



RÉPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET

DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Amar Thelidji Laghouat

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN DE CYCLE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine Sciences et Technologie

Filière Génie mécanique

Spécialité Energie renouvelable

THÈME

**Modélisation d'un système de refroidissement à  
absorption solaire sous TRNSYS**

*Préparé par :*

1- SENOUCI Mohammed Aymen

2- BOUZIANE Hadj Mahdi

*Membres de jury composé de :*

Mr. M. TEGGAER

Professeur

Président

Mme. H. RAGE

MC

Examineur

Mr. S. BOUABDALLAH

Professeur

Encadreur

Année universitaire 2023-2024



## **Remerciements**

**Nous remercions surtout eu de nous avoir accordé la réussite et de nous avoir aidé à persévérer dans nos études et à rencontrer des professeurs intéressés.**

**Tout d'abord, ce travail n'aurait pas été aussi riche et n'aurait pas vu le jour sans l'aide et l'encadrement du Pr. Saïd BOUABDALLAH. Nous le remercions pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité. En préparant cette modeste thèse.**

**Nous tenons à remercier le Pr Mohammad TEGGAR d'avoir présidé le jury et le Dr RAGUE Hanane d'avoir accepté d'étudier ce modeste travail.**

**Nous tenons également à remercier tous nos professeurs pour la grande générosité et la patience dont ils ont fait preuve malgré leurs responsabilités académiques et professionnelles.**

**Nous tenons également à remercier tous ceux qui nous ont aidé et soutenu directement ou indirectement.**

# DEDICACE

Je dédie ce travail à :

A celle qui a inséré le goût de la vie et le sens de la

Responsabilité...merci ma MERE.

A celui qui a été toujours la source d'inscription

Et de courage ...merci mon PERE.

Ames Frers Issam et Abdelkader.

A mes grands parants ABDELKADER et TOURKIA

A mes chers oncles DJARNIA AHMAD est DJAMAL

Ames toute Amies surtout massoud allaoua , ziad adjalat et hamada melik

A la promotion de Master II.



Mohammed aymen

# DEDICACE

**J**e dédie ce modeste travail à :

*Cher papa qui était compagnon dans ma vie et Ma chère mère la chose la plus précieuse que je possède pour leur soutien et leur Encouragement*

*Durant toute ma carrière d'étude,*

*Mes sœurs,*

*Toute ma grande famille,*

*Mes meilleurs amis : SENOUCI MOHAMMED AIMAN, KOUIDRI Said, BEDOUI Abderrazak, massoud allaoua , ziad adjalat et hamada melik.*

*A tous les étudiants de Génie Mécanique,*

*Ainsi qu'à tous mes amis et tous qui me Connaissent*



**Bouziane hadj mahdi**

### Résumé

En Algérie, l'énergie solaire est une source d'énergie à fort potentiel mais pas encore pleinement exploitée (solaire thermique, solaire photovoltaïque, centrale électrique) etc. Utiliser cette énergie solaire avec des systèmes de climatisation électriques peut être une solution pour réduire la consommation électrique dans ce secteur, et donc la climatisation solaire peut être une solution adaptée pour produire du froid avec de l'énergie solaire renouvelable.

Ce travail porte sur l'étude et la simulation d'une machine frigorifique à absorption, utilisant un couple ammoniac/eau avec une pompe mécanique pour activer la circulation de la solution binaire. La simulation a été réalisée à l'aide du programme (TRNSYS).

Mots-clés : machine de refroidissement par absorption, simulation ; L'énergie solaire, TRNSYS

### Abstract

In Algeria, solar energy is a source of energy with high potential but not yet fully exploited (solar thermal, solar photovoltaic, power plant) etc. Using this solar energy with electric air conditioning systems can be a solution to reduce electricity consumption in this sector, and therefore solar air conditioning can be a suitable solution to produce cold with renewable solar energy.

This work focuses on the study and simulation of an absorption refrigeration machine, using an ammonia/water couple with a mechanical pump to activate the circulation of the binary solution. The simulation was carried out using the program (TRNSYS).

Keywords: absorption cooling machine, simulation; solar energy, TRNSYS

### ملخص

في الجزائر، تعد الطاقة الشمسية مصدر طاقة ذو إمكانات عالية ولكن لم يتم استغلالها بالكامل بعد (التسخين الشمسي، والطاقة الشمسية الكهروضوئية، ومحطة الطاقة) وما إلى ذلك. يمكن أن تستخدم هذه الطاقة الشمسية مع أنظمة التكييف الكهربائية حلاً لتقليل استهلاك الكهرباء في هذا القطاع، وبالتالي يمكن أن يكون التكييف الشمسي حلاً مناسباً لإنتاج تبريد بالطاقة الشمسية المتجددة يركز هذا العمل على دراسة ومحاكاة آلة التبريد بالامتصاص، باستخدام زوج الأمونياك/الماء مع مضخة ميكانيكية لتفعيل دوران المحلول الثنائي. المحاكاة تمت بواسطة برنامج TRNSYS

الكلمات المفتاحية: آلة تبريد بالامتصاص، المحاكاة؛ الطاقة الشمسية، TRNS

RESUME	I
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITE SUR MACHINES FRIGORIFIQUE A ABSORPTION	4
1 INTRODUCTION	5
2 HISTORIQUE DES MACHINES FRIGORIFIQUES A ABSORPTION	5
3 DIFFERENTES TYPES MACHINES A ABSORPTION	7
a) Machines à simple effet	7
b) Machine à double effet	7
c) Principe de fonctionnement d'une installation à absorption avec une solution de $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$	8
4 DIAGRAMMES UTILISES POUR LES CYCLES DE REFRIGERATION A ABSORPTION	9
a) Diagramme d'Oldham	10
b) Équations du couple LiBr-H <sub>2</sub> O	12
c) Diagramme de Merkel	12
4.1 Il comprend cinq types de courbes	13
5. CARACTERISTIQUES DES INSTALLATIONS A ABSORPTION	14
6. UTILISATION	15
7. AVANTAGE DES CLIMATISATIONS SOLAIRE	15
8. MARCHE MONDIAL DES SYSTEMES SOLAIRE THERMIQUE	17
a) Le solaire thermique dans le monde	17
b) Une croissance forte et régulière depuis des années	17

## Table des matières

---

9. LES CAPTEURS SOLAIRES	18
9.1 Introduction	18
9.2 Conversion thermique	18
9.3 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire thermique	18
9.4 Composants des capteurs solaires thermiques	19
a) Le transfert d'énergie	19
b) Le stockage	19
9.5 Les différents modèles des capteurs solaires thermiques	19
a) Les capteurs à eau	19
9.6 Intérêt de la production de froid par absorption	22
9.6.1 Avantages et inconvénient de la réfrigération par absorption	22
9.6.2 Les couples classiques utilisés dans l'absorption	23
10. CONCLUSION DU CHAPITRE 1	24
CHAPITRE II : MODELISATION DE LA MACHINE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION	25
1. INTRODUCTION	26
2. DESCRIPTION D'UNE INSTALLATION FRIGORIFIQUE A ABSORPTION	26
3. BILAN MASSIQUE ET ENTHALPIE	27
A. Analyse du Générateur	28
B. Analyse du Condenseur	28
C. Analyse de l'Evaporateur	29
D. Analyse de l'Absorbeur	30
E. Pompe de solution	30
F. Echangeur de solution	31
4. CYCLES THERMODYNAMIQUES DE PRODUCTION DE FROID	32
4.1 Cycle ditherme - machine frigorifique à compression de vapeur	32
4.2 Cycle tritherme- machine consommant de l'énergie thermique	33

## Table des matières

---

4.3 Machine frigorifique à compression mécanique	34
4.4 Machine frigorifique à absorption	35
4.5 Comparaison entre machines frigorifiques à absorption et à compression de vapeur	36
4.6 Diagrammes utilisés dans les cycles à absorption	37
5. CONCLUSION DU CHAPITRE II	39
CHAPITRE III : L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION TRNSYS	40
1. INTRODUCTION	41
2. TRNSYS SIMULATION STUDIO	42
3. VUE SUR LE SIMULATEUR TRNSYS	43
CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS	48
1. PRESENTATION DES MODELES DE L'INSTALLATION ETUDIES	49
2. DESCRIPTION DU ROLE DES COMPOSANTS DE L'INSTALLATION	50
2.1 Conditions météorologiques	50
2.2 Système solaire	50
2.3 Capteur solaire	50
3. RENDEMENT DU CYCLE TOTAL (CYCLE FRIGORIFIQUE+ CAPTEUR)	51
4. SIMULATION DE METEO	51
5. SIMULATION DE PANNEAU SOLAIRE	53
5.1 Panneau à plan type 1b	53
5.2 RESULTATS POUR DIFFERENTES COMPOSANTES DE L'INSTALLATION	54
6. INFO-CLIMAT	56
6.1 Variation de température ambiante extérieure pendant cinq mois (janv.– mai 24)	58

## Table des matières

---

6.2 Variation de la durée de l'enseillement pendant cinq mois	61
CONCLUSION GENERALE	64
BIBLIOGRAPHIE	67

## Liste des Figures

### CHAPITRE I : GENERALITE SUR MACHINES FRIGORIFIQUE A ABSORPTION

Figure I.1 : Cycle à simple effet avec échangeur de solution (EX) qui permet De réduire la chaleur fournie au générateur .....	7
Figure I.2 : Cycle à absorption à double effet (Ecoulement en série fonctionnant à 3 niveaux de pression). ...	8
Figure I.3 : Schéma d'un système frigorifique à absorption avec une solution de NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O .....	9
Figure I.4 : Composition de la vapeur en fonction de celle du liquide NH <sub>3</sub> /H <sub>2</sub> O.....	10
Figure I.5 : Diagramme d'Oldham pour le couple NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O.....	11
Figure I.6 : Isotherme dans le diagramme de Merkel.....	13
Figure I.7 : Diagramme de Merkel du mélange LiBr-H <sub>2</sub> O.....	14
Figure I.8 : Croissance annuelle du marché mondial du solaire thermique (MW).....	17
Figure I.9 : processus dans un capteur solaire plan .....	18
Figure I.10 : Capteurs plans sans vitrage .....	20
Figure I.11: Capteur plan vitré . .....	20
Figure I.12 : Capteur sous vide .....	21
Figure I.13 : Schéma d'un capteur à air à plan incliné .....	22

### CHAPITRE II : MODELISATION DE LA MACHINE FRIGORIFIQUE A ABSORPTION

Figure II.1 : Schéma d'une machine de réfrigération par absorption simple effet.....	26
Figure II.2 : Generator.....	28
Figure II.3 : Condenseur.....	28
Figure II.4 : L'évaporateur. ....	29

## Liste des Figures

---

Figure II.5 : Absorbeur .....	30
Figure II.6 : Pompe de solution .....	30
Figure II.7 : Echangeur .....	31
Figure II.8 : Application du second principe de la thermodynamique à une machine frigorifique à compression d'une vapeur .....	32
Figure II.9 : Pompe à chaleur/Machine frigorifique (système ditherme) .....	33
Figure II.10 : Principe d'une machine frigorifique tritherme avec $T_M > T_C > T_F$ .....	34
Figure II.11 : Principe d'une pompe à chaleur tritherme avec $T_C > T_M > T_F$ .....	34
Figure II.12 : Exemple de cycle frigorifique à compression de vapeur .....	35
Figure II.13 : Comparaison entre une machine frigorifique à compression mécanique d'une vapeur .....	37
Figure II.14 : Diagramme d'équilibre liquide-vapeur (p-x) du mélange binaire (Ammoniac/Eau) à pression et température constantes du générateur .....	39

## CHAPITRE III : L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION TRNSYS

Figure III.1 : Interface du logiciel TRNSYS .....	43
Figure III.2 : Espace de travail de TRNSYS .....	44
Figure III.3 : Liens entrée-sortie entre modèles et fenêtre de paramètres de simulation .....	45
Figure III.4 : La configuration de machine a absorption sous TRNSYS simulation .....	46

## CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Figure IV.1 : Interface TRNSYS pour simuler les conditions climatiques .....	51
Figure IV.2 : Variation de la température ambiante à Bechar .....	52
Figure IV.3 : Variation de l'humidité relative à Bechar .....	52
Figure IV.4 : Interface TRNSYS pour simuler le panneau solaire plan .....	53

## Liste des Figures

---

Figure IV.5 : Débit à la sortie du capteur solaire plan (Kj/h).....	53
Figure IV.6 : Gain d'énergie utile d'un capteur solaire plan.....	54
Figure IV.7 : Variation de température de capteur plan type 1b. ....	55
Figure IV.8 : Variation d'énergie utile produit par le capteur (Kj/h). ....	55
Figure IV.9 : Variation de COP d'une machine a absorption (Performance Map Collector) (KJ/h). ....	56
Figure IV.10 : Interface et présentation du site info climat.....	57
Figure IV.11 : Variation de température durant les cinq premiers mois de 2024 à Laghouat.....	58
Figure IV.12 : Variation de température durant le mois de mai 2024 à Laghouat. ....	58
Figure IV.13 : Variation de température durant les cinq premiers mois de 2024 à Bechar.....	59
Figure IV.14 : Variation de température durant un mois de mai 2024 à Bechar.....	59
Figure IV.15 : Variation de température durant les cinq premiers mois de 2024 à Alger.....	60
Figure IV.16 : Variation de température durant le mois de mai 2024 à Alger. ....	60
Figure IV.17 : Variation de la durée de l'ensoleillement durant les cinq premiers mois de 2024 à Laghouat	61
Figure IV.18 : Variation de durée de l'ensoleillement durant les cinq premiers mois de 2024 à Bechar .....	62
Figure IV.19 : Variation de durée de l'ensoleillement durant les cinq premiers mois de 2024 à Dar el Beida- Alger.....	62
Figure IV.20 : L'ensoleillement de mois du mai à Laghouat.....	63

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR MACHINES FRIGORIFIQUE A ABSORPTION

Tableau I.1 : caractéristiques des installations a absorption..... 14

Tableau I.2 : Domaine débilisations des installations a absorption..... 15

## CHAPITRE III : L'ENVIRONNEMENT DE SIMULATION TRNSYS

Tableau III.1 : La description des différents éléments constitutifs de ce système..... 47

## CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau IV.1 : Informations sur le capteur sous-vide utilisé dans notre simulation ..... 50

## Nomenclature

Symboles	Description	Unité
COP	Coefficient de performance	(sans dimension)
T	température	°C, K
h	l'enthalpie	kJ/kg
W	Travail	kW
P	Pression	kPa
BP	Basse pression	kPa
HP	haute pression	kPa
$Q_{ab}$	La puissance thermique a l'absorbeur	W
$Q_c$	La puissance thermique au condenseur	W
$Q_g$	La puissance thermique au générateur	W
$Q_E$	La puissance thermique a l'évaporateur	W

$Q_A$	Quantité de chaleur dégagée de réaction endothermique	kJ/kg
$T_a$	Température ambiante	°C
$T_c$	Température du condenseur	°C
$T_E$	Température de l'évaporateur	°C
$T_B$	Température du bouilleur (générateur)	°C
$A_c$	Surface des collecteurs	m <sup>2</sup>
S	Surface du mur	m <sup>2</sup>
K	le coefficient global de transfert de chaleur	W/m <sup>2</sup> .K
$h_e$	Le coefficient de transfert thermique par convection externe	W/m <sup>2</sup> .K
$h_i$	Le coefficient de transfert thermique par convection interne	W/m <sup>2</sup> .K
$e_i$	L'épaisseur du mur	M
	La conductivité thermique du mur	W/m.K
D	le débit d'air	m/h
$Q_{aux}$	La puissance thermique du système auxiliaire	W
$Q_s$	La puissance thermique utile du champ solaire	W
G	le rayonnement solaire	W/m <sup>2</sup>
$A_c$	Surface des collecteurs	m <sup>2</sup>

## Liste des abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Désignation</b>
HFC	hydro fluor carbone
HCFC	hydro chlorofluorocarbure
LiBr	Symbole chimique du bromure de lithium
NH <sub>3</sub>	Symbole chimique de l'Ammoniac
TRNSYS	TRAnsient SYstems Simulation
S.F	la fraction solaire



# **Introduction Générale**

## Introduction Générale

---

L'Algérie a un grand potentiel pour l'énergie solaire, la luminosité annuelle du soleil est toujours supérieure à 40 000 kilojoules par mètre carré de surface de captage, il est donc important d'exploiter ces gisements libres et non pollués, dans le domaine de la production de froid, notamment dans les zones rurales isolées, pour les pays en développement avec un ensoleillement favorable, en particulier dans les zones hors réseau, les machines de refroidissement à absorption solaire semblent être une voie prometteuse pour améliorer les conditions de vie dans ces zones, d'un point de vue sanitaire et économique, dans ce travail, nous proposons un réfrigérateur solaire à charbon actif.

Méthanol qui est fabriqué en Algérie Avec des matériaux locaux, au laboratoire solaire et testé sur son balcon à conditions météorologiques réelles les systèmes de froid et de climatisation sont des consommateurs important d'énergie, ces systèmes sont habituellement actionnés par énergie électrique produite à partir de produit fossile (pétrole, gaz naturel, charbon) et les systèmes de réfrigération sorption entraînés par une source de chaleur à basse température ont été développés comme une alternative économique et respectueuse de l'environnement, et les recherches ont montré que l'énergie solaire est une bonne solution qui peut remplacer les énergies fossiles, dans tous ces systèmes, la consommation d'énergie mécanique est réduite au minimum ou nul, et ils peuvent fonctionner avec de la chaleur à basse température à partir de différentes sources telles que la chaleur résiduelle ou l'énergie solaire.

Les systèmes de refroidissement par absorption tels que ceux utilisant LiBr-H<sub>2</sub>O ou H<sub>2</sub>O- NH<sub>3</sub> comme couple de travail présents de nombreux avantages pour des applications spécifiques, ils donnent une meilleure efficacité du système de refroidissement par rapport aux systèmes d'adsorption, cependant, ces systèmes présentent également de nombreuses limitations dans les conditions de fonctionnement, le grand avantage des systèmes d'adsorption plus de ceux d'absorption est qu'elles peuvent fonctionner sans pièces mobiles, ayant des coûts inférieurs, puis de l'entretien, autres avantages en comparaison avec les systèmes de compression sont : construction simple respectueux de l'environnement et silencieux.

Un grand nombre d'applications pour les systèmes de refroidissement de sorption ont été vues dans les pays développés et en développement, tels que :

- Stockage et conservation des vaccins et des produits médicaux.
- Conserver les aliments et les aliments dans les zones désertiques loin de l'électricité.
- Réfrigération, climatisation, refroidisseurs et production de glace etc...

Le présent mémoire compose de quatre chapitres et conclusion :

Le premier chapitre est consacré à l'intérêt pratique du thème, résidant derrière l'importance primordiale d'étudier le système de fonctionnement d'une machine frigorifique à absorption fonction avec un fluide frigorigène NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O et ainsi que les types de capteurs solaires et leurs principes de fonctionnement, en plus d'un aperçu du marché mondial des systèmes solaires thermiques.

Le deuxième chapitre explique les rôles de chaque composant constituant la machine frigorifique en complément des cycles thermodynamiques de production de froid et donner leurs

## Introduction Générale

---

principes de fonctionnement afin de tirer le modèle mathématique représentant l'enchaînement des relations et formules pour calculer la puissance, l'efficacité et le COP de la machine.

Le troisième chapitre présente la simulation de systèmes, et des modèles d'installations solaires de climatisation. Grâce à sa prise en charge des fichiers météo et la fourniture de quelques données climatiques TRNSYS, la simulation est faite alors en effectuant des combinaisons modèle / climat en visant des résultats utiles pour notre étude.

Le quatrième chapitre présente des informations climatiques de différentes villes Algériennes (Dar el Baida, Laghouat et Béchar). En plus les résultats et la discussions de notre étude

A la fin une conclusion avec recommandations sont présentés.



**Chapitre I : Généralité sur  
machines frigorifique à absorption**

## 1 introduction

L'utilisation de l'énergie solaire dans les pays ensoleillés est un moyen efficace pour pallier au manque d'énergie surtout dans les zones rurales où il est parfois difficile et coûteux de les alimenter avec le réseau électrique conventionnel. Parmi les procédés de transformation thermique de l'énergie solaire, la réfrigération solaire est l'application la plus indiquée pour le stockage des denrées alimentaires et des produits pharmaceutiques [1].

L'énergie thermique d'origine solaire, à température modérée, est disponible un peu partout sous forme intermittente et diluée. Parmi les applications de l'énergie solaire pouvant s'accommoder plus ou moins bien de son intermittence, de sa dilution et de sa température modérée fournie par les capteurs plans, il y a lieu de citer le chauffage et la réfrigération solaire.

Ces deux dernières applications font l'objet d'un plus grand nombre d'études et de réalisation, du moment où le réchauffage et la réfrigération pour un pays développé au climat tempéré représente environ le tiers de ses dépenses totales en énergie.

La réfrigération solaire implique l'utilisation de l'énergie thermique d'origine solaire dans des composants mécaniques afin de produire un effet de refroidissement [2]

La production de froid est équivalente à une absorption de chaleur, car refroidir un corps ne consiste pas à lui donner une quantité de froid (c'est-à-dire, du point de vue physique le froid n'existe pas), mais à lui enlever une quantité de chaleur.

La production froide peut être obtenue par différent moyens fondés sur des techniques de refroidissements bien maîtrisés.

## 2 Historique des machines frigorifiques à absorption

Une première description du cycle a été donnée en 1805 par Oliver Evans, un Américain (1755-1819). Cependant, le premier brevet et le premier modèle fonctionnant avec de l'éther éthylique ont été développés par Jacob Perkins, un Américain travaillant en Angleterre, en 1835. Les premières machines à compression qui ont connu un succès industriel ont été créées par James Harrison, un Écossais émigré en Australie (1816-1893), avec des brevets déposés en 1855-56-57. Ces machines étaient fabriquées en Angleterre et pouvaient produire de la glace ou refroidir des saumures, des liquides frigoporteurs. L'éther éthylique était utilisé comme frigorigène à l'époque [3].

Par la suite, de nouveaux frigorigènes ont été introduits successivement. Charles Tellier, un Français (1828-1913), a utilisé le diméthyléther. Thaddeus Lowe, un Américain (1832-1913), a utilisé le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), qui est actuellement réapparu après une période d'oubli. L'ammoniac (NH<sub>3</sub>), d'abord expérimenté par Tellier en 1862, est devenu un réfrigérant majeur grâce aux travaux

de l'Américain David Boyle (1837-1891) et surtout de l'Allemand Carl von Linde (1842-1934), et il est toujours utilisé aujourd'hui. Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) a été utilisé par le Suisse Raoul Pierre Pictet (1846-1929), mais a disparu au seuil de la Seconde Guerre mondiale.

Le chlorure de méthyle (chlorométhane) (CH<sub>3</sub>Cl) a été utilisé pour la première fois par le Français C. Vincent en 1878 et a connu une longue carrière commerciale, disparaissant seulement dans les années 1960.

Les hydrocarbures fluorés ont été développés dans le but de trouver des frigorigènes sûrs (non toxiques et non inflammables) et ont été inspirés par les travaux de Swarts à Gand entre 1893 et 1907. Une équipe américaine de la Frigidaire Corporation, dirigée par Thomas Midgley, a mis au point en 1930 les premiers frigorigènes fluorés. Le premier CFC, le R12 (CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>), est apparu en 1931, suivi du premier HCFC, le R22 (CHF<sub>2</sub>Cl), en 1934, et du premier mélange azéotropique, le R502 (R22/R115), en 1961. Depuis la publication en 1974 d'un article des lauréats américains du prix Nobel F.S. Rowland et M.J. Molina, qui a révélé les effets nocifs du chlore sur la couche d'ozone stratosphérique, les frigorigènes chlorés tels que les CFC et les HCFC sont soumis à des processus d'élimination par le biais du Protocole de Montréal (1987) et de ses amendements. Actuellement, des frigorigènes fluorés non chlorés sont proposés, tels que le R134a, ainsi que des mélanges de HFC tels que le R410A, le R407C, le R404A, qui ont une influence plus ou moins forte sur l'effet de serre. On propose également l'utilisation (ou le retour) de frigorigènes "naturels" tels que l'ammoniac, les hydrocarbures, l'eau et le CO<sub>2</sub>, qui ont une action très faible ou nulle sur l'effet de serre. Au fil du temps, les composants des systèmes de compression ont également beaucoup évolué. Par exemple, les lourds compresseurs à pistons lents et encombrants du XIXe siècle ont cédé la place, 100 ans plus tard, à des machines rapides et légères. De nouveaux types de compresseurs sont apparus, tels que les compresseurs à vis bi-rotor (A.Lysholm en Suède - 1934), les compresseurs à vis mono-rotor (B. Zimmern en France - 1967), les compresseurs "spiro-orbitaux" (scroll) dans les années 70 (brevet du Français Léon Creux - 1905) et les compresseurs centrifuges (travaux fondamentaux de l'ingénieur français Auguste Rateau en 1890, puis de l'Américain Willis Carrier en 1911).

Pour les petites machines, des groupes frigorifiques hermétiques ont été développés pour limiter les fuites de frigorigène. Le premier du genre était la curieuse machine de l'abbé Audiffren en 1905. Les groupes hermétiques sont maintenant largement utilisés. Parallèlement, les échangeurs thermiques (condenseurs et évaporateurs) ont été améliorés et allégés au fil du temps [4].

### 3 Différentes types machines à absorption

#### a) Machines à simple effet

Le système à absorption à simple effet est le plus utilisé à cause de sa simplicité, la figure I.1 montre le schéma du principe d'une machine fonctionnant avec le couple H<sub>2</sub>O/LiBr. Dans le cas où on utilise un absorbant volatil comme NH<sub>3</sub> dans le couple NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O, l'installation aurait besoin d'une colonne de rectification qui a pour rôle de purifier le réfrigèrent avant de l'introduire dans le condenseur.

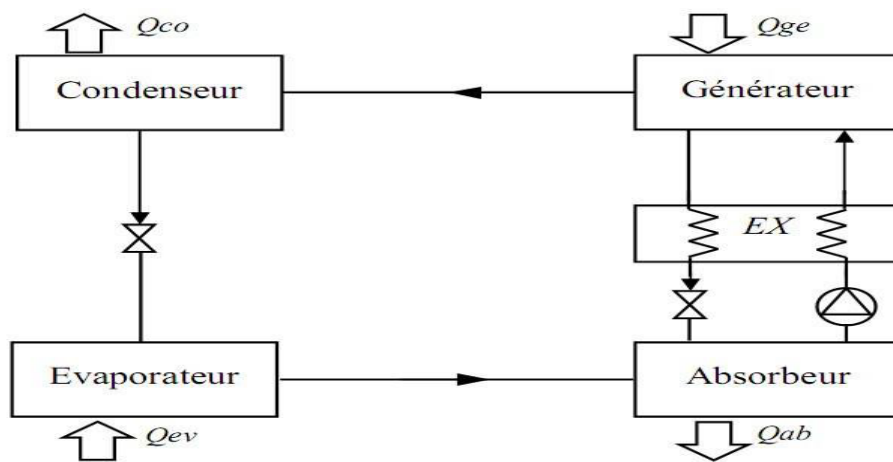


Figure I.1 : Cycle à simple effet avec échangeur de solution (EX) qui permet de réduire la chaleur fournie au générateur [5].

En général, un échangeur thermique est utilisé entre le générateur et l'absorbeur qui préchauffe la solution riche en utilisant la chaleur dégagée par la solution pauvre d'où le nom « échangeur de solution ». Son intérêt est d'augmenter le COP. Des études expérimentales ont montré qu'un échangeur de solution devrait faire partie de toute installation puisqu'il permet d'augmenter le COP d'environ 60% [5].

#### b) Machine à double effet

Le cycle à absorption à double effet a été introduit entre 1956 et 1958 [6], la figure II.2 montre un tel système fonctionnant avec H<sub>2</sub>O/LiBr.

Le générateur à haute pression est chauffé par une source de chaleur extérieure, les vapeurs frigorigènes produites sont ensuite utilisées comme source d'énergie au générateur basse pression ce qui permet la séparation d'avantage du frigorigène. Ce cycle fonctionne à trois niveaux de pression. La pression dans le 1er générateur peut être très importante ce qui nécessite des températures élevées pour permettre la séparation et, en plus, il y a risque de dépassement de la plage de solubilité du

mélange utilisé donc il faut choisir correctement le fluide de travail. Ce problème ne se pose pas dans le cas du bromure de lithium.

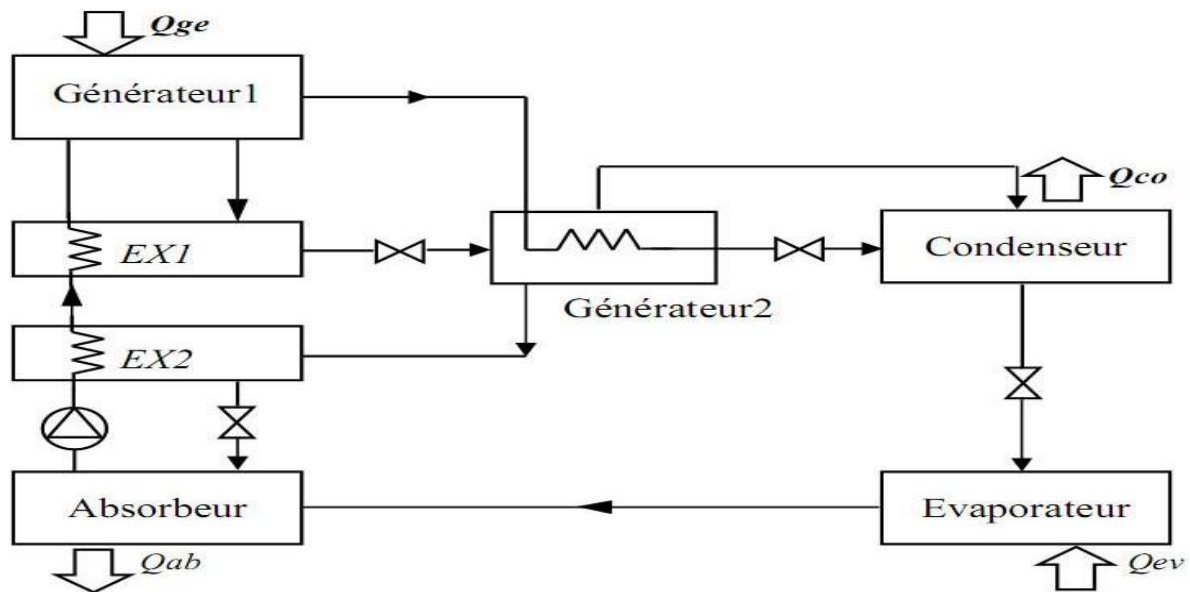


Figure I.2 : Cycle à absorption à double effet (Ecoulement en série fonctionnant à 3 niveaux de pression) [7].

COP th compris entre 1 et 1,2 avec des températures de génération demandées de l'ordre de 130°C à 160°C, c'est-à-dire nécessitant des capteurs à concentration suivant le rayonnement solaire.

L'utilisation de ces machines double effet avec l'énergie solaire reste une application possible et intéressante en termes d'efficacité [7] mais marginale (2 opérations recensées [8]) en raison des températures de fonctionnement demandées.

### c) Principe de fonctionnement d'une installation à absorption avec une solution de $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$

Le schéma d'une installation frigorifique à absorption est représenté sur la figure I.3. Nous allons traiter le cas d'une solution binaire constituée d'eau (le constituant le moins volatil) et d'ammoniac (le constituant le plus volatil).

Dans le cas d'une installation à absorption, on utilise de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) comme agent réfrigérant. Comme dans une installation frigorifique à compression, l'ammoniaque liquide s'évapore dans un évaporateur, se chargeant de chaleur. Dans un absorbeur, l'ammoniac en forme de vapeur est ensuite dissous dans de l'eau. La solution ammoniaque est chauffée, de telle sorte que se dégage de l'ammoniac sous forme de vapeur. Dans un condenseur, la vapeur ammoniaque est de nouveau condensée pour en faire de l'ammoniac liquide. [9]

Afin de pouvoir établir une différence de température entre l'évaporation et la condensation, il faut créer une différence de pression. L'arrivée de l'énergie d'entraînement s'effectue via le bouilleur et elle est uniquement thermique.

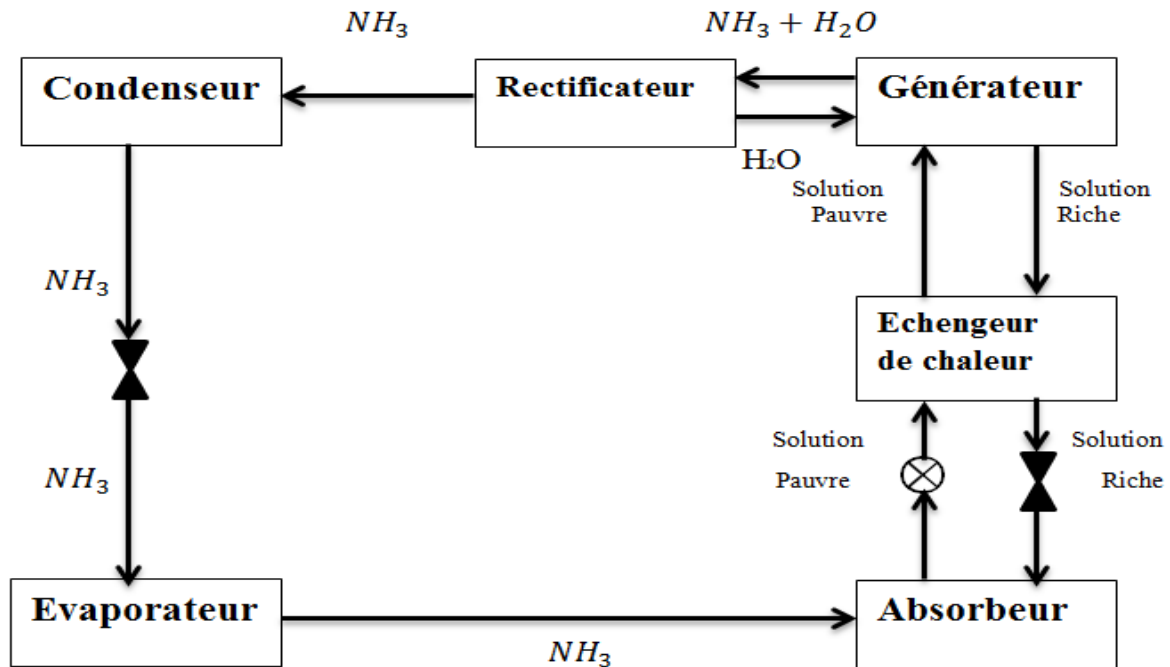


Figure I.3 : Schéma d'un système frigorifique à absorption avec une solution de NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O[9].

#### 4 Diagrammes utilisés pour les cycles de réfrigération à absorption

Les cycles à absorption liquide mettent en jeu au moins deux fluides : un solvant et un soluté (le réfrigérant). Bien que d'autres couples soient étudiés, les seuls qui soient utilisés en pratique pour la quasi-totalité des applications sont les deux couples LiBr-H<sub>2</sub>O et NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O. Parmi les conditions requises pour que le couple pressenti soit approprié, il faut d'une part que le solvant ait une grande affinité vis à vis du soluté, et d'autre part que ce dernier soit beaucoup plus volatil que le solvant, afin que la séparation des deux constituants soit la meilleure possible.

La courbe figure ci-dessous visualise, pour le couple eau-ammoniac, la relation existante entre la fraction massique de liquide et celle de la vapeur d'ammoniac, pour différentes pressions (1, 2, 5, 10 et 20 bars). Elle montre clairement que, dès lors que la fraction massique liquide du soluté  $x$  dépasse 0,4, la teneur en ammoniac de la vapeur dépasse 0,95.

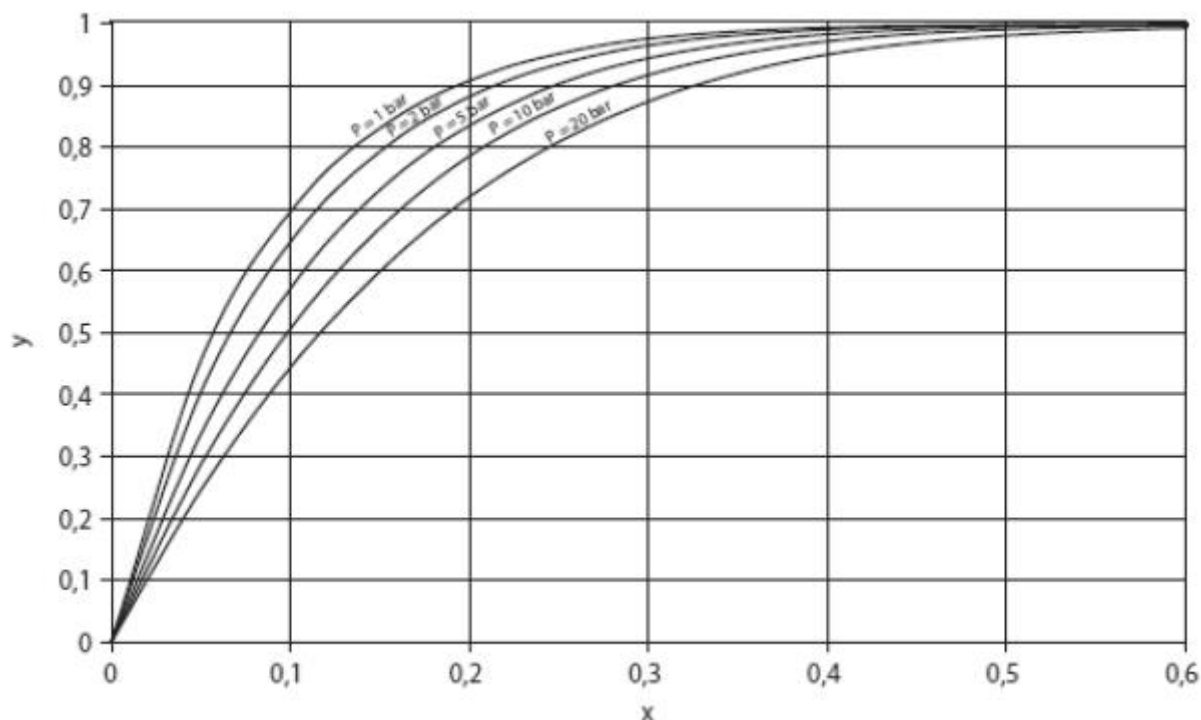


Figure I.4 : Composition de la vapeur en fonction de celle du liquide  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$

Pour le mélange bromure de lithium-eau, la séparation est encore plus nette, au point que l'on peut légitimement supposer que la vapeur d'eau est pure.

Avec le couple  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ , l'eau est le réfrigérant, ce qui impose deux contraintes : d'une part les pressions de travail sont très bas compte tenu de la loi de pression saturante de l'eau, et d'autre part la température minimale du cycle doit être supérieure à  $0^\circ\text{C}$ . Les machines utilisant le couple bromure de lithium-eau ne sont utilisées qu'en conditionnement d'air.

La manière dont peuvent être calculées dans le cas général les propriétés d'un mélange de deux fluides réels est présentée dans cette page.

Pour les calculs des cycles à absorption liquide, même si on utilise généralement des équations spécifiques comme nous le verrons ci-dessous, les phénomènes physiques sont de même nature, de telle sorte que cette présentation conserve sa pertinence.

### a) Diagramme d'Oldham

Le diagramme d'Oldham (Figure ci-dessous) permet de visualiser les courbes de pression saturante du mélange considéré, pour différentes valeurs de sa composition (en fraction massique du soluté ou du solvant selon les cas).

La pression apparaît en ordonnée, avec une échelle logarithmique, tandis que les abscisses correspondent à la température de bulle  $T_b$ .

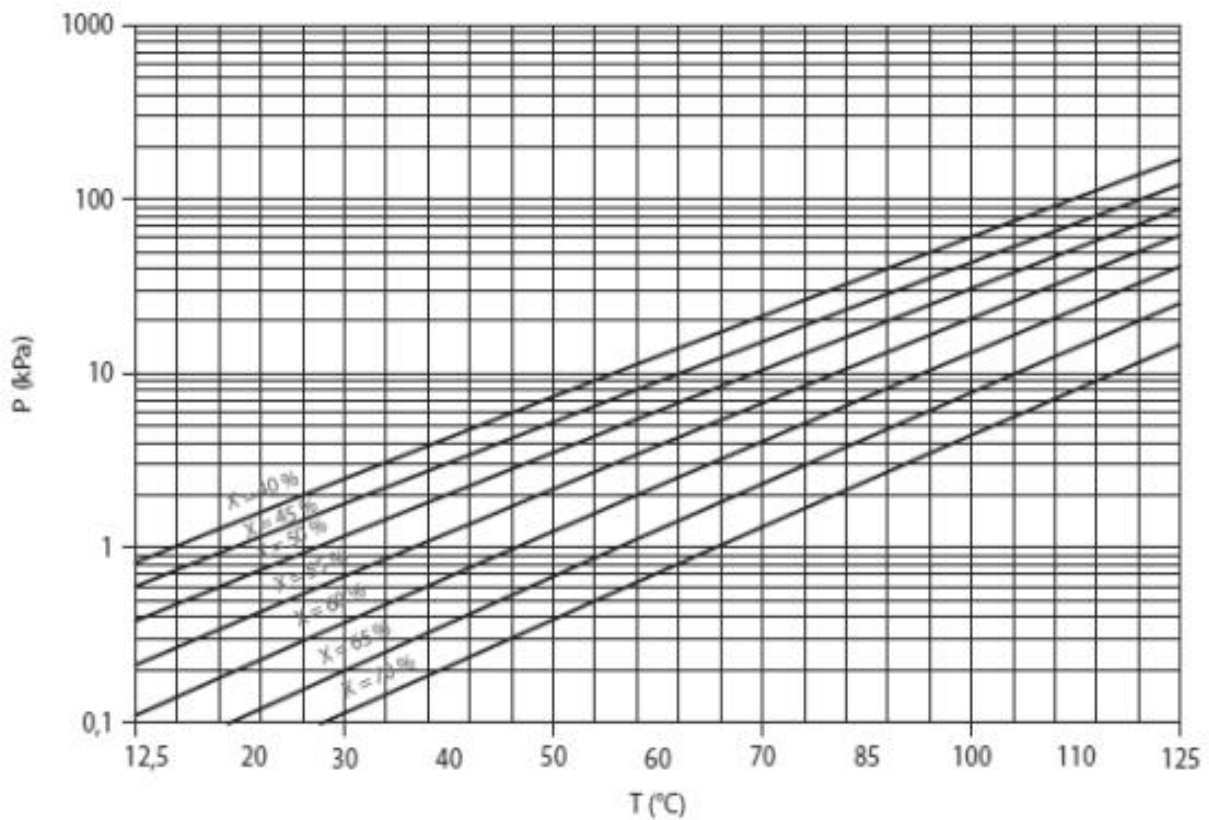


Figure I.5 : Diagramme d'Oldham pour le couple NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O

Si l'on choisit  $(-1/T_b)$  pour l'échelle des températures, les isotitres sont très proches de droites. Les extrêmes correspondent à l'équilibre liquide-vapeur des corps purs. Une évolution de la solution riche ou de la solution pauvre correspond donc à un segment de droite incliné parallèle à l'isotitre la plus proche. L'allure générale proche d'un parallélogramme des cycles dans ce diagramme a ainsi conduit les scientifiques du domaine à schématiser les architectures de leurs machines sous forme de losange.

Dans les machines utilisant le mélange LiBr-H<sub>2</sub>O, la différence de tension de vapeur du solvant (LiBr) et du soluté (H<sub>2</sub>O) est telle que l'on peut négliger la fraction massique du solvant en phase vapeur, ce qui permet de simplifier les calculs : le diagramme d'équilibre peut alors être directement gradué en fonction de la température de la solution.

### b) Équations du couple LiBr-H<sub>2</sub>O

Pour le couple LiBr-H<sub>2</sub>O, l'ASHRAE propose les équations (6.6) et (6.7), établies en généralisant au mélange la loi de tension saturante du réfrigérant (l'eau), dans laquelle la température de l'eau  $t'$  (°C) est remplacée par une fonction linéaire de la température de la solution  $t$  (°C).  $P$ , exprimée à partir du logarithme décimal, est la pression en kPa, et  $X$  la fraction massique du mélange en LiBr.

Ces équations, qui ont servi à établir le diagramme de la figure ci-dessus, sont valables dans les intervalles de valeurs suivantes :

$$-15 < t' < 110 \text{ °C}, 5 < t < 175 \text{ °C}, 45 < X < 70 \text{ \%}.$$

$$t' = \frac{t - \sum_{i=0}^3 B_i X^i}{\sum_{i=0}^3 A_i X^i} \quad \text{I.1}$$

$$\text{Log}(P) = C + \frac{D}{t' + 273,15} + \frac{E}{(t' + 273,15)^2} \quad \text{I.2}$$

### c) Diagramme de Merkel

Le diagramme d'Oldham est facile à comprendre et à utiliser comme on le verra plus loin, mais, tout comme les lentilles d'équilibre isobares ou isothermes, il présente l'inconvénient de ne fournir aucune information sur les énergies mises en jeu.

Le diagramme de Merkel (ou diagramme enthalpie-concentration) est quant à lui construit avec l'enthalpie comme ordonnée, et la fraction massique du soluté (ou souvent du solvant pour le couple LiBr-H<sub>2</sub>O) en abscisse. Il permet ainsi de superposer les informations de plusieurs lentilles d'équilibre isobares tout en faisant apparaître les enthalpies. On trouvera ci-dessous le diagramme de Merkel du mélange ammoniac-eau.

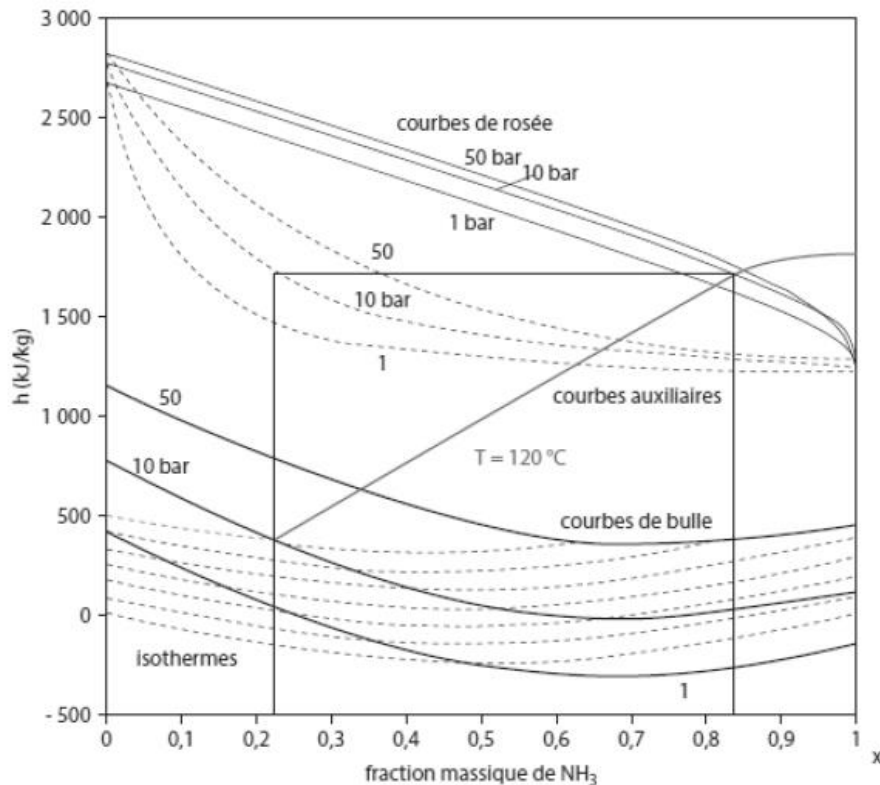


Figure I.6 : Isotherme dans le diagramme de Merkel

#### 4.1 Il comprend cinq types de courbes

Un faisceau de courbes de bulle à  $P = \text{Cste}$ , en traits continus à concavité tournée vers le haut

- Un faisceau de courbes de rosée pour les mêmes pressions, en traits continus à concavité tournée vers le bas ;

Un faisceau d'isothermes en zone liquide, en traits pointillés dans la partie basse du diagramme, valable quelle que soit la pression, l'influence de la pression sur l'enthalpie du liquide étant en première approximation négligeable (à titre d'exemple, l'écart d'enthalpie de la solution liquide à 30 % d'ammoniac en masse varie à 0 °C de 5 kJ/kg).

- Lorsque la pression passe de 0,5 à 50 bars, tandis que la partie utile du diagramme couvre plus de 1000 kJ/kg dans la zone liquide) ;

Un ensemble de courbes dites auxiliaires ou de construction, en traits pointillés dans la partie haute du diagramme, qui permet, pour une pression donnée, connaissant la fraction massique en soluté du liquide  $x$ , de déterminer la fraction massique en soluté de la vapeur  $y$  ;

- Un faisceau d'isotitres en frigorigène de la phase vapeur, qui permet, pour une pression donnée, de connaître la fraction massique en liquide correspondant à l'isotitre vapeur choisi (ce dernier ensemble de courbes est parfois omis du diagramme de Merkel, comme sur cet exemple).

En revanche, on ne fait pas apparaître dans le diagramme de Merkel les isothermes dans la zone vapeur, car elles dépendent de la pression et le diagramme deviendrait illisible.

Les valeurs numériques pour la construction de ce diagramme ont été obtenues à partir des équations proposées par Ziegler et Trepp implémentées dans **CTP Lib**.

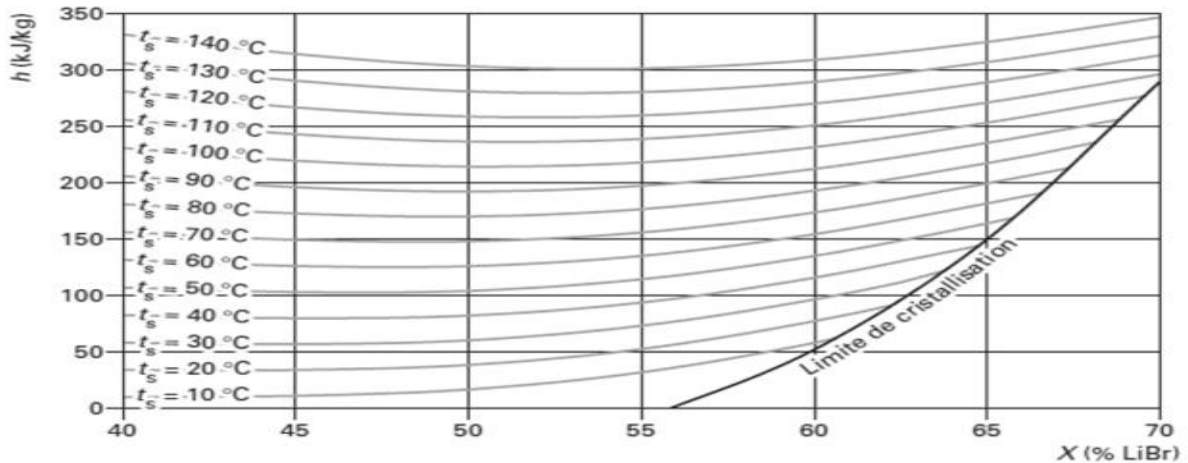


Figure I.7 : Diagramme de Merkel du mélange LiBr-H2O

### 5. Caractéristiques des installations à absorption

Les caractéristiques de ces équipements sont les suivantes :

Tableau I.1 : caractéristiques des installations a absorption.

Absorption simple effet		Absorption double effet
Source chaude COP	Eau chaude 70/80 °C	Eau surchauffée 150 °C
	0,6-0,70	1,1-1,2
Gamme de puissance (MW)	0,1-5,8	0,1-5, 3
Surface m²/KW	0,1-0 ,03	0,1-0 ,03
Poids Kg/KW	8,5-22	8,5-22

Les machines à triple effet existent et sont viables techniquement cependant leur coût d'investissement ne les rend pas encore commercialisables. Elles fonctionnent avec température moins élevé de la source chaude. Une production centralisée permettrait plus facilement l'utilisation

une température en entrée de 180°C et ont un COP voisin de 1,5. Les solutions décentralisées de production de froid par absorption sur réseau de chaleur devraient majoritairement conduire à de l'absorption simple du fait d'un niveau de d'absorbeur double effet avec un meilleur rendement. [10].

## 6. Utilisation

L'eau chaude fournie par un réseau de chaleur en été avoisinant les 90°C, seules les machines simple effet pourront être utilisées dans le cas de la climatisation [11].

Tableau I.2 : Domaine débilisations des installations a absorption

Puissance	Utilisation
<b>35 KW à 150 KW 150KW à 300KW</b>	Solution en pied de bâtiment
	Solution en pied de bâtiment, besoins plus importants
<b>300KW à 500KW</b>	Solution décentralisée avec mini réseau de froid (plusieurs bâtiments)
<b>500KW</b>	Solution décentralisée avec mini réseau de froid, besoins plus important.

## 7. Avantage des climatisations solaire

Respect de l'environnement, absence de CFC, HCFC et HFC : Les machines de production de froid par absorption ne contiennent ni CFC (chlorofluorocarbures), ni HCFC (hydro chlorofluorocarbures), ni HFC (hydrofluorocarbures), dont les effets néfastes sur l'environnement sont démontrés et qui font l'objet d'une réglementation sévère visant à en interdire progressivement l'usage.

- Depuis juillet 1999, il y a obligation de détenir un certificat d'étanchéité des installations de réfrigération et de climatisation de plus de 2 kg de fluide HCFC.
- Depuis le 1er janvier 2001, l'utilisation des CFC est interdite
- De plus, pour les nouveaux équipements, l'utilisation des HCFC est interdite :
  - Depuis le 1er janvier 2001 pour tous les groupes frigorifiques de capacité nominale supérieure à 100 kW (mode froid uniquement) ;
  - Depuis le 1er juillet 2002 pour tous les groupes frigorifiques neufs de capacité nominale inférieure à 100 kW (mode froid uniquement) ;

- À partir du 1er janvier 2004 pour tous les groupes frigorifiques neufs pouvant fonctionner en mode pompe à chaleur ou réversible (quelle que soit la capacité nominale).

La maintenance d'équipement existant avec du HCFC neuf sera autorisée jusqu'au 1er janvier 2010. Enfin, l'utilisation des HCFC recyclés en vue d'effectuer la maintenance sera interdite à compter du 1er janvier 2015.

Les fluides frigorigènes utilisés (l'ammoniac et l'eau) dans les machines à absorption sont sans effet sur l'environnement. Concernant l'ammoniac, et du fait de l'évolution des contraintes réglementaires qui frappent les CFC, HCFC, son utilisation s'étend. Son intérêt supplémentaire est d'être le fluide qui permet de produire des températures négatives en utilisant le principe de l'absorption.

Niveau sonore réduit, le fonctionnement d'un groupe à absorption est très silencieux, ce qui permet d'installer les groupes dans des locaux sensibles

(Centres culturels, hôpitaux, hôtels, commerces) où les nuisances sonores sont à proscrire.

Le niveau sonore d'un groupe à absorption en fonctionnement est sensiblement équivalent à celui d'une chaudière. En effet, à l'exception du ventilateur (cas des machines refroidies par air), du brûleur et de la pompe de solution (et de la pompe de réfrigérant sur certaines machines), il n'y a pas de pièces mécaniques en mouvement.

Fiabilité et durée de vie, l'absence de vibrations sur les machines à absorption, due aux très faibles nombres de pièces mécaniques (les seules pièces en mouvement sont celles de la pompe de solution et du ventilateur du brûleur), renforce leur fiabilité et leur longévité. La durée de vie d'un groupe à absorption est supérieure à vingt ans.

Souplesse, le régime de fonctionnement peut être adapté précisément aux besoins de chaud et de froid grâce au système de stockage et le système d'apion (électriques ou gaz).

On constate que la performance des groupes reste bonne même à faible charge.

Simplicité d'installation, le matériel est compact, pré-assemblé, câblé et testé en usine. Les machines de petite et moyenne puissance (inférieure ou égale à 350 kW) peuvent être installées à l'extérieur des bâtiments (gamme compacte).

Simplicité d'exploitation, les opérations de maintenance sont simples et toujours précisées par le constructeur ou le distributeur.

Le coût d'exploitation, le fonctionnement d'un groupe à absorption n'implique pas d'augmentation de puissance électrique, car l'énergie motrice de l'installation provient directement de l'énergie solaire gratuite, donc pas de changement de tarification afférente.

## 8. Marché mondial des systèmes solaire thermique

### a) Le solaire thermique dans le monde

L'énergie solaire thermique est aujourd'hui l'une des premières sources d'énergie renouvelable au monde. Elle est inépuisable, disponible partout et ne produit ni déchet, ni gaz à effet de serre. Pour ces raisons, le parc mondial du solaire thermique est en constante augmentation depuis près de dix ans.

### b) Une croissance forte et régulière depuis des années

Entre 1999 et 2006, le parc mondial d'installations solaires thermiques a connu une croissance moyenne de 20 % par an.

En 2007 et 2008, la progression du marché a été légèrement moins soutenue avec une croissance d'environ 15 %.

Fin 2010, la puissance solaire thermique installée dans le monde était de 195,8 GW soit une surface équivalente d'environ 279,7 millions de m<sup>2</sup>.

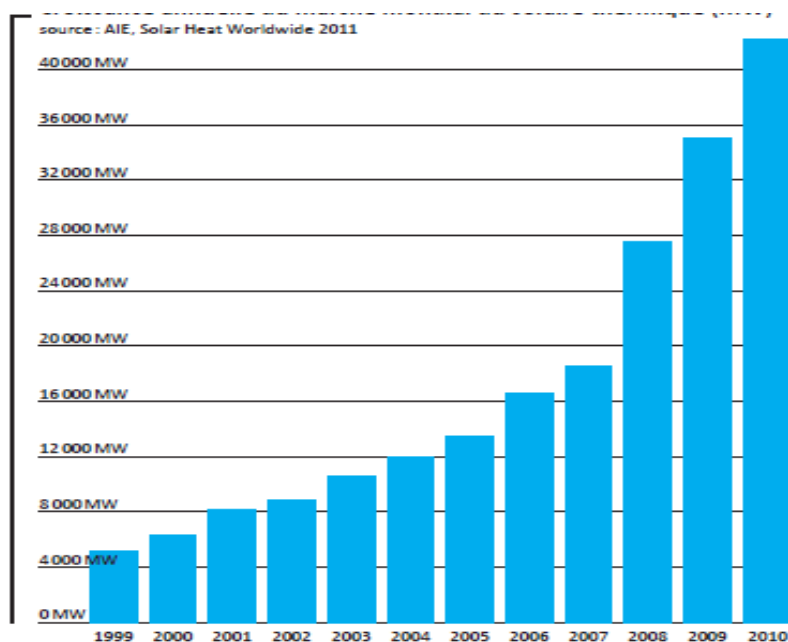


Figure I.8 : Croissance annuelle du marché mondial du solaire thermique (MW)

La Chine est largement en tête des pays producteurs de chaleur d'origine solaire : fin 2010, elle représentait 60 % du parc.

En 2010, ce pays a installé 34,3 GW soit l'équivalent de 49 millions de m<sup>2</sup>. Le marché européen reste très largement dominé par la technologie des capteurs plans vitrés, qui représentent 86 % du marché européen, contre 9,8 % pour les capteurs à tube sous vide et 3,6 % pour les capteurs non vitrés [12]

## 9. Les capteurs solaires

### 9.1 Introduction

Un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou collecteur solaire) est un dispositif utilisé pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur. Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels. Le premier panneau solaire a été construit en 1954 par les laboratoires Bell. Il a été appelé batterie solaire mais c'était juste un effet d'annonce car il était trop coûteux à produire. Ce sont les satellites qui ont réellement fait avancer l'énergie solaire dans les années 1960 lors de la course à l'espace. [13] Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de capteurs solaires thermiques ainsi que les chauffe-eaux solaires qui permettent de produire de l'eau chaude

### 9.2 Conversion thermique

D'une façon générale, le principe de conversion du rayonnement solaire en énergie dite thermique est basé sur l'effet de serre

### 9.3 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire thermique

Un collecteur solaire ou capteur solaire est utilisé pour extraire la chaleur du rayonnement du soleil. Ainsi, un collecteur fait toujours quelque chose de chaud. L'élément de base d'un capteur solaire est l'absorbeur. Ce dernier absorbe le rayonnement du soleil et la convertit en chaleur (voir figure II.1). Les capteurs solaires sont utilisés pour chauffer l'eau domestique, chauffage domestique, et produire de la chaleur à haute température [14].

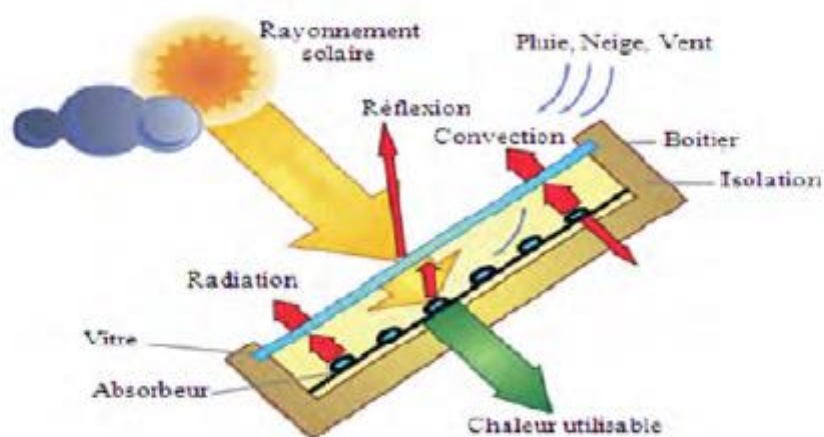


Figure I.9 : processus dans un capteur solaire plan [14]

### 9.4 Composants des capteurs solaires thermiques

Tout système de conversion d'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants :

- 1- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- 2- Un circuit caloporteur qui assure le transfert d'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories). Les fluides utilisés généralement comme fluide caloporteur sont : l'eau et l'air.
- 3- Un stockage thermique. 4- Un réseau de distribution.

#### a) Le transfert d'énergie

Le transfert d'énergie d'un capteur solaire thermique vers le ballon de stockage s'effectue de deux façons différentes :

- Soit par circulation avec une pompe commandée par un dispositif de régulation.
- Soit par circulation naturelle ou thermosiphon qui est basée sur le principe de la dilatation causée par une augmentation de température.

#### b) Le stockage

Afin d'assurer le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire, il est nécessaire de pouvoir stocker l'eau chaude dans un réservoir et l'utiliser pendant la nuit ou pendant les journées sans soleil. Le ballon de stockage doit être calorifugé. Le calorifugeage devra être disposé de façon à permettre la manœuvre et le démontage pour l'entretien des appareils. Le stockage de l'énergie captée permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire. L'accumulation de l'énergie dans le stockage se traduit par une élévation de sa température. Pour apprécier l'efficacité d'un système de stockage, il faut rappeler que le rendement d'un capteur dépend essentiellement de la température moyenne du fluide qui le traverse, donc de la température de fluide au retour du stockage. [15]

### 9.5 Les différents modèles des capteurs solaires thermiques

On peut classer le capteur solaire selon la température : les capteurs à faible température, Moyen température, haut température. [15-16]

#### a) Les capteurs à eau

Il existe trois types des capteurs solaires à eau :

##### ❖ Les capteurs solaires plans

Un Capteur solaire à plaque plane se constitue d'un imperméable en métal ou en fibre de verre, boîte isotherme contenant une plaque d'absorption de couleur foncée, l'absorbeur avec un ou plusieurs vitrages. La plaque absorbante est généralement fabriquée à partir de métal en raison de sa haute conductivité thermique, et est peinte avec des revêtements de surface sélectifs spéciaux afin d'absorber et transférer la chaleur mieux que la peinture noire. Le vitrage permet de réduire les pertes de chaleur par convection et par rayonnement [15-17]

### ❖ Les capteurs plans sans vitrage

C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins performant. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur. Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur la face avant. C'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse températures (inférieure à 30°C). Le domaine d'utilisation principal de ce type de capteurs est de chauffage des piscines extérieures. Ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, parce qu'ils ne sont pas isolés sur leur face avant, la grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il ya notamment du vent et que la température extérieure n'est pas assez élevée, (figure II.2).



Figure I.10 : Capteurs plans sans vitrage [18].

### ❖ Les capteurs plans vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés à eau sont très répandus. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel, ainsi que pour les piscines intérieures, (Figure. II.3).



Figure I.11: Capteur plan vitré [19].

### ❖ Les capteurs sous vide

Les capteurs solaires à tubes sous vide sont des capteurs solaires qui ont une meilleure performance que les capteurs plans pour un fonctionnement à haute température dans l'intervalle de 77 à 170 °C. Ils sont bien adaptés pour les



Figure I.12 : Capteur sous vide [20].

Applications de chauffage commercial et industriel ainsi que pour les applications de refroidissement par des cycles de réfrigération régénérèrent. [15-16] Les capteurs solaires "sous vide" (Figure. II.4). Sont composés d'une série de tubes en verre transparents. Dans chaque tube il y a une plaque absorbante pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour favoriser le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de la plaque absorbante et la plaque absorbante reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement à grande longueur d'onde de se dissiper, ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection.

### ❖ Capteur à concentration

Ce sont des capteurs solaires comportant un système optique (réflecteurs, lentilles...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture. Ils utilisent une surface réfléchissante dont la forme permet de concentrer en un même point la réflexion de l'énergie lumineuse.

### Capteurs à air Les capteurs plans à air

Sont munis d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évite le refroidissement de l'absorbeur. Les échanges par convection entre celui-ci et la couverture transparente sont réduits, de même que l'émission du rayonnement infrarouge de l'absorbeur. C'est le principe de « l'effet de serre ». Une isolation thermique est disposée à l'arrière

et sur le périphérique du capteur pour limiter des déperditions par conduction. Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage, pour le chauffage des locaux et la ventilation.

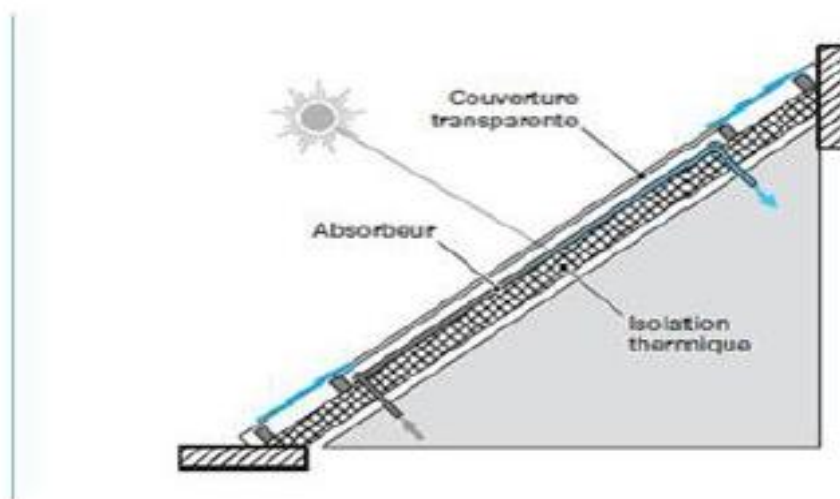


Figure I.13 : Schéma d'un capteur à air à plan incliné [21]

## 9.6 Intérêt de la production de froid par absorption

Le COP donne une idée de l'efficacité énergétique d'un cycle frigorifique. Celui d'une machine frigorifique à absorption à simple effet se situe entre 0,7 et 1,0. Mais contrairement à une machine frigorifique à compression mécanique, une machine à absorption peut être alimentée en énergie qui pourrait provenir d'une source inépuisable, gratuite et constamment renouvelable comme le solaire par exemple. Ce qui fait d'elle une offre sérieuse, d'autant de plus qu'elle n'utilise aucun fluide nocif que les réglementations internationales interdisent progressivement comme les chlorofluorocarbures (CFC).

Aujourd'hui, la gamme de puissances disponibles pour ces machines s'élargit avec les petites puissances pour lesquelles de réelles opportunités s'offrent dans de nombreux secteurs du bâtiment (individuels, petits résidentiels et tertiaires).

### 9.6.1 Avantages et inconvénient de la réfrigération par absorption

#### A. Avantages

- ❖ Pas de fluide frigoporteur nocif pour l'environnement.

- ❖ Pas de compression mécanique (et peu de pièces en mouvement) donc limitation du bruit et des vibrations.
- ❖ Maintenance simplifiée,
- ❖ Coût énergétique intéressant par rapport à l'électricité (à peu près équivalent en été mais nettement moins en hiver).

Fiabilité et durée de vie (les machines à absorption ont une durée de vie estimée de 25 à 30 ans, ce qui est largement supérieur à la durée de vie des machines à compression mécanique)

- ❖ Le poids et l'encombrement limités.

### B. Inco

- ❖ Son coefficient de performance est variable.
- ❖ Problèmes de production pour les températures en dessous de 0°C.
- ❖ Le liquide absorbant utilisé peut se cristalliser et rendre le circuit non opérationnel.

## 9.6.2 Les couples classiques utilisés dans l'absorption

Durant toute l'histoire de l'absorption plusieurs couples ont été mis à l'épreuve. Une étude faite par Marcriss [22] montre qu'il y a plus de 40 composés réfrigérants et 200 absorbants disponibles. Cependant, les fluides les plus utilisés sont: (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O) et (H<sub>2</sub>O/LiBr). Ces deux couples ont fourni pendant plusieurs années les meilleures performances comparées aux autres.

Le frigorigène NH<sub>3</sub> présente une grande chaleur latente et peut être utilisé pour extraire de la chaleur à des températures très basses allant jusqu'à -77 °C à la pression atmosphérique. Cependant ce couple est volatil donc il y a une nécessité d'avoir une rectification des vapeurs du réfrigérant. En plus, il présente des pressions de travail assez élevés et donc nécessite des installations complexes est coûteuses. Malgré les avantages de ce couple, il reste à craindre à cause de sa toxicité et de sa corrosivité envers le cuivre et ses alliages. L'usage du (H<sub>2</sub>O/LiBr) dans les systèmes à absorption a commencé en 1930 [23]. Deux aspects remarquables de ce couple sont le non - volatilité de l'absorbant LiBr (le besoin d'une colonne de rectification est éliminé) et aussi la grande chaleur latente de vaporisation d'eau. Cependant, l'utilisation de l'eau comme réfrigérant exige de travailler en dépression à des températures inférieures de 0°C et nécessite donc des installations spéciales. La solution H<sub>2</sub>O-LiBr est corrosive et à hautes concentrations est la cristallisation de l'eau peut se produire.

**10. Conclusion du chapitre 1**

Les machines frigorifiques à absorption sont l'une des machines les plus connues utilisées dans le domaine de la réfrigération. De nombreuses études ont été réalisées sur les machines frigorifiques à absorption dans le but d'améliorer le coefficient de performance du cycle et d'atteindre des conditions de fonctionnement optimales. Dans le prochain chapitre, un modèle mathématique de cycle de réfrigération à absorption a été mentionné, et pour chaque composant du cycle de réfrigération à absorption.



**Chapitre II : Modélisation de la machine  
frigorifique à absorption**

## 1. Introduction

La modélisation des machines frigorifiques à absorption constitue un domaine essentiel dans le développement de systèmes de refroidissement efficaces et durables. Ces machines, basées sur le principe de l'absorption de chaleur par un fluide absorbant, jouent un rôle crucial dans divers secteurs industriels, notamment le génie chimique, la climatisation et la réfrigération. Comprendre et modéliser ces systèmes est indispensable pour optimiser leur conception, leur fonctionnement et leur efficacité énergétique.

### Problématique

La modélisation est basée sur les lois de la conservation de chaleur et de masse au niveau de chaque élément, auxquelles on ajoute les équations d'équilibre de mélange  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ , l'enthalpie en tout point du cycle de la machine.

Le principe de fonctionnement de cette configuration de climatisation solaire est relativement similaire à un système à compression classique. En effet, le procédé fait appel à un condenseur et un évaporateur. Il y a également une zone de haute pression et de basse pression. La différence vient du fait que la compression n'est pas mécanique, mais résulte du phénomène d'absorption/désorption.

## 2. Description d'une installation frigorifique à absorption

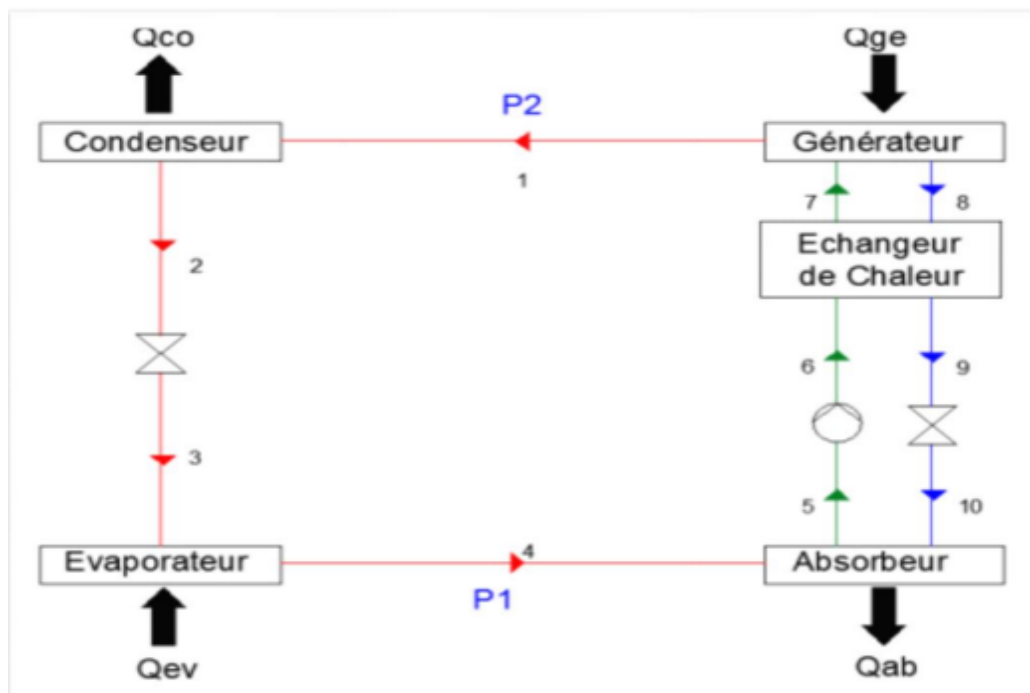


Figure II.1 : Schéma d'une machine de réfrigération par absorption simple effet

Les installations frigorifiques à absorption est compose de quatre éléments essentiels et des éléments intermédiaires et une source de production de chaleur, les éléments suivants : [24]

- ✓ Un générateur (bouilleur).
- ✓ Un absorbeur.

- ✓ Un condenseur.
- ✓ Un évaporateur.
- ✓ Une pompe
- ✓ Détendeur
- ✓ Echangeur de chaleur

### 3. Bilan massique et enthalpie

Pour évaluer les performances du cycle d'absorption représenté dans la figure III.1, nous avons. Fait les hypothèses de calcul suivantes :

- ❖ Aux points 1,2, 3,4 le fluide frigorigène est à l'état pur.
- ❖ Il n'y a pas de changement de pression dans la tuyauterie sauf au détendeur et au niveau De la pompe de solution.
- ❖ Aux points 5 et 8, la solution est à l'état saturée.
- ❖ Les détendeurs sont adiabatiques.
- ❖ La pompe de solution est isentropique.
- ❖ Il n'y a pas de perte de chaleur au niveau des différents composants.

Le coefficient de performance (COP) est défini par le rapport de la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur sur la quantité de chaleur fournit au générateur plus le travail de la pompe de solution

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g + W_p} \quad (\text{II.1})$$

D'où :

$Q_e$  Quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur.

$Q_g$  La quantité de chaleur absorbée fournit au générateur.

$W_p$  Le travail de la pompe de solution.

Bien que Le coefficient de performance de Carnot ( $COP_c$ ) le taux de circulation (**FR**), l'efficacité du système ( $\eta$ ), peuvent être écrit comme suit :

$$COP_c = \left( \frac{T_g - T_a}{T_g} \right) \left( \frac{T_e}{T_c - T_e} \right) \quad (\text{II.2})$$

$$FR = \frac{X_c}{X_c - X_d} \quad (\text{II.3})$$

$$\eta = \frac{COP}{COP_c} \quad (\text{II.4})$$

Afin d'utiliser l'équation du (**COP, FR,  $\eta$** ) un bilan de masse et d'énergie doit être établi au niveau de chaque élément de la machine à absorption : et dans ce qui suit, nous allons établi les bilans massiques et enthalpique de chaque composant.

$m$  : représente le débit de (la solution, la vapeur d'eau ou bien l'eau liquide).

Eff : représente l'efficacité de l'échangeur de solution.

### A. Analyse du Générateur

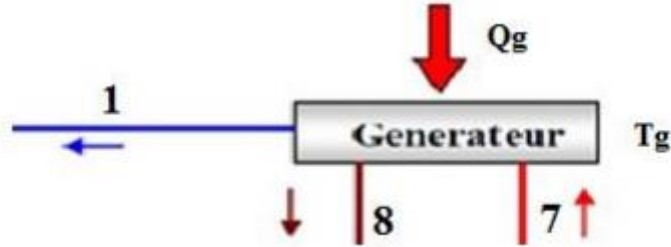


Figure II.2 : Generator

#### ✚ Bilan massique

$$m_7 = m_1 + m_8 \quad (\text{II.5})$$

$$m_7 X_7 = m_1 + m_1 X_8 \quad (\text{II.6})$$

#### ✚ Bilan enthalpique

$$Q_g = m_1 h_1 + m_8 h_8 - m_7 h_7 \quad (\text{II.7})$$

$h_1$  : Enthalpie de la vapeur surchauffée du frigorigène à la température du générateur  $T_g$  et à la pression du condenseur.

$h_7$  : Enthalpie du liquide de la solution diluée (riche en H<sub>2</sub>O) à la température  $T_7$  et à la pression du condenseur.

$h_8$  : Enthalpie du liquide de la solution concentrée (pauvre en H<sub>2</sub>O) à la température du générateur  $T_g$  et à la pression du condenseur.

### B. Analyse du Condenseur

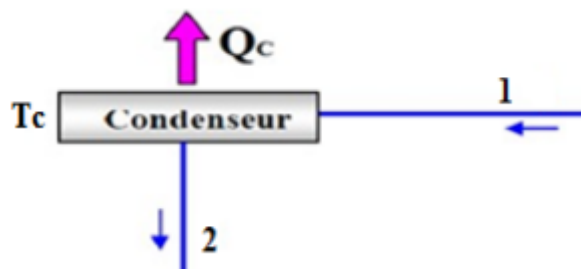


Figure II.3 : Condenseur

#### ✚ Bilan massique :

$$m_1 = m_2 . \quad (\text{II.8})$$

#### ✚ Bilan enthalpique :

$$Q_c = m_1 h_1 - m_1 h_2 = m_1 (h_1 - h_2) \quad . \text{(II.9)}$$

**$h_1$**  : Enthalpie de la vapeur du frigorigène à la température du générateur  **$T_g$**  et à la pression du condenseur

**$h_2$**  : Enthalpie du liquide saturé du frigorigène à la température  **$T_c$**  et à la pression du condenseur.

**$m_2$**  : Débit du réfrigérant.

### C. Analyse de l'Evaporateur

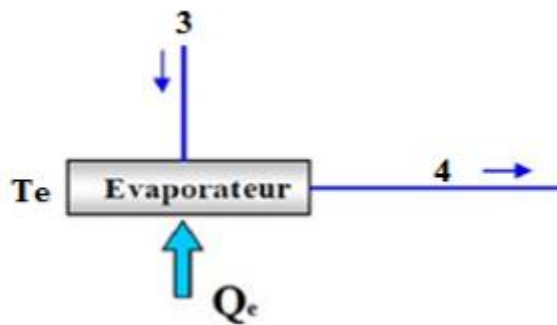


Figure II.4 : L'évaporateur.

#### + Bilan massique :

$$m_4 = m_3 = m_2 = m_1 \quad \text{(II.10)}$$

#### + Bilan enthalpique :

$$Q_e = m_4 h_4 - m_3 h_3 = m_1 (h_4 - h_3) \quad \text{(II.11)}$$

**$h_3$**  : Enthalpie liquide à la température  **$T_3$**  et à la pression de l'évaporateur.

**$h_4$**  : Enthalpie de la vapeur saturée du frigorigène à la température  **$T_e$**  et la pression de l'évaporateur.

**$m_3, m_4$**  : Débit du réfrigérant.

### D. Analyse de l'Absorbeur

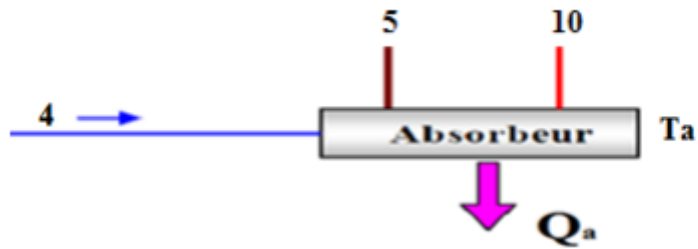


Figure II.5 : Absorbeur

#### ✚ Bilan massique :

$$m_4 + m_{10} = m_5 \quad (\text{II.12})$$

$$m_4 + m_{10}X_2 = m_5X_5 \quad (\text{II.13})$$

#### ✚ Bilan enthalpique :

$$Q_a = m_4h_4 + m_{10}h_{10} - m_5h_5 \quad (\text{II.14})$$

$h_5$  : Enthalpie du liquide de la solution à la température de l'absorbeur  $T_a$  et à la pression de l'évaporateur et à la fraction riche.

$h_{10}$  : Enthalpie du liquide de la solution à la température  $T_{10}$  à la pression de l'évaporateur et à la fraction pauvre.

$m_5$  : Débit massique de solution riche.

$m_{10}$  : Débit massique la solution pauvre.

### E. Pompe de solution



Figure II.6 : Pompe de solution

#### ✚ Bilan massique :

$$m_6 = m_5 \quad (\text{II.15})$$

#### ✚ Bilan enthalpique :

$$h_6 = h_5 + (Ph - Pb)V_a \quad (\text{II.16})$$

$$W_p = (Ph - Pb)V_a \quad (\text{II.17})$$

$m_6$  : Débit de solution riche.

$h_6$  : Enthalpie du liquide de la solution riche à la pression du condenseur.

$V_a$  : Le volume spécifique de la solution riche à la température  $T_6$

$P_b$  : Pression d'entrée de pompe.

$P_h$  : Pression de sortie de pompe.

**F. Echangeur de solution**

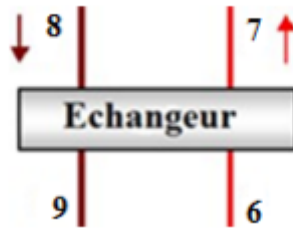


Figure II.7 : Echangeur

**Bilan massique :**

$$m_7 = m_6 \tag{II.18}$$

$$m_8 = m_9 \tag{II.19}$$

**Bilan enthalpique :**

$$T_9 = T_6 \cdot \varepsilon + T_7(1 - \varepsilon). \tag{II.20}$$

$$h_7 = h_6 + \frac{m_8}{m_6}(h_8 - h_9) \tag{II.21}$$

$h_9$  : Enthalpie de la solution pauvre à la température  $T_9$

$\varepsilon$  : L'efficacité de l'échangeur de chaleur.

On peut établir les deux bilans massiques suivants au niveau de l'absorbeur :

$$m_4 + m_{10} = m_5 \leftrightarrow m_2 + m_8 = m_7 \text{ (Bilan global)} \tag{II.22}$$

$$m_{10}X_{10} = m_5X_5 \leftrightarrow m_{10}X_{10} = m_7X_5 \text{ (Bilan du liBr)} \tag{II.23}$$

On obtient donc :

$$m_8 = m_2 \frac{X_5}{X_{10} - X_5} \tag{II.24}$$

$$m_7 = m_2 \frac{X_{10}}{X_{10} - X_5} \tag{II.25}$$

Le taux de circulation FR s'écrit :

$$FR = \frac{m_7}{m_2} = \frac{x_{10}}{x_{10} - x_5} = \frac{x_c}{x_c - x_d} \tag{II.26}$$

Le COP peut être exprimé comme suit :

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g + W_p} = \frac{m_2(h_4 - h_2)}{m_2 h_1 + m_8 h_8 - m_7(h_7 + h_5 + h_6)} \quad (II.27)$$

Et finalement :

$$COP = \frac{(h_4 - h_3)}{(h_1 + (FR - 1) \cdot h_8 - FR \cdot (h_7 + h_5 - h_6))} \quad (II.28)$$

L'efficacité du système  $\eta$  s'écrit :

$$\eta = \frac{COP}{COP_c} = \frac{h_1 + (FR - 1)h_8 - FR(h_7 + h_5 - h_6)}{\left(\frac{T_g - T_a}{T_g}\right)\left(\frac{T_e}{T_c - T_e}\right)} \quad (II.29)$$

Le COP, FR et  $\eta$  ainsi définis nécessitent la détermination des enthalpies massiques des différents points du cycle et ces dernières font appel aux propriétés thermodynamiques du couple H2O/LiBr [25].

#### 4. Cycles thermodynamiques de production de froid

##### 4.1 Cycle ditherme - machine frigorifique à compression de vapeur

Le principe de fonctionnement d'une machine frigorifique à compression d'une vapeur découle directement de l'application du second principe de la thermodynamique. Dans une telle machine, il est nécessaire de disposer d'au moins deux sources de chaleur, l'une sera appelée source froide où a lieu le soutirage de chaleur et l'autre source chaude où a lieu la restitution ou le rejet de cette chaleur,  $W$  étant l'énergie mécanique reçue, comme montré par les figures II.8 et II.9 suivantes :

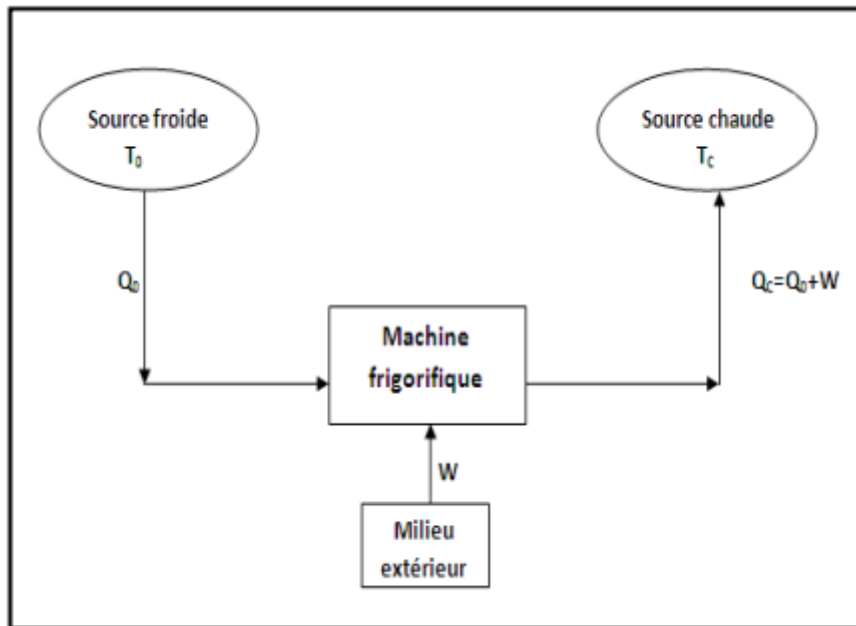


Figure II.8 : Application du second principe de la thermodynamique à une machine frigorifique à compression d'une vapeur

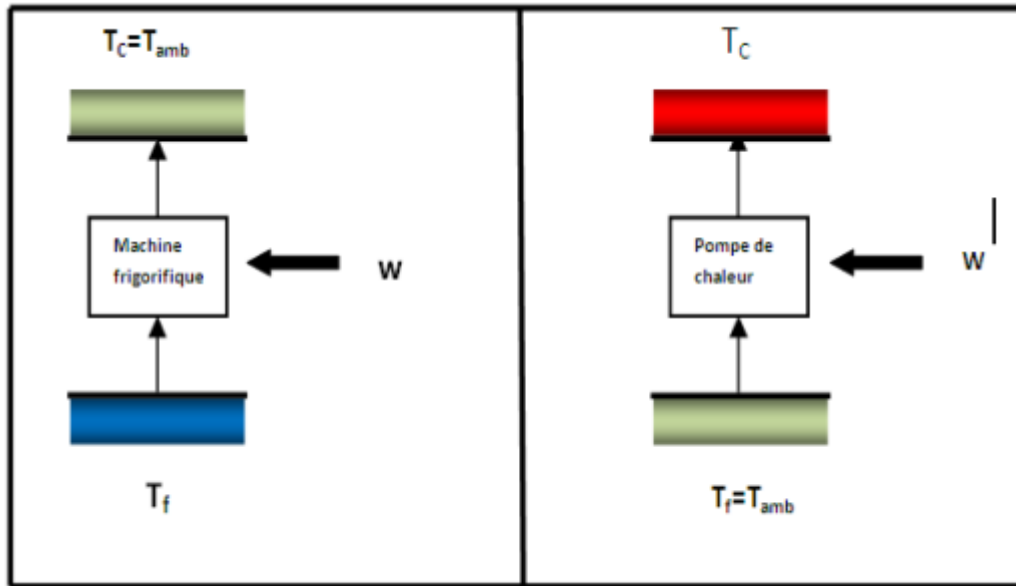


Figure II.9 : Pompe à chaleur/Machine frigorifique (système ditherme)

#### 4.2 Cycle tritherme- machine consommant de l'énergie thermique

Ces machines sont utiles pour valoriser une 3<sup>ème</sup> source à température modérée  $T_M$  (rejets industriels, énergie solaire, biomasse) qui selon son niveau thermique, deux cas peuvent être envisagés :

- 1<sup>er</sup> cas :  $T_M > T_C > T_F$

Le cycle ditherme est remplacé par un apport de « chaleur motrice » à un niveau supérieur à la source chaude  $T_C$ . De la chute de température entre la source  $T_M$  et la source  $T_C$ , il est possible d'obtenir un effet moteur et la chaleur est ainsi déplacée de  $T_F$  à  $T_C$ .

- 2<sup>ème</sup> cas :  $T_C > T_M > T_F$

La chaleur motrice de la troisième source est à température intermédiaire entre  $T_C$  et  $T_F$  pour produire l'effet moteur de la chaleur rejetée et n'a qu'une seule issue possible : le puits froid à  $T_F$  et par conséquent c'est une pompe de chaleur et ce système ne peut pas produire du froid, car la chaleur est cédée à la source froide. Les figures ci-dessous montrent les deux cas.

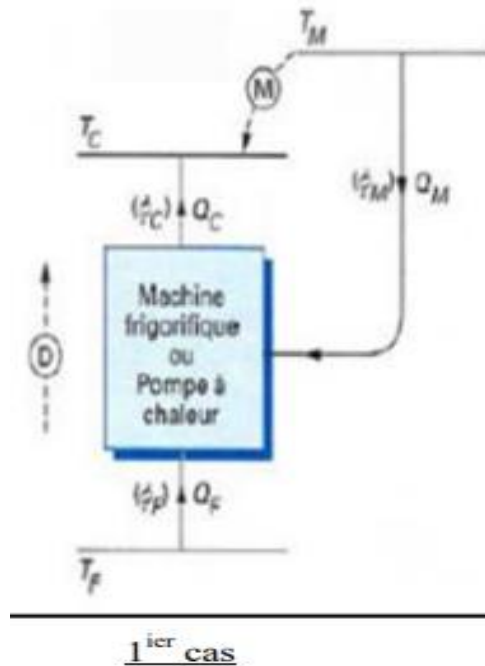


Figure II.10 : Principe d'une machine frigorifique tritherme avec  $T_M > T_C > T_F$

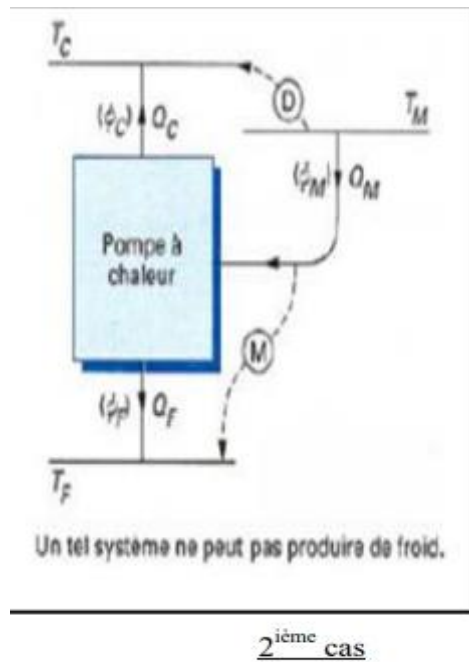


Figure II.11 : Principe d'une pompe à chaleur tritherme avec  $T_C > T_M > T_F$

### 4.3 Machine frigorifique à compression mécanique

C'est le principe le plus couramment rencontré (90% des installations frigorifiques). Il produit du froid grâce à un fluide frigorigène qui refroidit le milieu en s'évaporant et relargue de la chaleur vers le milieu extérieur en se condensant. Ce système fonctionne à partir d'énergie mécanique fournie par

un système électrique. Dans sa version la plus simple un cycle à compression de vapeur (cycle ditherme) comprend essentiellement :

- ✓ Un évaporateur dans lequel le fluide frigorigène se vaporise en enlevant une certaine quantité de chaleur  $Q_F$  aux milieux extérieurs :
- ✓ Un compresseur mécanique qui aspire les vapeurs formées dans l'évaporateur à la pression  $P_F$ , les comprime et les refoule à une pression  $P_C$ . Le compresseur absorbe l'énergie mécanique  $W$ .
- ✓ Un condenseur dans lequel le fluide frigorigène se condense en cédant une certaine quantité de chaleur  $Q_C$  aux milieux extérieurs.
- ✓ Un détendeur fixe, qui laisse passer le fluide frigorigène liquide du condenseur vers l'évaporateur en abaissant sa pression de  $P_C$  à  $P_F$ .

Un exemple simple de ce cycle fonctionnant avec le R134a comme fluide frigorigène où les pertes de charges au niveau du condenseur et de l'évaporateur sont négligées, la compression est supposée isentropique et la détente isenthalpique. Une représentation du diagramme P-h (Mollier) est montré par la figure II.12

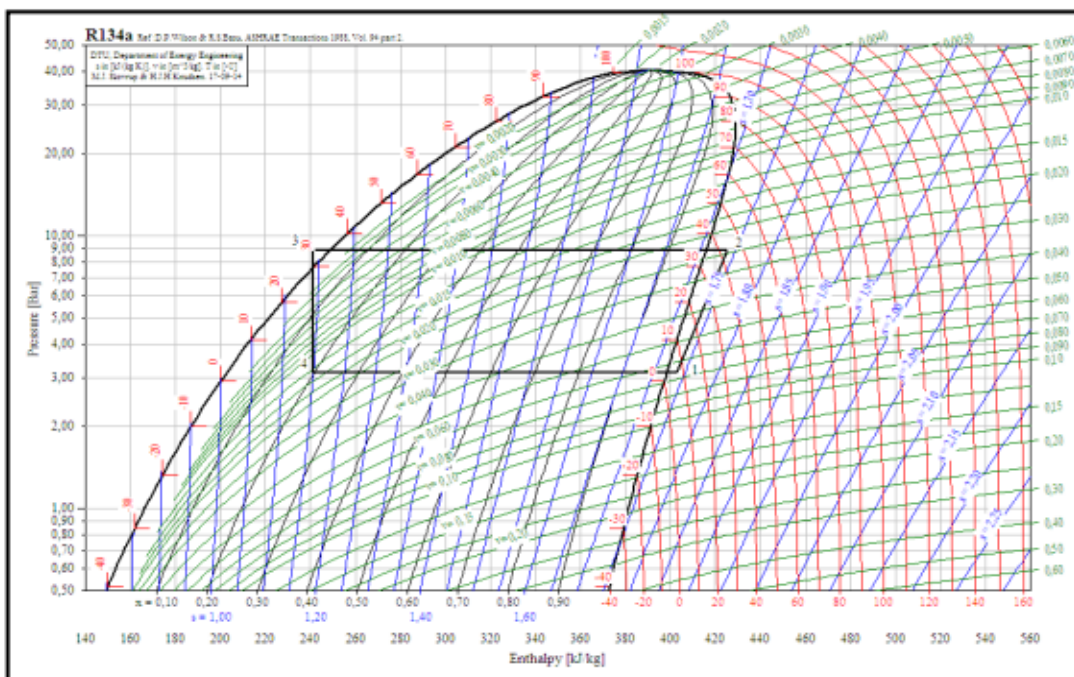


Figure II.12 : Exemple de cycle frigorifique à compression de vapeur

#### 4.4 Machine frigorifique à absorption

C'est une machine thermique à vapeur tritherme qui permet un fonctionnement sans apport de travail et qui offre l'avantage de ne pas comprendre de machines tournantes à l'exception d'une pompe. La figure II.13 montre le circuit de cette machine à absorption dont le principe de

fonctionnement est comme suit : la vaporisation du fluide frigorigène liquide détendu se fait en puisant de la chaleur au médium à refroidir, en l'occurrence de l'eau glacée par exemple (2ième fluide qui circule dans l'évaporateur). Les vapeurs de fluide frigorigènes parviennent ensuite à l'absorbeur où elles sont absorbées par la solution pauvre venant de l'échangeur de chaleur (contient un faible pourcentage de fluide frigorigène). Cette absorption libère une certaine quantité de chaleur appelée chaleur de sorption. Le mélange (solution pauvre et fluide frigorigène) ayant augmenté son titre en fluide frigorigène est alors dénommé solution riche (grand pourcentage en fluide frigorigène), grâce à pompe de circulation, la solution riche rejoint alors le bouilleur après avoir traversé l'échangeur de chaleur. Dans ce dernier, la solution riche se réchauffe au détriment de la solution pauvre. Le mélange binaire qui arrive au bouilleur y reçoit une certaine quantité de chaleur ce qui permet le dégazage du fluide frigorigène qui passe dans le condenseur tandis que l'absorbant se dirige vers l'absorbeur après passage dans l'échangeur de chaleur. Lorsque l'absorbant est volatil, une certaine quantité d'absorbant passe également en phase vapeur. Une rectification peut alors s'avérer nécessaire (c'est le cas lorsque l'on utilise le couple Ammoniac-Eau).

#### **4.5 Comparaison entre machines frigorifiques à absorption et à compression de vapeur**

La comparaison des deux machines frigorifiques permet de constater que les deux machines possèdent un ensemble d'éléments communs qui sont le condenseur, le détendeur et l'évaporateur. Par contre le compresseur mécanique de la machine à compression d'une vapeur est remplacé par

Chapitre II : Aspects théoriques des machines frigorifiques à absorption 23 un ensemble d'éléments qui sont le bouilleur, le détendeur, l'absorbeur et la pompe de circulation, comme montré par la figure II.13

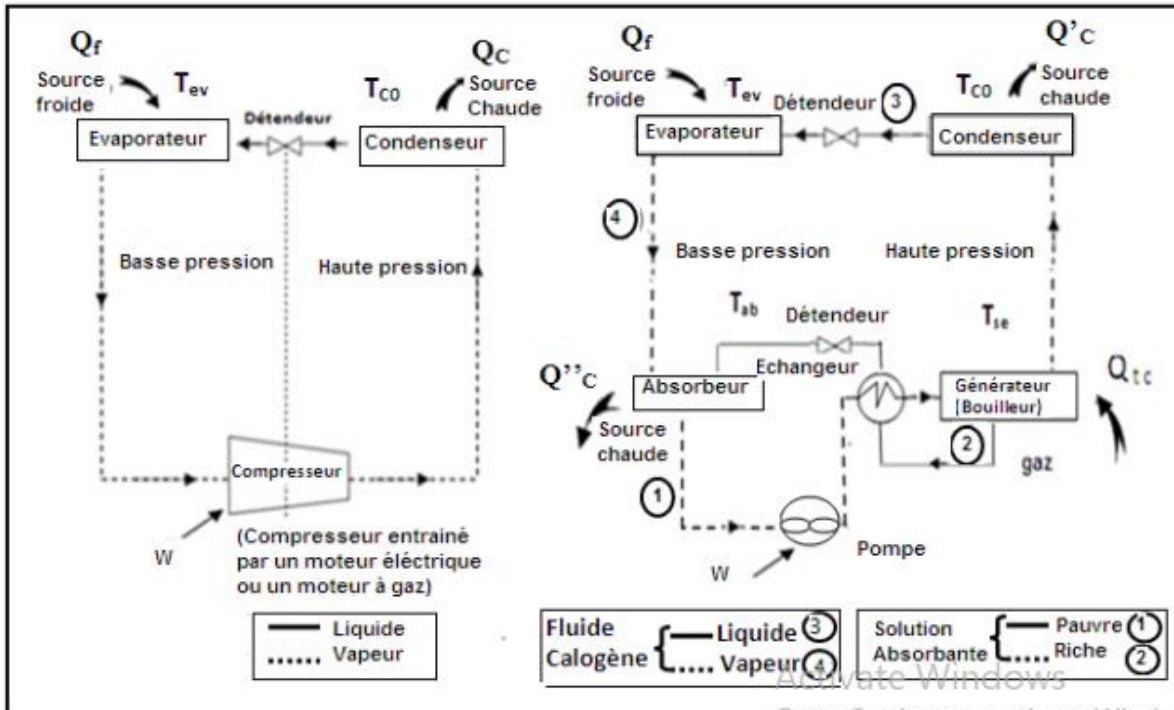


Figure II.13 : Comparaison entre une machine frigorifique à compression mécanique d’une vapeur

**4.6 Diagrammes utilisés dans les cycles à absorption**

L’étude d’une machine à absorption s’effectue au moyen d’un diagramme, similairement au cas d’une machine frigorifique à compression de vapeur. Toutefois d’autres diagrammes sont utilisés et sont soit le diagramme d’Oldham du mélange binaire considéré, soit celui de Merkel. Le diagramme de Oldham est le plus pratique car les courbes représentant l’équilibre du système binaire en phases vapeur et liquide sont représentées par des droites dans un système de coordonnées dont l’axe des abscisses est gradué en °C et celui des ordonnées en P. La figure II.17 correspond au tracé de ce diagramme pour le couple binaire Ammoniac-Eau, en traits pleins, montrant des courbes correspondant aux points de bulle de 5 mélanges liquides de ce binaire à des teneurs massiques en ammoniac ( $X_l$ ) donnés. Le diagramme comporte en outre à gauche, la courbe correspondant aux pressions de vapeur de l’ammoniac pur, à droite la courbe des pressions de vapeur de l’eau pure et les courbes des points de rosée de 5 mélanges gazeux dont les teneurs massiques en ammoniac ( $X_v$ ) sont indiquées. Il est à noter que la phase gazeuse est beaucoup plus riche que la phase liquide en ammoniac qui est le constituant le plus volatil.

Le second diagramme qui peut être utilisé est celui représentant la variation de l’enthalpie massique avec la concentration des mélanges liquides en frigorigène, proposé par Merkel d’où la dénomination de diagramme de Merkel –Bosnjakovic. Il est représenté dans la figure II.18 qui correspond au couple Ammoniac-Eau. Ce diagramme permet une étude complète de la machine à absorption car il fournit les bilans thermiques des différents compartiments du circuit par lecture directe des différences

d'enthalpies. L'axe des abscisses porte la concentration pondérale en fluide frigorigène du mélange binaire et l'axe des ordonnées les enthalpies massiques.

Il comporte les courbes suivantes :

- ✓ Des courbes isobares de bulle B en forme de selle. Au-dessous de chacune d'elle est le domaine des mélanges liquides sous-refroidis à la pression considérée ;
- ✓ Des courbes isobares de rosée R assez étendues et proches les unes des autres. Au-dessus de chacune d'elles est le domaine des mélanges gazeux surchauffés à cette pression ;
- ✓ Des courbes isobares de construction C qui n'ont pas, comme les précédentes, un sens physique mais qui servent à rechercher les compositions d'équilibre des phases coexistences liquide et vapeur ;
- ✓ Les isothermes des mélanges liquides  $\theta_l$  également en forme de selle ;
- ✓ Quelquefois, mais pas toujours, les courbes d'égale teneur massique en frigorigène de la phase gazeuse ici,  $X_v, \text{NH}_3$ .

Il est à noter que :

- ✓ L'amélioration du cycle nécessite une colonne de rectification au-dessus du bouilleur afin d'épurer la vapeur ammoniacale pour lui extraire l'eau. Cette rectification consiste en la séparation,

Plus ou moins complète, des constituants du mélange binaire par circulation, à contrecourant dans une colonne. Les deux phases liquide et vapeur échangent de la matière et de la chaleur.

- ✓ La colonne de rectification peut être très simple ou complexe selon la puissance faible ou élevée de la machine.
- ✓ L'équilibre atteint au niveau des différents compartiments de la machine à absorption en considérant un mélange binaire Ammoniac/Eau est décrit comme suit

À la température du bouilleur  $T_g$ , l'équilibre des phases liquide/vapeur d'un tel mélange en fonction de son titre et de la pression se présente comme suit :

À une pression  $p_h$ , le mélange de titre massique en réfrigérant  $x_r$  se sépare en une phase vapeur plus riche (titre  $x_v$ ) en réfrigérant volatil et un liquide plus pauvre (titre  $x_p$ ) : c'est le principe de la distillation.

La vapeur riche en réfrigérant est condensée à température ambiante dans le condenseur, détendue dans la vanne et évaporée à basse température dans l'évaporateur. [26]

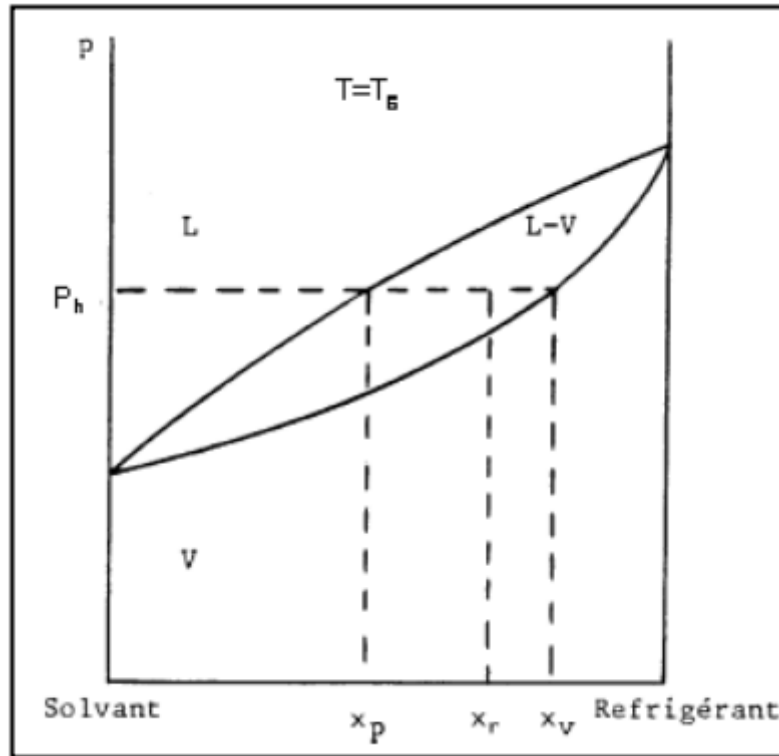


Figure II.14 : Diagramme d'équilibre liquide-vapeur (p-x) du mélange binaire (Ammoniac/Eau) à pression et température constantes du générateur.

### 5. Conclusion du chapitre II

En conclusion, la modélisation des machines frigorifiques à absorption est une discipline multidisciplinaire qui exige une compréhension approfondie des principes thermodynamiques, des propriétés des fluides et des techniques de modélisation mathématique. Grâce à des modèles précis et validés, il est possible d'analyser et d'optimiser ces systèmes pour répondre aux besoins croissants en matière de refroidissement dans divers domaines d'application. En continuant à améliorer nos capacités de modélisation, nous pouvons contribuer à rendre les machines frigorifiques à absorption plus efficaces, plus durables et plus respectueuses de l'environnement, tout en répondant aux défis posés par le changement climatique et la demande croissante en énergie.



## **Chapitre III : L'environnement de simulation TRNSYS**

## 1. Introduction

Dans ce chapitre, une simulation dynamique d'un système de rafraîchissement solaire à absorption sera réalisée à l'aide de logiciel TRNSYS. Le logiciel de simulation TRNSYS est un environnement complet et extensible, dédié à la simulation dynamique des systèmes.

TRNSYS (TraNsient System Simulation program) est un environnement de simulation des systèmes énergétiques qui fut initialement développé par l'université du Wisconsin pour pouvoir faire des simulations des composants relatifs à l'utilisation de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, les systèmes HVAC, la géothermie, l'énergie éolienne, les stratégies de régulation ... mais aussi la modélisation détaillée des bâtiments et leur couplage avec différents systèmes énergétiques.

Le logiciel est basé sur les modèles de type « boîte noire » écrits en fortran ou en C++ qu'on désigne par « type » dans TRNSYS et qui font partie des éléments de la bibliothèque de TRNSYS mais peuvent aussi être créés et paramétrés par l'utilisateur et classés dans la bibliothèque à l'instar de la bibliothèque payante « TESS » qu'on peut ajouter à la bibliothèque de TRNSYS et dont les éléments ont été créés et regroupés sous forme de Plugin. Les modèles « types » sont couplés entre eux par les interconnexions entre les entrées et les sorties sur chaque modèle, les entrées peuvent être soit les sorties d'un autre équipement soit imposées par l'utilisateur, les sorties peuvent soit faire l'objet d'entrées à un autre modèle, ou bien être exploitées autrement (affichage sous forme de graphe, intégration pour quantifier une grandeur le long d'une durée de temps donnée, utilisation dans des équations mathématiques...). Outre les entrées et sorties il existe un paramètre « paramètre » qui caractérise chaque équipement en général il représente les constantes du modèle de l'équipement par exemple pour un capteur solaire : l'inclinaison, l'orientation, la surface, les constantes...

Une autre caractéristique de TRNSYS c'est qu'il utilise dans la simulation des fichiers météo « weather », ces fichiers contiennent des données horaires annuelles de plusieurs paramètres (températures, humidités, rayonnements solaires, vitesse du vent, pression ...) en d'autres termes quand on fait des simulations on ne se contente pas de simuler des systèmes énergétiques mais aussi les tester dans différents climats.

En TRNSYS, le pas temporel est l'unité de temps « heure » s'il y'a modification par l'utilisateur vers un pas inférieur le calcul se fait alors par interpolation entre une heure et une autre, si l'on veut lancer la simulation sur une période donnée, on doit connaître les heures correspondantes, par exemple pour lancer une simulation, ce qui nous donne sur une période de 3624 heures.

Pour le bâtiment on utilise un autre environnement dérivé qui s'appelle TRNBUILD dans lequel on peut concevoir des bâtiments en détail (dimensions, orientations, matériaux de construction...)

pour pouvoir les utiliser sous TRNSYS. Plus de détails seront présentés ultérieurement sous forme d'annexe.

### **Aperçu sur TRNSYS**

### **Description du logiciel**

Les logiciels de simulation informatique sont devenus des outils précieux pour les chercheurs dans de nombreux domaines, y compris la prédiction du comportement des systèmes. Dans le cas des systèmes de refroidissement solaire, où il n'existe pas de modèle Standard et où les données précises sont souvent limitées, la fiabilité de la simulation est d'une Importance capitale.

TRNSYS (Transient System Simulation Tool) est en effet l'un des programmes de modélisation et de simulation les plus fiables utilisés par les chercheurs dans le domaine des applications solaires. TRNSYS est un logiciel de simulation dynamique des systèmes Énergétiques qui permettent de modéliser et de simuler différents systèmes de refroidissement Solaire, ainsi que d'autres applications énergétiques. Il offre une large gamme de composants Et de modèles prédéfinis, ce qui permet aux utilisateurs de construire des modèles Personnalisés pour représenter précisément le système étudié. TRNSYS est apprécié pour sa flexibilité et sa capacité à représenter des systèmes complexes. Il est utilisé pour évaluer les performances énergétiques, prédire les comportements des Systèmes solaires et optimiser leur conception. Les chercheurs peuvent ajuster les paramètres des modèles pour représenter les caractéristiques spécifiques des composants et des systèmes solaires étudiés [27].

En utilisant TRNSYS, les chercheurs peuvent réaliser des simulations détaillées, tenir compte des conditions climatiques, des caractéristiques du système, de l'orientation et de la configuration des composants, ainsi que des variables opérationnelles. Cela leur permet d'évaluer les performances attendues, d'optimiser la conception du système et d'identifier les problèmes potentiels avant de passer à la phase de construction ou d'installation.

Il convient de noter que, bien que TRNSYS soit un outil puissant, la fiabilité des résultats de simulation dépend également de la précision des données d'entrée fournies par l'utilisateur. Il est donc important de collecter des données précises sur les composants et les conditions d'exploitation pour obtenir des résultats fiables [28].

## **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.

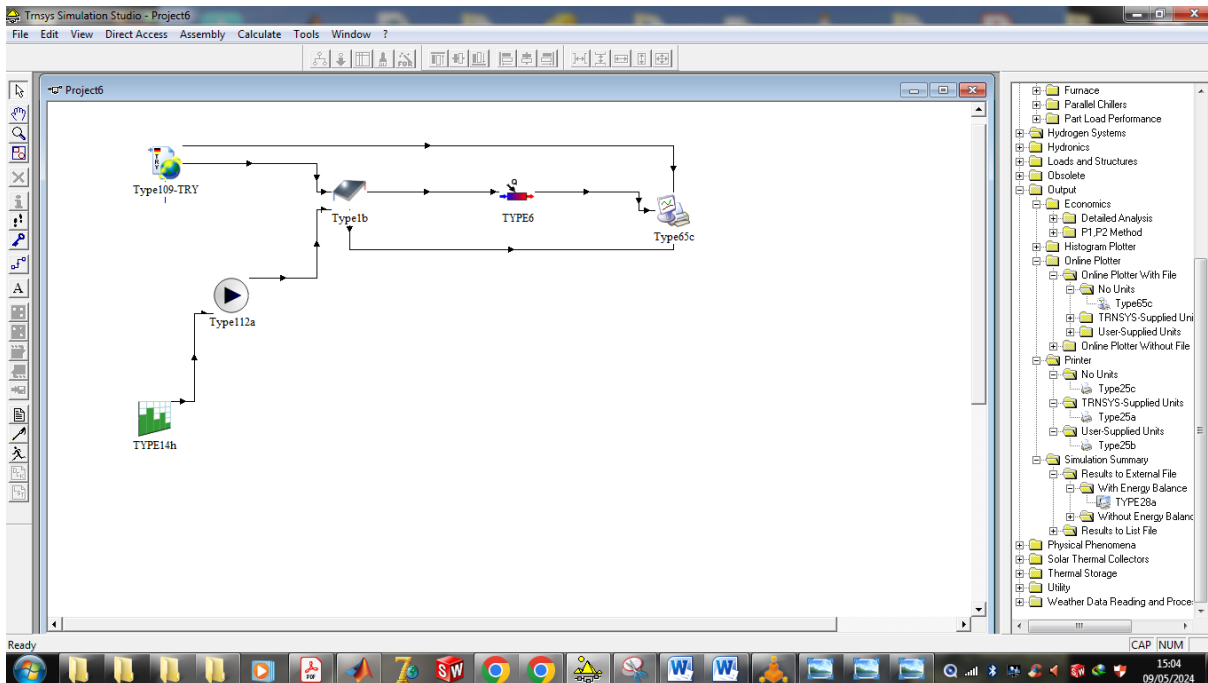


Figure III.1 : Interface du logiciel TRNSYS

### 3. Vue sur le simulateur TRNSYS

Le simulateur TRNSYS s'appuie sur le principe de la simulation dynamique c'est-à-dire qu'il tient compte de la variation du temps, son environnement est composé d'un espace de travail, les barres d'outils et de la bibliothèque des modèles sous forme d'icônes placées dans des fichiers dans l'onglet Library l'insertion des modèles dans l'espace de travail se fait par glissement avec le curseur.

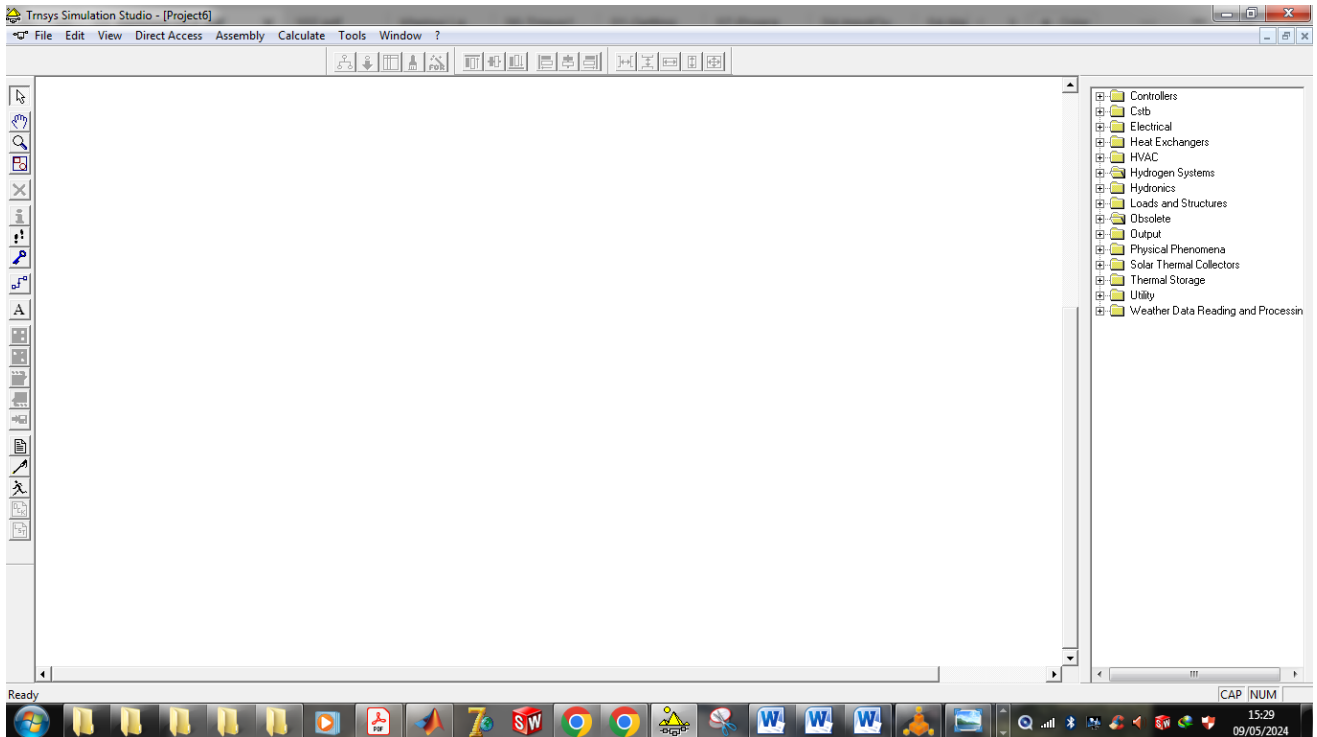


Figure III.2 : Espace de travail de TRNSYS

Une fois l'icône du modèle appelé « type » est insérée on peut modifier ses paramètres par exemple la puissance d'une machine, les coefficients de déperditions dans un capteur..., les modèles sont liés entre eux par des flèches, si on fait un double clic de la souris on pourrait gérer les entrées sorties, il existe des outils de sortie finaux tels que l'afficheur de graphe, ou l'intégrateur et l'imprimante qui exporte les données dans un fichier externe, mais aussi des entrées qui lisent leurs données sur un fichier telles que les fichier météo, pour gérer les paramètres de simulations tels que le début et la fin de simulation ainsi que le pas horaire on clique sur l'icône « control cards », on peut également insérer des icônes « équation » pour traiter des données par exemple additionner des débits, calculer un rendement...

Sur la figure III.1 on peut voir un fichier un collecteur qui tire ses entrées d'un fichier météo et qui ensuite affiche sa température de sortie ainsi que le débit sur un afficheur de graphe.

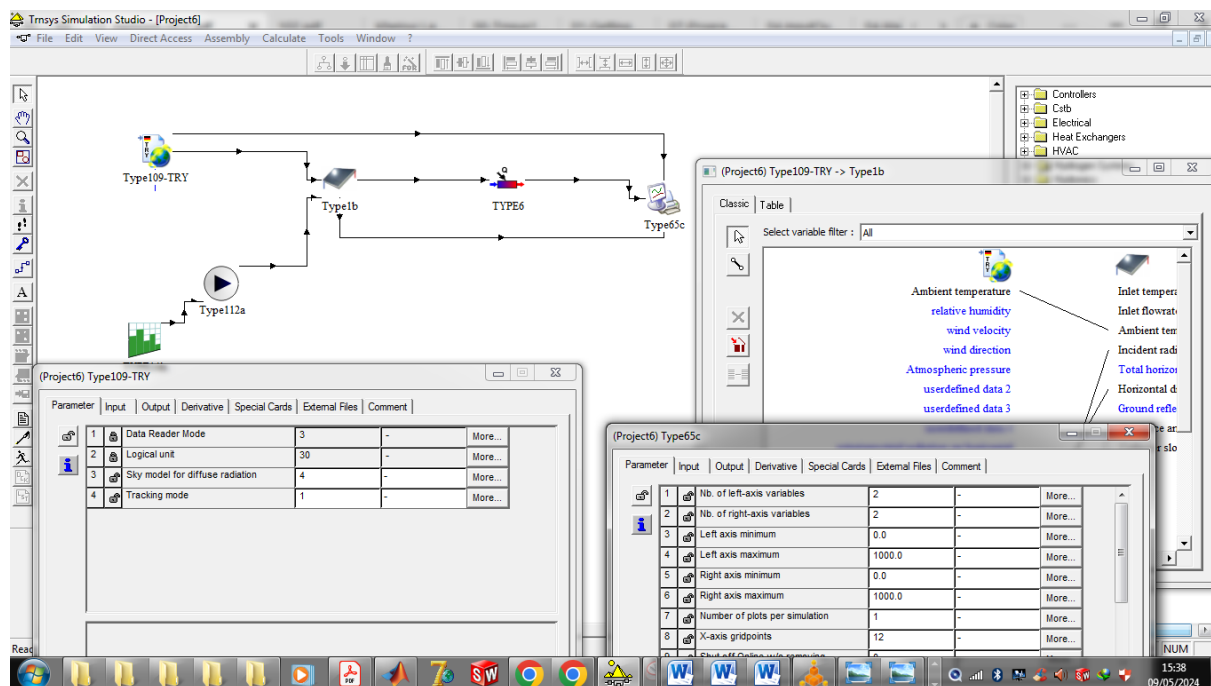


Figure III.3 : Liens entrée-sortie entre modèles et fenêtre de paramètres de simulation

**TRNSYS** contient tant d'autres fonctionnalités mais nécessite une bonne compréhension afin de pouvoir l'exploiter correctement et savoir surtout gérer les erreurs qui surviennent à chaque fois, méthodiquement il est recommandé de se référer au manuel d'utilisation contenu dans la documentation qui accompagne le logiciel

**TRNBuild** TRNBUILD (anciennement PREBID) a été développé pour fournir un outil facile à utiliser pour la création du fichier BUI. En commençant par certaines données de base du projet, Enfin, les sorties souhaitées sont sélectionnées. Toutes les données saisies sont enregistrées dans le fichier de construction (\*. BUI), un fichier texte ASCII lisible. Le fichier BUI est très pratique pour vérifier les données entrées dans TRNBuild [29]

#### ✚ Avantages Inconvénients du logiciel TRNSYS

- ✓ Grâce à son approche modulaire, **TRNSYS** est extrêmement flexible pour modéliser un ensemble de systèmes thermiques à différents niveaux de complexité (modules avec procédures de calcul plus ou moins élaborées).
- ✓ L'accès au code source permet aux utilisateurs de modifier ou d'ajouter des composants qui ne figurent pas dans la librairie d'origine.

- ✓ Documentation vaste sur les sous-programmes y compris explications usages usuels équations de base.
- ✓ Définition très souple de la période de simulation : choix du pas de temps, du début et de la fin de la simulation
- ✓ TRNSYS ne dispose pas de valeur ou de système par défaut, l'utilisateur doit donc posséder des données définissant le bâtiment et le système. [27]

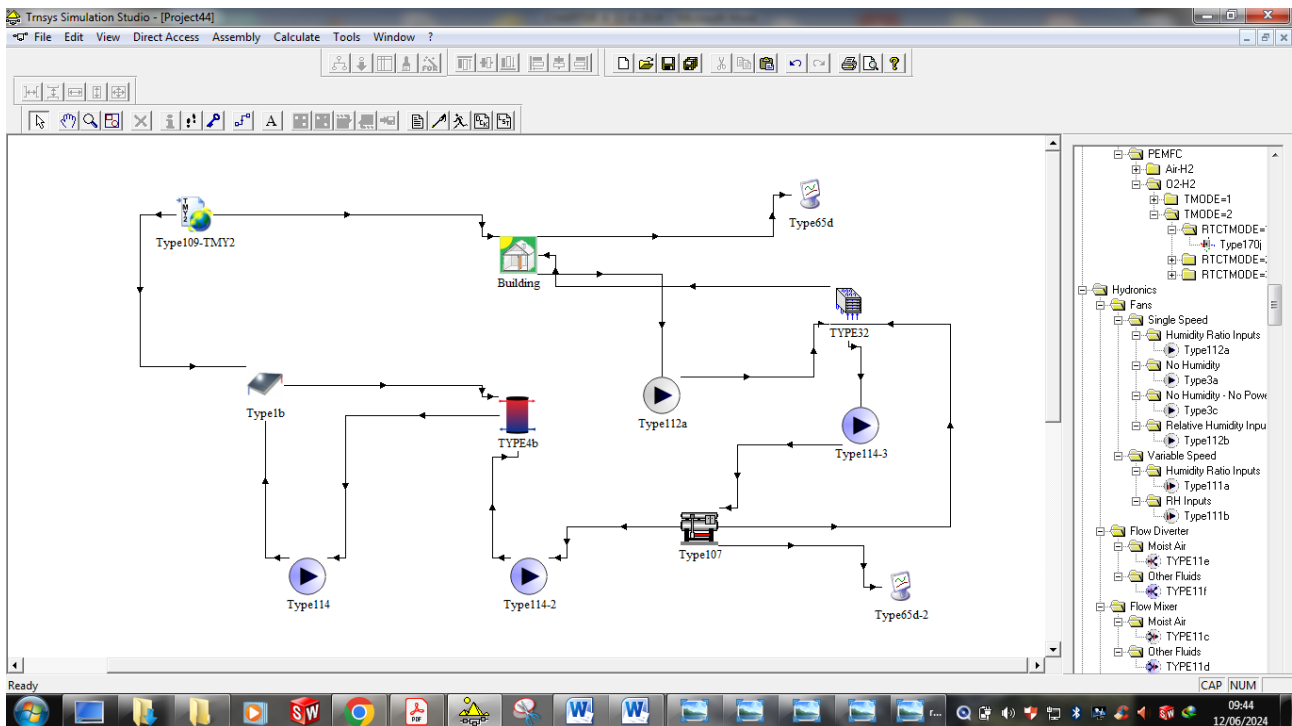


Figure III.4 : La configuration de machine a absorption sous TRNSYS simulation

## Les types TRNSYS

Le tableau ci-dessous nous présente le nom de chaque composant des types TRNSYS du système thermique :

Tableau III.1 : La description des différents éléments constitutifs de ce système

Types	Nom de composant
 Type109-TMY2	Conditions météorologiques
 Type1b	Capteur solaire plan
 Type107	Machine à absorption à simple effet
 TYPE4b	Tank
 Type114	Pompe
 Type112a	Fan avec effets de l'humidité
 TYPE32	Humidificateur
 Building	TRNBUILD





## **Chapitre IV : Résultats et discussions**

## 1. Présentation des modèles de l'installation étudiés

La simulation de système absorption solaires à donner des résultats qu'on va discuter dans le présent chapitre. La présentation des résultats est faite en deux manières, l'une est hebdomadaire consiste à présenter des résultats pour les cinq mois du mois janvier au mois de mai 2024. Le deuxième est saisonnier, elle présente les résultats pour la saison entière de climatisation pour la ville de Bechar.

### ✚ Facteur de performance COP de l'installation

Le coefficient de performance (COP) est défini par le rapport de la quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur sur la quantité de chaleur fournit au générateur plus le travail de la pompe de solution :

$$COP = \frac{Q_e}{Q_g + W_p} \quad (IV.1)$$

D'où :

$Q_e$  Quantité de chaleur absorbée par l'évaporateur.

$Q_g$  La quantité de chaleur absorbée fournit au générateur.

$W_p$  Le travail de la pompe de solution.

Bien que Le coefficient de performance de Carnot ( $COP_c$ ) le taux de circulation (**FR**), l'efficacité du système ( $\eta$ ), peuvent être écrit comme suit :

$$COP_c = \left( \frac{T_g - T_a}{T_g} \right) \left( \frac{T_e}{T_c - T_e} \right) \quad (VI.2)$$

$$FR = \frac{X_c}{X_c - X_d} \quad (VI.3)$$

$$\eta = \frac{COP}{COP_c} \quad (VI.4)$$

Afin d'utiliser l'équation du (**COP, FR,  $\eta$** ) un bilan de masse et d'énergie doit être établi au niveau de chaque élément de la machine à absorption : et dans ce qui suit, nous allons établir les bilans massiques et enthalpie de chaque composant.

$m$  : représente le débit de (la solution, la vapeur d'eau ou bien l'eau liquide).

$Eff$  : représente l'efficacité de l'échangeur de solution.

## 2. Description du rôle des composants de l'installation

### 2.1 Conditions météorologiques

Afin de conditionner le rayonnement solaire incident en analogie avec notre climat de la ville d'Bechar, on utilise le « **TYPE 109-TMY2** » représenté dans la figure (3.4), ceci est utilisé pour calculer le rayonnement solaire sur le plan des capteurs solaires.

### 2.2 Système solaire

Trois composants sont déjà ajoutés dans le système solaire : capteur solaire plan, la pompe, tank. Les composants sélectionnés sont les suivants :

### 2.3 Capteur solaire

Ce composant de « TYPE 1b » est un capteur solaire thermique plan qui consiste à collecter l'énergie du soleil et la transformée en énergie thermique à l'aide du fluide caloporteur (transportant l'énergie).

Tableau IV.1 : Informations sur le capteur sous-vide utilisé dans notre simulation

Surfaces du champ [m <sup>2</sup> ]	2
Efficacité du capteur	0.80
Inclinaison du capteur [°]	30
Nombre en série	1

#### Tank

Ce composant définit par le « TYPE 4b », il permet de stocker le fluide caloporteur à haute température.

#### Pompe

Ce composant définit par le « TYPE 114 », elle permet de pomper l'eau froide vers le capteur solaire sous-vide.

### Machine à absorption

Ce composant défini par le TYPE « 107 » permet de produire l'eau glacée pour les besoins de la climatisation.

### Construction de la maison

Ce composant défini par le « TYPE56 ».

## 3. Rendement du cycle total (cycle frigorifique+ capteur)

Le rendement du cycle total est égale le produit du COP de cycle frigorifique et le rendement de capteur solaire :

Pour améliorer le rendement de cycle total on ajoute d'autres capteurs solaires en série afin qu'augmenter la température de sortie de capteur, ou bien remplacer le capteur complètement par un autre ayant un rendement plus élevé ou avais une surface de captage plus grande.

## 4. Simulation de météo

Dans la construction de notre installation sur la plate-forme de TRNSYS on utiliser des délinants organes et ce sont les plus utilisés dans la simulation du bâtiment sont :

- TYPE 109-TMY2 : Données climatique
- TYPE 1b : Panneau solaire plan
- TYPE 56a : Dimension du local multi zone à chauffer faite à l'aide de TRNBUILD
- TYPE 65d : Affichage des résultats

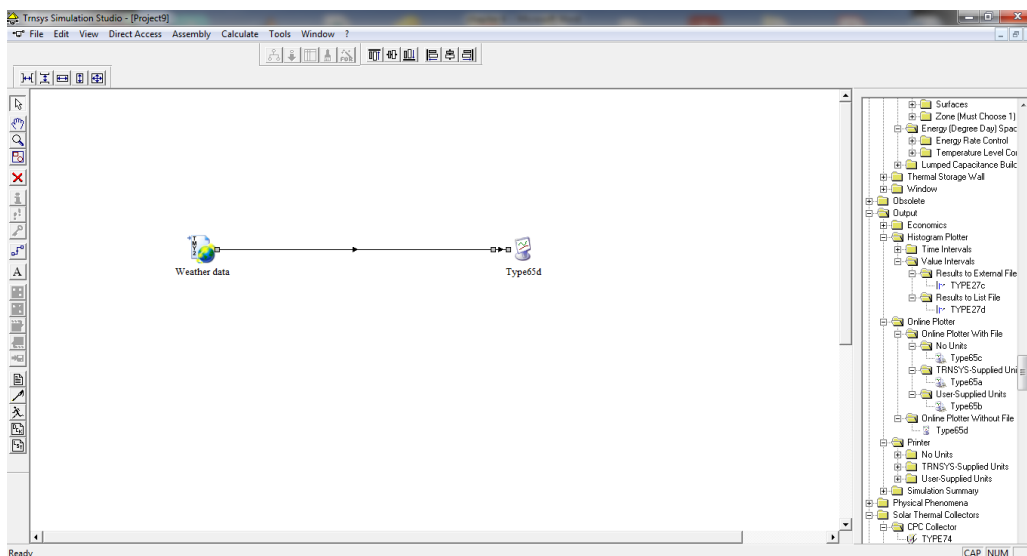


Figure IV.1 : Interface TRNSYS pour simuler les conditions climatiques

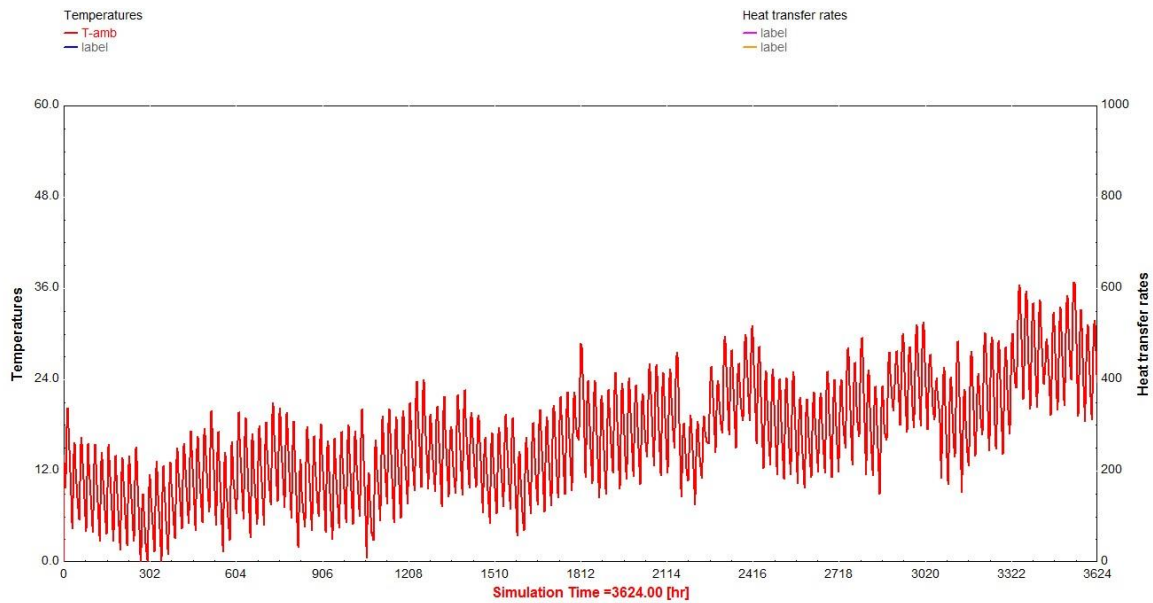


Figure IV.2 : Variation de la température ambiante à Bechar

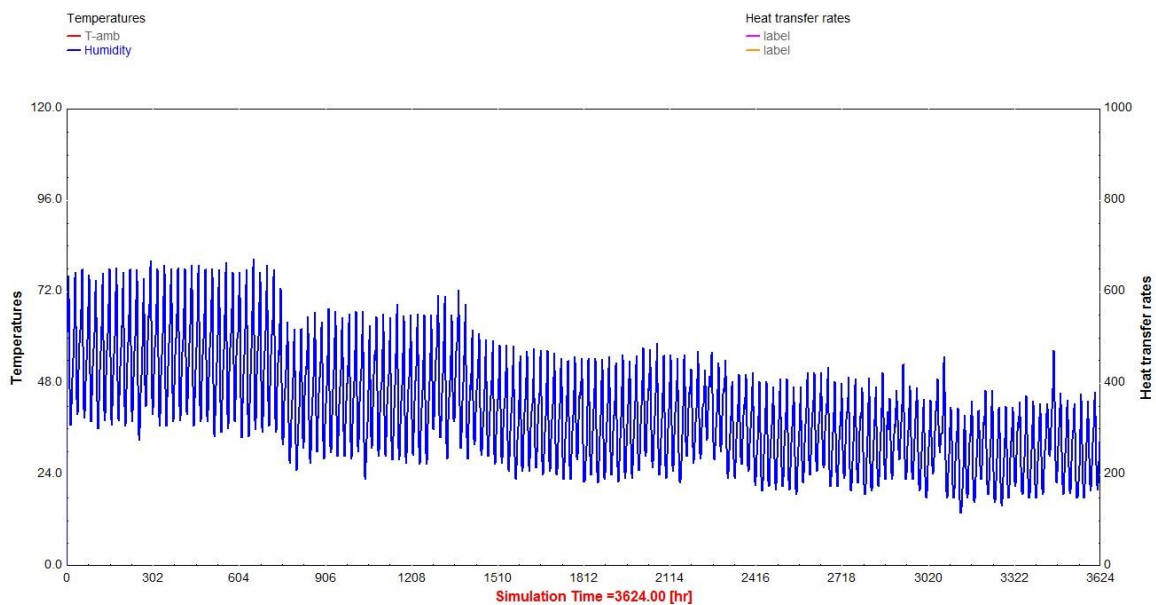


Figure IV.3 : Variation de l'humidité relative à Bechar

La figure 1 explique la forme générale de la boucle dans TRANSYS pour l'étude du climat de la région. Les autres figures expliquent le résultat de simulation, nous avons constaté que la température  $T_{max} = 36^{\circ}C$  et  $T_{min} = -2^{\circ}C$ . Et pour l'humidité relative  $H_{max} = 85\%$  et  $H_{min} = 10\%$

## 5. Simulation de panneau solaire

### 5.1 Panneau à plan type 1b

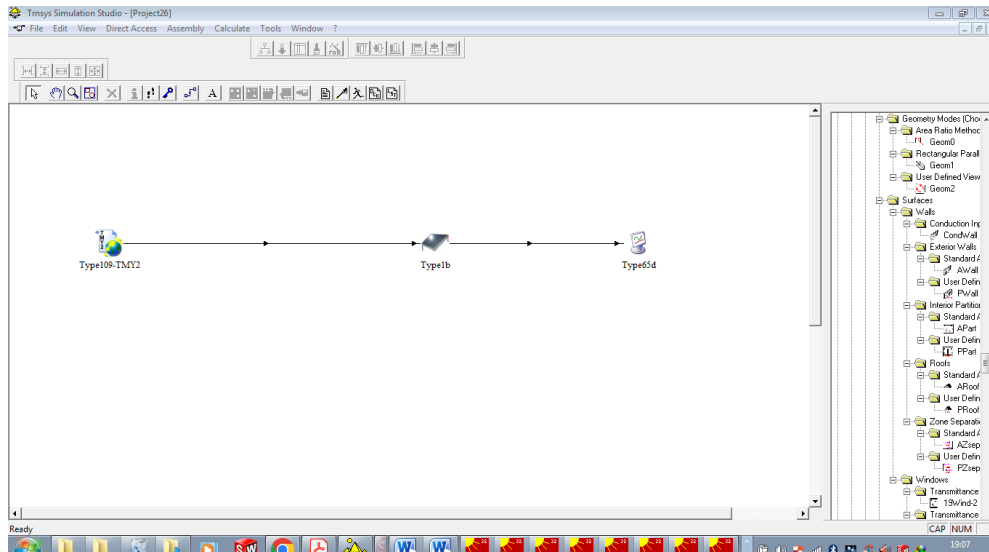


Figure IV.4 : Interface TRNSYS pour simuler le panneau solaire plan.

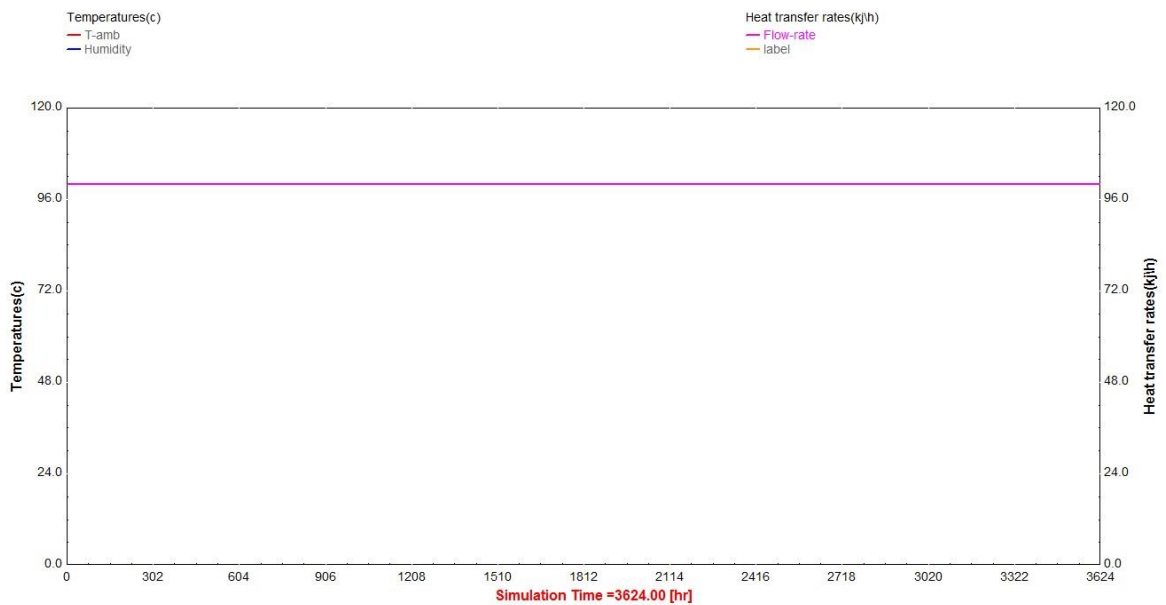


Figure IV.5 : Débit à la sortie du capteur solaire plan (Kj/h).

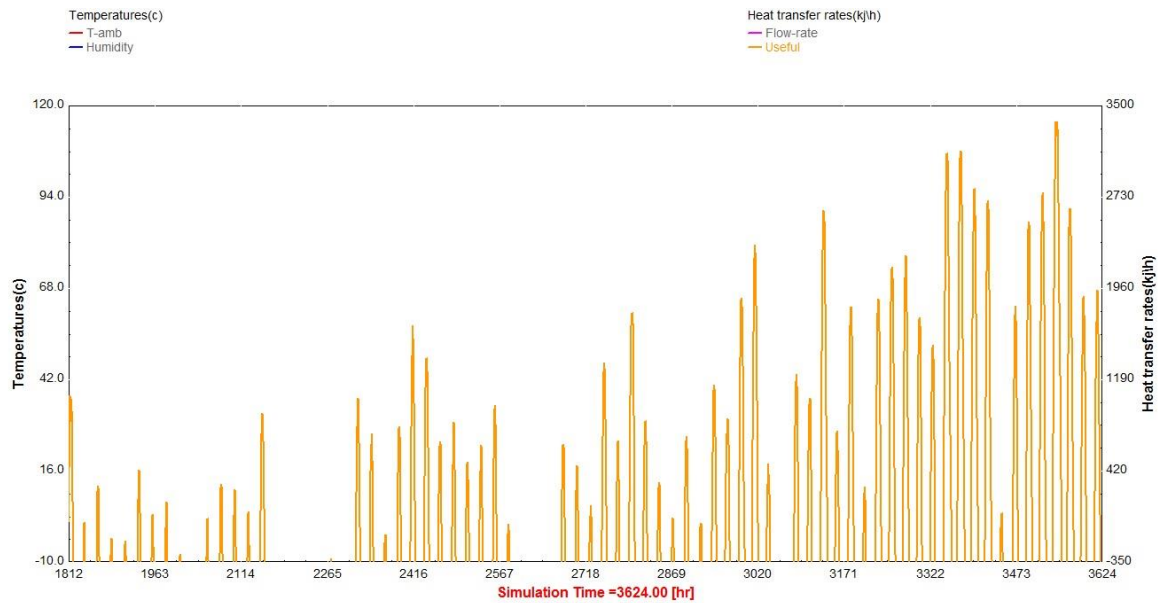


Figure IV.6 : Gain d'énergie utile d'un capteur solaire plan

Sur la figure 6 explique la boucle dans TRNSYS. Afin de simuler le fonctionnement du panneau solaire plan dans la région.

Les trois figures précédentes expliquent le résultat de simulation des paramètres thermo physiques et climatiques de la région d'étude, la figure 5 montrent la variation de la température du capteur solaire, et la figure 6 montre le gain d'énergie utile était 3400 kJ correspond au (3548h).

## 5.2 Résultats pour différentes composantes de l'installation

Dans la figure au ci-dessus on remarque que la variation de température de capteur est toujours plus de 5 °C et augmentent jusqu'à la valeur de 90 °C, cela est dû à la situation géographique de la ville de Bechar et les températures ambiantes extérieures qui sont élevées la plupart des jours des cinq mois.

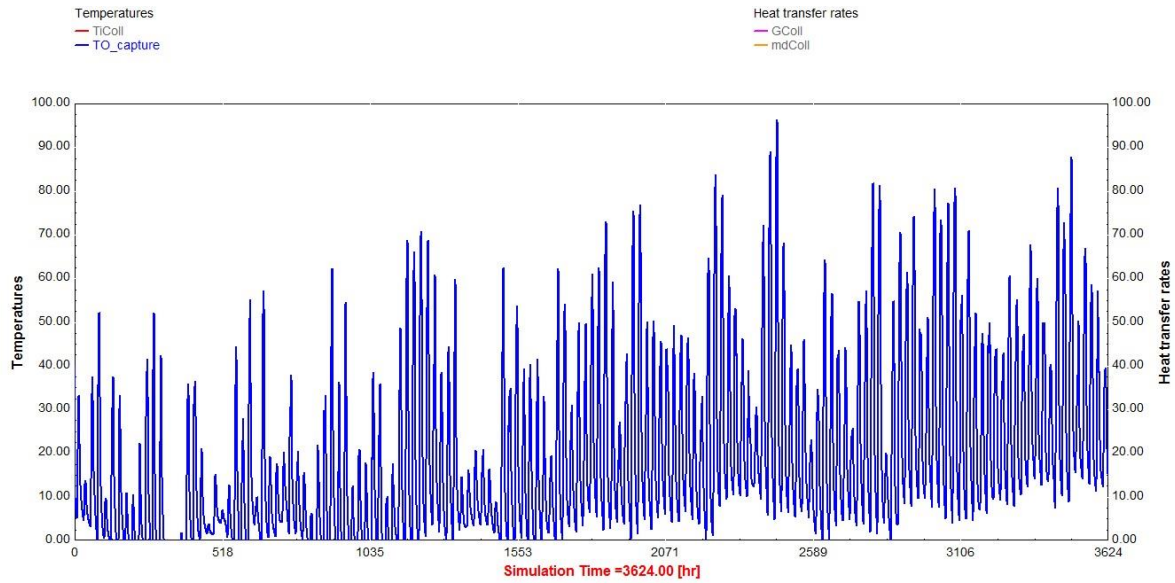


Figure IV.7 : Variation de température de capteur plan type 1b.

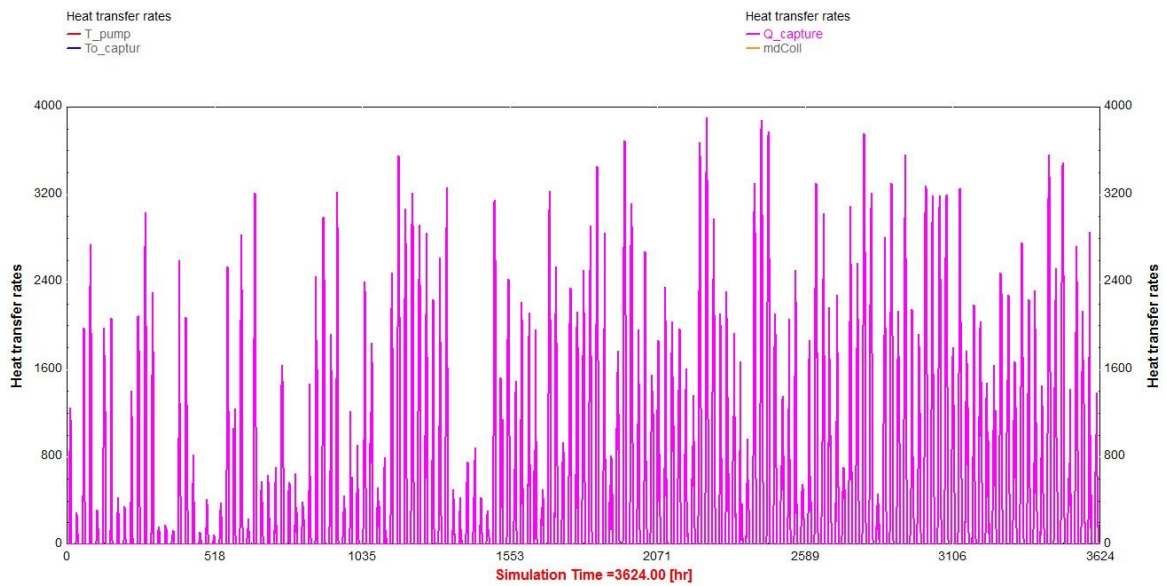


Figure IV.8 : Variation d'énergie utile produit par le capteur (Kj/h).

La figure 8 montre la variation annuelle de l'énergie utile fournie par le capteur solaire nous regardons que l'énergie produite est très grande presque à tous les cinq mois et ça revient aux valeurs du rayonnement solaire qui sont très élevé et la durée de l'ensoleillement.

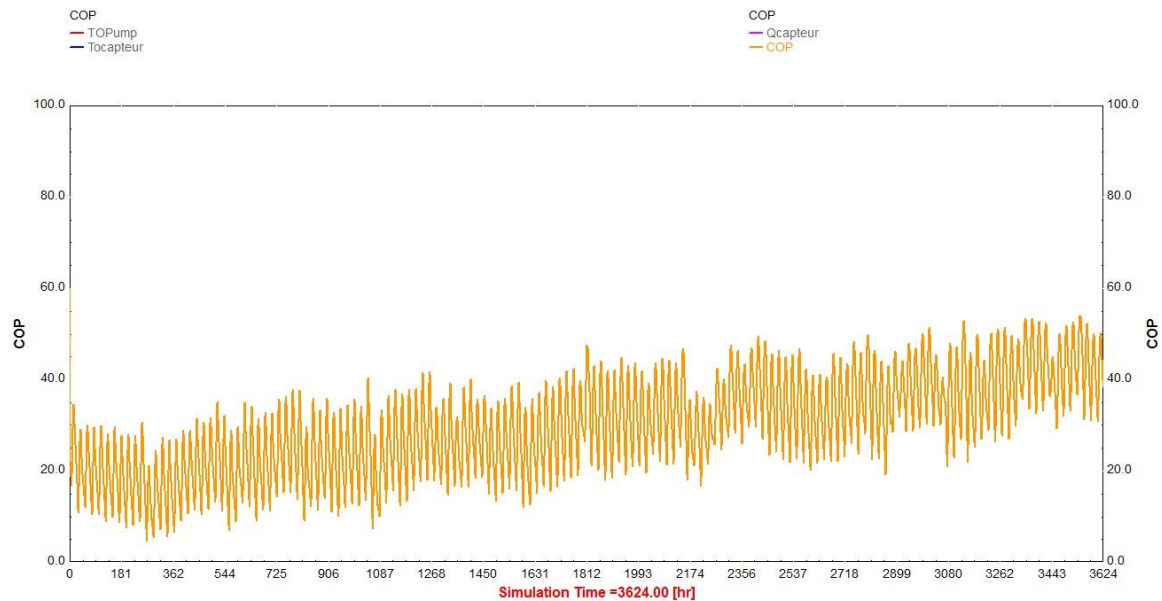


Figure IV.9 : Variation de COP d'une machine à absorption (Performance Map Collector) (KJ/h).

Dans la figure (9) ci-dessus, on peut observer que les valeurs du coefficient de performance (COP) pour la machine à absorption sont faibles. Cela est dû à l'efficacité des différents composants de la machine à absorption tels que l'absorbeur, le générateur, le condenseur et l'évaporateur. Cependant, il n'est pas possible d'intervenir au niveau de la machine à absorption, car celle-ci est la seule proposée par le logiciel TRNSYS.

En revanche, le choix du fluide frigorigène utilisé et du type de capteur intégré dans le cycle peut avoir un impact significatif sur les performances. Par exemple, l'utilisation du type "Performance Map Collector" a permis d'augmenter les performances du cycle total d'environ 26%. Il est également important de prendre en compte la température d'entrée (10 °C) ainsi que le nombre de capteurs utilisés (un seul capteur dans notre cas).

## 6. Info-climat

Avant de procéder à une simulation d'un cycle frigorifique à absorption, il est préférable de mener une étude sur les variations de température et de rayonnement solaire dans la région considérée. Cette étude permettra d'obtenir un aperçu des conditions dans lesquelles ce cycle frigorifique thermique fonctionne, et comparer dans différentes villes algériennes (Dar el Baida-Alger, Bechar et Laghouat).

**Info climat** est une association loi de 1901 à but non lucratif d'intérêt général<sup>1</sup>, créée en 2003. Son objectif est de rendre accessible les connaissances autour de la météo et du climat ainsi que favoriser le partage et les échanges sur ces sujets.

Description [modifier | modifier le code]

Créée en 2003, l'association Info climat a été lancée afin de pérenniser et structurer la plateforme collaborative du même nom lancée le 7 octobre 2001.

Les objectifs affichés de l'association sont de :

- Créer un commun numérique libre de données météorologiques et climatologiques, qu'elles soient produites par les passionnés et citoyens, ou par les institutions publiques qui mettent à disposition des données sous licence libre ;
- Vulgariser la climatologie et la météorologie ;
- Promouvoir l'échange des connaissances.



Figure IV.10 : Interface et présentation du site info climat

### 6.1 Variation de température ambiante extérieure pendant cinq mois (janv.– mai 24)

Ce diagramme représente la variation de température durant une cinq mois à Laghouat, il agit donc des informations sont représentées par la superposition d'un graphique en lignes et d'un graphique en barres on a Laghouat la température variée entre. [-2–36,5 c] durant une cinq mois.

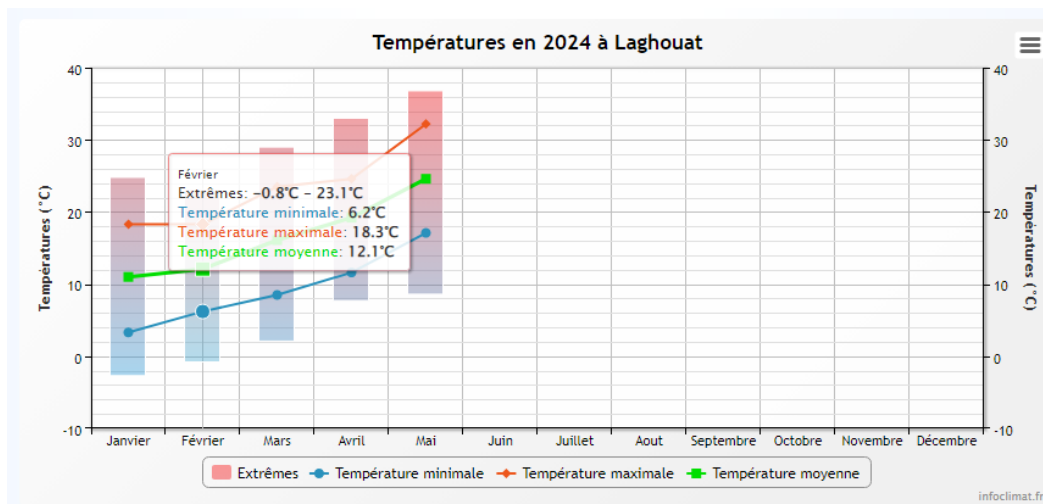


Figure IV.11 : Variation de température durant les cinq premiers mois de 2024 à Laghouat.

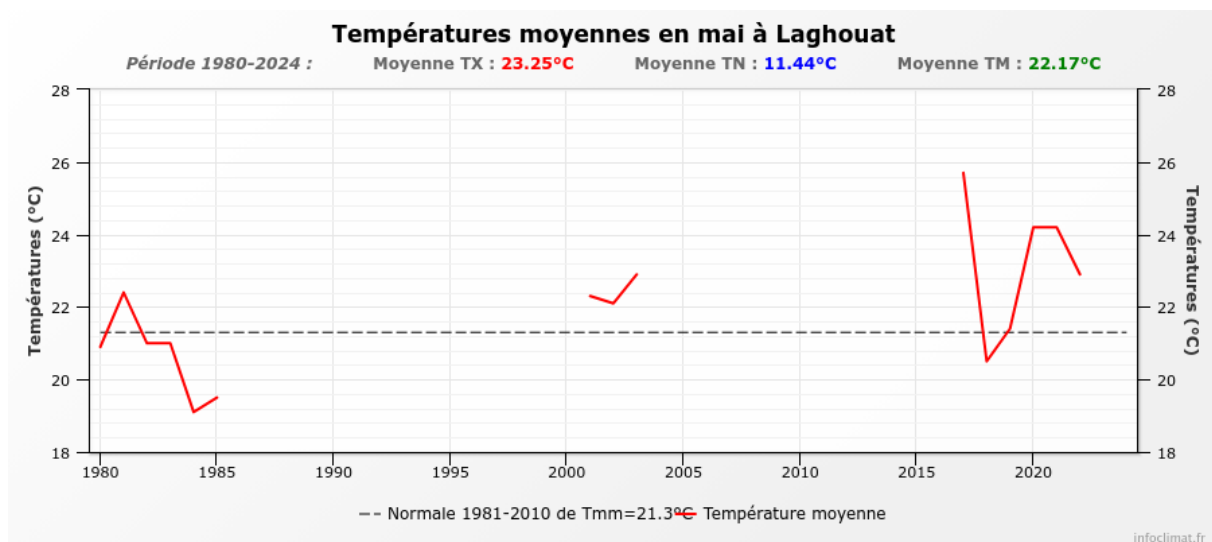


Figure IV.12 : Variation de température durant le mois de mai 2024 à Laghouat.

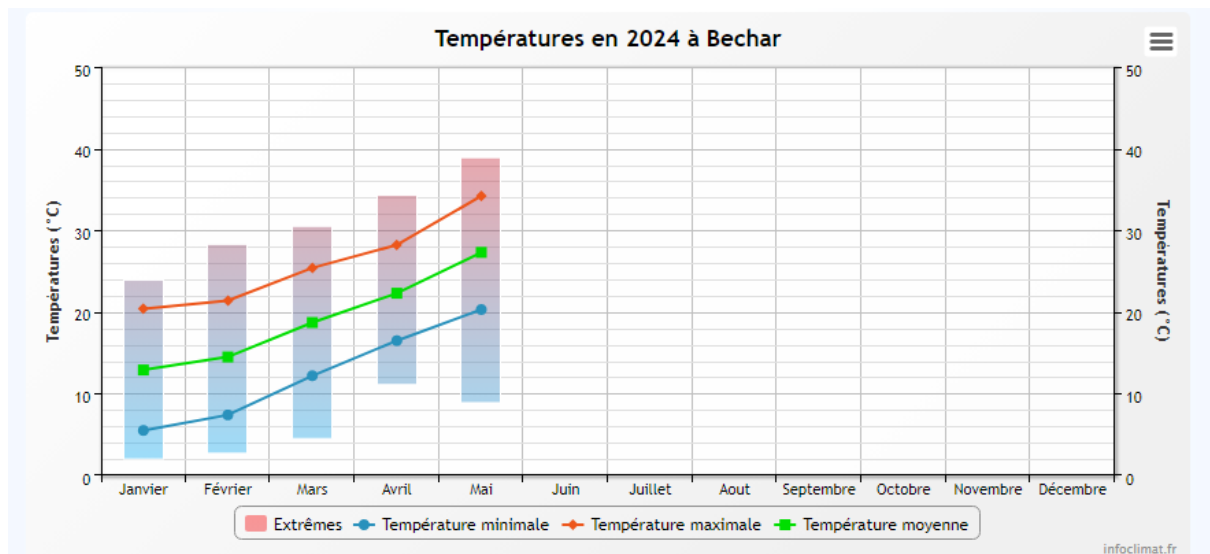


Figure IV.13 : Variation de température durant les cinq premiers mois de 2024 à Bechar.

Ce diagramme représente la variation de température durant cinq mois à bécher, il agit donc des informations sont représentées par la superposition d'un graphique en lignes et d'un graphique en barres on a bécher la température variée entre. [2– 39,8 °C] durant cinq mois

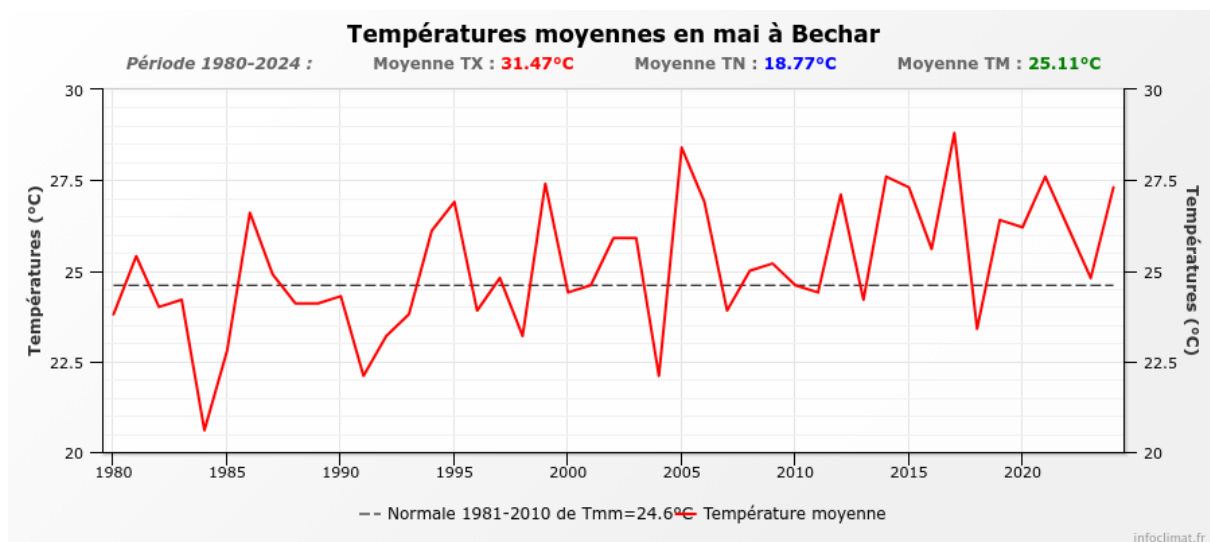


Figure IV.14 : Variation de température durant un mois de mai 2024 à Bechar.

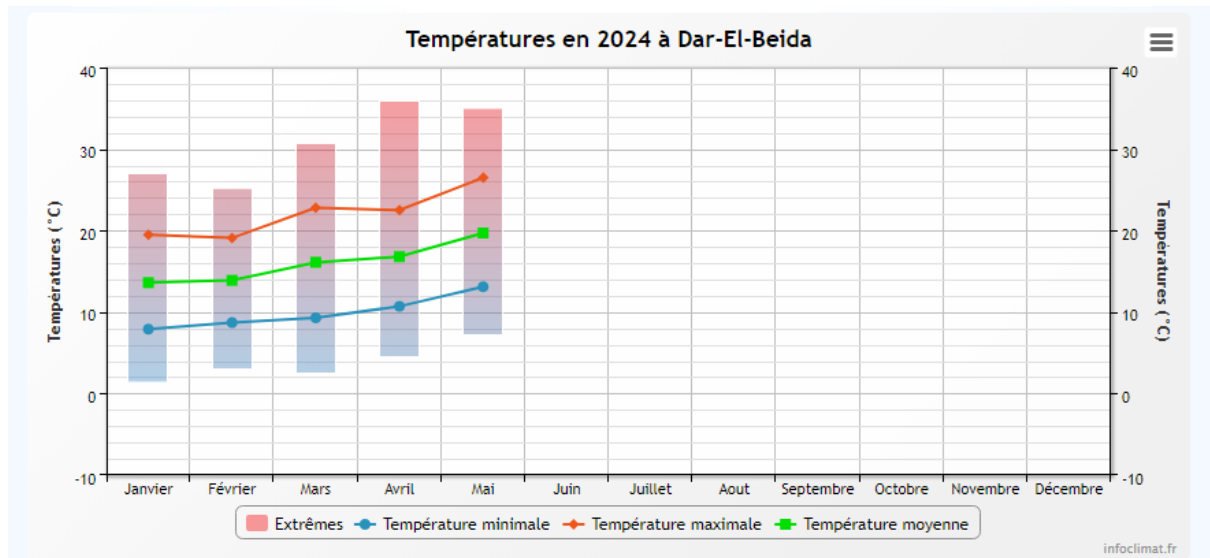


Figure IV.15 : Variation de température durant les cinq premiers mois de 2024 à Alger

Ce diagramme représente la variation de température durant une cinq mois à dar el biada Alger, il s’agit donc des informations sont représentées par la superposition d’un graphique en lignes et d’un graphique en barres on a à dar el biada la température variée entre. [2–36 °C] durant une cinq mois.

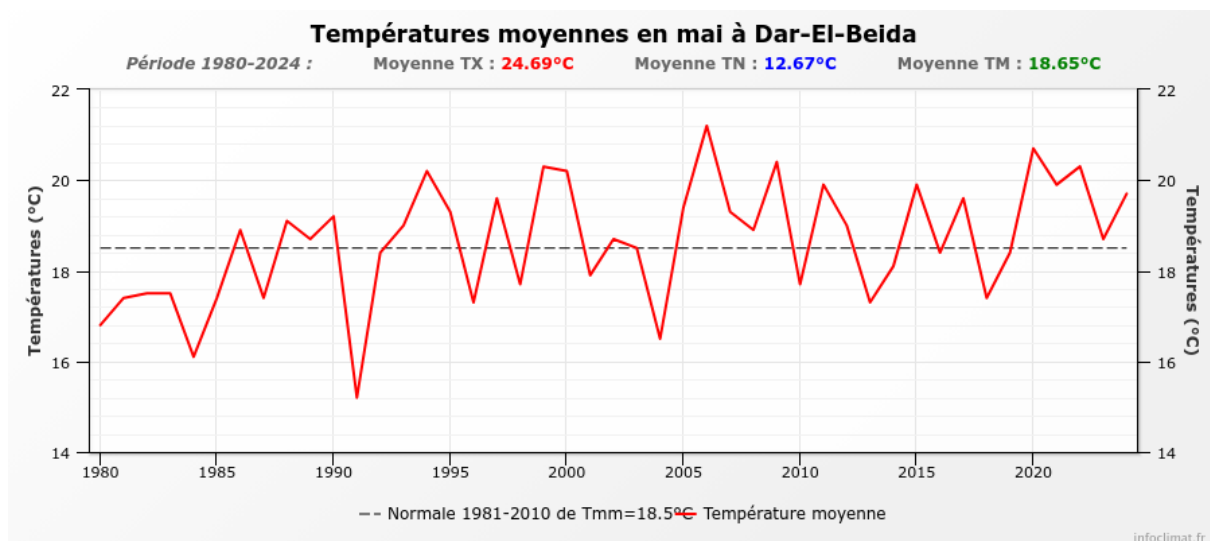


Figure IV.16 : Variation de température durant le mois de mai 2024 à Alger.

## 6.2 Variation de la durée de l'ensoleillement pendant cinq mois

A travers les figures IV.17-20, on remarque que l'ensoleillement de le DJU se diffère dans chaque ville e chaque et mensuelle

- DJU pour la climatisation à Dar El Baida nous constatons que le DJU climatique varie beaucoup sur cinq mois, allant de 16 à 95. De plus, le DJU pour le Chauffage à Dar El Baida varie de 14 à 43 en cinq mois.
- Le facteur DJU pour la climatisation à Béchar, le facteur DJU climatique varie davantage, allant de 12 à 275 de janvier à mai. Quant au chauffagiste DJU, il varie de 165 à 5 durant la même période. Cela indique des différences significatives dans les besoins de chauffage entre les mois et entre les régions.
- Pour la ville de Laghouat, le DJU climatique varie de 5 à 128 sur cinq mois, tandis que le DJU thermique varie de 125 à 8 sur la même période. Laghouat présente des valeurs d'ensoleillement différentes de celles de Becher.

En résumé, ces données montrent de différences mentionnées dans les conditions d'ensoleillement et les besoins en chauffage entre les régions Dar elbaida, Béchar et Laghouat en Algérie. Ces différences peuvent avoir un impact significatif sur les pratiques de chauffage et de climatisation dans ces zones, ainsi que sur les besoins énergétiques globaux tout au long de l'année.

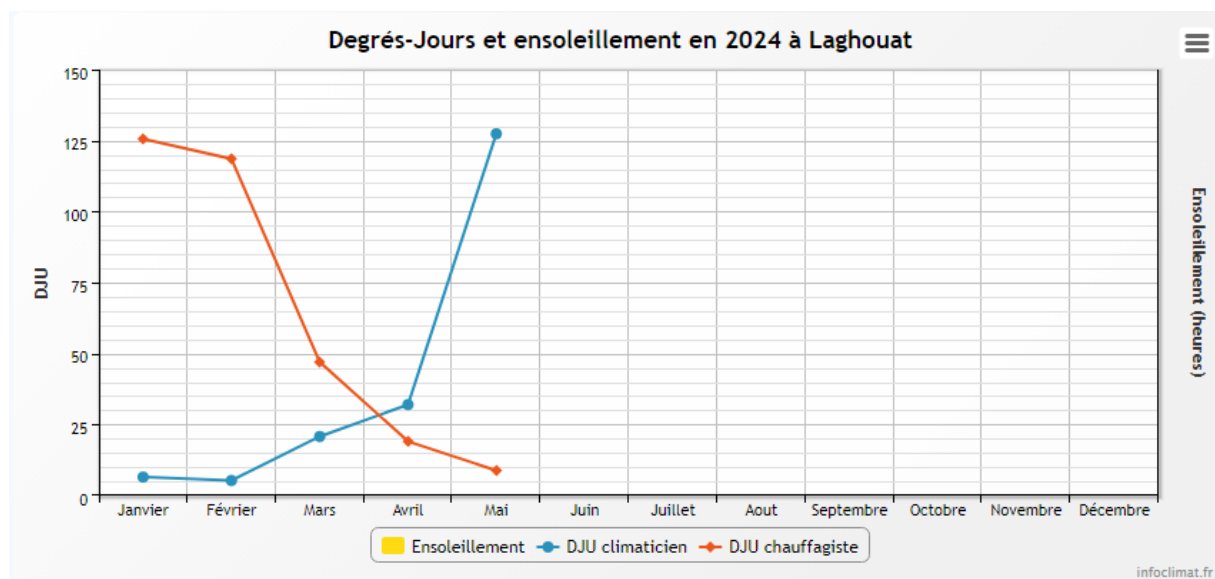


Figure IV.17 : Variation de la durée de l'ensoleillement durant les cinq premiers mois de 2024 à Laghouat

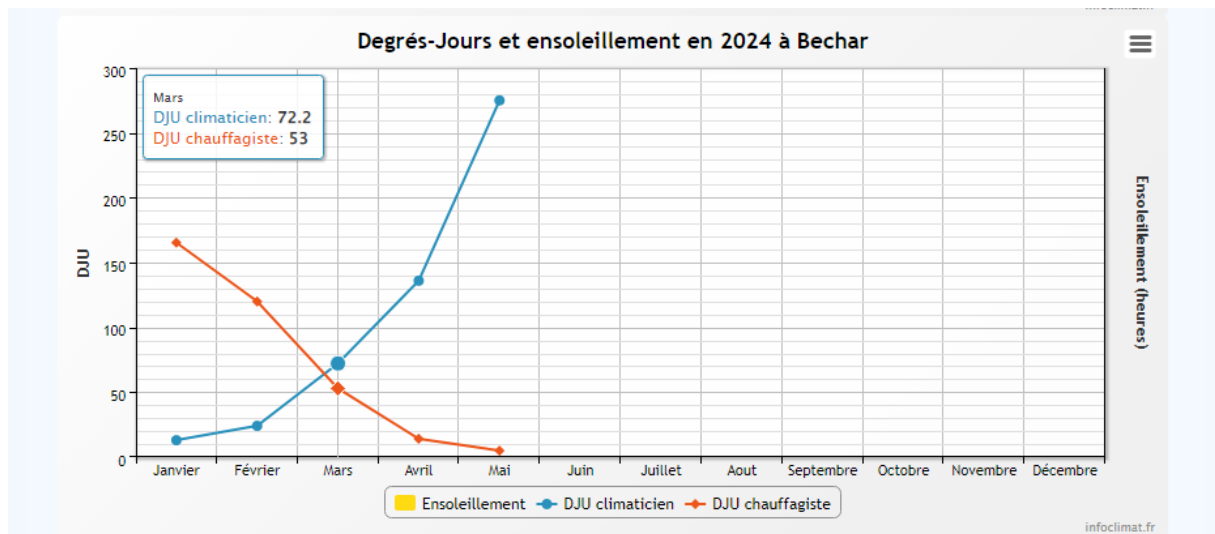


Figure IV.18 : Variation de durée de l'ensoleillement durant les cinq premiers mois de 2024 à Bechar

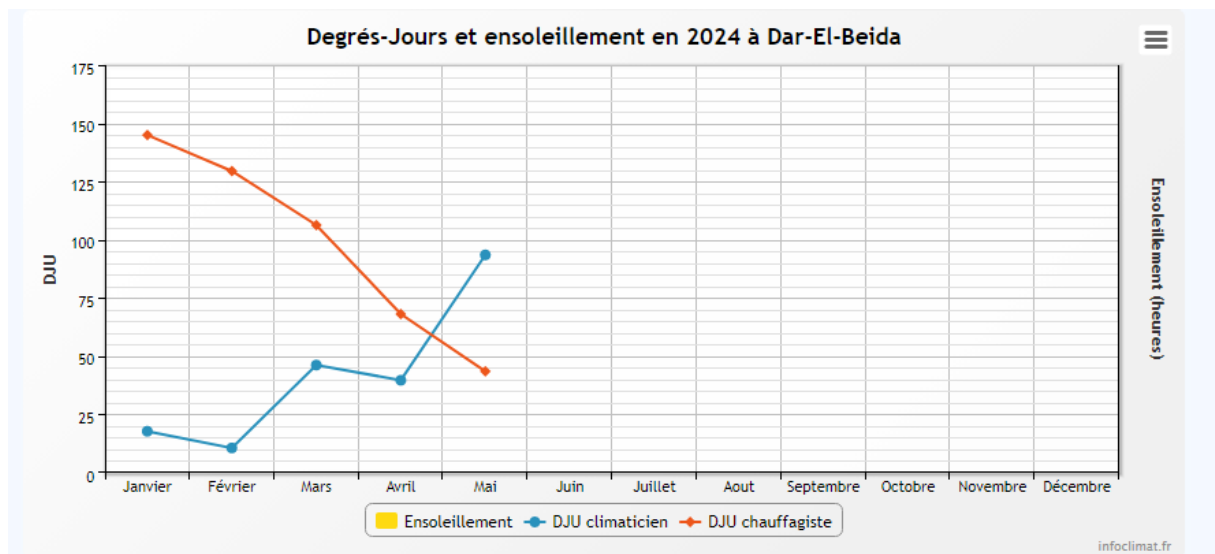


Figure IV.19 : Variation de durée de l'ensoleillement durant les cinq premiers mois de 2024 à Dar el Beida-Alger.

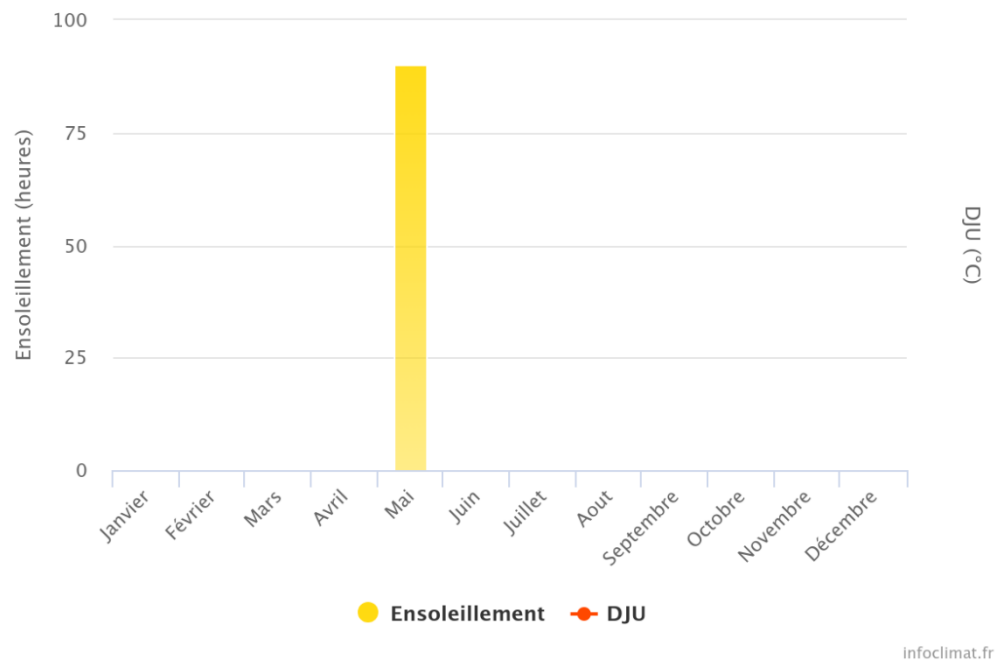


Figure IV.20 : L'ensoleillement de mois du mai à Laghouat



**Conclusion générale**

## Conclusion générale

La simulation des paramètres d'absorption est une étape importante dans le développement et l'optimisation de systèmes de refroidissement efficaces et durables. Grâce à l'utilisation du logiciel TRNSYS, des modèles mathématiques précis ont été développés pour simuler le fonctionnement de chaque partie du refroidisseur, en particulier l'évaporateur, le condenseur, l'absorbeur et le condenseur produisant de l'électricité.

Les refroidisseurs à absorption représentent une alternative durable et prometteuse aux systèmes de climatisation traditionnels, qui s'appuient généralement sur des processus énergivores et polluants. En s'appuyant sur l'énergie thermique pour générer du froid, les refroidisseurs à absorption offrent une solution plus respectueuse de l'environnement.

L'objectif principal de cette thèse était de développer et d'analyser un modèle de simulation précis pour un refroidisseur à absorption à l'aide du logiciel TRNSYS. Dans la ville de Bechar Ce modèle visait à :

Comprendre le fonctionnement interne du refroidisseur à absorption et ses différents composants.

La méthodologie adoptée dans cette thèse comprenait les étapes suivantes :

Nos simulations ont été présentées pour surface de capteur solaire ( $S=2 \text{ m}^2$ , Inclinaison du capteur  $[30^\circ]$ , Nombre en série 1.) La machine frigorifique à absorption est installée sur un bâtiment comporte une pièce d'une Chambre de  $16 \text{ m}^2$  à Bechar, Les résultats de la simulation ont montré la validité et la fiabilité du modèle développé. Les performances du refroidissement ont été évaluées en termes de coefficient de performance (COP), et la Variation de la température ambiante l'humidité à Bechar en plus la Débit à la sortie du capteur et Gain d'énergie utile d'un capteur solaire et Variation de température de capteur en fin la Variation d'énergie utile produit par le capteur





# **Bibliographie**

## References bibliographiques

- [1] Ph. Grenier, J. J. Guillemot, F. Meunier, M. Pons, Solar powered solid adsorption cold store. Journal of Solar Energy Engineering, Vol 110, 1988
- [2] R. E. Critoph, Simulation of a continuous multiple-bed regenerative adsorption Cycle. International Journal of refrigeration, N° 24, 2001
- [3] Delaire, E. (2012). Le froid dans la conservation des produits de la mer.
- [4] Duminil M. (2000). Une brève histoire du froid. Réalisé par : Tchantchane ryadh oussama Abu Breik Abdalrazeq Année Universités 2022/2023
- [5] PIERRENEVEU Absorption liquide machine, <http://www.neveu.pierre.free.fr> site consulté en novembre 2008
- [6] A. EL Almers, Renewable Energy, thèse de Doctorat Université de Tetouan Maroc, étude du transfert de chaleur et de masse dans un lit fixe de charbon actif réagissant par adsorption avec l'ammoniac – application à la modélisation d'une machine frigorifique solaire, 2002
- [7] Tierney M.J, Renewable Energy, Options for solar-assisted refrigeration trough collectors and double-effect chillers, 2007
- [8] LOKURLU A, MÜLLER G. Experiences with the worldwide first cooling system based Réalisé Par: Menni Madjed et Mechou Lamine Soutenu le: 06 / 07 /2017
- [9] Chekirou Wassila, Thèse de doctorat énergétique Université de Mentouri-Constantine, Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption, 2008 Réalisé Par : Menni Madjed et Mechou. 2017
- [10] Chekirou Wassila, Thèse de doctorat énergétique Université de Mentouri-Constantine, Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption, 2017
- [11] Maxime Duminil Techniques de l'Ingénieur, Systèmes à éjection et à absorption BE 9 735, traité Génie énergétique, 2002
- [12] André Joffre. " Energie solaire thermique dans le bâtiment chauffe-eau solaires ". revue techniques de l'ingénieur BE 9164.
- [13] R.foster, M.ghassemi, A.cota, solar energy, renewable energy and the environment, (2009).
- [14] Thierry CABIROL - Albert PELISSOU - Daniel ROUX « l'isolateur plan à effet de serre et le chauffe-eau solaire » EDISUD, AIX-EN-PROVENCE 1978.
- [15] G.iordanou, flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic, thesis, university of durham, (2009).
- [16] F.struckmann, analysis of a flat-plate solar collector, (2008).

## Bibliographie

---

- [17] Soteris A, kalogirou, solar thermal collectors and applications, progress in energy and combustion science, Volume 30, Issue 3, 2004, Pages 231-295
- [18] Y. Maigne, J-P. Causse, M. Claverie, B. Equer. "les perspectives de l'énergie solaire En FRANCE". Commission « Energie et changement climatique » Groupe de travail « Energie solaire » Juillet 2008
- [19] Brian Norton, solar energy thermal technology, (1991).
- [20] Serge Blaise Ekomy Ango , Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Paris, France. Spécialité Energétique. Le 24 novembre 2011.
- [21] Serge Blaise EkomyAngo , Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers. Paris, France. Spécialité Energétique. Le 24 novembre 2011.
- [22] Belachi Abdallah, Ben Saadi Ahmed Etude d'un mini cycle de réfrigération à absorption (H<sub>2</sub>O-LiBr), UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, Mémoire de fin d'étude, 2023
- [23] Salim MESSAOUDI, Abdelghani LAKROUNE, Abelmoumène Hakim BENMACHICHE, Modélisation des cycles frigorifiques à absorption fonctionnant avec le couple eau/Bromure de lithium (H<sub>2</sub>O - LiBr), Université Mohamed Khider de Biskra, MÉMOIRE DE MASTER, 2020
- [24] DJEZZAR Souad Epouse MAHSNI, ETUDE DE MELANGES D'ALCANES DANS LES MACHINES DE REFRIGERATION A ABSORPTION ET MODELISATION DE LEURS PROPRIETES ET PERFORMANCES, UNIVERSITE CONSTANTINE 3 SALAH BOUBNIDER, 2018-2019
- [25] BELKESSAM, H. (2014). Contribution à la valorisation de l'utilisation de l'énergie solaire pour des besoins de climatisation et de conditionnement d'air (Doctoral dissertation, Master Thesis University of Abou Baker Belkaid Tlemcem (Algeria))
- [26] Bouhelal, G. (2011). L'utilisation de l'énergie solaire pour les besoins de la climatisation'. Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en Génie Mécanique Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMEN-Année universitaire, 2012.
- [27] DJEBBAS, M., & BEN CHAA, Abdelhakim. Etude du conditionnement d'air solaire d'un bâtiment à usage éducatif (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDIMERBAH OUARGLA). 2022/2023.