

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

**En : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energies Renouvelables en mécanique**

**Par:**

**BENHABIB Mohammed Racem**

**LAFENDI Adel Hadj Mami**

**Sujet**

**Etude et optimisation des systèmes de réfrigération  
solaire à adsorption**

Soutenu publiquement, le 04 / 06 / 2023 , devant le jury composé de :

Mr. GHERNAOUT Mohammed EL Amine	Pr	Université de Tlemcen	Président
Mme. SARI HASSOUN Hind	MAA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr. BENRAMDANE Mohammed	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr. GHRICI Adenane	Docteur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2022 / 2023

*“ Nous avons construit un monde où l'intelligence est la première des facultés, où la science et la technique nous tirent en avant et nous chutons, en produisant plus de misères, de famines, de maladies. “*

**Michel Serres**

*Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut... ✍  
Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour,  
Le respect, la reconnaissance... ✍  
Aussi, c'est tout simplement que... ✍*



***Nous dédions ce mémoire***

## *Je dédie ce mémoire*

### *A mes chers parents*

*Ma très chère maman source de tendresse, mon très cher papa l'homme de ma vie.*

*Aucun mot, aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, ma gratitude et l'amour éternel. Vous avez su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Vos conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Votre patience sans fin, votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester votre fierté et ne jamais vous décevoir. Que Dieu, le tout puissant, vous préserve, vous accorde santé, bonheur, quiétude de l'esprit et vous protège de tout mal.*

### *A mon adorable sœur, ma nièce et mon cher frère*

*Merci d'être toujours à mes côtés, par votre présence, par votre amour dévoué et votre tendresse, pour donner du goût et du sens à ma vie. En témoignage de mon amour et de ma grande affection, je vous prie de trouver dans ce travail l'expression de mon estime et mon sincère attachement. Je prie Dieu, le tout puissant, pour qu'il vous donne bonheur et prospérité.*

### *A mon binôme Racem*

*Merci d'être mon ami, merci pour ta patience, ta tolérance,  
Pour les bons moments qu'on a partagés, aussi pour ton soutien et ton dévouement à ce travail,  
Je te dédie le fruit de nos efforts et te souhaite un avenir à la hauteur de tes ambitions.*

### *A ma grande famille*

*À mes tantes, à mes oncles ainsi que tous mes cousins et cousines,  
Pour l'amour et le respect qu'ils m'ont toujours accordé.*

### *A mes cher(e)s ami(e)s*

*Je vous remercie pour les moments inoubliables que nous avons partagés ensemble et pour le plaisir dont j'ai  
jouis avec vous.*

*Adel Hadj Mami*

### ***À mes chers parents***

*Mes parents, qui m'ont encouragé à aller de l'avant et qui m'ont donné tout leur amour pour prendre mes études. Auxquels je dois ce que je suis. Que dieu les protège.*

### ***À mes chères sœurs***

*Je vous dédie ce travail en témoignage de mon amour et mon attachement.*

*Merci de me suivre et de m'encourager dans mes projets et dans mes rêves les plus fous; Vous me faites toujours sentir que vous êtes derrière moi et que Vous croyez en moi et votre support fait une grande différence dans ma vie.*

*J'implore DIEU qu'il vous apporte bonheur, amour et que vos rêves se réalisent.*

### ***À mes chers oncles, tantes, leurs époux et épouses et à mes chers cousins et cousines***

*Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

### ***À mon cher binôme Adel***

*Mon frère qui a eu la patience de me supporter durant ce mémoire, et qui m'a soutenu et encouragé pendant tous les moments difficiles vécus.*

*Je te souhaite tout le succès que tu mérites dans ta vie.*

### ***À tous mes amis***

*En témoignage de l'amitié qui nous uni et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous souhaite un avenir plus brillant et plus heureux,*

***Mohammed Racem***

## *Remerciements*

*Nous tenons particulièrement à remercier Allah le tout puissant, qui nous a donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail, qui n'aurait jamais été réalisé sans sa bénédiction.*

*Nous remercions infiniment, Monsieur BENRAMDANE Mohammed, enseignant au département de Génie Mécanique. Faculté de Technologie, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, qui nous a confié ce travail riche d'intérêt et nous a guidé à chaque étape de sa réalisation.*

*Vous nous avez toujours réservé le meilleur accueil, malgré vos obligations professionnelles, vos encouragements inlassables, votre amabilité, votre gentillesse méritent toute admiration.*

*Nous saisissons cette occasion pour vous exprimer notre profonde gratitude, tout en vous témoignant notre respect.*

*Nous tenons à exprimer mes vifs remerciements envers mon Co-encadreur Mr GHRICI Adenane pour sa disponibilité, son encadrement, sa confiance et les conseils qu'il nous a généreusement prodigués.*

*Nos vifs remerciements aux membres de jury Pr. GHERNAOUT Mohammed EL Amine et Mme. SARI HASSOUN Hind enseignants au département de Génie Mécanique. Faculté de Technologie d'avoir accepté d'examiner notre travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire de fin d'études. Aussi, nous tenons à remercier infiniment, nos chers parents, pour leurs contributions, leurs soutiens et leurs patiences au long de nos études.*



*BENHABIB Mohammed Racem*

*LAFENDI Adel Hadj Mami*

## ملخص

يركز مشروع التخرج لدينا على الطاقة الشمسية وتكنولوجيا التبريد الشمسي. تم إجراء بحث مكثف في هذا المجال لاستكشاف فكرة علم الفلك ، والإمكانات الشمسية في الجزائر ، والديناميكا الحرارية للامتصاص ونمذجة آلات التبريد بالامتزاز الشمسي. سمحت لنا دراستنا بوضع عملنا في السياق العلمي الحالي ، لتحديد الفجوات المعرفية واقتراح حلول مبتكرة. أظهرنا فهمنا للأساسيات ، واكتسبنا مهارات في النمذجة والتحليل النقدي ، وقدمنا النتائج ذات الصلة. يساهم مشروعنا في استخدام أكثر كفاءة واستدامة للطاقة الشمسية في مجال التبريد ، وبالتالي فتح آفاق لانتقال الطاقة يوضح نجاحنا والتزامنا بالتميز الأكاديمي وإمكانياتك للمساهمة في التقدم العلمي

---

**الكلمات المفتاحية :** التبريد الشمسي ، الامتزاز ، الممتز ، الامتزاز ، معامل الأداء ، الكربون المنشط / الميثانول ، الزيوليت / الماء ، المركب / الإيثانول

## **Abstract**

Our graduate project focuses on solar energy and solar cooling technology. In-depth research was conducted in the field, exploring the notion of astronomy, the solar potential in Algeria, the thermodynamics of adsorption, and the modeling of solar-adsorption refrigeration machines. Our study has enabled us to place our work in the existing scientific context, to identify knowledge gaps and to propose innovative solutions. We demonstrated our understanding of fundamental principles, acquired modeling and critical analysis skills, and presented relevant results. Our project contributes to a more efficient and sustainable use of solar energy in the cold field, thus opening perspectives for the energy transition. Our success testifies to our commitment to academic excellence and our potential to contribute to scientific progress.

---

**Key words:** Solar refrigeration, Adsorption, Adsorbent, Adsorbate, Performance coefficient, Activated carbon / Methanol, Zeolite / Water , Composite / Ethanol.

## **Résumé**

Notre projet de fin d'études porte sur l'énergie solaire et la technologie de froid solaire. On a réalisé une recherche approfondie dans le domaine, en explorant la notion d'astronomie, le potentiel solaire en Algérie, la thermodynamique de l'adsorption et la modélisation des machines frigorifiques à adsorption solaire. Notre étude a permis de situer notre travail dans le contexte scientifique existant, d'identifier les lacunes de connaissances et de proposer des solutions innovantes. On a démontré notre compréhension des principes fondamentaux, acquis des compétences en modélisation et en analyse critique, et présenté des résultats pertinents. Notre projet contribue à une utilisation plus efficace et durable de l'énergie solaire dans le domaine du froid, ouvrant ainsi des perspectives pour la transition énergétique. Notre réussite témoigne de notre engagement envers l'excellence académique et notre potentiel à contribuer au progrès scientifique.

---

**Mots clés** : Refrigeration solaire, Adsorption, Adsorbant, Adsorbat, Coefficient de performance, Charbon actif / Méthanol , Zéolite / Eau , Composite / Ethanol.

## Table des matières

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Nomenclature**

**Introduction générale.....1**

### **Chapitre 1 : Recherche bibliographique**

1.1 Introduction.....	3
1.2 Notions Astronomiques .....	3
1.2.1 Définitions.....	3
1.2.2 Données astronomiques .....	4
1.2.3 Rayonnement solaire.....	6
1.2.4 Gisement solaire.....	7
1.3 Potentiel solaire en Algérie.....	7
1.4 Technologie de froid solaire .....	8
1.4.1 System de refroidissement solaire électrique.....	9
1.4.2 System de refroidissement solaire thermique .....	12
1.4.3 Réfrigération par adsorption solaire.....	17
1.5 Conclusion .....	18

### **Chapitre 2 : Thermodynamique de l'adsorption**

2.1 Introduction .....	19
2.2 Principe de l'adsorption .....	19
2.3 Types d'adsorption.....	20
2.3.1 Adsorption chimique (chimisorption).....	20
2.3.2 Adsorption physique (physisorption) .....	20
2.4 Isothermes d'adsorption.....	21
2.4.1 Modèle de Langmuir.....	23
2.4.2 Modèle de Brunauer, Emmet et Teller (B, E, T) .....	23
2.4.3 Modèle thermodynamique .....	24
2.5 Chaleur d'adsorption.....	25

2.6 Application pratique de l'adsorption .....	26
2.6.1 Applications industrielles .....	26
2.6.2 Applications environnementales.....	27
2.6.3 Applications d'adsorption à pompe à chaleur et froid.....	28
2.7 Conclusion .....	28

### **Chapitre 3 : Modélisation des machines frigorifiques a adsorption solaire (cycle de base)**

3.1. Introduction.....	29
3.2. Machines frigorifiques solaire à adsorption.....	29
3.2.1. Principe de fonctionnement .....	29
3.2.2. Processus.....	31
3.2.3. Cycle thermodynamique .....	34
3.3. Couples adsorbants/adsorbats .....	36
3.3.1. Adsorbants .....	36
3.3.2. Choix des adsorbants .....	36
3.4. Adsorbats .....	37
3.4.1. Choix des adsorbats .....	38
3.5. Modélisation des machines frigorifiques solaire a adsorption.....	39
3.5.1. Bilans des composantes de la machine.....	39
3.5.2. Coefficient de performance .....	43
3.5.2.2. <i>Expression de <math>Q_c</math></i> .....	44
3.5.2.3. <i>Intensité solaire et température ambiante</i> .....	46
3.6. Conclusion.....	47

### **Chapitre 4 : Résultats et interprétation**

4.1. Introduction.....	48
4.2. Condition climatique.....	48
4.2.1. Situation géographique .....	48
4.3. Paramètres et données thermophysique.....	51
4.3.1. Paramètre D/A .....	51
4.4. Courbes et interprétations .....	51
4.4.1. Données .....	53
4.4.1.1. <i>Données de cycle</i> .....	56
4.4.1.2. <i>Données de panneau</i> .....	56

4.4.2. Coefficient de performance .....	57
4.5. Optimisation .....	57
4.5.1. Effet de température d'évaporation.....	58
4.5.2. Effet de température de condensation.....	58
4.5.2. Effet de surface de capteur solaire.....	59
4.6. Conclusion .....	59
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>60</b>

## Liste des figures

### Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Fig.1.1 : Variation annuelle de la déclinaison solaire .....	4
Fig.1.2 : Zénith, azimut et l'angle horaire .....	5
Fig.1.3 : Rayonnement solaire .....	6
Fig.1.4 : Carte du monde de l'enseilllement moyen annuel .....	7
Fig.1.5 : Durée d'enseilllement moyenne annuelle en Algérie .....	8
Fig.1.6 : Principe des systèmes de refroidissement photovoltaïques .....	10
Fig.1.7 : Schéma d'un système de refroidissement thermoélectriques.....	11
Fig.1.8 : Mouvements du piston et du plongeur pendant un cycle de réfrigération Stirling ...	12
Fig.1.9 : Système de réfrigérateur thermo acoustique .....	12
Fig.1.10 : Schéma de principe du système de réfrigération solaire thermique.....	13
Fig.1.11 : Schéma du système de sorption solaire liquide.....	14
Fig.1.12 : Système frigorifique à déshydratant solide équipé de capteurs solaires pour la régénération de la roue dessiccante.....	15
Fig.1.13 : Schéma et diagramme T-s du système de réfrigération à éjecteur.....	16
Fig.1.14 : Système de réfrigération par absorption solaire.....	17
Fig.1.15 : Configuration de base d'un système de réfrigération par adsorption solaire.....	18

### Chapitre 2 : Thermodynamique de l'adsorption

Fig.2.1 : Phénomène d'adsorption .....	19
Fig.2.2 : Schéma explicatif des deux types d'interactions .....	21
Fig.2.3 : Différents types d'isothermes d'adsorption .....	22
Fig.2.4 : Modèle d'adsorption en monocouche .....	23

Fig.2.5 : Modèle d'adsorption en multicouches .....	23
Fig.2.6 : Phénomène d'adsorption selon le modèle de POLANYI .....	24
Fig.2.7 : Détermination de la chaleur isostérique d'adsorption .....	25

### **Chapitre 3 : Modélisation des machines frigorifique à adsorption solaire**

Fig.3.1 : Schéma d'une machine solaire à adsorption .....	29
Fig.3.2 : Phase échauffement et désorption .....	30
Fig.3.3 : Phase de refroidissement et adsorption .....	31
Fig.3.4 : Processus de chauffage et de pressurisation .....	32
Fig.3.5 : Processus de chauffage et de désorption .....	32
Fig.3.6 : Processus de refroidissement et de dépressurisation .....	33
Fig.3.7 : Processus de refroidissement et d'adsorption .....	34
Fig.3.8 : Cycle thermodynamique idéal de la machine dans un diagramme de Clausius Clapeyron .....	35
Fig.3.9 : Vue en perspective d'un boîtier .....	39
Fig.3.10 : Un exemple d'un condenseur.....	41
Fig.3.11 : Schéma d'un évaporateur.....	42

### **Chapitre 4 : Résultats et interprétation**

Fig.4.1 : Variation de l'intensité de rayonnement en fonction du temps.....	49
Fig.4.2 : Variation de la température en fonction du temps.....	50
Fig.4.3 : Variation de la concentration de l'adsorbat en fonction de la température.....	51
Fig.4.4 : Variation de la concentration de l'adsorbat en fonction de la température.....	52
Fig.4.5 : Variation de la concentration de l'adsorbat en fonction de la température.....	52

Fig.4.6 : Variation du COP en fonction de couple dans chaque ville .....	57
Fig.4.7 : Variation du COP en fonction de la température d'évaporation (°C).....	58
Fig.4.8 : Variation du COP en fonction de la température de condensation (°C).....	58
Fig.4.9 : Variation du COP en fonction de la surface de capteur solaire (m <sup>2</sup> ) .....	59

## Liste des tableaux

### Chapitre 1 : Recherche bibliographique

Tab.1.1 : Durée d'ensoleillement dans le territoire Algérien.....8

### Chapitre 3 : Modélisation des machines frigorifique à adsorption solaire

Tab.3.1 : Surface spécifique de différents adsorbants selon L.M. Sun et F. Meunier.....36

Tab.3.2 : Propriétés thermodynamique d'adsorbats.....38

### Chapitre 4 : Résultats et interprétations

Tab.4.1 : Données climatique des villes algériennes.....49

Tab.4.2 : Paramètre D/A des couples.....51

Tab.4.3 : Caractéristique thermophysique de l'eau.....51

Tab.4.4 : Caractéristique thermophysique de l'eau  $T_e=5^{\circ}\text{C}$  .....51

Tab.4.5 : Caractéristique thermophysique de l'eau  $T_c=15^{\circ}\text{C}$  .....51

Tab.4.6 : Caractéristique thermophysique de méthanol.....54

Tab.4.7 : Caractéristique thermophysique de méthanol  $T_e=5^{\circ}\text{C}$  .....54

Tab.4.8 : Caractéristique thermophysique de méthanol  $T_c=15^{\circ}\text{C}$  .....54

Tab.4.9 : Caractéristique thermophysique de l'éthanol .....55

Tab.4.10 : Caractéristique thermophysique de l'éthanol  $T_e=5^{\circ}\text{C}$ .....55

Tab.4.11 : Caractéristique thermophysique de l'éthanol  $T_c=15^{\circ}\text{C}$  .....55

## Nomenclature

<u><i>Symboles</i></u>	<u><i>Description</i></u>	<u><i>Unité</i></u>
$\rho$	Densité	kg/m <sup>3</sup>
$\delta$	Déclinaison solaire	
$\varphi$	Latitude	degré
$\omega$	Angle horaire	degré
$\beta$	Angle d'inclinaison	degré
$\psi$	Angle de zénith Degré	degré
$\theta$	Angle d'incidence	degré
T	Température	K
x	Masse adsorbée	Kg
V	Volume	m <sup>3</sup>
A <sub>i</sub>	Potentiel d'adsorption de Polanyi	KJ/mol
W <sub>i</sub>	Volume adsorbé	L/kg
w <sub>0</sub>	Volume maximal adsorbable	m <sup>3</sup> /kg
$\Delta G$	Énergie libre de GIBBS	J/mol
$\Delta S$	Entropie	J/mol. K
$\Delta x$	Masse cyclée	Kg
A	Surface	m <sup>2</sup>
t	Temps	S
t <sub>s</sub>	Temps solaire vrai	S
I	Rayonnement solaire	W/m <sup>2</sup>
Q	Quantité	kJ/kg
Q <sub>ev</sub>	Quantité de froid produite à l'évaporateur	MJ/m <sup>2</sup>
Q <sub>t</sub>	Quantité d'énergie totale incidente	MJ
Q <sub>in</sub>	Quantité de chaleur absorbée par l'adsorbé	kJ/kg
Q <sub>dés</sub>	Chaleur de désorption	
Q <sub>utile</sub>	Energie totale utile	MJ
Q <sub>rej</sub>	Energie totale rejeté	MJ
COP <sub>th</sub>	Coefficient de performance thermique	

Cp	Chaleur spécifique	J/kg k
$\Delta H$	Chaleur isostérique d'adsorption	kJ/kg
L	Chaleur latente	kJ/kg

**Indices**

**Description**

amb	Ambiant
ex	Extérieur
ad	Adsorption
ch	Adsorbant
$E_g$	L'efficacité énergétique de l'adsorbent (générateur)
g	Régénération
max	Maximum
min	Minimum
Con	Condensation
ev	Évaporation
dés	Désorption
l	Liquide
PV	Photovoltaïques
D-A	Dubinin-Astakhov
CA	Courant alternatif
CC	Courant continue
CD	Courant direct
AC	Charbon actif
TEM	Refroidissement thermoélectrique
<i>COP</i>	Coefficient de performance
<i>COP<sub>th</sub></i>	Coefficient de performance thermique
B.E.T	Brunauer, Emmet et Teller

# **Introduction générale**

## **Introduction Générale**

L'essentiel de l'énergie consommée provient d'énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon...), et leur utilisation intensive peut conduire à l'épuisement de ces réserves, véritable menace pour l'environnement. Cette menace se manifeste principalement par le réchauffement climatique de la Terre causé par la pollution et l'effet de serre. En fait, le monde d'aujourd'hui est surtout soucieux de réduire cette pollution en essayant de faire en sorte que les sources d'énergie conventionnelles répondent à des normes très strictes.

Les systèmes de réfrigération et de climatisation sont de gros consommateurs d'énergie. Ces systèmes sont généralement alimentés par de l'électricité produite à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), et les systèmes de réfrigération par adsorption alimentés par des sources de chaleur à basse température ont été développés comme une alternative économique et respectueuse de l'environnement. La recherche a montré que l'énergie solaire est une excellente solution pour remplacer les combustibles fossiles. Dans tous ces systèmes, la consommation d'énergie mécanique est minimisée ou nulle, et ils peuvent fonctionner en utilisant de la chaleur à basse température provenant de différentes sources, telles que la chaleur perdue 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 paires de travail, présentent de nombreux avantages pour des applications spécifiques. Ils offrent une meilleure efficacité du système de refroidissement que les systèmes à adsorption.

Cependant, ces systèmes présentent également de nombreuses limitations dans les conditions de fonctionnement.

Le plus grand avantage des systèmes d'adsorption par rapport aux systèmes d'absorption est qu'ils peuvent fonctionner sans pièces mobiles, ce qui est moins coûteux que la maintenance. Les autres avantages par rapport aux systèmes à compression sont : une construction simple, écologique et silencieuse. Les systèmes de refroidissement par adsorption ont de nombreuses applications dans les pays développés et en développement, telles que : le stockage et la conservation des vaccins et des produits médicaux, la conservation des aliments, la réfrigération, la climatisation, les refroidisseurs et la production de glace. Cette étude serait d'un apport appréciable pour de nouvelles conceptions de ce type de machines ou pour optimiser les indices économiques d'exploitation de l'énergie solaire pour la production

du froid, tout en tenant compte des contraintes qui peuvent être engendrées par la présence des conditions climatiques non adaptables.

- Le premier chapitre est une définition de quelque notion d'astronomie aussi du gisement et le potentiel solaire d'Algérie, ensuite une explication de la technologie du froid solaire.

- Le chapitre 2 présente les différents phénomènes nécessaires à l'étude de l'adsorption dans le but de définir quelques concepts généraux classiques nécessaires utilisés dans notre étude.

- Dans le chapitre 3, nous avons établi un modèle prédictif des performances et des limites de fonctionnement de la machine frigorifique à adsorption. Ce modèle est basé sur l'utilisation des équations d'état (adsorbant/adsorbat) à l'équilibre thermodynamique, il ne tient compte ni des effets de la cinétique de l'adsorption ni des différences de température ou de pression dues aux transferts de chaleur et de masse.

- Le quatrième chapitre expose et discute les résultats de la modélisation et l'interprétation des spectres. L'étude de la situation géographique et son influence sur la température, l'analyse des différents couples, la variation du coefficient de performance en fonction des couples. Enfin, une conclusion générale pour résumer notre travail.

# **Chapitre 1**

## **Recherche bibliographique**

# Chapitre 1

## Recherche bibliographique

### 1.1 Introduction

De nombreux pays dans le monde s'orientent vers l'exploitation des énergies renouvelables ; parmi eux l'énergie solaire qui est utilisée dans le secteur de bâtiment pour fournir l'électricité, la climatisation ou le chauffage.

Ce chapitre présente des différentes technologies de froid solaire et une revue bibliographique concernant les notions astronomiques et le potentiel solaire en Algérie.

### 1.2 Notions Astronomiques

Dans cette partie on donne des notions de base dans l'astronomie qui décrit la position du soleil et se trouvent essentielles et rentrent dans le calcul du rayonnement solaire.

#### 1.2.1 Définitions

- **Soleil**

Le soleil est une étoile de forme pseudo sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km et sa masse est de l'ordre de 2.1022 tonnes. Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, il est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes, Il transforme à chaque seconde 564.106 tonnes d'hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie ( $E = mc^2$ ), ce qui représente une énergie totale de  $36 \cdot 10^{22}$  kW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit une énergie de  $1.8 \cdot 10^{17}$ W [1].

- **Mouvement de la terre autour du soleil**

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

L'excentricité de cette ellipse est faible, ce qui fait que la distance terre-soleil ne varie que de  $\pm 1.7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 106km.

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison de l'ordre de  $23^\circ 27'$  [2].

## 1.2.2 Données astronomiques

### 1.2.2.1 Coordonnées géographiques

- **Latitude du lieu ( $\varphi$ )**

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre.

- **Longitude (L)**

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré. La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ .

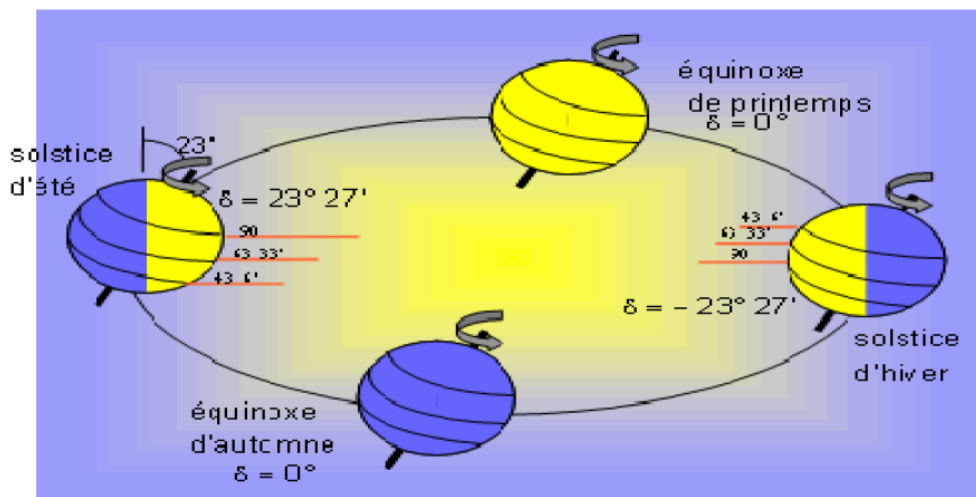
- **Altitude (Z)**

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer = 0), il est mesuré en mètre [3].

### 1.2.2.2 Coordonnées horaires

- **Déclinaison ( $\delta$ )**

C'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de  $+23^\circ 27'$  à  $-23^\circ 27'$  et détermine l'inégalité des durées des jours [2].



**Fig.1.1.** Variation annuelle de la déclinaison solaire [4].

- **Incidence ( $\theta$ )**

C'est l'angle entre le rayonnement direct sur une surface et la normale à cette surface.

- **Inclinaison ( $\beta$ )**

L'angle entre le plan de la surface et l'horizontale.

- **Angle horaire ( $\omega$ )**

L'angle horaire solaire est le déplacement angulaire du soleil d'est en ouest autour de l'axe polaire par rapport au méridien local. Les valeurs d'angle horaire sont nulles le midi solaire, négatives le matin et positives l'après-midi, augmentant de  $15^\circ$  toutes les heures ( $360^\circ$  en 24 heures).

### 1.2.2.3 Coordonnées horizontales

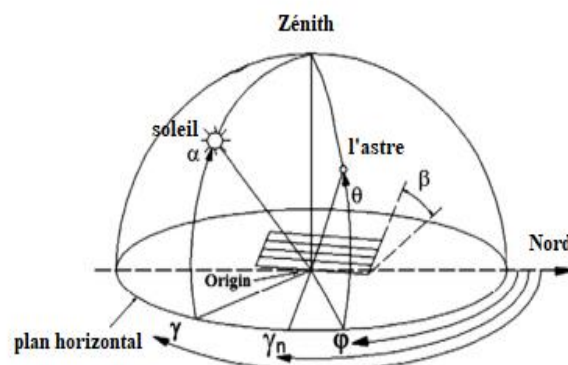
Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles

- **Hauteur angulaire du soleil ( $h$ )**

La hauteur du soleil est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire ou point D'observations et le plan horizontal, passant par le point d'observations.

- **Azimut ( $\gamma$ )**

C'est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal sud (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud. En utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation [2].



**Fig.1.2.** Zénith, azimut et l'angle horaire [5].

### 1.2.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'énergie émise par le soleil sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est principalement constitué de lumière visible, d'ultraviolet et d'infrarouge, mais il contient également d'autres types de rayonnement électromagnétique.

Le noyau du soleil est l'endroit où se produisent les réactions thermonucléaires, produisant principalement de l'hélium et des radiations à une température de plusieurs dizaines de millions de degrés. La plupart des rayonnements se situent dans le domaine de la lumière visible. Les autres sont essentiellement dans la gamme infrarouge et une petite partie dans la gamme ultraviolette.

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit au plusieurs chemins comme l'indique la figure suivante.

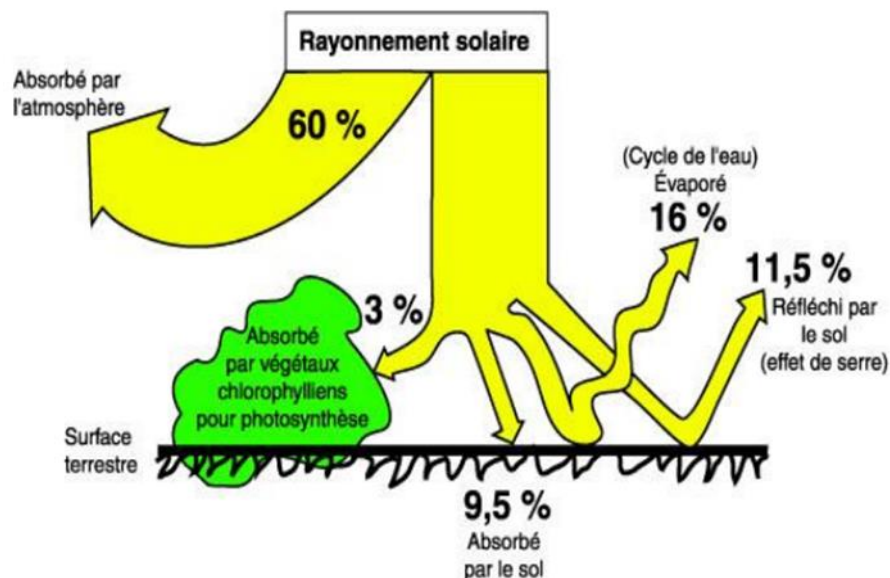


Fig.1.3. Rayonnement solaire [6].

- **Rayonnement direct**

Le rayonnement solaire reçu du soleil sans avoir été dispersés par l'atmosphère.

- **Rayonnement diffus**

Le rayonnement solaire reçu du soleil après que sa direction a été modifiée par diffusion par l'atmosphère.

- **Rayonnement solaire total**

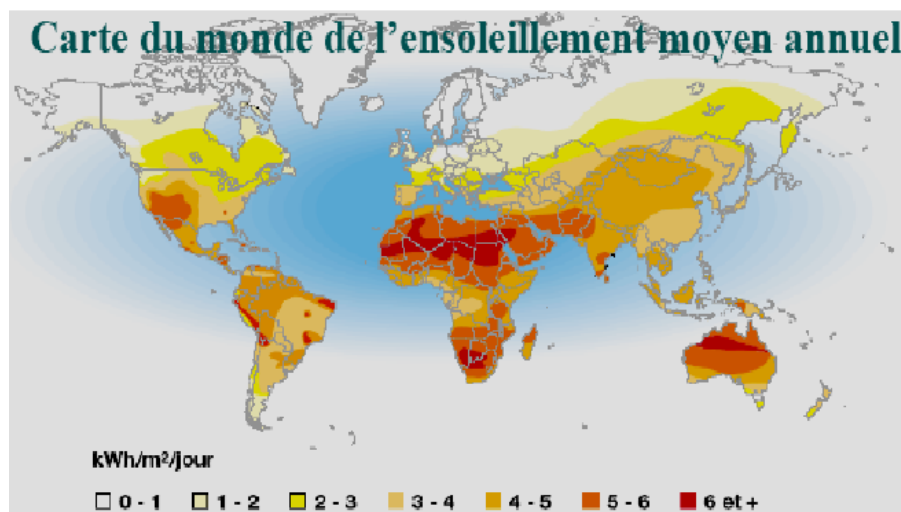
La somme du rayonnement direct et du rayonnement solaire diffus sur une surface.

- **Rayonnement solaire hors atmosphère**

Le rayonnement solaire hors atmosphère ne dépend que des paramètres astronomiques, Il est caractérisé par une donnée fondamentale appelée constante solaire.

#### 1.2.4 Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [7]. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure.



**Fig.1.4.** Carte du monde de l'enseillement moyen annuel [8].

### 1.3 Potentiel solaire en Algérie

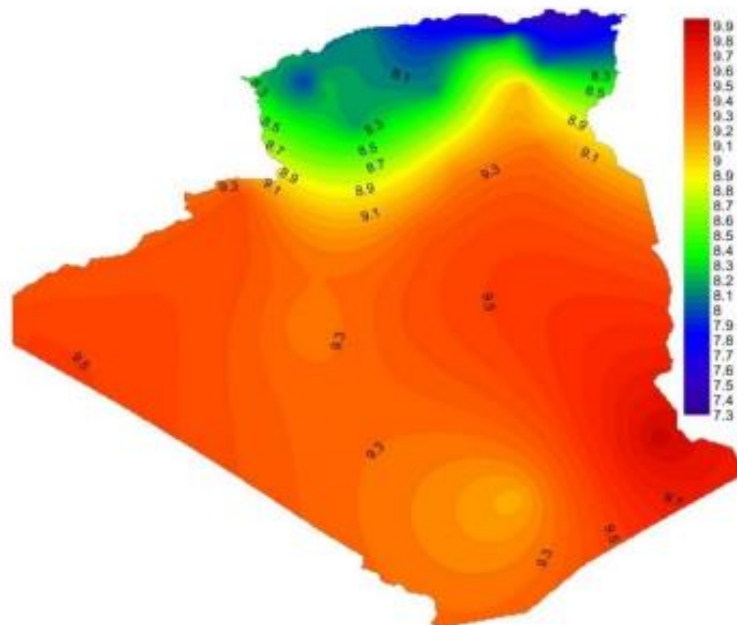
Le temps d'enseillement annuel moyen en Algérie dépasse 2 000 heures et le désert du Sahara compte près de 3 500 heures d'enseillement. L'énergie totale reçue est estimée à 13.9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque, 169 400TWh/ans pour le solaire thermique soit 5000

fois la consommation électrique annuelle du pays, avec une énergie solaire quotidienne moyenne de 6 kWh/m<sup>2</sup>/jour.

L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen.

**Tab.1.1.** Durée d'ensoleillement dans le territoire Algérien [8].

Zones géographiques	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650



**Fig.1.5.** Durée d'ensoleillement moyenne annuelle en Algérie [8].

#### 1.4 Technologie de froid solaire

La réfrigération solaire est un système dans lequel l'énergie solaire est utilisée à des fins de refroidissement.

Les pays sub-sahariens qui ont un très bon potentiel solaire peuvent appliquer la réfrigération solaire pour améliorer le coté consommation d'énergie et d'un autre côté pour stocker les médicaments et les vaccins.

La réfrigération peut être obtenue par deux méthodes : Le premier est un système d'énergie solaire basé sur le photovoltaïque (PV), dans lequel l'énergie solaire est convertie en énergie électrique et utilisée pour la réfrigération comme les méthodes conventionnelles, Le second utilise un système de réfrigération solaire thermique, dans lequel un capteur solaire chauffe directement le réfrigérant à travers les tubes collecteurs au lieu d'utiliser l'énergie électrique solaire [9].

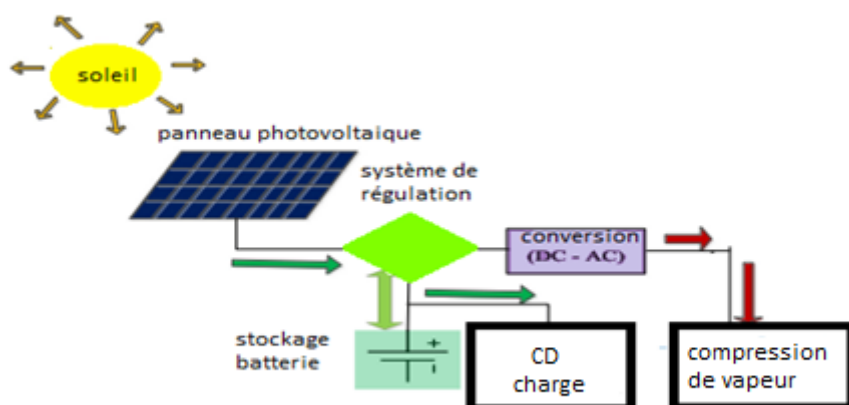
#### 1.4.1 Système de refroidissement solaire électrique

Utilisant des méthodes conventionnelles telles que la compression de vapeur, ce système de refroidissement utilise l'énergie solaire pour alimenter une cellule photovoltaïque. Cette cellule est reliée à un onduleur pour produire de l'électricité et la stocker. Ensuite, l'électricité produite est utilisée pour alimenter un groupe frigorifique. Dans ce système, des modules photovoltaïques, des onduleurs et des batteries sont nécessaires.

##### 1.4.1.1 Système de refroidissement photovoltaïque

Le rayonnement solaire reçu par les panneaux photovoltaïques est converti en électricité avant d'être utilisé pour produire du froid. Cela se fait principalement grâce à l'utilisation de systèmes de réfrigération Peltier ou de cycles de réfrigération à compression de vapeur conventionnels.

Lorsqu'un photon de la lumière solaire est absorbé par une jonction PN, une différence de potentiel est créée et les porteurs de charges commencent à circuler. Photo courant résultant est indiqué par  $I_{PV}$ , qui est mis en parallèle par une diode à jonction PN.



**Fig.1.6.** Principe des systèmes de refroidissement photovoltaïques [10].

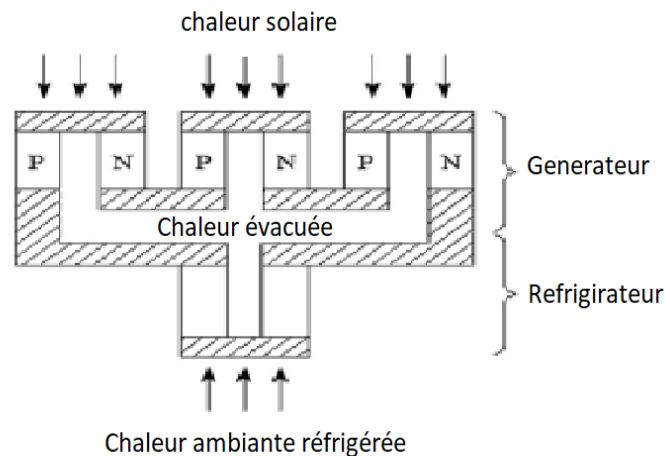
- Les cellules photovoltaïques produisent de l'énergie électrique en convertissant le rayonnement solaire en courant continu (CC).
- Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique en mode charge lorsque l'énergie solaire est disponible et pour fournir de l'énergie électrique en l'absence d'énergie solaire.
- L'onduleur est utilisé pour convertir le courant continu (CC) en courant alternatif (CA).
- L'unité de compression de vapeur est la partie qui utilise l'énergie fournie par l'onduleur pour produire du froid par le cycle conventionnel [11].

#### 1.4.1.2 Réfrigération solaire thermoélectrique

Le refroidissement thermoélectrique basé sur l'effet de Peltier (TEM) est utilisé pour produire des quantités de froid.

Son principe de fonctionnement consiste à faire passer un courant dans un thermocouple constitué de conducteurs de natures différentes reliée par un pont de cuivre.

Le système de refroidissement thermoélectrique peut fonctionner à la fois pour chauffage (pompe à chaleur) et pour réfrigération [12].

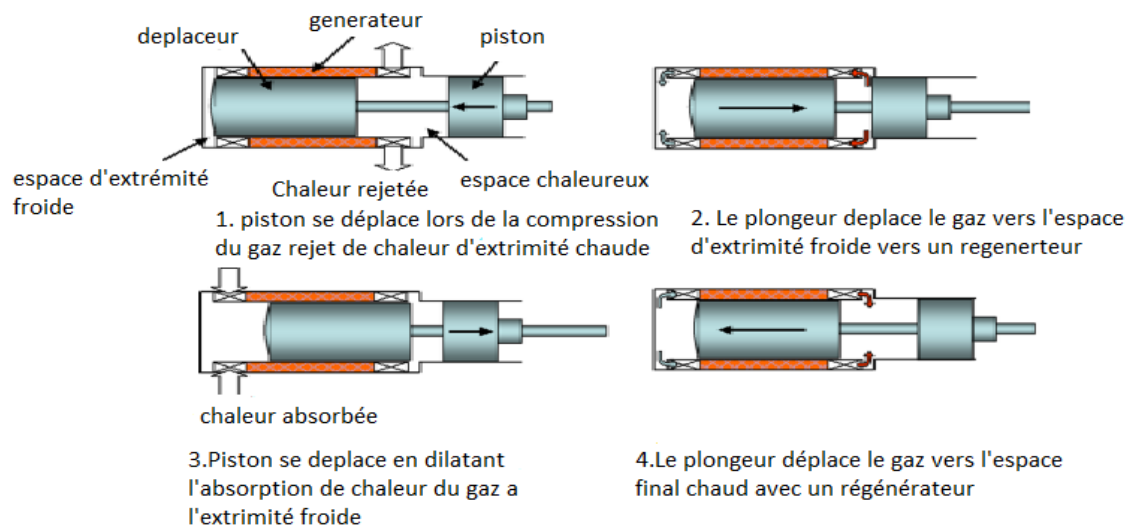


**Fig.1.7.** Schéma d'un système de refroidissement thermoélectrique [13].

#### 1.4.1.3 Systèmes de refroidissement Stirling

Les réfrigérateurs Stirling peuvent utiliser des panneaux solaires photovoltaïques pour créer du froid. Ils ont des COP inférieurs à ceux des réfrigérateurs à compression de vapeur. Un

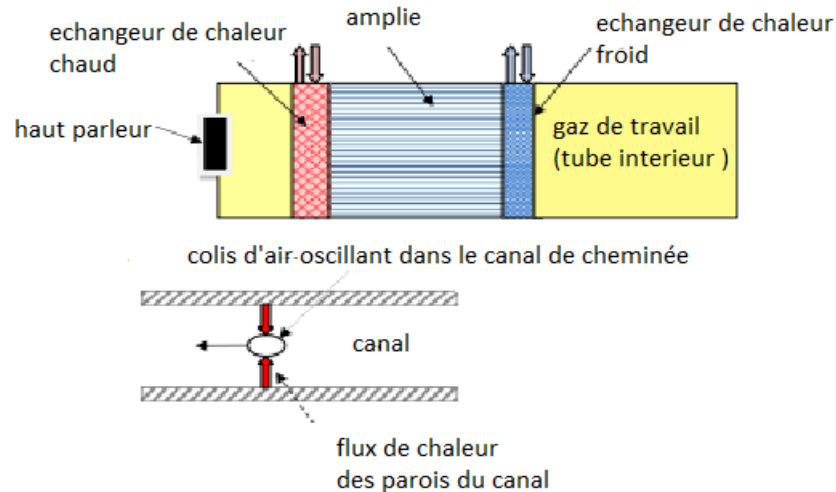
petit réfrigérateur Stirling à piston libre d'une capacité maximale de 100 W de refroidissement a eu des résultats de test qui ont été rapportés. Des difficultés pratiques dans le développement des réfrigérateurs et des climatiseurs Stirling sont apparues avec le passage de 1,6 à 0,8. Ceux-ci comprenaient une faible densité de puissance et un faible COP en raison d'un mauvais transfert de chaleur entre les fluides de travail [14].



**Fig.1.8.** Mouvements du piston et du plongeur pendant un cycle de réfrigération Stirling [15].

#### 1.4.1.4 Réfrigération thermo-acoustique

Les systèmes de réfrigération thermo-acoustique à énergie solaire photovoltaïque constituent une autre option pour la réfrigération solaire. Les systèmes de réfrigération thermo-acoustique fonctionnent en utilisant des ondes sonores et un mélange inflammable de gaz inertes (hélium, argon, air) ou un mélange de gaz dans un résonateur pour produire du froid. Les dispositifs thermo-acoustiques sont généralement caractérisés par des "ondes stationnaires" ou des "ondes progressives" [16].

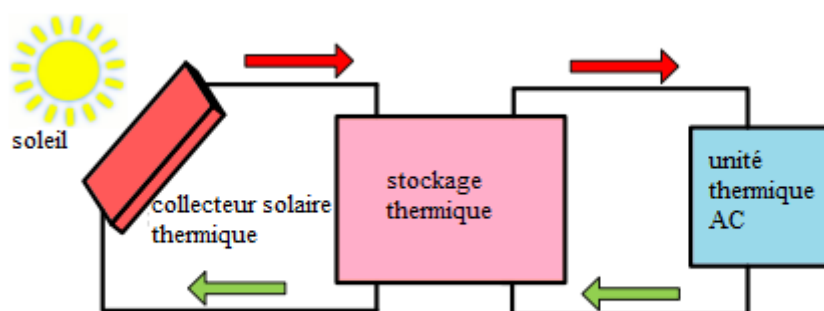


**Fig.1.9.** Système de réfrigérateur thermo acoustique [15].

#### 1.4.2 Système de refroidissement solaire thermique

La technologie de réfrigération solaire thermique est préférable et plus rentable que les technologies de réfrigération photovoltaïque car elle peut tirer davantage parti du rayonnement solaire incident. Par conséquent, la réfrigération solaire thermique est de plus en plus utilisée car les capteurs thermiques convertissent directement le rayonnement solaire incident en chaleur prête à être utilisée.

Le réservoir de stockage thermique est utilisé pour stocker les réfrigérants chauds provenant des tubes collecteurs. L'unité thermique AC est alimentée en réfrigérant chaud depuis le réservoir de stockage thermique et le réfrigérant circule dans tout le système. La technologie de sorption est l'une des techniques de réfrigération thermique. L'effet de refroidissement est obtenu à partir des changements chimiques ou physiques entre le sorbant et le réfrigérant [17].



**Fig.1.10.** Schéma de principe du système de réfrigération solaire thermique [17].

### 1.4.2.1 Sorption à cycle ouvert

Le refroidissement par adsorption à cycle ouvert peut fonctionner avec un déshydratant liquide ou solide. Le mode de fonctionnement le plus courant est le mode dit "ventilé", qui utilise de l'air frais pour le fonctionnement. Le flux d'air extérieur est déshumidifié par un déshydratant. L'air de retour, alors chaud et humide, est ensuite réchauffé par la chaleur du soleil afin de pouvoir régénérer le déshydratant [18].

#### a) Sorption des liquides

Des déshydratants liquides sont pulvérisés dans l'air pour absorber l'humidité directement de l'air de traitement. Le liquide tombe ensuite dans un puisard, est pompé et pulvérisé à nouveau dans l'air. Une petite quantité de déshydratant liquide est aspirée en continu du puisard dans le régénérateur pour éliminer l'eau récupérée.

Lorsque la solution déshydratante liquide retourne dans la cellule du régulateur, elle est plus sèche, plus concentrée et toujours à une pression de vapeur et une température élevée. Le déshydratant liquide est refroidi à la température souhaitée par une tour de refroidissement avant d'être pulvérisé dans l'air.

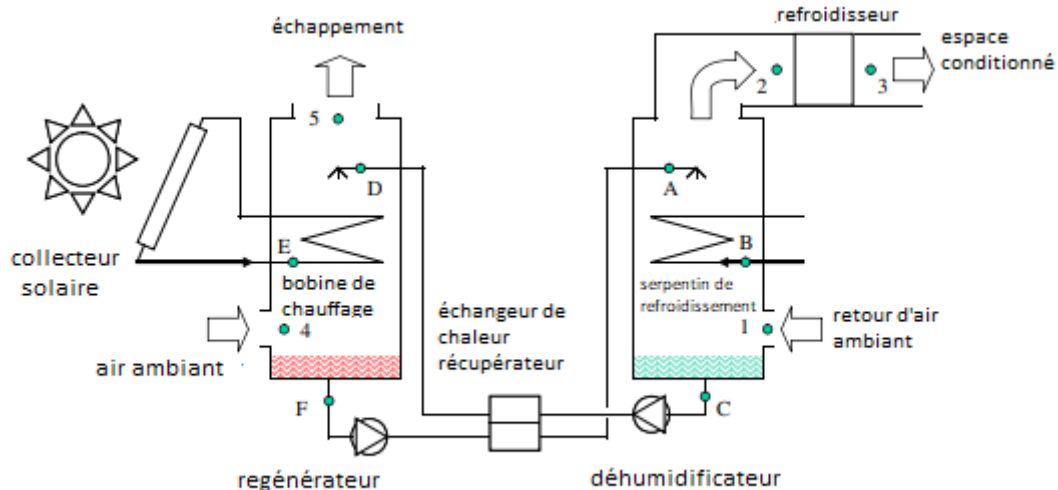
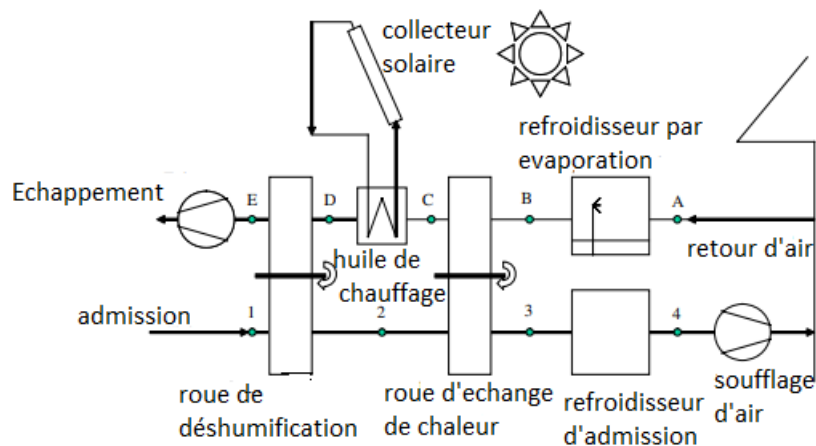


Fig.1.11. schématique du système de sorption solaire liquide [19].

### b) Sorption solide

La roue de dessiccation tourne lentement entre les flux d'air de traitement et de régénération. Il est divisé en deux parties, l'air de régénération et l'air de traitement. L'air de traitement passe à travers la première section de la turbine où l'humidité est éliminée en raison de la pression partielle de vapeur plus faible dans le matériau dessiccant. Le processus de déshydratation augmente la température de séchage de l'air de traitement.



**Fig.1.12.** Système frigorifique à déshydratant solide équipé de capteurs solaires pour la régénération de la roue dessiccante [19].

### c) Système de refroidissement solaire par dessiccation

Le système réduit l'humidité de l'air ambiant en utilisant l'énergie thermique reçue par les capteurs solaires thermiques. L'air est ensuite refroidi par la centrale de traitement d'air.

#### 1.4.2.2 Sorption à cycle fermé

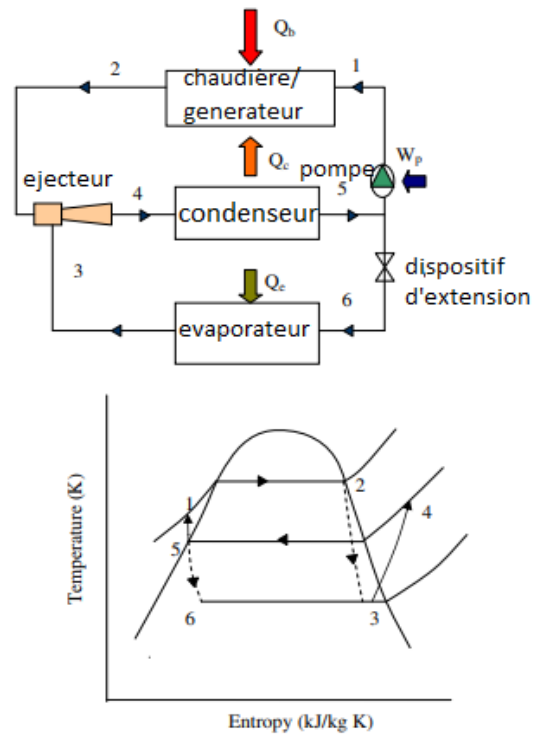
Les systèmes de sorption à cycle fermé sont classés en deux catégories selon la nature du matériau de sorption : liquide et solide. La sorption liquide à cycle fermé est représentée par des cycles d'absorption, tandis que la sorption solide à cycle fermé est donnée par des cycles d'adsorption. Une autre technologie de réfrigération solaire thermique à cycle fermé est la réfrigération thermomécanique.

### a) Système thermo-mécanique

Dans le système de refroidissement solaire thermomécanique, l'énergie thermique est convertie en énergie mécanique. Ensuite, l'énergie mécanique est utilisée pour produire l'effet de réfrigération. Cycle d'éjection de la vapeur. Le cycle d'éjection de la vapeur représente le système de refroidissement thermomécanique. Contient deux boucles : la boucle d'alimentation et la boucle de réfrigération.

Dans la boucle d'alimentation, la chaleur  $Q_g$  est utilisée dans le générateur pour évaporer le réfrigérant liquide à haute pression. La vapeur générée à haute pression, également appelée fluide primaire, s'écoule vers l'éjecteur et est accélérée vers la buse. La réduction de la pression induit une vapeur provenant de l'évaporateur, appelée fluide secondaire. Les deux fluides sont mélangés dans la chambre de mélange avant d'entrer dans la section du diffuseur où le fluide a décéléré et la pression a augmenté. Le fluide est acheminé vers le condenseur où il est condensé en rejetant de la chaleur vers l'environnement extérieur.  $Q_c$ . Une partie du liquide est pompée vers le générateur pour relancer le cycle de production d'énergie. Le reste du liquide est détendu après avoir subi une expansion par un détendeur et entre dans l'évaporateur de la boucle de réfrigération. Le réfrigérant s'est évaporé en produisant du froid  $Q_e$  la vapeur qui en résulte est dirigée vers l'éjecteur.

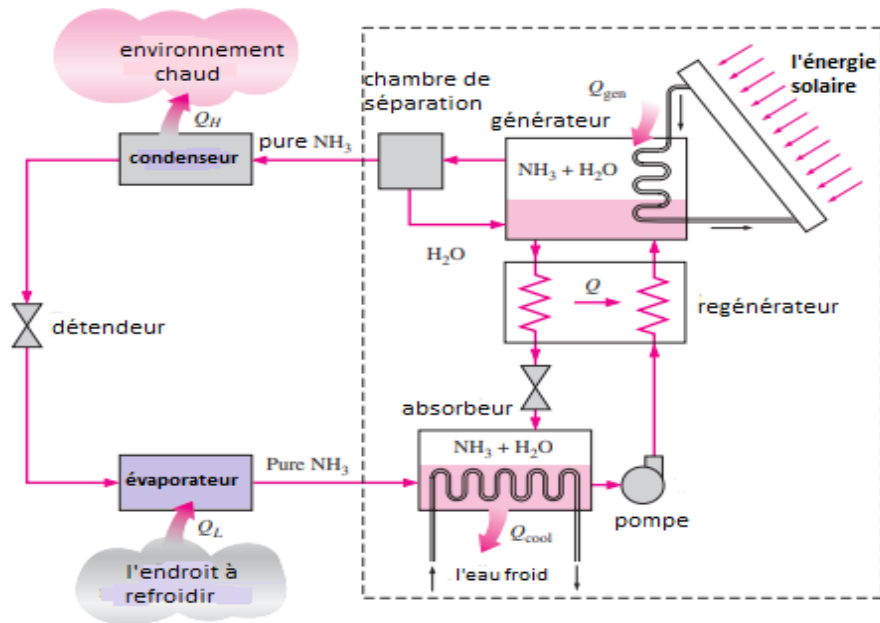
Le réfrigérant est mélangé au fluide primaire dans l'éjecteur et le cycle recommence. Le schéma du système et le processus de fonctionnement sont présentés dans les figures suivantes.



**Fig.1.13.** Schéma et diagramme T-s du système de réfrigération à éjecteur [15].

### b) Refroidissement par absorption solaire

Ce système ressemble au système de compression de vapeur, sauf que le compresseur a été remplacé par un mécanisme d'absorption composé d'un absorbeur, d'une pompe, d'un générateur et d'un régénérateur, comme le montre la figure.



**Fig.1.14.** Système de réfrigération par absorption solaire [20].

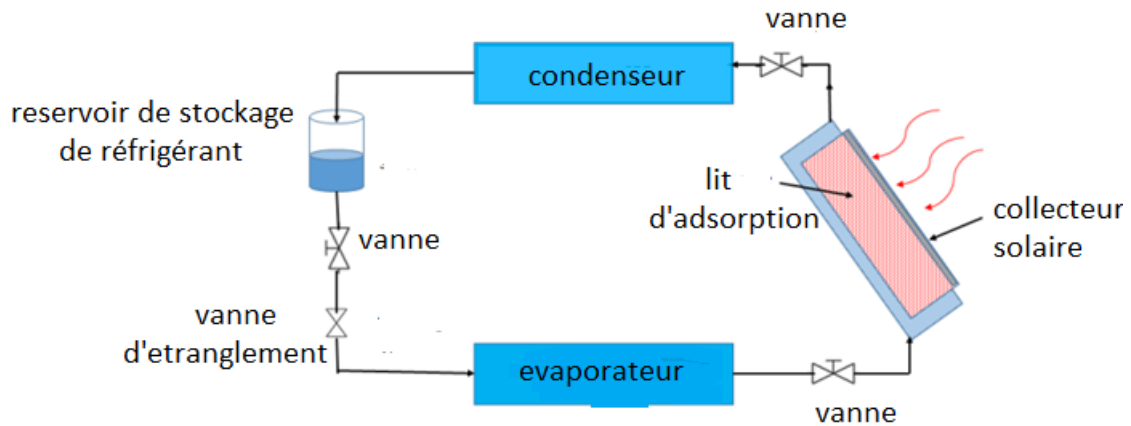
Le principe est décrit comme suit, en prenant NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O comme couple de travail [21].

- Une pompe amène la solution riche dans la zone de haute pression.
- Le mélange est chauffé dans le générateur. Un apport de chaleur (énergie solaire) permet la séparation du réfrigérant (NH<sub>3</sub>) de l'absorbant (solution H<sub>2</sub>O).
- La vapeur du fluide frigorigène est envoyée dans le cycle traditionnel du condenseur, du détendeur et de l'évaporateur. Le froid est produit par l'évaporation du réfrigérant dans l'évaporateur à basse pression.
- La solution faible retourne à l'absorbeur via une soupape de décharge.
- La vapeur de réfrigérant est absorbée par la solution absorbante du générateur. Le cycle peut recommencer

### 1.4.3 Réfrigération par adsorption solaire

La technologie de la réfrigération a été utilisée dans plusieurs domaines tels que les processus de purification et de séparation et la réfrigération thermique, qui a de nombreuses applications comme la climatisation, la fabrication de glace et la réfrigération. Le système de réfrigération par adsorption solaire est considéré comme la deuxième grande technologie de réfrigération solaire thermique après l'absorption.

Le processus d'adsorption diffère du processus d'absorption en ce que l'absorption est un phénomène volumétrique, tandis que l'adsorption est un phénomène de surface [17].



**Fig.1.15.** Configuration de base d'un système de réfrigération par adsorption solaire [22].

## 1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a conclu que les technologies de refroidissement solaire par adsorption sont utilisées pour produire une large gamme de température cryogénique.

Dans le chapitre suivant, nous nous consacrons sur l'étude thermodynamique du phénomène d'adsorption en plus de définir certains modèles cela fera l'objet d'une recherche ou d'une analyse d'une machine à adsorption.

# **Chapitre 2**

## **Thermodynamique de l'adsorption**

## Chapitre 2

### Thermodynamique de l'adsorption

#### 2.1 Introduction

Le phénomène d'adsorption a une très grande importance dans l'étude analytique des machines frigorifiques à adsorption, nous allons dédier ce chapitre aux études thermodynamique de ce phénomène avec ces différents aspects.

Un autre aspect très important dans l'étude des phénomènes d'adsorption, notamment des réfrigérateurs est le choix du couple adsorbant/adsorbat. Ce choix est dicté par certains critères physiques et chimiques reliées au couple lui-même et aux conditions de fonctionnement des machines.

#### 2.2 Principe de l'adsorption

Le phénomène d'adsorption a été décrit pour la première fois par Fantana et Schelle en 1711, L'adsorption est un fluide (gaz ou liquide). Connue sous le nom d'adsorbat en général ou de réfrigérant en cours de génération d'air froid. Se fixe à une surface solide appelée adsorbant. Le terme surface du solide correspond à la totalité des surfaces externes et internes engendrées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur de l'adsorbant. L'adsorption des gaz par les solides comporte trois étapes principales (Figure.2.2) :

- La phase gazeuse constituée de molécules de gaz.
- La phase d'adsorption (adsorbat) formée par les molécules adsorbées en surface.
- La Phase solide qu'est l'adsorbant [23].

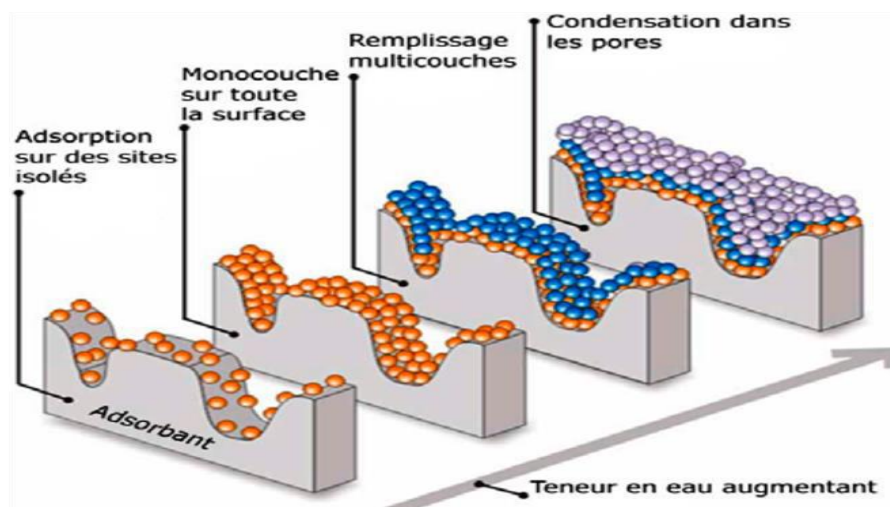


Fig.2.1. Phénomène d'adsorption [24].

## 2.3 Types d'adsorption

Les études du phénomène d'adsorption ont montré que sa nature varie d'un cas à l'autre. En général, on distingue deux types d'adsorption, qui diffèrent par leurs propriétés d'énergie pour réparer et fonctionner.

### 2.3.1 Adsorption chimique (chimisorption)

L'adsorption chimique est caractérisée par la forte liaison chimique entre l'adsorbat et l'adsorbant. Elle est donc plus difficile à inverser et nécessite donc plus d'énergie pour éliminer les molécules adsorbées que dans l'adsorption physique [25].

La chaleur d'adsorption mise en jeu est en général assez grande, dépassant les 80 KJ/mole. L'adsorption chimique est souvent irréversible (ou difficilement réversible) et favorisée par une haute température.

L'adsorbant chimique le plus communément utilisé dans les applications de refroidissement solaire est le chlorure de calcium ( $\text{CaCl}_2$ ). Le chlorure de calcium adsorbe l'ammoniac pour produire du  $\text{CaCl}_2 \cdot 8\text{NH}_3$  et de l'eau pour produire du  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  [25].

### 2.3.2 Adsorption physique (physisorption)

L'adsorption physique ou bien la physisorption, le processus résulte par des liaisons physiques plus faible, avec des énergies d'interaction de l'ordre 2 kJ/mole, qui ne modifie pas la nature chimique de la molécule de l'adsorbant.

Cette fixation des molécules de fluide sur des surfaces solides est principalement réalisée par les forces de Van der Waals et les forces dues aux interactions électrostatiques polarisées. Cette liaison faible des molécules d'adsorbat sur le solide n'entraîne aucune modification de la structure moléculaire du solide, mais une simple modification de sa masse. La physisorption est donc totalement réversible, c'est-à-dire que les molécules adsorbées se désorbent facilement en augmentant la température. La transition d'état du fluide de la phase gazeuse à la phase adsorbée se produit à pression et température constantes.

Ce phénomène s'accompagne d'un dégagement de chaleur s'appelle chaleur isostérique d'adsorption. Il met en jeu deux types d'interactions :

- Les interactions adsorbant/adsorbat (entre le solide et les molécules adsorbées).
- Les interactions adsorbat/adsorbat (entre les différentes molécules adsorbées) [26].

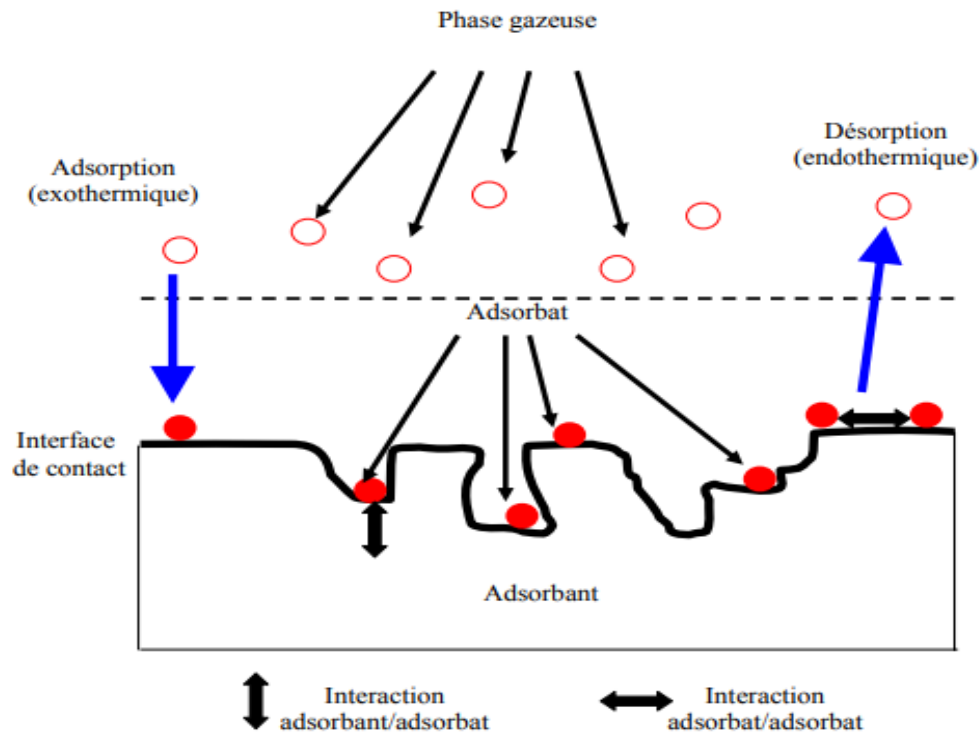


Fig.2.2. Schéma explicatif des deux types d'interactions [27].

## 2.4 Isothermes d'adsorption

L'état thermodynamique d'un couple (adsorbant-adsorbat) est caractérisé par une relation entre trois grandeurs : masse ( $x$ ), pression ( $P$ ) et température ( $T$ ).

La détermination de la forme de cette relation est relatée dans la littérature traitant de la thermodynamique de l'adsorption.

On peut constater que l'équilibre peut être décrit de trois façons :

- L'isotherme d'adsorption  $x=f(P)T$
- L'isobare d'adsorption  $x=f(T)P$
- L'isostère d'adsorption  $P=f(T)x$

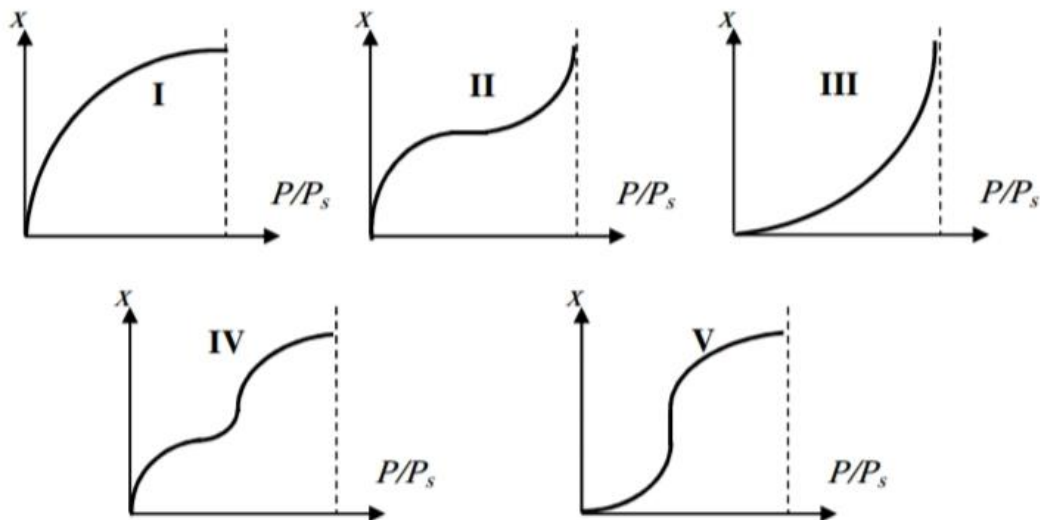
Les isothermes d'adsorptions présentées ont des formes variables et peuvent être regroupées en cinq types selon leur allure globale d'après la classification de Brunauer, Emmet et Teller [28], présentés dans la Figure.2.3.

- **Type I** : Isotherme de Langmuir qui représente les cas d'adsorption mono moléculaire (Monocouche).
- **Type II** : C'est l'isotherme la plus fréquemment rencontrée, quand l'adsorption se produit sur des surfaces non microporeuses ou ayant des macropores, elle est

caractéristique d'une Supériorité de l'attraction par l'adsorbant vis-à-vis des attractions intermoléculaires de l'adsorbat.

- **Type III** : Ces type représente le phénomène d'adsorption dans lequel l'interaction entre l'adsorbant et les molécules adsorbée est faible par rapport aux interactions adsorbat-adsorbat, mais suffisante pour accroître la tendance des molécules à s'accumuler à la surface de l'adsorbant.

Généralement, les isothermes **I**, **II** et **III** sont réversibles où la désorption suit la même courbe que d'adsorption [29].

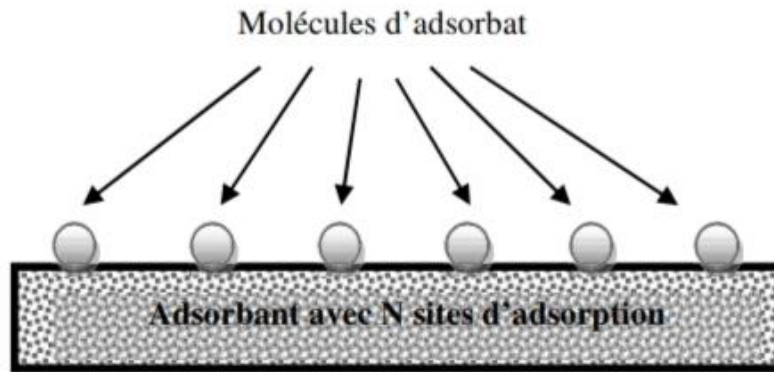


**Fig.2.3.** Différents types d'isothermes d'adsorption [29].

### 2.4.1 Modèle de Langmuir

Langmuir en 1916 développé le modèle d'adsorption mono moléculaire fondé sur des bases théoriques en faisant les hypothèses suivantes [30].

- La chaleur d'adsorption est la même pour toutes les molécules de l'adsorbat.
- Les interactions intermoléculaires de la phase adsorbée sont négligeables.
- L'adsorption de produit en une seule couche (Figure.2.4).



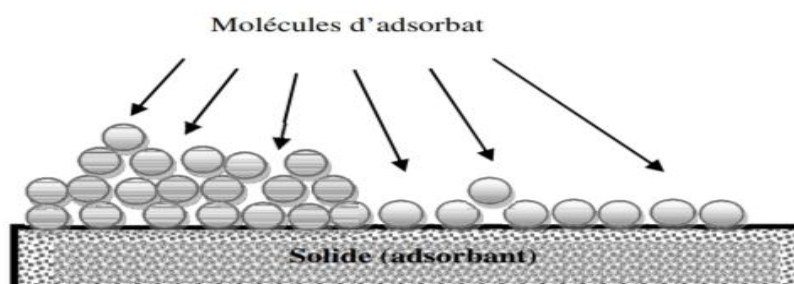
**Fig.2.4.** Modèle d'adsorption en monocouche [30].

#### 2.4.2 Modèle de Brunauer, Emmet et Teller (B, E, T)

Elle est basée sur l'hypothèse que l'adsorbant est recouvert de couches multimoléculaires (Multicouches), ces auteurs B.E.T ont utilisé le postulat de Langmuir en supposant que :

- La chaleur d'adsorption dégagée à chaque couche, exceptée pour la monocouche, est Égale à la chaleur molaire de condensation.
- Excepté pour la monocouche, les conditions d'évaporation-condensation à la surface Libre sont identiques.
- A la pression de saturation  $P_s$ , l'adsorption est entièrement due à la condensation Capillaire.

Les interactions gaz-gaz et gaz-solide sont prises en considération et chaque molécule Adsorbée dans une couche est un site d'adsorption pour une molécule de la couche suivante (Figure.2.5) [27].

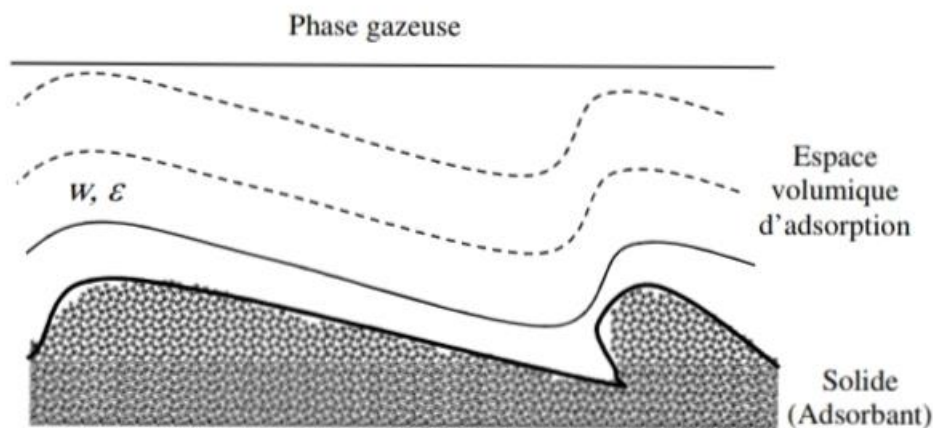


**Fig.2.5.** Modèle d'adsorption en multicouches [31].

### 2.4.3 Modèle thermodynamique

Il s'agit de modèle où le concept de recouvrement en surface, dans le modèle moléculaire, est remplacé par la notion de remplissage en volume des pores notamment pour les adsorbants contenant un grand nombre de micropores avec l'application de la théorie du potentiel de POLANYI [32].

Avec cette approche, on considère que les interactions entre les molécules d'adsorbat et la Surface d'adsorbant sont déterminées par un champ de potentiel et que le volume d'adsorbat  $w$  est uniquement une fonction du potentiel de ce champ (Figure.2.6) :



**Fig.2.6.** Phénomène d'adsorption selon le modèle de POLANYI [31].

## 2.5 Chaleur d'adsorption

On a vu que le processus d'adsorption est exothermique, ça veut dire qu'il est accompagné avec un dégagement de chaleur appelé la chaleur isostérique.

Les trois termes utilisés dans le processus d'adsorption sont :

- La chaleur intégrale d'adsorption qui est la chaleur totale libérée par l'adsorption de l'état initial à l'état final à température constante.
- La chaleur différentielle de l'adsorption est le changement de la chaleur intégral d'adsorption avec le changement de la charge.
- La chaleur isostérique définit par l'utilisation des isostères d'adsorption et la relation de Clausius Clapeyron.

L'application du deuxième principe de la thermodynamique donne [33] :

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \quad (2.1)$$

Avec  $\Delta H$  est l'enthalpie ou chaleur isostérique d'adsorption,  $\Delta G$  est l'enthalpie libre de GIBBS ( $\Delta G < 0$ ) et ( $\Delta S < 0$ ) est l'entropie du gaz qui vient du perdre des degrés de libertés.

La chaleur isostérique d'adsorption peut être exprimée comme la somme de deux termes Donnée dans l'équation suivante :

$$\Delta H = \Delta H(\text{con}) + \Delta H(\text{adhésion}) \quad (2.2)$$

$\Delta H(\text{con})$  : l'enthalpie de condensation qui concerne les propriétés de l'adsorbat.

$\Delta H(\text{adhésion})$  : l'enthalpie d'adhésion qui caractérise les interactions adsorbant/adsorbat.

D'autre part, la chaleur isostérique est donnée par la relation Clausius Clapeyron suivante [33] :

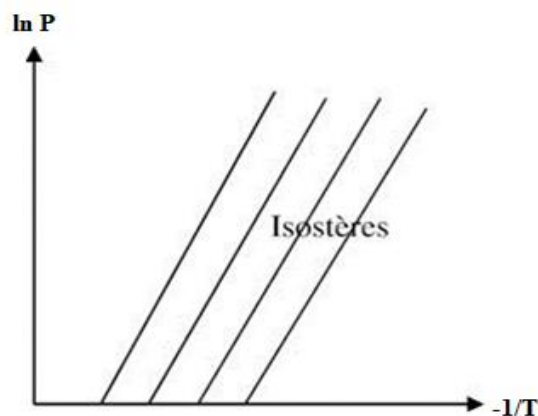
$$\left[ \frac{dP}{dT} \right] = \frac{\Delta H}{T\Delta V} \quad (2.3)$$

L'équation précédente se réduit à l'expression suivant :

$$\left[ \frac{d \ln P}{dT} \right] = \frac{\Delta H}{RT^2} \quad (2.4)$$

Avec  $C$  est la constante d'intégration.

Graphiquement, la constante d'intégration peut être déduite à partir du graphe de Clapeyron montré dans la figure suivante :



**Fig.2.7.** Détermination de la chaleur isostérique d'adsorption [2]

## 2.6 Application pratique de l'adsorption

Depuis les anciens temps, la science de l'adsorption a été appliquée pour exploiter ces caractéristiques dans la vie quotidienne et plus tard généralisé dans des applications industrielles. Cette partie est consacrée pour présenter certains domaines, orientations et exemples importants des applications de l'adsorption.

### 2.6.1 Applications industrielles

Séparation et purification de mélanges liquides et gazeux, de produits chimiques, d'isomères et d'air. On cite quelques exemples tels que :

➤ Les masques à gaz : Les masques à gaz sont utilisés comme dispositifs de protection contre les gaz toxiques tels que le méthane ( $\text{CH}_4$ ), le chlore ( $\text{Cl}_2$ ), le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ), etc., contiennent des adsorbants appropriés. Les adsorbants adsorbent préférentiellement les gaz toxiques et purifient ainsi l'air utilisé pour la respiration. La forme courante de masque à gaz contient une couche de charbon actif qui adsorbe les gaz toxiques.

➤ Application de l'adsorption dans la teinture : En teinture, les vêtements sont d'abord maintenus trempés dans un mordant (généralement de l'alun) puis dans la solution du colorant. Le mordant est d'abord adsorbé sur les vêtements, puis le colorant est adsorbé sur le mordant. Le mordant adhère bien à la fibre et au colorant.

➤ L'adsorption dans l'adoucissement de l'eau dure : L'eau contenant des sels dissous de calcium et de magnésium est appelée eau dure. L'eau dure est généralement adoucie en utilisant des résines échangeuses d'ions. L'utilisation de ces résines est basée sur les principes de l'adsorption sélective à partir de la solution. Ces résines adsorbent la dureté produisant des ions de l'eau dure et la rendent douce. De même, dans le processus de permis, la zéolithe utilisée adsorbe les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) présents dans l'eau dure et la rend douce.

➤ Application de l'adsorption dans l'industrie pharmaceutique : Certains médicaments peuvent absorber les germes qu'ils contiennent et donc les tuer et nous sauver des maladies. Le charbon actif, l'oxyde de magnésium, l'acide tannique, etc. sont utilisés pour l'absorption de substances toxiques et toxiques. L'adsorption est également utilisée dans la préparation de la vitamine B1, la filtration bactérienne, l'adsorption Pharmaceutique, etc.

➤ Application de l'adsorption dans la clarification du sucre : Le sucre est décoloré en traitant une solution de sucre avec de la poudre de charbon de bois. Ce dernier absorbe les couleurs indésirables présentes.

➤ Application de l'adsorption dans la séparation des gaz nobles : Un mélange de gaz rares est généralement séparé en l'adsorbant sur du charbon actif. La séparation est basée sur la différence de degré d'adsorption de ces gaz par le charbon de bois.

➤ Application de l'adsorption dans l'analyse chromatographique : L'adsorption sélective de certaines substances d'une solution par un adsorbant solide particulier est utilisée pour séparer le composant du mélange lors d'une analyse chromatographique.

### 2.6.2 Applications environnementales

L'application principale concernée est le traitement des eaux, par l'élimination des polluants chimiques organiques synthétiques contenant dans l'eau potable tels que les pesticides,

Herbicides, détergents, hydrocarbures aromatiques polycycliques, et les métaux lourds tels que Cd, Cr, Hg, Cu, Fe, V, Zn.

La procédure consiste à utiliser le charbon actif où le charbon actif granulaire pour adsorber ces constituants en améliorant le goût et l'odeur de l'eau.

### 2.6.3 Applications d'adsorption à pompe à chaleur et froid

Pour des raisons énergétiques, écologiques, le domaine de chauffage et climatisation vise principalement à trouver des solutions alternatives aux machines à compression de vapeur à cause de la grande consommation de l'énergie électrique et l'utilisation des réfrigérants polluants. Grâce à ses caractéristiques données dans le domaine de la production du froid, des nouvelles recherches ont proposés la technologie des machines à adsorption comme solution alternative aux systèmes à compression de vapeur.

La production du froid par adsorption peut être alimenté par les installations de cogénération en exploitant la chaleur perdue pour produire du froid, comme peut être alimenté par de l'énergie solaire.

## 2.7 Conclusion

La science de l'adsorption a une longue histoire et qui a été connu depuis l'antiquité, mais grâce à la théorie actuelle de l'adsorption et ses applications basés sur les travaux fondamentaux de Langmuir ont développés cette science dans les dernières années.

L'existence de la science de l'adsorption est due à deux faits principaux qui sont :

- La grande complexité liée aux phénomènes d'adsorption aux différentes interfaces
- L'importance de l'adsorption et son énorme utilité dans la nature, y compris les produits de la vie quotidienne, les applications industrielles et environnementales.

Ce chapitre a été consacré pour l'étude théorique du phénomène d'adsorption, cela compris un état de l'art de la science d'adsorption théorique et expérimentale connu depuis l'antiquité et les principaux modèles d'isothermes avec classification, ainsi que les applications pratiques de l'adsorption. L'une des applications majeures de l'adsorption est la climatisation et la production du froid, cela peut être entraîné avec de l'énergie solaire : c'est l'objectif d'étude dans le prochain chapitre.

# **Chapitre 3**

## **Modélisation des machines frigorifiques a adsorption solaire (cycle de base)**

## Chapitre 3

### Modélisation des machines frigorifiques à adsorption solaire (cycle de base)

#### 3.1. Introduction

A l'heure actuelle, la technologie nous offre une variété de façons permettant d'obtenir le froid. Le choix d'un système passe par l'étude d'un ensemble de critères menant à la sélection du système le mieux adapté à l'application envisagée.

Dans ce chapitre nous nous intéressons à présentation du principe de fonctionnement d'une machine, et la modélisation thermodynamique d'une machine frigorifique solaire à adsorption.

#### 3.2. Machines frigorifiques solaire à adsorption

##### 3.2.1. Principe de fonctionnement

L'adsorption est une réaction qui se produit entre l'adsorbant et l'adsorbat, cette réaction est caractérisée par des molécules attachées à une surface. Selon les instructions d'installation ci-dessus, le principe de fonctionnement de cette machine pour la production de froid peut être décrit comme suit [34 ,35].

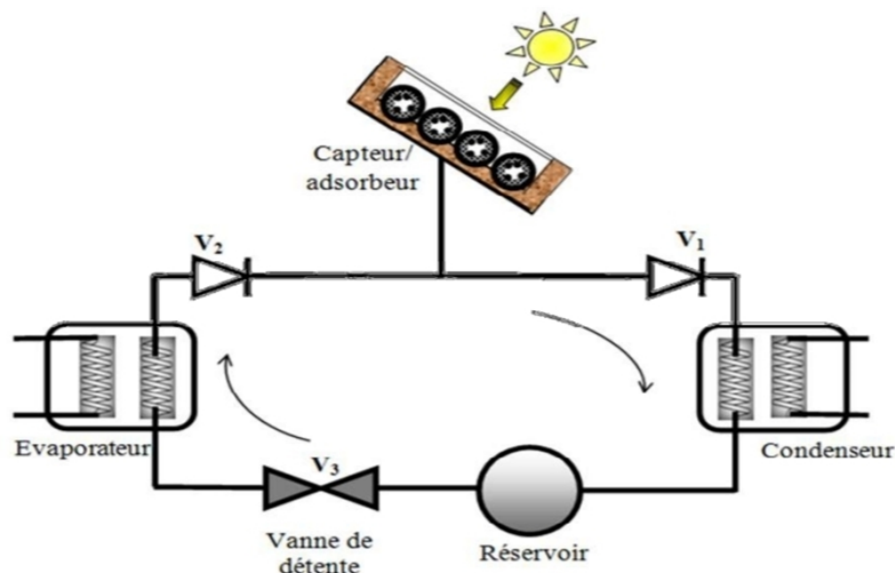
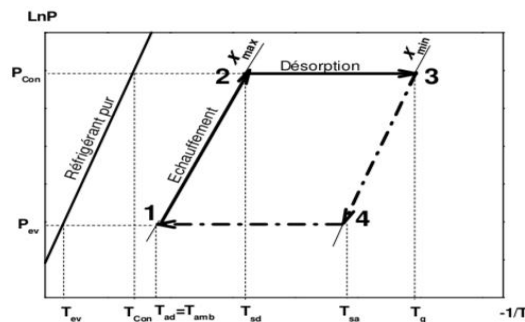
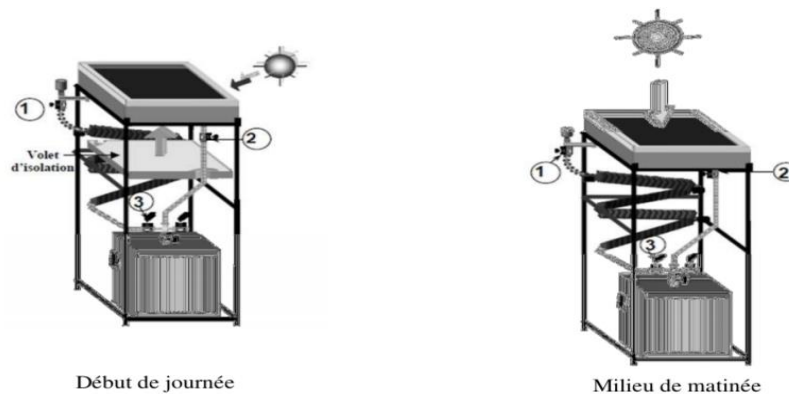


Fig.3.1. Schéma d'une machine solaire à adsorption [34].

Au lever du soleil, le capteur/adsorbeur solaire est situé a basse température  $T_{ad}$  est égale à la température ambiante ( $T_{ad}=T_{amb}$ ) et la pression correspond à la pression de saturation  $P_s$  du méthanol a la température d'évaporateur  $T_{ev}$ .

A ce stade, la vanne et le volet d'isolation du capteur/adsorbeur sont fermés. Le panneau solaire chauffe le capteur/adsorbeur en augmentant progressivement sa température ce qui entraine une élévation de la pression de vapeur de l'adsorbat dans l'adsorbeur, tandis que la masse totale du l'adsorbat adsorbé reste constant. Cette phase est équivalente à la compression dans le cycle de compression classique.

Au milieu de la matinée, lorsque la pression dans le capteur/adsorbeur atteint la pression de saturation correspondant à la température du condensateur  $T_c$  la vanne 1 est ouverte. Le processus de désorption démarre et les vapeurs de l'adsorbat se condensent dans le condensateur. L'énergie solaire reçue par le capteur/adsorbeur sert à augmenter sa température et à la désorption d'adsorbat contenu dans l'adsorbant.



**Fig.3.2.** Phase échauffement et désorption [34].

En fin de l'après-midi le flux solaire diminue, on ferme la vanne 1 et on retire l'isolation arrière du collecteur/adsorbeur. Dans ce dernier, la température diminue selon les isobares (3-4), cela provoque une chute de pression pour atteindre la pression de l'évaporateur. Les

condensats ont été totalement transférés dans l'évaporateur au travers de la vanne de a la détente. Cette vanne est ensuite fermée pour isoler l'évaporateur du condenseur et on ouvre la vanne 2. La nuit le capteur/adsorbeur est refroidie par convection naturelle avec l'air ambiant, la pression diminue et fini par atteindre la pression de saturation  $P_s$  correspondant a la température évaporateur  $T_{ev}$ .

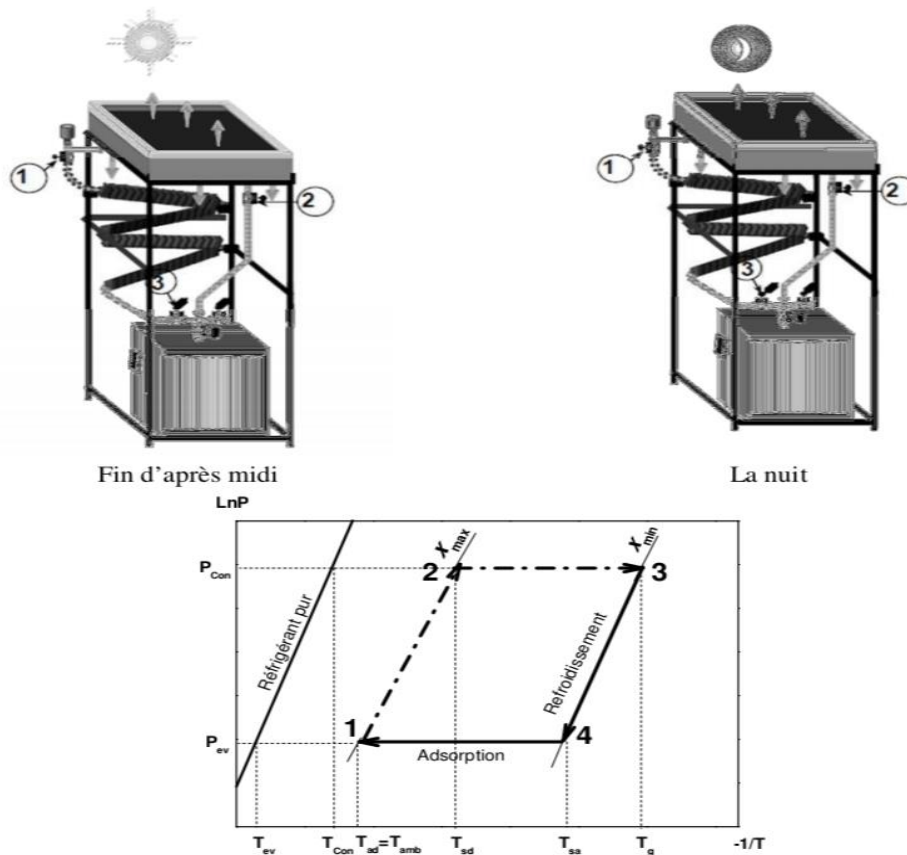


Fig.3.3. Phase de refroidissement et adsorption [34].

### 3.2.2. Processus

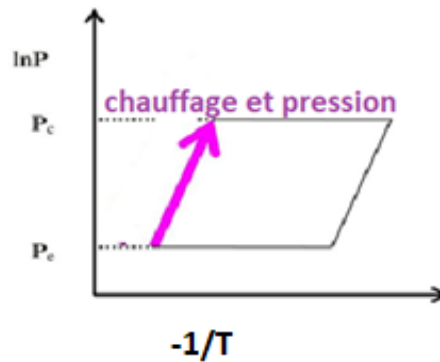
Le cycle d'adsorption comprend 4 processus, dont 2 sont des processus isostérique et les 2 autres des processus isobariques. Le cycle est illustré par le diagramme de Clapeyron. Les processus du cycle d'adsorption de base sont les suivants :

- 1- Chauffage isostérique (processus 1-2)
- 2- Chauffage isobare (processus 2-3)

3-Refroidissement isostérique (procédé 3-4)

4-Refroidissement isobare (procédé 4-1)

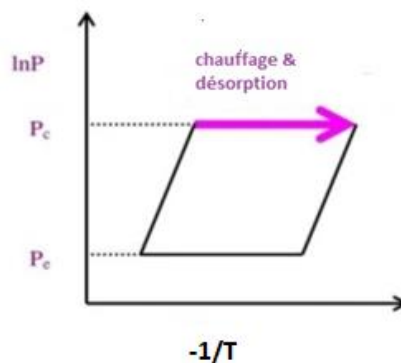
1-Chauffage isostérique Procédé 1-2



**Fig.3.4.** Processus de chauffage et de pressurisation [36].

Il s'agit du processus de chauffage et de pressurisation. Le processus commence au point 1, lorsque l'adsorbant est à la température d'adsorption et à une faible pression (pression d'évaporation), et que l'adsorbat est à forte concentration. La vanne qui isole le condenseur de l'évaporateur est fermée et, à mesure que la chaleur est appliquée à l'adsorbant, la température et la pression augmentent le long de la ligne isostérique 1-2, tandis que la masse de réfrigérant adsorbé reste constante à la valeur maximale [36].

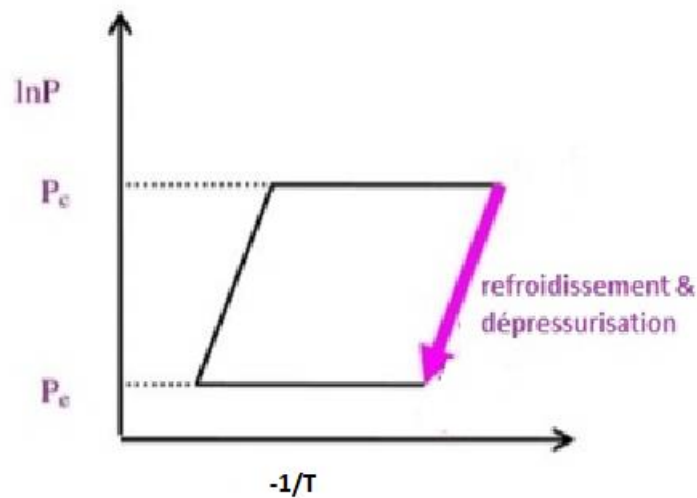
2-Chauffage isobare Procédé 2-3



**Fig.3.5.** Processus de chauffage et de désorption [36].

Au point 2, la pression atteinte est celle du condenseur et le processus de désorption commence. Au cours de ce processus, la température est progressivement augmentée sous pression constante. La vapeur de fluide frigorigène est libérée de l'adsorbant, puis liquéfiée (libérant la chaleur de condensation) à la température de condensation dans le condenseur, puis collectée dans le réservoir de réception. Cette étape se termine lorsque l'adsorbant a atteint sa température de régénération maximale et que la concentration en l'adsorbat est tombée à un minimum [36].

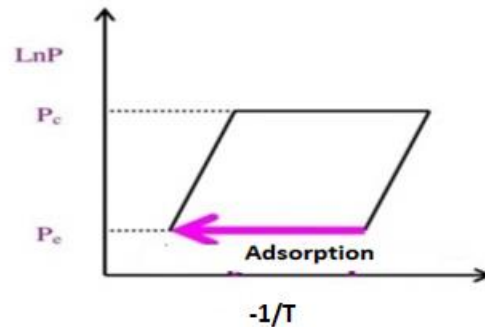
### 3-Refroidissement isostérique Processus 3-4



**Fig.3.6.** Processus de refroidissement et de dépressurisation [36].

Au cours de ce processus, l'adsorbant se refroidit le long de la ligne de isostérique 3-4, tandis que le réfrigérant adsorbé reste à la concentration la plus faible. Pendant cette phase, la vanne s'ouvre, le réfrigérant s'écoule dans l'évaporateur et la pression du système chute atteindre la pression de l'évaporateur [36].

### 4-Refroidissement isobare Procédé 4-1

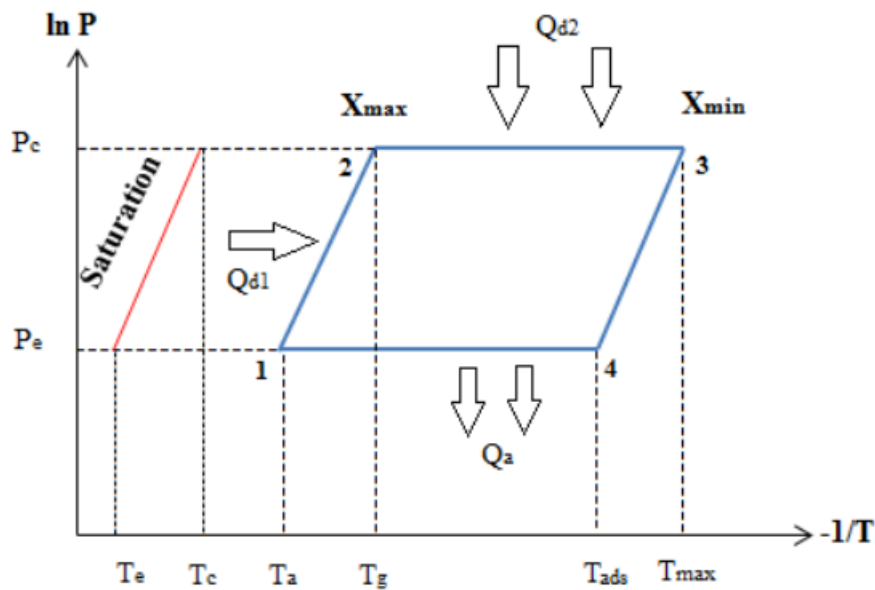


**Fig.3.7.** Processus de refroidissement et d'adsorption [36].

Au cours de ce processus, une étape d'adsorption-évaporation **4-1** se produit, ce qui produit un effet de refroidissement dans l'évaporateur à la température d'évaporation. À ce stade, le réfrigérant vaporisé dans l'évaporateur s'écoule vers le lit d'adsorption, où il est adsorbé jusqu'à ce qu'il atteigne la concentration maximale, point **1**. Dans cette étape, l'adsorbant est refroidi pour atteindre la température d'adsorption, et la chaleur sensible et la chaleur d'adsorption sont évacuées. À la fin de cette phase, la vanne se ferme (pour éviter une condensation ultérieure dans l'évaporateur) et le cycle recommence [36].

### 3.2.3. Cycle thermodynamique

Dans le cadre de l'optimisation des refroidisseurs solaires à adsorption, une étude thermodynamique des cycles de bases associés à cette machine est nécessaire. La figure montre l'installation des principaux composants de la machine d'adsorption solaire et son cycle thermodynamique idéal de base dans le diagramme de Clapeyron ( $\ln P$ ,  $-1/T$ ) comme le montre la figure, l'ensemble des deux étapes (1-2) et (2-3) correspond à la première étape (chauffage/désorption), et les deux autres étapes (3-4) et (4-1) cycle (refroidissement/adsorption). De plus, le cycle thermodynamique entièrement défini par quatre températures de fonctionnement [34].



**Fig.3.8.** Cycle thermodynamique idéal de la machine dans un diagramme de Clausius Clapeyron [34].

- Température d’adsorption ( $T_{ad}=T_{amb}$ ) : la température minimale atteinte par le mélange AC/méthanol.
- Température régénération  $T_g$  : la température maximale atteinte par le mélange.
- Température de condensation  $T$  (con).
- Température d’évaporation  $T$  (ev).

La définition du cycle thermodynamique d’une machine est achevée lorsque les deux points critiques (seuils) de ce cycle sont déterminés et définis, La température de seuil de désorption  $T_{sd}$  est définie comme le phénomène de désorption commence, elle correspond à l’apparition de la première goutte liquide dans le condenseur. La température seuil d’adsorption  $T_{sa}$  est définie comme la température à partir de laquelle le phénomène d’adsorption commence, elle correspond à l’évaporation de la première goutte liquide dans l’évaporateur. Cependant lors du calcul du coefficient de performance thermique (COP<sub>th</sub>) nous n’avons besoin que de la température de seuil  $T_{sd}$  désorbée et  $T_{sa}$  adsorbée [37].

### 3.3. Couples adsorbants/adsorbats

#### 3.3.1. Adsorbants

Les adsorbants sont des matériaux poreux avec des tailles de pores allant de plusieurs Angströms à des centaines d'Angströms. Les adsorbants couramment utilisés sont le gel Adsorbants de silice, d'aluminium activé, de charbon actif et de tamis moléculaire tels que Zéolite. La caractéristique la plus importante des adsorbants est leur grande capacité En raison de la structure microporeuse de la surface de l'adsorbant, l'adsorption peut être décrite comme plusieurs paramètres physiques. En particulier la distribution volumique des pores et des surfaces spécifiques [38].

#### 3.3.2. Choix des adsorbants

Le choix de l'adsorbant dans l'étude du phénomène d'adsorption est vaste, mais peut être limité dans le domaine de la réfrigération solaire à adsorption par certains critères, citons :

- Les corps utilisés en tant qu'adsorbants sont des matériaux poreux ou microporeux qui présentent une très grande surface spécifique. A titre d'exemple, les charbons actifs présentent une surface spécifique de l'ordre de 400 à 2000 m<sup>2</sup>/g. Le tableau 3.1 donne la surface spécifique de différents adsorbants utilisés dans l'adsorption selon la classification de L. M. Sun et F. Meunier [39].

**Tab.3.1.** Surface spécifique de différents adsorbants selon L. M. Sun et F. Meunier [39].

Adsorbant	Surface spécifique (m <sup>2</sup> /g)
Charbons actifs	400 à 2000
Tamis moléculaires carbonés	300 à 600
Zéolites	500 à 800
Gels de silice	600 à 800
Alumines activées	200 à 400
Adsorbants à base de polymère	100 à 700

- L'adsorbant doit avoir une grande capacité d'adsorption à la température ambiante et basse pression, mais une faible capacité d'adsorption à la température maximum du système et haute pression pour obtenir une grande quantité de production du froid.
- Il doit posséder une bonne conductivité thermique.
- Il doit avoir une faible chaleur spécifique.
- Il faut que l'adsorbant soit chimiquement compatible avec l'adsorbat choisi et aille des pores de dimensions proches à celle des molécules de l'adsorbat.
- Il doit être non toxique et non corrosif.
- Ne présentant aucune détérioration avec le temps et l'usage.
- Représentant un coût abordable en étant largement disponible. Les considérations précédentes justifient donc le choix porté dans la majorité des travaux effectués jusqu'à maintenant, sur les adsorbants suivants : les zéolites, les charbons actifs, les gels de silice et les alumines activées, ...etc. Ces adsorbants sont soit des corps naturels, soit améliorés par un traitement qui a pour effet d'augmenter leur surface spécifique, ou bien des corps artificiels dont certains ont une composition et une structure voisines de celles des corps naturels.

### 3.4. Adsorbats

Les adsorbats sont des matériaux à petites molécules. Trois types d'adsorbat Les plus couramment utilisés sont le méthanol, l'eau et l'ammoniac. Les caractéristiques la plus importantes des adsorbats sont : la chaleur latente, le volume spécifique, la pression de saturation, la stabilité Adsorbants utilisés et impact sur l'environnement [38].

**Tab.3.2.** Propriétés thermodynamiques d'adsorbats [40].

Réfrigérant	Température (°C)	Chaleur latente et vaporisation (KJ Kg)	Pression vapeur (Bar)
<b>Eau</b>	0	2485	0.0063
	20	2442	0.0236
	40	2397	0.0747
<b>Ammoniac</b>	-30	1359	1.195
	-10	1296	2.909
	0	1262	4.294
	30	1146	11.665
<b>Méthanol</b>	-50	1190	0.01
	-10	1182	0.04
	30	1122	0.25

### 3.4.1. Choix des adsorbats

L'autre partie du couple est l'adsorbat (ou le réfrigérant). L'identification et le choix de ce dernier sont basés sur trois critères (technique, écologique, sécurité) :

#### ➤ Critère technique

Le choix de l'adsorbat est dicté par un ensemble des contraintes techniques (pression, propriétés thermodynamiques et sécurité) suivantes :

- Posséder une grande chaleur latente d'évaporation.
- Avoir une faible viscosité.
- Avoir une grande conductivité thermique.
- être constitué de petites molécules facilement adsorbables.
- Avoir une chaleur spécifique la moins élevée possible.
- être sans toxicité.
- être ininflammable et non explosif en mélange avec l'air.

### ➤ Critère écologique

L'utilisation et la fabrication des adsorbats doivent être réalisées sans aucun effet négatif sur l'environnement. D'autres recherches s'orientent vers le développement de nouveaux fluides frigorigènes possédant une efficacité énergétique intéressante tout en restant neutres vis-à-vis de l'environnement.

### ➤ Critères de sécurité

Dans le choix de sécurité, deux paramètres fondamentaux sont à respecter [38]:

- La toxicologie de chacun des éléments du couple (contrainte écologique).
- L'inflammabilité des éléments de la machine.

## 3.5. Modélisation des machines frigorifiques solaire à adsorption

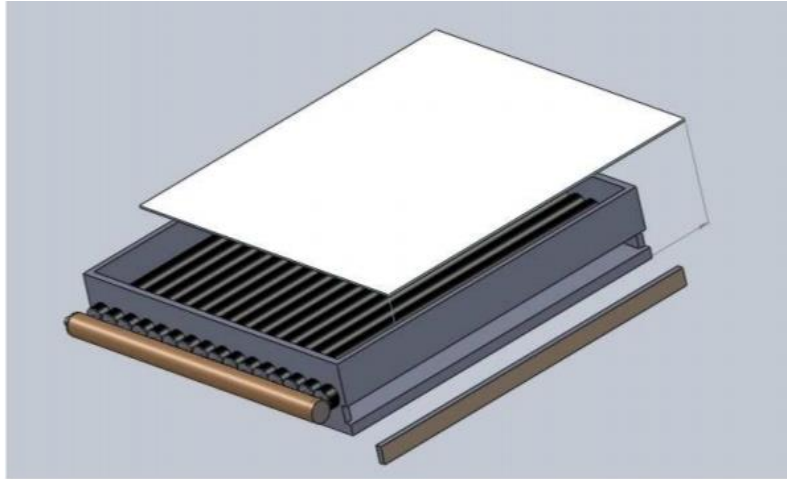
La modélisation permet d'établir les différents bilans de transfert de masse et de chaleur dans les composantes du système afin d'établir l'expression finale de la performance pour les calculs d'optimisation définis dans cette étude.

### 3.5.1. Bilans des composantes de la machine

La modélisation du cycle de fonctionnement d'un réfrigérateur à adsorption dans les phases de chauffage et de refroidissement est donnée par les expressions suivantes.

- **Adsorbent (le générateur)**

Un adsorbent contenant l'adsorbant solide, en contact avec une source chaude, il joue pour le cycle à adsorption, le rôle joué par le compresseur (aspiration et compression) dans un cycle à compression de vapeur [41].



**Fig.3.9.** Vue en perspective d'un boîtier [38].

Durant la phase de désorption-condensation on a :

$$\dot{m}_{air} c_{p,air} E_g (T_{ex} - T_a) = m_{ch} (c_{p,ch} + m_{des} c_{p,a}) \frac{dT_{ch}}{dt} + m_g c_{p,g} \frac{dT_g}{dt} + \frac{d(m_{ch} \cdot m_{des} \cdot q_{st})}{dt} \quad (3.1)$$

Avec :

$\dot{m}_{air}$  Le débit d'air

$E_g$  L'efficacité énergétique de l'adsorbent (générateur)

$c_{p,air}$  La chaleur spécifique de l'air

$T_{ex}$  La température extérieure

$T_a$  La température d'adsorption

$m_{ch}$  La masse de l'adsorbant

$c_{p,ch}$  La chaleur spécifique de l'adsorbant

$m_{des}$  La masse désorbée

$c_{p,a}$  La chaleur spécifique de l'adsorbat

Durant la phase d'adsorption-évaporation on a :

$$\dot{m}_{air} c_{p,air} E_g (T_{ex} - T_a) = m_{ch} (c_{p,ch} + m_a c_{p,ad}) \frac{dT_{ch}}{dt} + m_g c_{p,g} \frac{dT_g}{dt} + \frac{d(m_{ch} \cdot m_{ad} \cdot q_{st})}{dt} \quad (3.2)$$

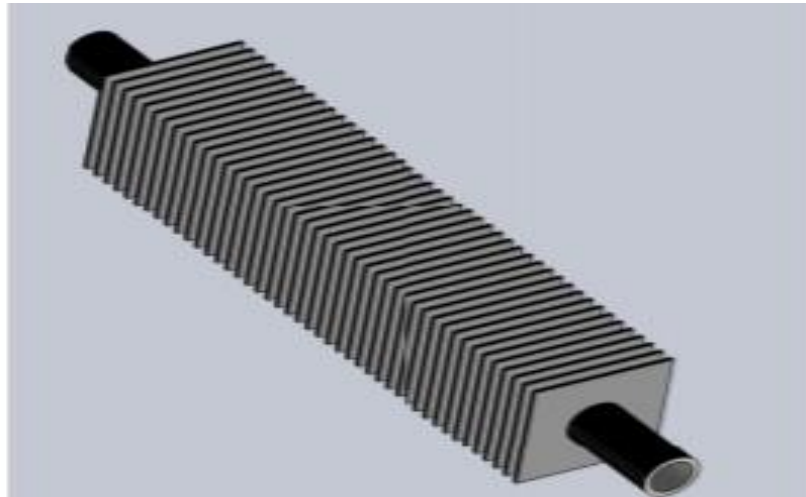
Avec :

$m_{ad}$  est la masse adsorbée

Dans l'équation précédente, le terme du côté gauche de l'équation représente la puissance échangée avec l'air dans le générateur efficace. Les deux premiers termes du côté droit de l'équation représentent le bilan thermique sensible du couple adsorbant/adsorbat, et le dernier terme représente l'énergie thermique nécessaire à la désorption ou à l'adsorption au cours du cycle.

- **Condenseur**

Le condenseur est un échangeur de chaleur dans lequel le fluide frigorigène passe progressivement de l'état gazeux à l'état liquide. Le fluide frigorigène transfère son énergie à un fluide secondaire dit « source chaude » à une température inférieure de quelques degrés à la température de condensation [41].



**Fig.3.10.** Un exemple d'un condenseur [41].

$$m_{cd} c_{p,cd} \frac{dT_c}{dt} + \dot{m}_{eau} c_{p,eau} E_g (T_{ee} - T_{se}) = \dot{m}_a [l(T_c) + c_{p,a} (T_g - T_c)] \quad (3.3)$$

Avec :

$m_{cd}$  La masse du condenseur

$c_{p,cd}$  La chaleur spécifique du condenseur

$\dot{m}_{eau}$  Le débit d'eau de condensation

$T_{ee}$  et  $T_{se}$  Les températures d'entrée et de sortie d'eau

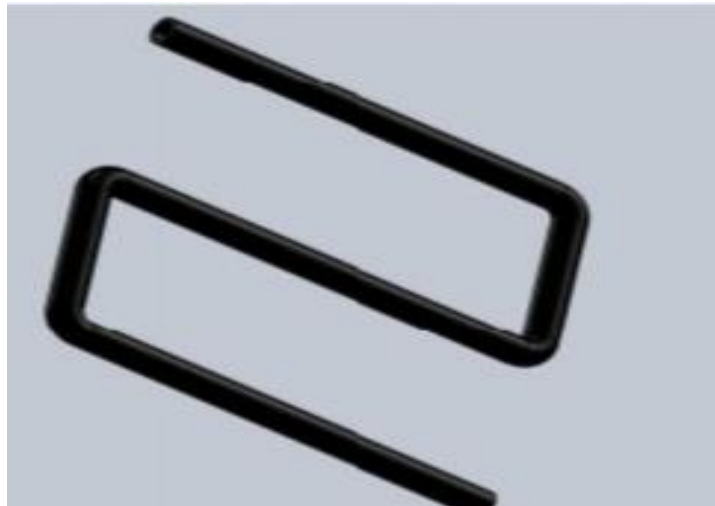
$l(T_c)$  La chaleur latente de condensation

$T_c$  La température de condensation

Le premier terme à gauche est la chaleur sensible relative au condenseur, et le second terme représente la chaleur transférée à l'eau de refroidissement. Le terme à droite du signe égal représente la chaleur latente de condensation et de refroidissement du sorbant du générateur.

- **Evaporateur**

Le réfrigérant liquide passe progressivement du liquide au gaz par absorption de l'énergie du fluide secondaire appelée "source froide" [41].



**Fig.3.11.** Schéma d'un évaporateur [41].

$$m_{ref}c_{ref}\frac{dT_{ref}}{dt} + \dot{m}_a c_{p,a}(T_c - T_{ev}) = \dot{m}_a l(T_e) + m_{ev}c_{p,ev}\frac{dT_{ev}}{dt} \quad (3.4)$$

Avec :

$m_{ref}$  La masse refroidie

$c_{ref}$  La chaleur spécifique du fluide refroidi

$T_{ev}$  La température d'évaporation

$l(T_e)$  La chaleur latente d'évaporation

$m_{ev}$  La masse de l'évaporateur

$c_{p,ev}$  La chaleur spécifique de l'évaporateur

Le premier terme à gauche de l'égalité représente l'effet frigorifique produit, et le deuxième terme est la chaleur sensible du condensat venant du condenseur. Le premier terme à droite de l'égalité est la chaleur latente de vaporisation, et le deuxième terme est la chaleur sensible de l'évaporateur.

### 3.5.2. Coefficient de performance

La performance de la machine frigorifique à adsorption donnée dans cette étude est caractérisée par le coefficient de performance COP.

Le coefficient de performance et les quantités de chaleur dans les autres parties de notre étude ne tiennent pas compte des parties métalliques des différents composants de la machine, tels que l'adsorbent et le condenseur, et sont exprimés en termes de relations thermodynamiques sans tenir compte des transferts de masse et de chaleur du système [42].

Dans ce cas, le coefficient de performance est donné par la relation suivante :

$$COP = \frac{Q_f}{Q_s} \quad (3.5)$$

$Q_f$  La quantité de froid produite ou la production de froid de l'évaporateur (adsorption)

$Q_c$  La quantité de chaleur utile fournie à l'adsorbent

### 3.5.2.1. Expression de $Q_f$

La quantité de froid produite au niveau de l'évaporateur (adsorption) est donnée par l'expression suivant[42] :

$$Q_f = m_a \Delta m [l(T_e) - \int_{T_e}^{T_c} cp_l(T) dT] \quad (3.6)$$

Avec :

$m_a$  La masse de l'adsorbant contenant dans l'adsorbeur

$\Delta m$  La masse cyclée de l'adsorbat calculée par la relation suivante :

$$\Delta m = m_{max} - m_{min} \quad (3.7)$$

D'après le diagramme montré dans la figure 4.6,  $m_{max}$  et  $m_{min}$  correspond à :

$$m_{max} = m(T_a, P_e) = m(T_g, P_c) \quad (3.8)$$

$$m_{min} = m(T_{ads}, P_e) = m(T_{max}, P_c) \quad (3.9)$$

Les deux quantités de masse sont calculées à l'aide de la relation de Dubinin-Astakhov (D-A).

$l(T)$  et  $cp_l(T)$  représentent, respectivement la chaleur latente d'évaporation et la chaleur spécifique de l'adsorbat à l'état liquide.

Le premier terme de cette équation représente la chaleur latente extraite pour l'évaporation du réfrigérant à la température d'évaporation  $T_e$ . Le second terme représente la chaleur sensible nécessaire pour amener le condenseur de sa température de condensation à celle d'évaporation  $T_e$ .

### 3.5.2.2. Expression de $Q_c$

L'adsorbeur reçoit une quantité de chaleur de la source chaude (l'énergie solaire dans ce cas) qui sert à chauffer : l'adsorbant, les parties métalliques de l'adsorbeur, l'adsorbat, et pour la désorption [42].

Donc l'expression de  $Q_c$  est donné par :

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{des} \quad (3.10)$$

Avec :

$Q_1, Q_2$  et  $Q_3$  sont les quantités de chaleur sensibles utilisés pour chauffer respectivement : les parties métalliques de l'adsorbeur, l'adsorbat, l'adsorbant  $Q_{des}$  est la chaleur nécessaire à la désorption qui correspond à la masse de l'adsorbat désorbé.

- **Expression de la chaleur sensible de l'adsorbant  $Q_1$**

C'est la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer l'adsorbant et donc de lui porter de la température  $T_a$  à  $T_{max}$  (la température de génération de vapeur).

$$Q_1 = m_a \int_{T_a}^{T_{max}} cp_2(T) dT = m_a cp_2 (T_{max} - T_a) \quad (3.11)$$

Avec :

$m_a$  La masse de l'adsorbant

$cp_2$  La chaleur spécifique de l'adsorbant, donc  $m_a cp_2$  est la capacité calorifique de l'adsorbant.

- **Expression de la Chaleur sensible des parties métalliques de l'adsorbeur  $Q_2$**

Cette quantité correspond à la chaleur qui porte les parties métalliques de l'adsorbeur de la température  $T_a$  à  $T_{max}$ . elle est donnée par la relation suivante :

$$Q_2 = m_g \int_{T_a}^{T_{max}} cp_g(T) dT = m_g cp_g (T_{max} - T_a) \quad (3.12)$$

Avec :

$m_g$  La masse des parties métalliques de l'adsorbeur

$cp_g$  La chaleur spécifique des parties métalliques de l'adsorbeur, donc  $m_g cp_g$  est la capacité calorifique des parties métalliques de l'adsorbeur.

- **Expression de la Chaleur sensible de l'adsorbat  $Q_3$**

$Q_3$  est la quantité de chaleur nécessaire pour chauffer l'adsorbat de la température  $T_a$  à  $T_{max}$ .

Cette quantité est exprimée par :

$$Q_3 = m_a \int_{T_a}^{T_{max}} m(T) cp_l(T) dT = m_a m_{max} \int_{T_a}^{T_g} cp_l(T) dT + m_a \int_{T_g}^{T_{max}} m(T) cp_l(T) dT \quad (3.13)$$

$m(T)$  est la masse adsorbée calculé à une température donnée  $T$  et à une pression de condensation  $P_c$ .

- **Expression de la Chaleur de désorption  $Q_{des}$**

La phase de désorption se fait sur le diagramme de la fig.3.4 de 2-3, il est caractérisé par la production de vapeur à partir de l'adsorbat liquide après son chauffage de la température  $T_g$  à  $T_{max}$ .

Cette quantité de chaleur est donnée par [42]:

$$Q_{des} = m_a \int_{m_{max}}^{m_{min}} q_{st} dm \quad (3.14)$$

$q_{st}$  est la chaleur isostérique d'adsorption.

La différentiation de  $m$  la masse adsorbée donne l'expression suivant :

$$dm = n D m T^n \left( \ln \frac{P_s(T)}{P} \right)^{n-1} \left[ d \ln P - \frac{q_{st}}{RT^2} dT \right] \quad (3.15)$$

$n$  et  $D$  sont les paramètres de l'équation Dubinin-Astakhov.

### 3.5.2.3. Intensité solaire et température ambiante

L'évolution de l'irradiation solaire transitoire est donnée par l'équation suivante [43] :

$$I(t) = I_{c,max} \sin\left(\frac{\pi(t-t_{sunrise})}{(t_{sunrise}-t_{sunset})}\right) \quad (3.16)$$

Avec :

$I_{c,max}$  : L'irradiation solaire totale maximale composée de l'irradiation direct, diffus et réfléchi par le sol (l'irradiation réfléchi est supposée être négligeable devant les deux autres composantes). Ceci est exprimé par l'équation suivante [43] :

$$I_c = I_b \cos \theta + I_d + I_r \quad (3.17)$$

$\theta$  : L'angle d'incidence du rayonnement solaire directe.

L'irradiation totale reçue par une surface quelconque du capteur solaire est donnée par [43] :

$$Q_s = A\alpha\gamma \int_{\text{sunrise}}^{\text{sunset}} I(t)dt \quad (3.18)$$

Avec :

$A$  : La surface du capteur solaire,  $\alpha$  est l'absorptivité du collecteur,  $\gamma$  est la réflectivité,  $\eta$  est l'efficacité du capteur solaire.

L'équation (3.19) est utilisée pour l'estimation de la température ambiante.[43]

$$T_{amb}(t) = \frac{T_{amb.max} + T_{amb.min}}{2} + \frac{T_{amb.max} - T_{amb.min}}{2} \sin\left(\frac{\pi(t - t_{sunrise})}{(t_{sunrise} - t_{sunset})}\right) \quad (3.19)$$

Avec :

$T_{amb.max}$  Température ambiante maximale.

$T_{amb.min}$  Température ambiante minimale.

### 3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu le principe de fonctionnement d'une machine frigorifique a adsorption avec ses principaux composants et son cycle thermodynamique, et le choix de couples adsorbent/adsorbat et finalement on a clôturé le chapitre en expliquant l'objectif de la modélisation qui permet d'établir l'expression de performance pour les calculs d'optimisation.

# **Chapitre 4**

## **Résultats et interprétations**

## Chapitre 4

### Résultats et interprétation

#### 4.1. Introduction

Expérimentation : Enfin, il est important de tester le système dans des conditions réelles pour valider les résultats de la modélisation et de l'optimisation. Les expériences peuvent être utilisées pour affiner le modèle mathématique et améliorer la conception du système.

Matlab est un environnement de développement et de programmation qui permet aux ingénieurs et aux scientifiques d'analyser des données, de modéliser des systèmes complexes et de développer des algorithmes pour une variété d'applications. Parmi les applications les plus courantes de Matlab, on trouve l'analyse de données, la modélisation mathématique, la simulation, le traitement du signal et de l'image, et la conception de systèmes de contrôle.

Le laboratoire de recherche Tlemcen est une institution de recherche scientifique, les chercheurs et les étudiants du laboratoire utilisent souvent des outils informatiques tels que Matlab et Méteonorm pour mener des recherches et des projets dans des domaines tels que les énergies renouvelables. Le laboratoire de recherche de l'Université de Tlemcen nous a autorisé d'utiliser ses logiciels.

#### 4.2. Condition climatique

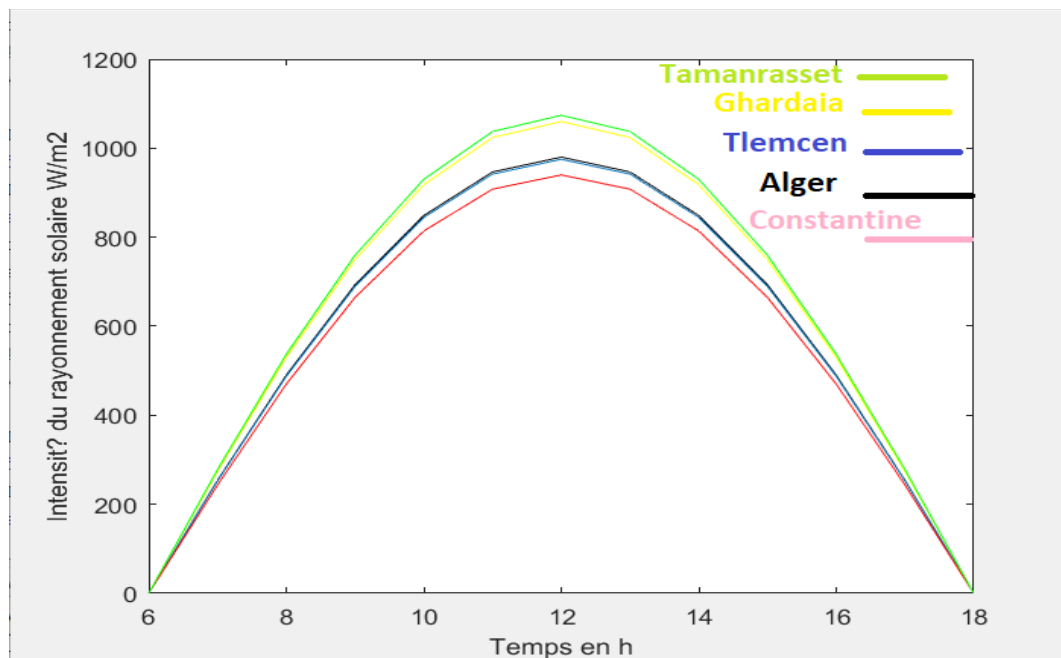
##### 4.2.1. Situation géographique

- Ghardaïa est une ville située dans le sud de l'Algérie, Les coordonnées géographiques de Ghardaïa sont approximativement 32,4883 degrés de latitude nord et 3,6735 degrés de longitude est. La région est caractérisée par des températures élevées et des précipitations annuelles faibles.
- Tlemcen est une ville située dans le nord-ouest de l'Algérie. Les coordonnées géographiques de Tlemcen sont approximativement 34,8783 degrés de latitude nord et 1,3150 degrés de longitude ouest.
- Tamanrasset est une ville située dans le sud de l'Algérie (Sahara) la plus grande région désertique du monde. Les coordonnées géographiques de Tamanrasset sont approximativement 22,7854 degrés de latitude nord et 5,5228 degrés de longitude est. La région est caractérisée par des températures très élevées et des précipitations annuelles très faibles.

- Constantine est une ville située dans le nord-est de l'Algérie. Les coordonnées géographiques de Constantine sont approximativement 36,3650 degrés de latitude nord et 6,6147 degrés de longitude est.
- Alger est la capitale de l'Algérie et se situe sur la côte nord du pays, sur la rive ouest de la baie d'Alger, en bordure de la mer Méditerranée. Les coordonnées géographiques d'Alger sont approximativement 36,7538 degrés de latitude nord et 3,0588 degrés de longitude est. La région est caractérisée par un climat méditerranéen avec des étés chauds et secs et des hivers doux et humides.

**Tab.4.1.** Données climatiques des villes algériennes

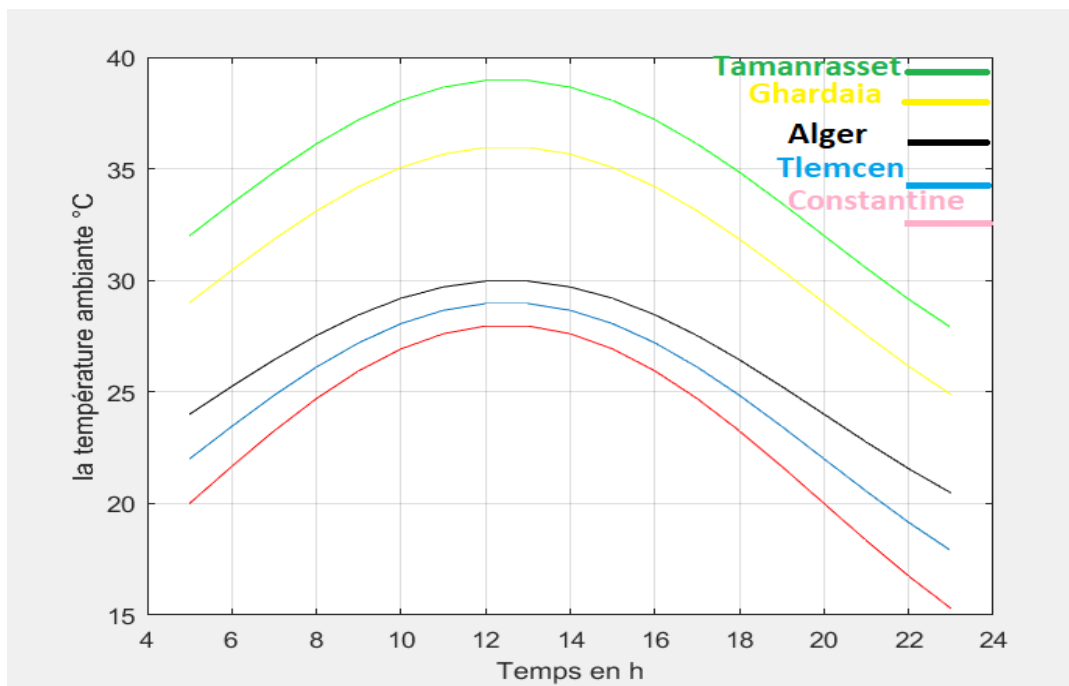
Ville	Ic (max)	Tam(min)	Tam(max)
Alger	975	15	29
Tlemcen	980	18	30
Constantine	940	12	28
Ghardaïa	1060	22	36
Tamanrasset	1074	25	39



**Fig.4.1.** Variation de l'intensité de rayonnement en fonction du temps.

La figure 4.1 montre que dans les cinq villes citées l'intensité du rayonnement solaire varie proportionnellement au temps au début de la journée pour diminuer ensuite en fin de journée, c'est à dire elle augmente au lever de soleil pour atteindre un maximum à midi (12h) avant de redescendre jusqu'à ce qu'elle s'annule à le coucher de soleil. On remarque que l'intensité atteint son maximum à 12:00h . Ce changement enregistré est en raison de la position du soleil pendant la journée.

On observe que pour le site de Tamanrasset l'intensité du rayonnement solaire dépasse les  $1000\text{w/m}^2$  et on a enregistré la plus basse intensité à Constantine où sa valeur égale à  $920\text{w/m}^2$  .Notons que parmi les cinq courbes, l'évolution du rayonnement solaire global est la même, la différence réside uniquement dans la pente de la courbe.



**Fig.4.2.** Variation de la température en fonction du temps.

La figure 4.2 représente l'évolution de la température en fonction du temps. On observe que la température atteint son maximum à midi pour les cinq villes. On remarque que la ville de Tamanrasset, la température est maximale à midi qui approche au  $40^{\circ}\text{C}$ , et la plus basse température par rapport aux 4 villes a été enregistrée à Constantine  $27^{\circ}\text{C}$ . Cette différence de température est due à la situation géographique de chaque ville.

### 4.3. Paramètres et données thermophysique

#### 4.3.1. Paramètre D/A

**Tab.4.2.** Paramètre D/A des couples

AC/ méthanol	Zéolite/eau	Composite/Ethanol
n=2,15	n=2	n=1.8
$D=5.02.10^{-7}$	$D=1,8.10^{-7}$	$D=2,67.10^{-7}$
$X_0=0,425(1/Kg)$	$X_0=0.265(1/kg)$	$X_0=0.81(1/kg)$

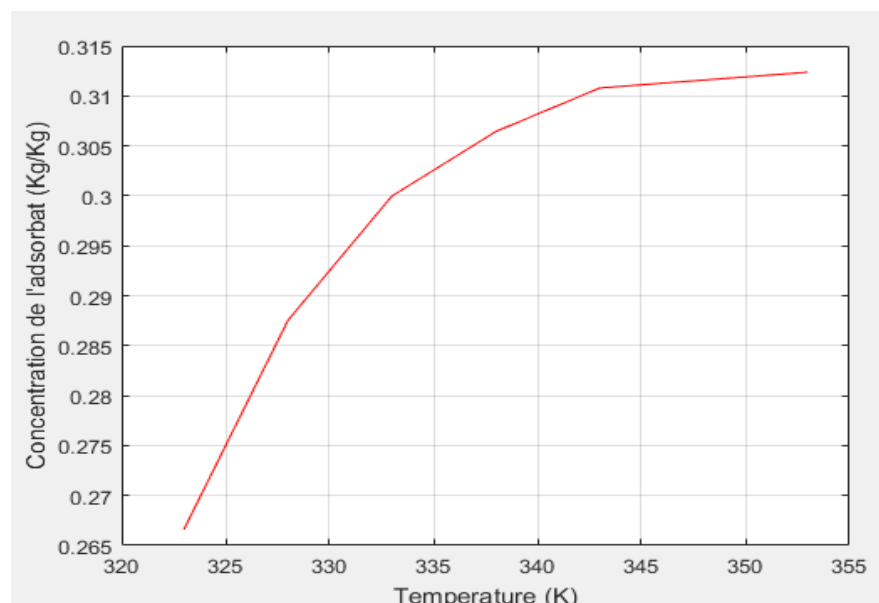
**AC** : Charbon Actif est un matériau carboné poreux qui a été activé pour augmenter sa porosité et donc sa capacité d'adsorption.

**Composite** : c'est un assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles à caractéristiques différentes.

Les données de couple ont été extraits a partir de la littérature

### 4.4. Courbes et interprétations

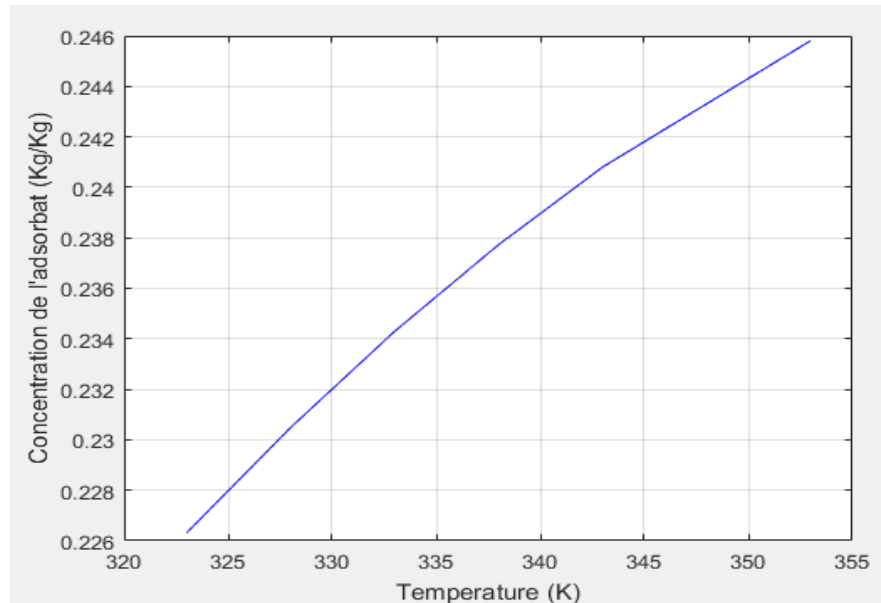
#### a) AC/Méthanol



**Fig.4.3.** Variation de la concentration de l'adsorbat(méthanol) en fonction de la température.

La figure 4.3 représente l'évolution de la concentration en fonction de la température. On remarque que la concentration de l'adsorbat (méthanol) se stabilise à 345K. La concentration de méthanol nécessite une température qui dépasse les 340K pour avoir la stabilité.

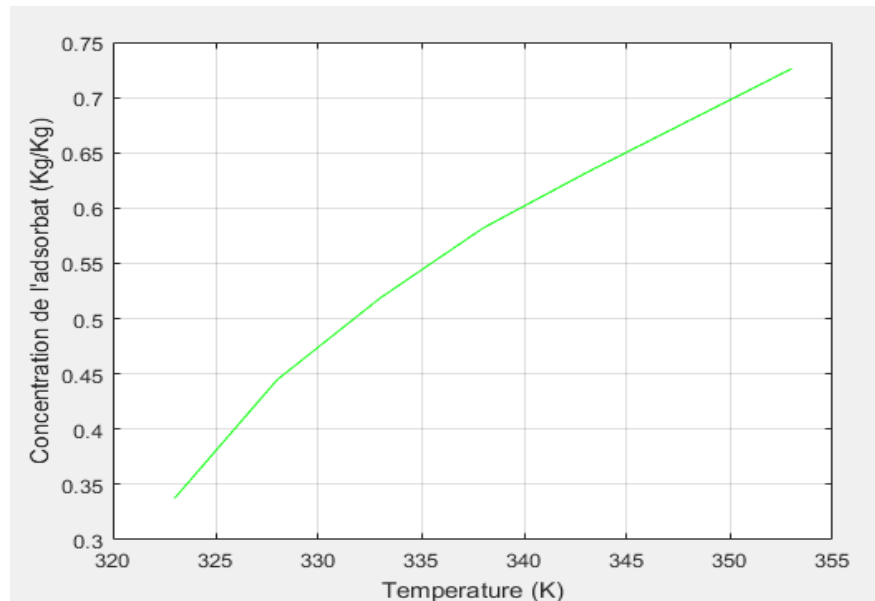
### b) Zéolite/Eau



**Fig.4.4.** Variation de la concentration de l'adsorbat(eau) en fonction de la température.

La figure 4.4 montre la variation de la concentration de l'adsorbat (zéolite/eau) en fonction de la température on remarque que la concentration de ce couple n'est pas stable car elle aura besoin de température élevée pour atteindre la stabilité.

### c) Composite/Ethanol



**Fig.4.5.** Variation de la concentration de l'adsorbat(éthanol) en fonction de la température.

La figure 4.5 représente une évolution de la concentration de l'adsorbat (Éthanol) en augmentant la température. On n'a pas enregistré une stabilité de concentration car l'éthanol nécessite une température plus élevée.

#### 4.4.1. Données thermophysique [44] :

##### a) Zéolite/Eau

**Tab.4.3.** Caractéristique thermophysique de l'eau

Température (°C)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Pression de vapeur (bar)
50	0,988	0,12334
55	0,9857	0,15739
60	0,9832	0,19917
65	0,9805	0,25006
70	0,9777	0,31165
80	0,9718	0,47356

**Tab.4.4.** Caractéristique thermophysique de l'eau pour différente température d'évaporation

Température (°C)	Chaleur Latente (KJ/Kg)	Chaleur massique Liquide (KJ/Kg °C)
0	2500,7	4,22
2.5	2494,85	4,2153
5	2489	4,2107
7.5	2483,15	4,2062
10	2477,3	4,2015

**Tab.4.5.** Caractéristique thermophysique de l'eau pour différente température de condensation

Température (°C)	Chaleur Latente (KJ/Kg)	Chaleur massique Liquide (KJ/Kg °C)
15	2465,6	4,1922
17.5	2459,5	4,1877
20	2453,4	4,183
22.5	2612,55	4,182
25	2771,7	4,181

## b) AC/Méthanol

**Tab.4.6.** Caractéristique thermophysique de méthanol.

Température (°C)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	Pression de vapeur (bar)
50	0,7641	0,55
55	0,75962	0,74
60	0,75515	0,93
65	0,75067	1,11
70	0,7462	1,31
80	0,7353	2

**Tab.4.7.** Caractéristique thermophysique de méthanol pour différente température d'évaporation

<b>Température (°C)</b>	<b>Chaleur Latente (KJ/Kg)</b>	<b>Chaleur massique Liquide (KJ/Kg °C)</b>
0	1178,5	2,42
2.5	1177,62	2,4258
5	1176,5	2,4316
7.5	1175,87	2,4575
10	1175	2,443

**Tab.4.8.** Caractéristique thermophysique de méthanol pour différente température de condensation

<b>Température (°C)</b>	<b>Chaleur Latente (KJ/Kg)</b>	<b>Chaleur massique Liquide (KJ/Kg °C)</b>
15	1170	2,455
17.5	1167,5	2,4608
20	1165	2,4666
22.5	1162,5	2,472
25	1160	2,478

**c) Composite/Ethanol**

**Tab.4.9.** Caractéristique thermophysique de l'éthanol

<b>Température (°C)</b>	<b>Masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Pression de vapeur (bar)</b>
50	0,7622	0,29
55	0,7574	0,41
60	0,7526	0,52
65	0,7479	0,64
70	0,7431	0,76
80	0,7342	1,09

**Tab.4.10.** Caractéristique thermophysique de l'éthanol pour différente température d'évaporation

Température (°C)	Chaleur Latente (KJ/Kg)	Chaleur massique Liquide (KJ/Kg °C)
0	916,75	2,303
2.5	913,76	2,323
5	910,77	2,344
7.5	907,78	2,365
10	904,8	2,386

**Tab.4.11.** Caractéristique thermophysique de l'éthanol pour différente température de condensation

Température (°C)	Chaleur Latente (KJ/Kg)	Chaleur massique Liquide (KJ/Kg °C)
15	900 ,75	2,428
17.5	898,72	2,449
20	896,7	2,47
22.5	894,67	2,501
25	892,65	2,532

#### 4.4.1.1. Données de cycle

Dans cette étude, nous avons imposés les données du cycle suivants :

$$T_g=50 \text{ °C} \quad T_c=15 \text{ °C} \quad T_{ads}=20 \text{ °C}$$

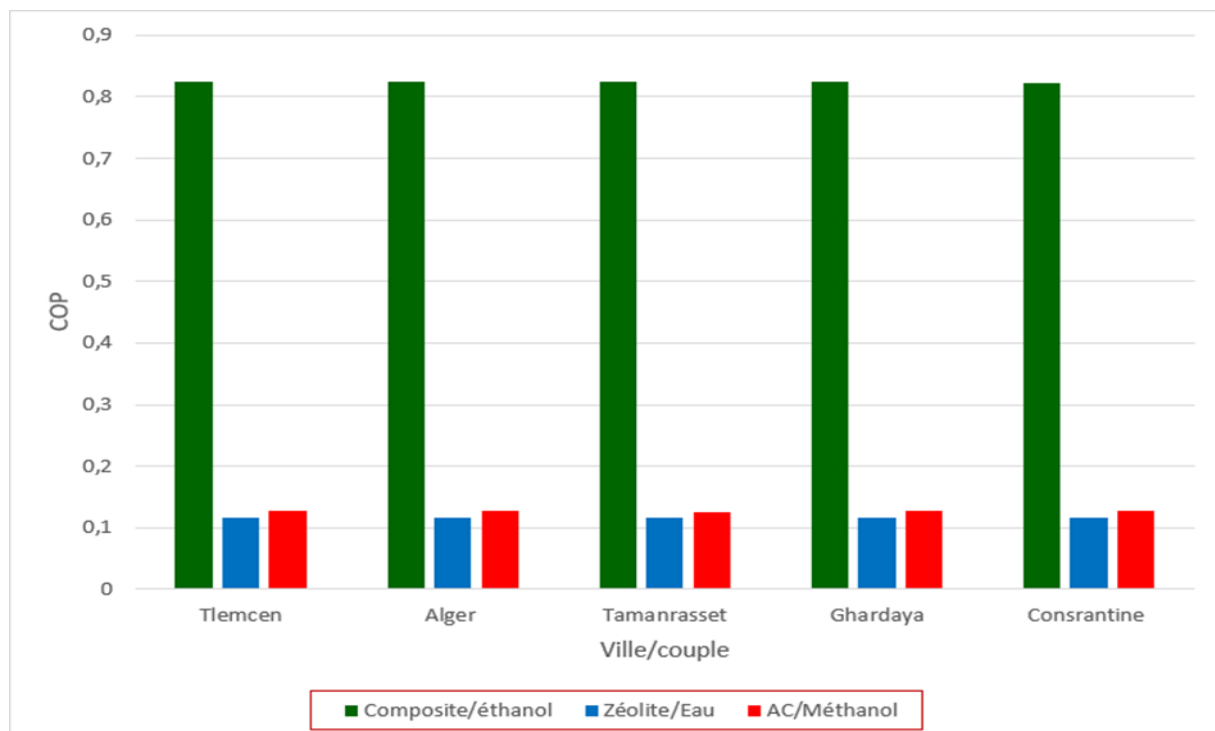
$$T_{max} = 80 \text{ °C} \quad T_e=5 \text{ °C}$$

#### 4.4.1.2. Données du collecteur solaire [45]

$$A=1 \text{ m}^2 \quad \alpha = 0,95 \quad \tau=0,7$$

$$m_a=12,5 \text{ kg} \quad P=2 \text{ bar} \quad \eta= 0,935$$

#### 4.4.2. Coefficient de performance



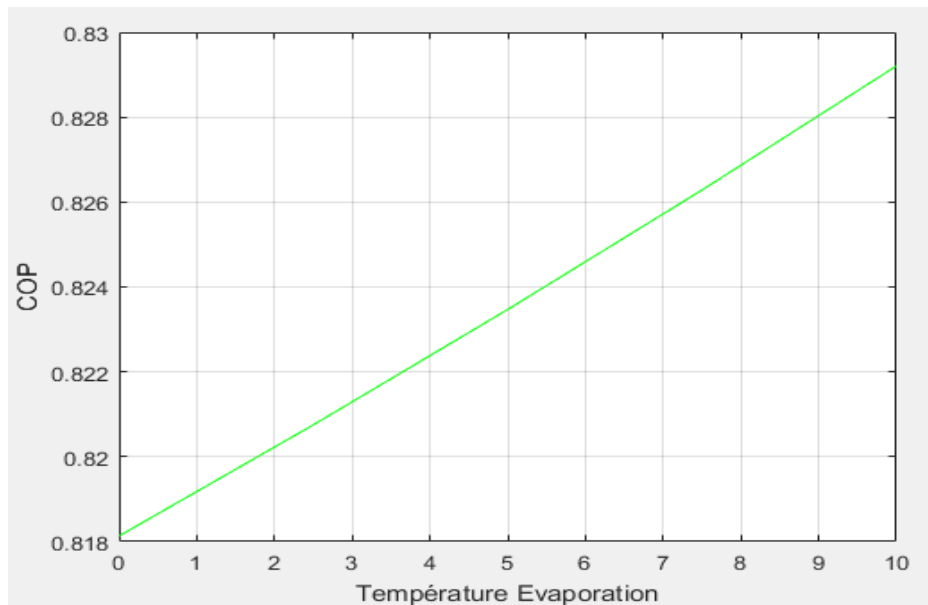
**Fig.4.6.** Variation du COP en fonction de couple dans chaque ville.

La figure 4.6 présente la variation de coefficient de performance cop en fonction de différents couples dans les villes. On note que d'après l'étude des couples dans chacune des villes suivantes : Tlemcen, Alger, Constantine, Ghardaïa et Tamanrasset on a pu constater que composite/éthanol est le meilleur couple dans notre analyse vu qu'il a un rendement inestimable en comparant avec les autres couples.

#### 4.5. Optimisation

Composite/éthanol a été choisi comme meilleur couple à cause de son rendement dans la figure 4.6. On prend le couple composite/éthanol dans notre ville (Tlemcen) afin d'optimiser le coefficient de performance.

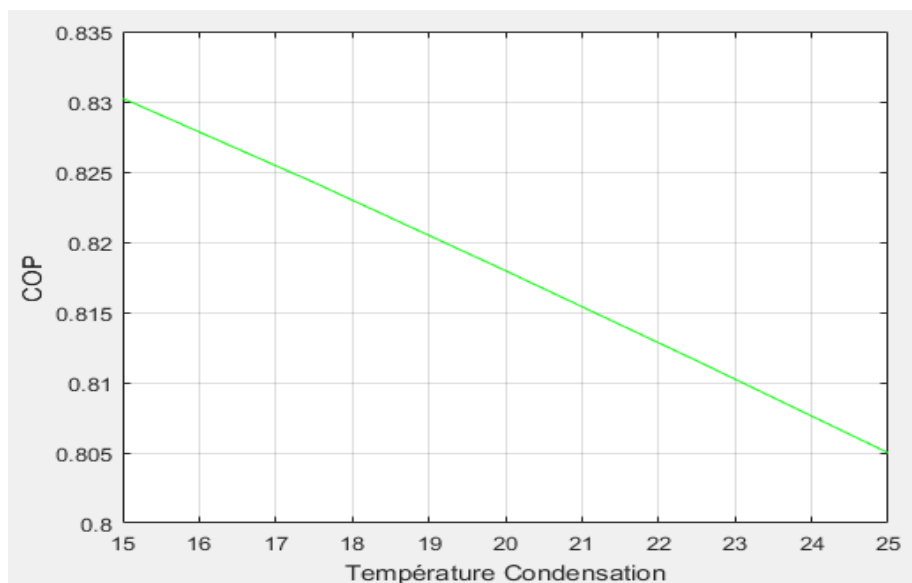
#### 4.5.1. Effet de température d'évaporation



**Fig.4.7.** Variation du COP en fonction de la température d'évaporation(°C).

La figure 4.7 illustre l'effet de température d'évaporation sur le coefficient de performance solaire COP. En effet, l'augmentation de  $T_e$  signifie que la pression et la masse d'adsorption dans le réacteur sont en max augmente en début de cycle, ce qui conduit à une masse de cycle  $\Delta m$  et Par conséquent, une augmentation du COP.

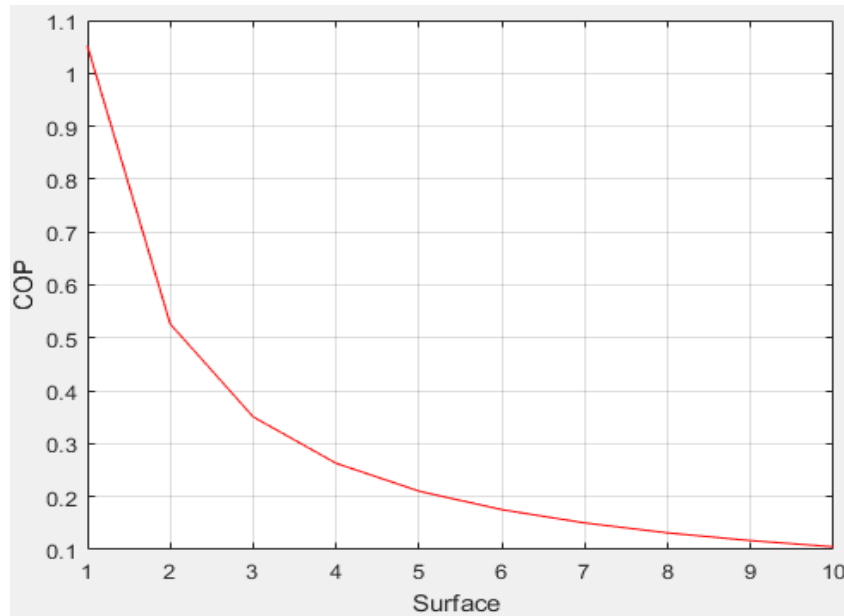
#### 4.5.2. Effet de température de condensation



**Fig.4.8.** Variation du COP en fonction de la température de condensation (°C).

Influence de la température de condensation  $T_c$  sur le COP de la machine. La figure 4.8 montre l'effet de température de condensation sur le coefficient de performance solaire COP. On constate que lorsque la température de condensation  $T_c$  augmente, le COP diminue.

#### 4.5.2. Effet de surface de capteur solaire



**Fig.4.9.** Variation du COP en fonction de la surface de capteur solaire (m<sup>2</sup>).

On peut voir que le COP augmente avec l'augmentation du rapport de concentration. Cette augmentation du COP est justifiée que l'augmentation du taux de concentration augmentera la production de froid et ceci est dû en fait que l'augmentation du taux d'adsorption de l'adsorbant augmentera le taux de la masse adsorbée de l'adsorbant à fixer sur le microporeux de l'adsorbant, ce qui signifie plus de masse adsorbée et plus de production de froid. Donc, le COP dépend principalement du rapport de concentration.

#### 4.6. Conclusion

Les températures du cycle d'une machine frigorifique à adsorption ayant une influence importante sur la performance de production froid. Alors la sélection de ces paramètres peut être la clé principale pour optimiser la réfrigération à adsorption.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Les machines frigorifiques à adsorption offrent une large plage de couverture des besoins frigorifiques. Elles présentent plusieurs avantages tels que la simplicité, la fiabilité et la capacité à utiliser diverses sources d'énergie. Cependant, en comparaison avec les systèmes à compression, elles souffrent d'une faible efficacité énergétique.

Les systèmes de réfrigération à adsorption solaire sont considérés comme la deuxième technologie de refroidissement solaire derrière les machines à absorption. Cette technique peut être utilisée pour produire du froid à diverses fins, telles que la fabrication de glace, refroidissement par eau et climatisation, tout dépend de la plage de température du cycle fonctionner, car il s'est avéré adapté aux applications en chambre froide telles que la conservation des aliments et des médicaments, en particulier dans les zones reculées et le Sahara abritent d'importants gisements solaires.

Le développement de cette technologie peut être réalisé à la fois par des études expérimentales et par la modélisation mathématique.

Dans notre projet nous avons entamé l'étude du phénomène d'adsorption avec ces différents types et domaines d'application, On a pu constater le fonctionnement d'une machine frigorifique avec ces principaux composants et son cycle thermodynamique (Clapeyron). Nous avons donné une comparaison entre Trois couples AC/ Méthanol, Eau/Zéolite et Composite/ Ethanol sur la base du cycle idéale des machines de réfrigération à adsorption.

Les résultats obtenus grâce à ce modèle ont montré que la performance de la machine, exprimée par le coefficient de performance thermique, dépend fortement de plusieurs paramètres. Pour améliorer cette performance, il est essentiel de faire un bon choix des critères pour ces paramètres. Parmi les paramètres les plus importants figurent :

Les températures de fonctionnement du cycle, telles que la température de condensation, d'évaporation. L'augmentation de la température de condensation et d'adsorption entraîne une diminution de la performance thermique. En revanche, l'augmentation de la température d'évaporation conduit à une amélioration de la performance thermique de la machine.

L'adsorbat lui-même joue également un rôle significatif dans l'obtention de bonnes performances. Nos recherches démontrent que l'éthanol demeure le meilleur adsorbat comparé à d'autres options mentionnées dans la littérature, et il conduit toujours à de bonnes

performances. C'est pourquoi il est utilisé comme adsorbant dans le paragraphe traitant de l'influence de l'adsorbant.

La surface de capteur solaire a une influence notable sur la performance de système de réfrigération à adsorption solaire.

En général, le coefficient de performance dépend non seulement des températures de fonctionnement dans l'adsorbeur et de ses propriétés, mais aussi des rendements de l'évaporateur et du condenseur. Par conséquent, des modèles décrivant le processus de transfert de chaleur dans ces deux composants peuvent être étudiés pour comprendre leur influence sur l'efficacité de la machine à adsorption. L'optimisation réalisée dans ce travail pour le réacteur solaire et la machine frigorifique solaire à adsorption se limite à une optimisation énergétique.

## **Références bibliographiques**

## **Références bibliographiques**

- [1] **Y. Jannot**, Thermique solaire octobre 2003.
- [2] **M.A. Hadj Ammar**, Impact de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre sur l'efficacité du capteur solaire à double vitrage, thèse de magister en physique, U de Ouargla 2009.
- [3] **M. Daguenet**, les séchoirs solaires : théorie et pratique, Unisco, paris ; 1985.
- [4] [https://www.researchgate.net/figure/Declinaison-solaire\\_fig9\\_340846580](https://www.researchgate.net/figure/Declinaison-solaire_fig9_340846580) (Consulté le 10/02/2023)
- [5] **Liu, B. Y. H.R. C. Jordan**. 'The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation.' Solar Energy, 4 (3), 1 (1960)
- [6] **M. Collares-pereira and A. Rabl**.the average distribution of solar radiation-- correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. Solar Energy Vol. 22 (1978), pp. 155-164.
- [7] **M. Amine Khodja**, Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire, thèse de magister en génie climatique, U de Constantine 2004.
- [8] **R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz**, Le rayonnement solaire, conversion thermique et application. Technique et Documentation, Paris, 1979
- [9] **Thirugnanasambandam M, Iniyar S, Goic R**. A review of solar thermal technologies. renewable and Sustainable Energy Reviews 2010 ;14 :312–22
- [10] **Siecker, J., Kusakana, K., & Numbi, B. P.** (2017). A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 192–203
- [11] **Otanicar T, Taylor RA, Phelan PE**. Prospects for solar cooling—an economic and environmental assessment. Solar Energy 2012 ;86 :1287–99.
- [12] **A. Sharma, A.B. Agrawal, N. Shrivastava**. Solar Energy based Refrigeration System using Peltier Device. International Journal of Theoretical & Applied Sciences, 10(1): 110-116(2018)
- [13] **Sarbu, C. Sebarchievici**. Review of solar refrigeration and cooling systems. Energy and Buildings 67 (2013) 286–297
- [14] **Zhang, H.Y**, 2010. A general approach in evaluating and optimizing thermoelectric coolers. International Journal of Refrigeration 33, 1187-1196

- [15] **Tassou, S. A., Lewis, J. S., Ge, Y. T., Hadawey, A., & Chaer, I. (2010).** A review of emerging technologies for food refrigeration applications. *Applied Thermal Engineering*, 30(4), 263–276.
- [16] **T.C. Bammann, C.Q. Howard, B.S. Cazzolato,** Review of flow-through design in thermoacoustic refrigeration, in : *Proceedings of ACOUSTICS 2005*, 9–11 November 2005, Busselton, Western Australia
- [17] **Ullah, K. R., Saidur, R., Ping, H. W., Akikur, R. K., & Shuvo, N. H. (2013).** A review of solar thermal refrigeration and cooling methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 499–513
- [18] **Grossman, G.** 2002, Solar-powered systems for cooling, dehumidification and air-conditioning. *Solar Energy* 72(1) :53–62
- [19] **Ghrici, A** “Contribution à l’optimisation de l’efficacité énergétique des systèmes frigorifiques à Adsorption solaires” Thèse de doctorat.
- [20] **Michael J. Moran, Howard N. Shapiro, Bruce R. Munson David P. DeWitt.** *Introduction to Thermal Systems Engineering.*
- [21] **Y. Fan, L. Luo, B. Souyri.** Review of solar sorption refrigeration technologies development and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (2007) 1758–1775
- [22] **Khaled Bataineh, Yazan Taamneh,** Review and recent improvements of solar sorption cooling systems, *Energy and Buildings* <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.075>.
- [23] **A. Rouag,** étude des échangeurs de chaleur d’une réfrigération solaire à adsorption (dimensionnement d’un condenseur), mémoire master système énergétique, Université Mohamed Kheider Biskra, pp 7-8, (2012).
- [24] **V. Thibaut,** Le froid solaire par dessiccation appliqué au bâtiment : Proposition d’une stratégie de régulation du système, thèse doctorat, Université Lyon1, pp 40, (2007).
- [25] **Eicker U,** Colmenar-Santos A, Teran L, Cotrado M, Borge-Diez D. Economic evaluation of solar thermal and photovoltaic cooling systems through simulation in different climatic conditions : an analysis in three different cities in Europe. *Energy Build* 2014 ;70 :207–23
- [26] **H. Benabdellah,** étude expérimentale de production frigorifique par adsorption solide application à la conception d’une plateforme de tri génération à partir de biomasse en milieu rural, thèse de Magister, université M’Hamed Bougara Boumerdes, p 68, (2011).

- [27] **W. Chekirou**, "Étude et Analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption", Thèse de doctorat, Université Mentouri, pp 14, (2008).
- [28] **F. Rouquerol**, Textures des solides poreux ou divisés. Technique de l'ingénieur, (1982) p 3645, p 1-14.
- [29] **Mimet A**, Étude théorique et expérimentale d'une machine frigorifique à adsorption d'ammoniac sur charbon actif, thèse de doctorat. FPMS Mons, Belgique 1991.
- [30] **M. A. Slasli**, Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux : approche théorique et expérimentale, thèse de Doctorat, Université de Neuchâtel, 2002.
- [31] **Mouad D**, Étude du fonctionnement d'une machine frigorifique a adsorption modélisation des transferts de chaleur et de masse et optimisation du fonctionnement de la machine, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy (1) 1996.
- [32] **M. M. Dubinin**, Microporous structures and absorption properties of carbonaceous adsorbents, Carbon, volume 21 (1983) 359-366.
- [33] **U. Borel, D. Favrat**, thermodynamique et énergétique, 1 De l'énergie à l'exergie, Presses Polytechnique et universitaires romandes, 2005.
- [34] **Ghrici Adenane, Benramdane Mohammed, Ghernaout M.E.A.** "Effect of operating temperatures and working pairs on performance of solar adsorption cooling system", International Journal of Heat and Technology, (2021) ; 39 (4), 1280-1286.
- [35] **Chekirou. W**, étude et analyse d'une machine frigorifique solaire a adsorption, thèse de doctorat, Constantine,2008.
- [36] **Sneha Patil, S. G. Dambhare**, "Review on Study of Solar Powered Adsorption refrigeration System", International Journal of Innovative and Emerging Research in Engineering, vol. 2, 2394 – 5494 (2015).
- [37] **G. Cacciola and G. Restuccia**, Réversible adsorption heat pump : a thermodynamic model. Int. Journal of refrigeration,18 (1995) 100-106.
- [38] **M. Billel**. Mémoire magister < Etude et analyse d'un système de production de froid par énergie solaire pour la climatisation >. 2013. pp-09B.
- [39] **L. M. Sun et F. Meunier**, Adsorption : Aspects théorique, Technique de l'ingénieur. J 2730 ; 1-16.
- [40] **M. Chahid**, Contribution à l'étude des machines thermiques a adsorption, Thèse de troisième cycle, 1985, I.N.P.L, Nancy France.

- [41] **A. M. Amziane**, étude comparative entre les systèmes de climatisation classique et solaire, application à la climatisation d'un immeuble, 2013-2014
- [42] **E. Passos**, Étude des couples Charbon actif – Méthanol et de leur application à la réfrigération solaire PhD. Thésis, federal Polytechnic College of Lausanne, Switzer land,1986.
- [43] **Ghrici Adenane, Benramdane Mohammed, Ghernaout M.E.A.** “Parametric study of solar adsorption cooling machine under the climatic conditions of Algeria”, Communication Science Et Technologie Vol.11, N°01, pp.9-18, January2022
- [44] **Bejan A and Kraus A D 2003** heat transfer handbook John wiley and Sons New York.
- [45] **Ghrici Adenane, Benramdane Mohammed, Ghernaout M.E.A.** “Performance study of the methanol and R134a adsorption solar refrigeration system in Algeria.”, 1st international Conference on Materials and Energies September 13 - 14, 2021 - IC-ME '21 Online conference

## ملخص

يركز مشروع التخرج لدينا على الطاقة الشمسية وتكنولوجيا التبريد الشمسي. تم إجراء بحث مكثف في هذا المجال لاستكشاف فكرة علم الفلك ، والإمكانات الشمسية في الجزائر ، والديناميكا الحرارية للامتصاص ونمذجة آلات التبريد بالامتزاز الشمسي. سمحت لنا دراستنا بوضع عملنا في السياق العلمي الحالي ، لتحديد الفجوات المعرفية واقتراح حلول مبتكرة. أظهرنا فهمنا للأساسيات ، واكتسبنا مهارات في النمذجة والتحليل النقدي ، وقدمنا النتائج ذات الصلة. يساهم مشروعنا في استخدام أكثر كفاءة واستدامة للطاقة الشمسية في مجال التبريد ، وبالتالي فتح آفاق لانتقال الطاقة. يوضح نجاحنا التزامنا بالتميز الأكاديمي وإمكانياتك للمساهمة في التقدم العلمي

---

الكلمات المفتاحية : التبريد الشمسي ، الامتزاز ، الممتز ، الامتزاز ، معامل الأداء ،  
الكربون المنشط / الميثانول ، الزيوليت / الماء ، المركب / الإيثانول

## Abstract

Our graduate project focuses on solar energy and solar cooling technology. In-depth research was conducted in the field, exploring the notion of astronomy, the solar potential in Algeria, the thermodynamics of adsorption, and the modeling of solar-adsorption refrigeration machines. Our study has enabled us to place our work in the existing scientific context, to identify knowledge gaps and to propose innovative solutions. We demonstrated our understanding of fundamental principles, acquired modeling and critical analysis skills, and presented relevant results. Our project contributes to a more efficient and sustainable use of solar energy in the cold field, thus opening perspectives for the energy transition. Our success testifies to our commitment to academic excellence and your potential to contribute to scientific progress.

---

**Key words:** Solar refrigeration, Adsorption, Adsorbent, Adsorbate, Performance coefficient, Activated carbon / Methanol, Zeolite / Water, Composite / Ethanol.

## Résumé

Notre projet de fin d'études porte sur l'énergie solaire et la technologie de froid solaire. On a réalisé une recherche approfondie dans le domaine, en explorant la notion d'astronomie, le potentiel solaire en Algérie, la thermodynamique de l'adsorption et la modélisation des machines frigorifiques à adsorption solaire. Notre étude a permis de situer notre travail dans le contexte scientifique existant, d'identifier les lacunes de connaissances et de proposer des solutions innovantes. On a démontré notre compréhension des principes fondamentaux, acquis des compétences en modélisation et en analyse critique, et présenté des résultats pertinents. Notre projet contribue à une utilisation plus efficace et durable de l'énergie solaire dans le domaine du froid, ouvrant ainsi des perspectives pour la transition énergétique. Notre réussite témoigne de notre engagement envers l'excellence académique et votre potentiel à contribuer au progrès scientifique.

---

**Mots clés :** Réfrigération Solaire, Adsorption, Adsorbant, Adsorbat, Coefficient de performance, Charbon actif / Méthanol, Zéolite / Eau, Composite / Ethanol.