solaire.

A l'échelle mondiale la production de froid dans l'habitat (individuel ou collectif) apparaît comme un enjeu majeur de ce nouveau siècle. Durant les dernières décennies, une demande de confort accrue et des températures particulièrement élevées ont conduit à un fort développement de la climatisation dans les pays développés.

L'objectif de ce mémoire est le calcul d'une installation de climatisation à absorption à base solaire et la simulation d'une application concernant le conditionnement d'un tunnel de test du groupe de climatisation des voitures de voyageurs de la SNTF, pour cela une condition estivale sévère (+45 °C) est réalisable en toute période de l'année, ainsi qu'une condition hivernale (-10 °C).

# **A**bstract

The use of renewable energy generates more and more significant interest in the world. The global reduction in oil and gas and environmental problems has led many countries to become interested in renewable and clean energy such as solar energy.

Globally, the production of cold housing (individual or collective) appears as a major energy challenge of this new century. In recent decades, an increasing demand for comfort and high temperatures in summer has led to a strong growth development air conditioning in developed countries.

The objective of this work is the calculation of an air conditioning system based solar absorption and a simulation of conditioning a tunnel for testing the passenger wagons air conditioning system of SNTF Company. Hard condition were reached in summer (+45°C) and in winter (-10°C).

## ملخص

المشاكل العالمية المتمثل في نقص الاحتياط العالمي للنفط و الغاز و كذلك المشاكل البيئية ادت الى اهتمام العالم في استخدام الطاقة المتجددة .

التبريد السكني (فردى او جماعى) يبدو كقضية رئيسية في هذا القرن على الصعيد العالمى

تزايد طلب التكييف و ارتفاع الحرارة في هذه العقود الاخيرة ادو الى تنمية قوية في مكيفات الهواء في البلدان المتقدمة .

الهدف من هذه المذكرة هو حساب تكييف الهواء استنادا على الطاقة الشمسية و تحليل التطبيق المتمثل في تكييف نفق الاختبار اجهزة التكييف لسيارات SNTF على