

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE DE TISSEMSILT
INSTITUT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Visa du chef de département des
Sciences et de la Technologie
Signature:.....
Date :.....

**Étude théorique des performances d'une pompe
à chaleur à adsorption zéolithe-eau
alimentée par un capteur
solaire**

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de master académique en «*Installations énergétiques et turbomachines*»

Encadreur: ZEBBAR Djallel,
Professeur

Signature:

Date:

Réalisé par : KADDOURI Nadia

Signature:

Date:

Membres du jury

BAGHDAD. M

MAA (*Président*)

KHERRIS. S

MCA (*Examineur*)

ZEBBAR. Dj

Prof (*Encadreur*)

Tissemsilt: 2017/2018

Remerciements

Tout d'abord je tiens à remercier <<ALLAH>> Le tout puissant de m'avoir donné la foi et l'accès à ce droit chemin.

Je tiens ensuite à remercier mes parents pour le soutien inconditionnel dont ils ont fait preuve depuis que mon projet. Merci pour le soutien financier, moral, psychologique et matériel. Si je suis ici aujourd'hui, c'est grâce à vous !

Je tiens tout d'abord à remercier mon encadreur Monsieur ZEBBAR Djallel professeur au centre universitaire de Tissemsilt, pour tout le soutien, l'aide et l'orientation. Pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de diriger ce travail et ses précieuses directives tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury qui me font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Je souhaite aussi remercier mes frères et ma belle-sœur pour leur accompagnement durant ces cinq ans et leur soutien sans faille.

Enfin, je remercie mes amis et camarades de promotion pour ces cinq ans passés ensemble, dans les meilleurs moments.

Dédicace

Ce travail modeste est dédié :

À ma chère mère que Dieu ait pitié d'elle

À la mémoire de mon père pour leur soutien, aide, orientation et amour

À tous mes proches de la famille KADDOURI, et plus particulièrement, mes sœur et mes frères

Tous à son nom et sans oublier les familles

À mon encadreur Monsieur ZEBBAR Djallel et à tous mes enseignants chacun par son nom

À tous mes chères amies et mes collègues du centre universitaire de Tissemsilt

KADDOURI Nadia

Sommaire

Remerciements.....	1
Dédicace	2
Liste des figures.....	8
Liste des tableaux	9
Nomenclature	10
Introduction générale.....	14
Chapitre 1: Estimation du rayonnement solaire.....	16
Introduction	17
1.1. Définition.....	17
1.2. Composantes au sol du rayonnement solaire.....	18
1.2.1. Rayonnement solaire direct	18
1.2.2. Rayonnement diffus.....	18
1.2.3. Rayonnement global	18
1.3. Caractérisation du rayonnement solaire :	19
1.3.1. Caractérisation énergétique	19
1.3.2. Caractérisation spectrale	19
1.4. L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	19
1.5. Répartition spectrale du rayonnement solaire	20
1.6. Le calcul du rayonnement solaire.....	21
1.6.1. Le facteur de trouble atmosphérique	21
1.6.2. Le rayonnement direct normal (I_{DN})	21
1.6.3. Le rayonnement solaire direct (s)	22
1.6.4. Le rayonnement diffus (d)	22
1.6.5. Le rayonnement global (g).....	22
1.7. Caractéristiques du rayonnement solaire.....	22
1.8. Les modèles pour estimer le rayonnement solaire	22
1.8.1 Modèle de PERRIN DE BRICHAMBEAU	22
1.8.2 Modèle de HOTTEL et LIU JORDAN	23
1.9. Le capteur solaire plan.....	24
1.9.1. Principe de captation du rayonnement solaire	25
1.9.2. Fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	25
Conclusion.....	26
Chapitre 2: Thermodynamique de l'adsorption.....	27

Introduction	28
2.1. Description du phénomène d'adsorption.....	28
2.2. Définition de l'adsorption	29
2.3. Type d'interaction de l'adsorption	29
2.3.1. Adsorption physique ou physisorption	30
2.3.2. Adsorption chimique ou chimisorption	30
2.4. Caractérisations des types d'adsorption	31
2.4.1. Adsorption physique	31
2.4.1.1. Energétique et cinétique	31
2.4.1.2. Effet de la température	31
2.4.1.3. Effet de la pression.....	31
2.4.1.4. Spécificité.....	31
2.4.2. Adsorption chimiques	31
2.4.2.1. Energétique et cinétique	31
2.4.2.2. Effet de la température	31
2.4.2.3. Effet de la pression.....	31
2.4.2.4. Nature de l'adsorbant	32
2.5. Isothermes d'adsorption	32
2.5.1. Phase gazeuse	32
2.5.1.1. Les isothermes réversibles de types I.....	32
2.5.1.2 Les isothermes réversibles de type II.....	33
2.5.1.3. Les isothermes réversibles de type III.....	33
2.5.1.4. La caractéristique principale des isothermes de type IV.....	33
2.5.1.5. Les isothermes de type V	33
2.5.1.6. Les isothermes de type VI.....	33
2.5.2. Phase liquide	34
2.5.2.1. Courbe du type (S)	34
2.5.2.2. Courbe du type (L)	34
2.5.2.3. Courbes de type (H)	35
2.5.2.4. Courbe de type (C).....	35
2.6. Thermodynamique de l'adsorption	35
2.7. Critères de choix du couple Adsorbant/Adsorbat.....	36
2.7.1. Choix de l'adsorbant.....	36
2.7.2. Choix de l'adsorbat.....	36
2.8. Chaleur isostérique d'adsorption	37
2.9. Modélisation mathématique de l'adsorption	37

2.9.1. Modèle moléculaires.....	37
2.9.1.1 Modèle de LANGMUIR	37
2.9.1.2 Modèle de Freundlich	38
2.9.1.3. Modèles de BRUNAUER, EMMET et TELLER (B.E.T).....	38
2.9.1.4 Modèle de Temkin	39
Conclusion.....	39
Chapitre 3: Les zéolithes.....	40
Introduction	41
3.1. Historique des zéolithes.....	41
3.2. Définition des zéolithes.....	41
3.3. Structure des zéolithes.....	42
3.3. Type des zéolithes	43
3.3.1. Zéolithe naturelles.....	43
3.3.2. Synthèses des zéolithes.....	43
3.4. Propriété de la zéolithe	44
3.4.1. L'échange ionique	44
3.4.2. La stabilité thermique	44
3.4.3. L'adsorption et la séparation des molécules	44
3.4.4. Catalyse.....	44
3.5. Applications des zéolithes	45
3.5.1. Adsorption des gaz	45
3.5.2. Tamis moléculaire	45
3.5.3. Adsorption/ désorption de l'eau.....	45
3.5.4. Adsorption des liquides organiques et minéraux.....	45
3.5.5. Capacité d'échange cationique	45
3.6. Caractérisations des zéolithes.....	45
3.7. Sites actifs des zéolithes	46
3.8. Facteurs influents sur la synthèse des zéolithes	47
3.8.1. La nature des réactifs et la composition du mélange	47
3.8.2. L'influence du pH (le rôle du minéralisateur)	47
3.8.3. Effet du mûrissement.....	48
3.8.4. Impact de la température et de la durée de synthèse.....	48
3.8.5. La nature et le rôle des agents structurants	48
3.8.6. Effet de la température sur la cristallisation des zéolithes.....	48

3.8.7. Effet de l'agitation sur la cristallisation des zéolithes	49
Conclusion.....	49
Chapitre 4: Les pompes à chaleur.....	50
Introduction	51
4.1. Historique de la pompe à chaleur	51
4.2. Pompe à chaleur	51
4.3. Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur	53
4.4. Les composantes d'une pompe à chaleur	54
4.4.1. Condenseur	54
4.4.2. L'évaporateur.....	55
4.4.3. Le compresseur	55
4.4.4. Détendeur.....	56
4.5. Classification d'une pompe à chaleur	56
4.5.1. Classification en fonction des types de source chaude et de source froide	56
4.5.1.1. La pompe à chaleur air/air	56
4.5.1.2. Pompes à chaleur air / eau.....	57
4.5.1.3. Pompes à chaleur eau-eau	57
4.5.2. Classification en fonction du phénomène physique employé.....	57
4.5.2.1. Pompe à chaleur à compression	57
4.5.2.2. Pompe à chaleur à absorption	58
4.5.2.3. Pompe à chaleur à adsorption	59
4.5.2.3.1. Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur à adsorption.....	59
4.5.2.3.2. Application d'une pompe à chaleur à adsorption.....	60
4.6. Les avantages et les inconvénients de la pompe à chaleur à adsorption	60
4.6.1. Les avantage	60
4.6.2. Les inconvénients	61
Conclusion.....	62
Chapitre 5: Étude et analyse du cycle idéal d'une pompe à chaleur à adsorption.....	63
Introduction	64
5.1. Le cycle de base d'une pompe à chaleur à adsorption	64
5.1.1. Phase de chauffage	65
5.1.1. 1. Phase de Chauffage isostérique (1 - 2).....	65
5.1.1. 2. Phase de Désorption isobare (2 - 3)	65
5.1.2. Phase de refroidissement	66
5.1.2.1. Phase de Refroidissement isostérique (3 - 4).....	66

5.1.2.2. Phase d'Adsorption isobare (4 - 1)	66
5.2. Coefficient de performance	67
5.3. Détermination des températures de début d'adsorption et de désorption	68
5.3.1. Equation de Dubinin-Astakhov (D-A).....	68
5.4. Évaluation de des différentes chaleurs du cycle.....	69
5.4.1. Chauffage isostérique	69
5.4.2. Désorption isobare	69
5.4.3. Refroidissement isosetrique.....	69
5.4.4. Adsorption isobare.....	69
5.4.5. Chaleur de condensation.....	70
5.5. Résultats et discussion.....	70
5.6. Interprétation des résultats.....	73
5.6.1. Chaleur isostérique	73
5.6.2. L'influence de la température d'évaporation.....	73
5.6.3. L'influence de la température de condensation	75
Conclusion.....	80
Conclusion générale	82
Les perspectives.....	83
Bibliographies	84
Annexes.....	90
Résumé	100
Abstract.....	100
ملخص.....	100

LISTES DES FIGURES

Fig. 1 - les composantes du rayonnement solaire.....	18
Fig. 2 - Le spectre solaire	20
Fig. 3 - Schéma d'un capteur solaire plan	24
Fig. 4 - Schéma de principe d'un capteur solaire plan	26
Fig. 5 - Schéma simplifié représentant le phénomène d'adsorption	29
Fig. 6 - Classification de Brunauer des isothermes d'adsorption en phase gazeuse.....	32
Fig. 7 - Groupes principaux de la classification de Giles pour les isothermes d'adsorption en solution. L'abscisse est la concentration CA, l'ordonnée est la quantité adsorbée	34
Fig. 8 - Diagramme représentant la relation entre la température, la pression et la masse adsorbée	35
Fig. 9 - Modèle d'adsorption en monocouche.....	38
Fig. 10 - Modèle d'adsorption en multicouches.....	38
Fig. 11 - Structure des zéolithes A, X et Y. a) Assemblage des tétraèdres dans une zéolithe. b) Cage sodalite. c) zéolithe A. d) zéolithes X et Y.....	42
Fig. 12 - Schéma (A, B, C) Structure poreuse des principales zéolithes utilisées industriellement	46
Fig. 13 - Principe d'une pompe à chaleur	52
Fig. 14 - Schéma d'un circuit de la pompe à chaleur	53
Fig. 15 - Schéma d'un Constitution d'une pompe à chaleur	54
Fig. 16 - Condenseur	54
Fig. 17 - Échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires	55
Fig. 18 - Compresseur hermétique spiral (Scroll)	55
Fig. 19 - Vanne d'expansion thermostatique.....	56
Fig. 20 - Schéma de principe de la pompe à chaleur à absorption	58
Fig. 21 - Schéma du principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur à adsorption.....	60
Fig. 22 - Le cycle idéal de la pompe à chaleur par adsorption (diagramme de Clapeyron).....	65
Fig. 23 - Phase de chauffage dans le cycle d'adsorption.....	66
Fig. 24 - Phase de refroidissement dans le cycle d'adsorption	67
Fig. 25 - Champ isostérique de la zéolite 13X.....	70
Fig. 26 - Variation de chaleur isothermique en fonction de la concentration.....	73
Fig. 27 - Variation du coefficient d'amplification en fonction de la température d'évaporation	73
Fig. 28 - Variation du coefficient d'amplification réversible en fonction de la température d'évaporation.....	74
Fig. 29 - Variation du rendement en fonction de la température d'évaporation	75
Fig. 30 - Variation du coefficient d'amplification en fonction de la température de condensation ($T_e = 10^\circ\text{C}$).....	76
Fig. 31 - Variation du coefficient d'amplification en fonction de la température de condensation ($T_e = 15^\circ\text{C}$).....	76
Fig. 32 - Variation du coefficient d'amplification réversible en fonction de la température de condensation ($T_e = 10^\circ\text{C}$).....	77
Fig. 33 - Variation du coefficient d'amplification réversible en fonction de la température de condensation ($T_e = 15^\circ\text{C}$).....	77
Fig. 34 - Variation de rendement en fonction de la température de condensation.....	78
Fig. 35 - Variation de rendement en fonction de la température de condensation.....	78
Fig. 36 - Variation de la température maximale du capteur thermique en fonction de la température de condensation ($T_e = 10^\circ\text{C}$).....	79
Fig. 37 - Variation de la température maximale du capteur en fonction de la température de condensation ($T_e = 15^\circ\text{C}$) thermique	79

Liste des tableaux

Tableau 1 - Emission du rayonnement solaire	18
Tableau 2 - Les donnés de A, B et C	22
Tableau 3 - Les types de capteurs solaires thermiques.....	25
Tableau 4 - différences entre l'adsorption physique et chimique.....	30
Tableau 5 - Types de zéolithes les plus utilisées	44
Tableau 6 - Domaine de rapports Si/Al pour quelques zéolithes	47
Tableau 7 - Les constants x_0 , n et k	68
Tableau 8 - Le calcul de chaleur isothermique	71
Tableau 9 - Les variations des COA, COA _{rev} et η_{II} en fonction de la température d'évaporation .	71
Tableau 10 - Les variations des COA, COA _{rev} et η_{II} en fonction de la température de condensation à la température d'évaporation fixe ($T_e=283$ K).....	72
Tableau 11 - Les variations des COA, COA _{rev} et η_{II} en fonction de la température de condensation à la température d'évaporation fixe ($T_e=288$ K).....	72

Nomenclature

A_{he}	Une modélisation de ce facteur en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à Capderou
A_p	D'azimut
C_A	La concentration
C_B	Constante de B.E.T, fonction de la chaleur d'adsorption
C_e	Concentration du soluté à l'équilibre [g/g]
COA	Coefficient d'amplification
C_z	Capacité calorifique de l'adsorbant [J / (kg K)]
C_w	Capacité calorifique de l'adsorbat liquide [J / (Kg K)]
D	paramètres caractéristiques de la paire adsorbant / adsorbat
d	Le rayonnement diffus [w/m^2]
g	Le rayonnement global [w/m^2]
h	La hauteur du soleil [°]
h_{fg}	L'enthalpie de condensation [Kj/Kg]
I	L'angle d'incidence sur un plan incliné [°]
I_{DN}	Le rayonnement direct normal [w/m^2]
I_0	Constant solaire [w/m^2]
J	Le numéro du jour dans l'année
K_F	Constante de Freundlich
K_L	Constante de Langmuir
K_T	Constante de Temkin
L_{max}	Longueur d'onde maximale [nm]
m_s	La masse d'adsorbant [Kg]
n_a	Un paramètre caractéristique de la paire adsorbant-adsorbat
n_1	Étant le nombre de moles adsorbées [mol]
n	Étant la valence du cation M
N	Constante de Freundlich associée à l'affinité de l'adsorption
P	La pression d'adsorbat [Pa]
P_c	Pression de condensation [Pa]
P_e	Pression d'évaporation [Pa]
P_0	La pression de vapeur saturante [Pa]
Q_{ads}	Chaleur du processus d'adsorption isobare [Kj/Kg]
Q_c	La chaleur de condensation [Kj/Kg]
Q_{ch}	Chaleur de processus de chauffage isostérique [Kj/Kg]

Q_{des}	Chaleur du processus de désorption isobare [Kj/Kg]
Q_e	Quantité du soluté retenue à l'équilibre par unité de masse de charbon [g/g]
Q_{ev}	La chaleur d'évaporation [Kj/Kg]
Q_m	Quantité maximale du soluté retenue par unité de masse de charbon [g/g]
Q_{ref}	Chaleur de processus de refroidissement isostérique [Kj/Kg]
Q_{st}	La chaleur isostérique d'adsorption [Kj/Kg]
R	Constante des gaz parfaits [Kj/mol K]
T	Température [K]
T_a	Température d'adsorption [K]
T_c	Température de condensation [K]
T_{c1}	Limite la température de désorption [K]
T_{c2}	Limite la température d'adsorption [K]
T_e	Température d'évaporation [K]
T_g	Température de régénération [K]
T_L	Le facteur de trouble atmosphérique de Linke
T_{sat}	La température de saturation de l'adsorbat à la pression du système [K]
T_0	Le trouble dû à l'absorption gazeuse
T_1	Le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 et O_3)
T_2	Le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption
V_{ads}	Le volume de gaz adsorbé [m^3]
V_0	Le volume maximal adsorbable [m^3]
w	le nombre de molécules d'eau par maille.
x_a	Nombre entries
x	La concentration (masse adsorbé par unité de masse d'adsorbant) [Kg/Kg]
x_0	La concentration limite
Y	Nombre entries
Z	L'altitude du lieu [Km]

Symbols grecques

δ	L'angle de la déclinaison du soleil [°]
β	Angle d'inclinaison du capteur [°]
ρ_l	Densité de l'adsorbat à l'état liquide [Kg/ m^3]
ΔQ	Chaleur d'adsorption [Kj/mol K]
τ_b	Sont les transmissions pour le direct

τ_d	Sont les transmissions pour le diffus
γ	L'angle d'incidence. [°]
φ	La latitude du lieu [°]

Indices

ads	Adsorption
abs	Absorption
c	Condensation
ch	Chauffage
DN	Directe normal
dés	Désorption
e	Évaporation
F	Freundlich
g	Générateur
L	Langmuir
ref	Refroidissement
rév	Réversible
sat	Saturation
SC	Constant solaire
St	Isostérique

Introduction générale

Introduction générale

Le bien être des humains est fortement lié au confort de leurs habitations. Ce confort est en partie assuré par des systèmes de chauffage et de refroidissement composés de pompes à chaleur caractérisées par leurs hautes performances thermiques. Elles peuvent être divisées en pompes à chaleur mécaniques et pompe à chaleur à entraînement thermique. Tous les types ont leurs propres avantages et inconvénients, ainsi que leur impact sur l'environnement.

Les pompes à chaleur à sorption objet du présent travail utilisent de la chaleur de bas potentiel pouvant être collectée par un collecteur solaire. Celle à adsorption est composée d'un lit d'adsorbant, un évaporateur, un condenseur et une vanne de détente. Elle fonctionne en cyclant l'adsorbat entre l'adsorbant, le condenseur et l'évaporateur. Le fluide de travail circule dans la machine sans la moindre pompe mécanique. Plusieurs couples de travail peuvent être utilisés. Le couple de travail choisi dans la présente étude est le zéolite-eau. À température ambiante, les zéolithes peuvent adsorber de grandes quantités de vapeur d'eau même à de faibles pressions partielles, et lorsqu'elles sont chauffées, elles désorbent la majeure partie de la vapeur même à des pressions partielles élevées, correspondant à des températures élevées du condenseur [1].

Ce mémoire est constituée d'une introduction générale, de cinq chapitres et d'une conclusion générale

Le premier chapitre est consacré à l'estimation du rayonnement solaire. Ici même sont exposés les différentes composantes au sol du rayonnement solaire, les caractéristiques et les modèles mathématiques du rayonnement solaire. Ce chapitre est complété par l'étude théorique du capteur solaire et le principe de son fonctionnement.

Le deuxième chapitre aborde d'une façon détaillée le phénomène de l'adsorption avec tout ce qui lui relate comme les isothermes d'adsorption, les critères de choix du couple adsorbant / adsorbat, les lois de la chaleur isothermique et enfin la modélisation mathématique de l'adsorption.

Quant aux zéolithes, elles sont exposées dans le troisième chapitre. Ici même, on en retrouve d'abord la définition de la de zéolithe suivie par la description de ses structures, ses types, ses propriétés et enfin ses applications.

Dans le quatrième chapitre on en retrouve une classification globale des pompes à chaleur et leur principe de fonctionnement suivi par un dénombrement des différentes applications de la pompe à chaleur à adsorption.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude et à l'analyse thermodynamiques du cycle théorique de la pompe à chaleur à adsorption fonctionnant avec le couple Zéolithe 13X/ eau. L'étude thermodynamique consiste en la formulation détaillée des équations nécessaires à la détermination de toutes les chaleurs échangées durant phase du cycle. La formulation

mathématique a permis également de calculer les différents coefficients de performance de la pompe à chaleur à adsorption en fonction des différentes températures du cycle.

Enfin, la conclusion générale synthétise les principaux apports du mémoire.

Chapitre 01

Estimation du rayonnement solaire

Introduction

La connaissance du rayonnement solaire est essentielle au calcul de diverses performances des systèmes liés au solaire, tels que les chauffe-eau solaires, les modules photovoltaïques, mais également pour la construction des bâtiments dans la perspective d'une meilleure isolation thermique adaptée au lieu géographique et aussi pour le chauffage des habitations et des locaux par de l'énergie solaire. Les exemples d'utilisation ne font que s'accroître au fil du temps. Cependant le développement de ces filières ne pourra se faire sans la connaissance approfondie du rayonnement solaire [2].

Comme le rayonnement solaire traverse l'atmosphère terrestre. Il est absorbé, réfléchi, dispersé et transmis directement. À la surface de la Terre, le soleil a une intensité plus faible, une couleur différente et une forme différente de celle observée au-dessus de l'atmosphère. Par conséquent, dans les applications d'énergie solaire, les paramètres comme l'irradiation solaire normale directe, l'irradiation horizontale globale et l'irradiation solaire / éclairage global inclinée sont couramment utilisés dans la pratique et plus particulièrement dans les technologies de concentration thermique (concentration d'énergie solaire) [3]. Ce chapitre est consacré à l'étude de toutes ces composantes du rayonnement solaire. Il traite aussi des dispositifs de captage, plus particulièrement le panneau solaire plan

1.1. Définition

Le soleil produit une énorme quantité d'énergie (66 millions W/m^2) qui est transmise à la Terre par un rayonnement. Seule une fraction de cette énergie atteint l'atmosphère (environ 1300 W/m^2). Environ 15% de ce rayonnement est alors absorbé par l'atmosphère et émis dans toutes les directions sous la forme d'un rayonnement diffus. Environ 6% est réfléchi vers l'espace. La partie restante (79%) est directement transmise au sol à travers l'atmosphère. Par conséquent, l'énergie du rayonnement solaire frappant le sol est beaucoup plus faible qu'à la limite de l'atmosphère. Il est généralement considéré qu'en cas de ciel clair, l'énergie atteignant le sol est d'environ 1000 W/m^2 [4].

Le rayonnement solaire est l'ensemble du rayonnement émis par le soleil. En plus des rayons cosmiques, particules animées d'une vitesse et d'une énergie extrême élevées, le soleil émet des ondes électromagnétiques dont le spectre s'étend des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible. Ce rayonnement transporte l'énergie solaire, indispensable à toute vie terrestre [5].

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décompose en deux parties :

L'une provient directement du soleil (direct), l'autre a été diffusée par l'atmosphère (diffus). L'atmosphère et la terre possèdent également un rayonnement propre. La

connaissance de ces divers rayonnements permet d'établir un bilan radiatif du système terre-atmosphère [6].

1.2. Composantes au sol du rayonnement solaire

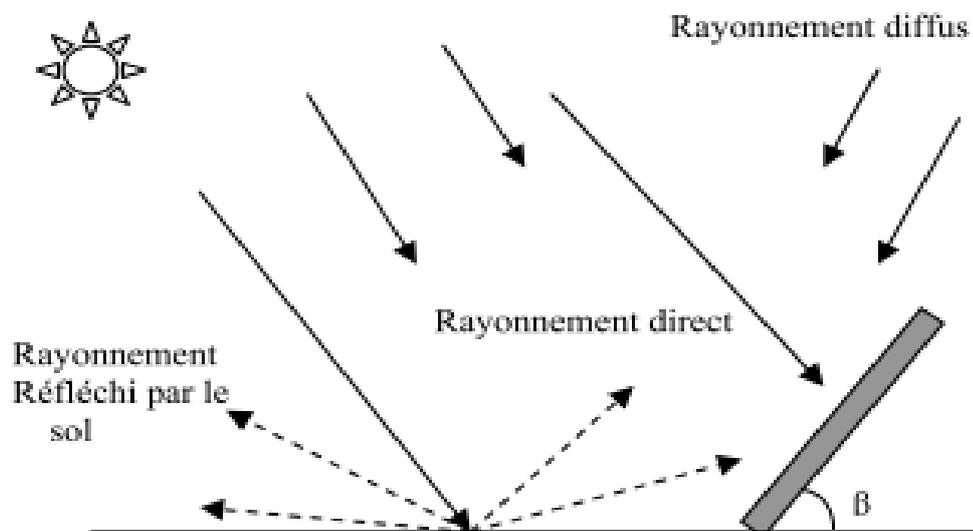


Fig.1 - les composantes du rayonnement solaire [7]

1.2.1. Rayonnement solaire direct

C'est l'éclairement énergétique d'une surface réceptrice normale aux rayons solaires, par le seul rayonnement provenant directement du soleil, par un ciel clair et sans nuages interposés. [13] On définira ainsi une composante verticale du rayonnement direct. Comme ordre de grandeur, la constante solaire (éclairement extra-terrestre) vaut 1400 Wm^{-2} . A 1500 m d'altitude, I_{max} vaut 1200 Wm^{-2} pour $h = 90^\circ$ et 1120 Wm^{-2} pour $h = 30^\circ$ ($m = 1,7$) [8].

1.2.2. Rayonnement diffus

C'est le rayonnement prélevé sur le rayonnement direct par les molécules et les particules diffusantes, surtout dans les couches proches du sol, et rediffusé. Il parvient au sol en provenance de toute la voûte céleste. Par un ciel sans nuages, on peut montrer que sa composante verticale correspond à peu près à la moitié de la composante verticale de la partie diffusée du rayonnement terrestre. Pour une surface horizontale, les énergies mises en jeu sont de 110 Wm^{-2} au sol pour un soleil au zénith, 90 Wm^{-2} pour un soleil à 30° et un coefficient de trouble de $0,05$ et 220 Wm^{-2} pour un soleil au zénith ($m = 1$) et un coefficient de trouble de $0,20$ [8].

1.2.3. Rayonnement global

C'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus [8]. Eclairement énergétique solaire reçu par une surface horizontale à partir d'un angle solide de $2\pi \text{ sr}$. Symbole: G [9]. L'ensemble du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus du ciel et des nuages, reçu sur un plan horizontal, constitue le rayonnement solaire global. La mesure de l'éclairement énergétique dû à ce rayonnement global s'effectue classiquement en climatologie à l'aide d'un

pyranomètre, le même pyranomètre équipé d'une bande pare-soleil permet la mesure du seul rayonnement diffus (par différence entre I_G et I_a on peut calculer le rayonnement solaire direct reçu sur un plan horizontal) [10].

1.3. Caractérisation du rayonnement solaire

1.3.1. Caractérisation énergétique

L'éclairement énergétique fourni par le Soleil est caractérisé par la constante solaire I_0 qui est l'éclairement énergétique d'une surface perpendiculaire à la direction du Soleil, qui serait placée hors de l'atmosphère à l'équinoxe. Les valeurs proposées dans la bibliographie varient entre 1350 et 1400 W/m^2 , et les mesures récentes par satellite convergent vers 1368 W/m^2 , compte tenu des variations de l'activité solaire la gamme de variation de cette "constante" reste cependant de quelques W/m^2 [10].

A l'aide des lois astronomiques déjà présentées et de la connaissance de l'éclairement énergétique extraterrestre il est possible de calculer la quantité d'éclairement reçue par des surfaces diversement orientées. En effet, l'éclairement fourni par le rayonnement solaire extraterrestre sur un plan incliné selon un angle i et d'azimut A_p (par rapport à la direction du Soleil), se calcule à l'aide de la formule: [10]

$$I_0(\sin i \cos h \cos A_p + \cos i \sin h) \quad (1.1)$$

Où B est la hauteur du Soleil. Pour un plan horizontal ($i = 0$) l'éclairement énergétique est :

$$I_0 \sin h \quad (1.2)$$

1.3.2. Caractérisation spectrale

La formule de Wien donne la longueur d'onde maximale L_{max} (en nm) d'émission d'un corps noir à la température T (en kelvin, K) :

$$L_{max} T = 2,900. 10^6 \quad (1.3)$$

Comme la température de couleur du Soleil est voisine de 6000 K, l'éclairement monochromatique fourni par le Soleil passe donc par un maximum pour les longueurs d'onde voisines de 500 nm [10].

1.4. L'effet de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

Lors de son trajet à travers l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses influences:

- Diffusion par les molécules composant les gaz atmosphériques (diffusion de Rayleigh, Mie). Elle affecte les courtes longueurs d'onde du spectre solaire (loi de variation en λ^{-4}); ce qui explique la couleur bleue du ciel [11].
- Absorption par les gaz atmosphériques (oxygène, O_3) dans le domaine des courtes longueurs d'ondes (vapeur d'eau...) et dans celui des grandes longueurs d'onde (gaz carbonique...)[11].

- Diffusion par les aérosols est les microparticules en suspension dans l'atmosphère, ainsi que par les microcristaux et les gouttelettes constituant les nuages. Là, toutes les longueurs d'ondes sont affectées, ce qui cause parfois des troubles atmosphériques [11].

1.5. Répartition spectrale du rayonnement solaire

Les photons ne sont pas émis en même quantité par le soleil quelle que soit la longueur d'onde. Si l'on mesure l'énergie associée à chaque gamme de longueurs d'onde dans le rayonnement solaire, on observe que celle-ci est très faible pour des longueurs d'onde inférieures à $0,2 \mu\text{m}$ et pour des longueurs d'onde supérieures à $4 \mu\text{m}$, mais aussi qu'elle passe par un maximum autour de $0,5 \mu\text{m}$ [12].

Il est intéressant de remarquer que, sur le plan d'émission du rayonnement, le soleil se comporte de façon similaire à un corps noir à une température de presque de 6000°K . La terre et son atmosphère jouent un rôle de transformateurs de l'énergie solaire, qu'elles reçoivent principalement sous forme de rayonnement de courtes longueurs d'ondes et qu'elles réémettent vers l'espace essentiellement sous forme de rayonnement infrarouge [12].

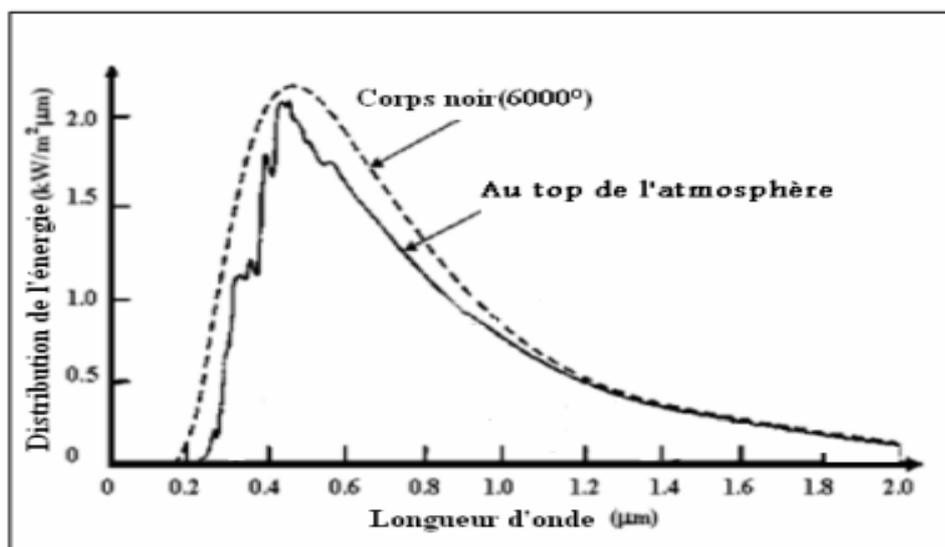


Fig.2 - Le spectre solaire [12]

Le maximum d'intensité a lieu dans le rayonnement visible, soit pour une longueur d'onde de $0,5 \mu\text{m}$. [18] L'énergie totale est pratiquement émise pour des longueurs d'onde situées entre $0,2$ et $3,0 \mu\text{m}$. La surface située sous la courbe représente la constante solaire [13].

Ce rayonnement est groupé au sein de trois grandes parties formant le spectre solaire :

- Les ultraviolet (UV) : de 250 nm à 380 nm , ces rayons sont invisibles à l'œil humain et peuvent être dangereux en cas de surexposition. Ils vieillissent les matériaux et détériorent les surfaces et les couleurs [4].

- La partie visible : de 380 nm (violet) à 780 nm (rouge), ces rayons sont détectés par la rétine humaine et permettent la vue des formes, des reliefs et des couleurs[4].

-Les infrarouges de courtes longueurs d'onde (IR) : de 780 nm à 2500 nm, ces rayons sont invisibles mais sont ressentis sous forme de chaleur [4].

Tableau - 1 Emission du rayonnement solaire [2]

Longueur d'onde constituant le rayonnement solaire de température 6000 K	
Domaine ultraviolet inférieure à 0,3µm (violet-bleu)	10%
Domaine visible de 0,3µm (violet-bleu) à 0,7µm (rouge)	40%
Domaine infrarouge au-delà de 0,7 µm (rouge)	50%

1.6. Le calcul du rayonnement solaire

1.6.1. Le facteur de trouble atmosphérique

Le facteur de trouble atmosphérique permet de calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan. L'absorption et la diffusion causées par les constituants de l'atmosphère peuvent être exprimées par ce facteur [2].

Le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L par ciel clair est donné par la relation suivante:

$$T_L = T_0 + T_1 + T_2 \quad (1.4)$$

T_0 : représente le trouble dû à l'absorption gazeuse [2].

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin \varphi + 0.1(2 + \sin(\varphi)) \times A_{he} - 0.2z - (1.22 + 0.14A_{he})(1 - \sin(h)) \quad (1.5)$$

$$A_{he} = \sin((360/365) \times (j - 121)) \quad (1.6)$$

T_1 : Est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donné par l'approche:

$$T_1 = 0.98 \quad (1.7)$$

T_2 : est le trouble relatif à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption. [2]

$$T_2 = (0.9 + 0.4 \times A_{he}) \times (0.63)^z \quad (1.8)$$

1.6.2. Le rayonnement direct normal (I_{DN})

Le calcul ce rayonnement suit des différents méthodes parmi c'est méthode :

$$I_{DN} = I_0 \exp\left(-\frac{T_L}{0.9+9.4 \sin h}\right) \quad (1.9)$$

I_0 : constant solaire, 1360 W/m² [14].

1.6.3. Le rayonnement solaire direct (s)

La valeur de rayonnement solaire direct sur un plan récepteur qui égal à [13] :

$$s = I_{DN} \cos \gamma \quad (1.10)$$

γ :L'angle d'incidence[8].

1.6.4. Le rayonnement diffus (d)

La relation du rayonnement solaire [8] :

$$d = 125 \sin(h)^{0.4} \left(1 + \frac{\cos i}{2}\right) + 211.86 \sin(h)^{1.22} \left(\frac{1 - \cos i}{2}\right) \quad (1.11)$$

Ou par l'utilisation de la corrélation suivante en l'absence de toute mesure [8] :

$$d = 54.8 \sqrt{\sin(h)} [T_L - 0.5 - \sqrt{\sin(h)}] \quad (1.12)$$

1.6.5. Le rayonnement global (g)

Le rayonnement global est La somme de deux rayonnements, direct et diffus [14].

$$g = s + d \quad (1.13)$$

1.7. Caractéristiques du rayonnement solaire

L'énergie solaire au niveau de la terre est disponible sous forme de rayonnement électromagnétique émis depuis le soleil. La puissance transmise par ce rayonnement varie avec la longueur d'onde du rayonnement. La plus grande quantité d'énergie est apportée par les ondes visibles (lumière blanche qui est la superposition de toutes les couleurs) [15].

Certaines ondes sont absorbées partiellement ou totalement par les particules de l'atmosphère (les molécules d'ozone absorbent une partie de l'ultra-violet) [15]. La puissance incidente par unité de surface sur un plan donné est appelée irradiance. Elle est donnée en W/m². Par intégration des irradiances sur un intervalle de temps donné, on accède aux irradiations, usuellement données en kWh/m² [15].

1.8 Les modèles pour estimer le rayonnement solaire

1.8.1 Modèle de PERRIN DE BRICHAMBEAU

Ce modèle est présenté par les formules suivantes [16] :

$$g = s + d \quad (1.14)$$

$$s = A \sin(h) \exp(-1/(C \sin(h + 2))) \quad (1.15)$$

$$d = B \sin(h)^{0.4} \quad (1.16)$$

Avec A, B et C sont rapportés dans le Tab. 2.

Tableau -2 Les données de A, B et C [16]

Etat du ciel	A	B	C
Ciel très pur	1300	87	6
Ciel moyen	1230	125	4
Ciel pollué	1200	187	2,5

1.8.2 Modèle de HOTTEL et LIU JORDAN

$$g^* = s^* + d^* \quad (1.17)$$

$$s^* = gne. \sin(h). \tau_b \quad (1.18)$$

$$d^* = gne. \sin(h). \tau_d \quad (1.19)$$

$$gne = 1353 \left[1 + 0.0334 \cos\left(\frac{360}{365} J - 2\right) \right] \quad (1.20)$$

Ou sous la forme :

$$gne = C(J). i \quad (1.21)$$

C(J) : est la correction de la distance. [16]

$$\cos i = \cos \delta . \cos w . \cos(\varphi - \beta) + \sin \delta . \sin(\varphi - \beta) \quad (1.22)$$

Sur le plan horizontal : $\cos i = \sin h$

τ_b et τ_d sont les transmissions pour le direct et le diffus. [16]

$$\tau_b = a_0 + a_1. \exp(-k/\sin(h)) \quad (1.23)$$

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939. \tau_b \quad (1.24)$$

Avec :

$$a_0 = 0.4237 - 0.00820. (6 - z)^2 \quad (1.25)$$

$$a_1 = 0.05055 - 0.00595. (6.5 - z)^2 \quad (1.26)$$

$$k = 0.2711 + 0.01858. (2.5 - z)^2 \quad (1.27)$$

Ces formules sont établies pour une atmosphère moyenne de visibilité 23 km et pour des altitudes inférieures à 2.5 km [16].

1.9. Le capteur solaire plan

Les systèmes de conversion d'énergie solaire en énergie thermique en utilisant le capteur solaire plan sont les plus anciens, les plus avancés et les plus économiques. Le capteur solaire est un échangeur de chaleur, il est composé de surface noire (absorbeur) qui transforme le rayonnement solaire en chaleur et le transmet au fluide caloporteur (air ou eau). La capacité de transformation de l'irradiation solaire en chaleur d'une installation dépend du besoin et l'utilité qu'on veut donner à la production de cette chaleur, suivant les procédés de transformation, on peut classer les systèmes solaires [17] :

-Basse et moyenne température ($\leq 100^{\circ}\text{C}$): (Chauffage central, Eau chaude sanitaire, Réfrigération, Dessalement de l'eau de mer, Séchage des fruits, des légumes, ...etc.)[17].

-Haute température ($> 100^{\circ}\text{C}$) : (Procédés thermiques, Stérilisation) [17].

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,.....)[18]. La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température : $T_{fs}-T_{fe}$ à la traversée du capteur [18].

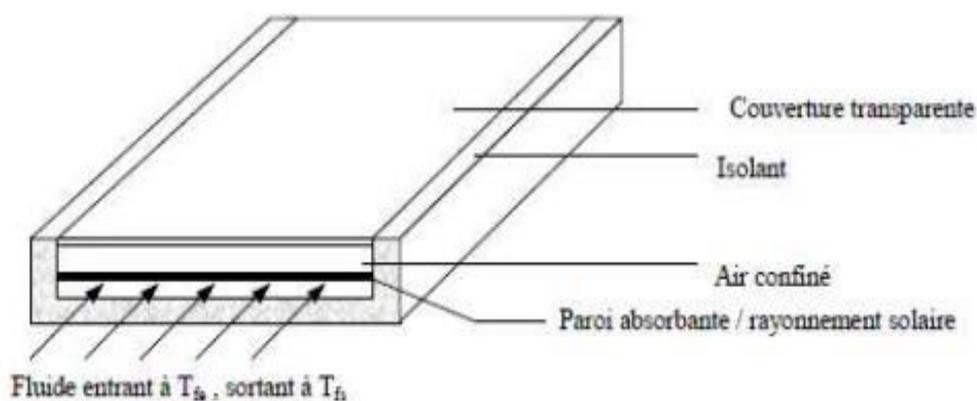


Fig.3 - Schéma de principe d'un capteur solaire plan [18]

Un capteur solaire est constitué principalement d'un absorbeur et d'un fluide caloporteur chargés de capter l'énergie solaire, et d'un système de transport et de stockage (ballon de stockage), permettant le déphasage entre le rayonnement solaire et l'utilisation de la chaleur transformée [19].

Tableau -3 Les types de capteurs solaires thermiques [19]

Type de capteurs	Température de fonctionnement	Application
Absorbeurs nus : pas de coffre isolant, pas de vitrage	30 -40°C : Bon rendement uniquement à faible température en raison des fortes déperditions	Chauffage des piscines
Capteur plans : l'absorbeur est isolé dans un coffre et protégé un vitrage spécial	60 - 90°C : Les déperditions sont limitées par le coffre et le vitrage	Production d'eau chaud sanitaire et de chauffage
Collecteur d'air : idem que Capteur plans, mais le fluide caloporteur est remplacé par de l'air	40 – 50°C	Chauffage à air du locaux
Capteur à vide sans vide : L'absorbeur est placé dans un tube en verre, sous vide	70 – 130°C : Les déperditions par convection dans le capteur sont quasiment totalement évitées	Production d'eau chaud sanitaire et de chauffage (résidentielle et industriel)

1.9.1. Principe de captation du rayonnement solaire

Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur des rayons solaires qui les transforment en chaleur, en absorbant les rayons solaires provenant de toutes les directions.

Un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel, dont la réalisation ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, fait appel à des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite. Les capteurs plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, par contre les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct. La figure suivante montre le principe de captation par le type de conversion thermique de l'énergie solaire [20].

1.9.2. Fonctionnement d'un capteur solaire plan

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple (figure) [21].

Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la

chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur. Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le proche I.R mais opaque pour le rayonnement I.R lointain émis par l'absorbeur, ainsi, la couverture transparente crée un effet de serre. [26] L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement [21].

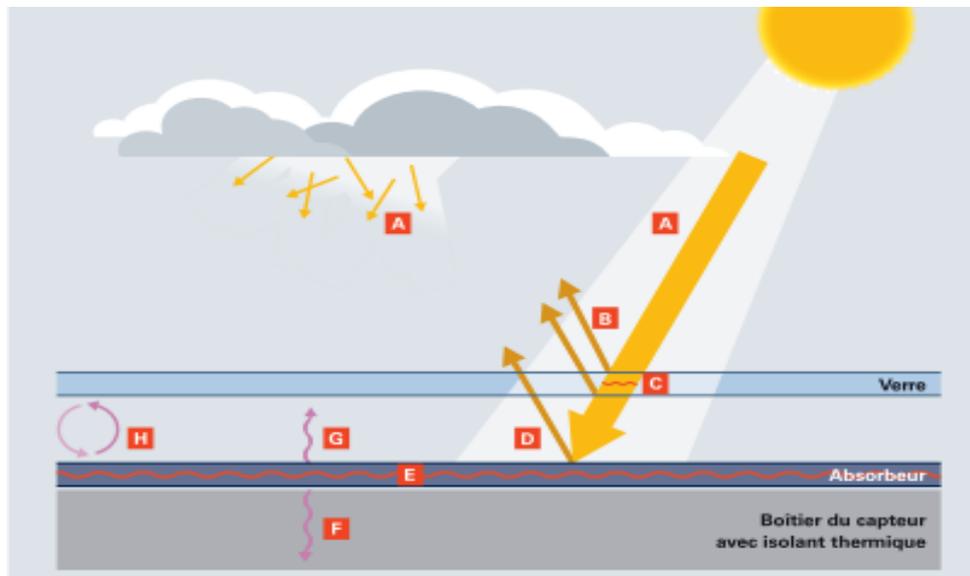


Fig.4 - Schéma de principe d'un capteur solaire plan [22]

A : rayonnement sur le capteur

B : réflexion sur le vitrage

C : adsorption par le vitrage

D : réflexion sur l'absorbeur

E : Réchauffement de l'absorbeur par la puissance de rayonnement

F : conduction thermique du matériau du capteur

G : rayonnement thermique de l'absorbeur

H : convection

Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence les différentes composantes du rayonnement solaire pouvant être mesurées directement ou estimées par des modèles analytiques établis sur la base de mesures expérimentales. Ici même on retrouve, un exposé succinct de quelques modèles mathématiques connus comme ceux de Perrin de Brichambaut et de Hottel et Liu Jordan. Le chapitre est clôturé par un exposé du rôle et du fonctionnement du capteur solaire plan largement utilisé dans les applications solaires.

Chapitre 02

Thermodynamique de l'adsorption

Introduction

D'innombrables processus physiques, chimiques et biologiques ont lieu à la limite entre deux phases, tandis que d'autres sont initiés à cette interface. Le changement de concentration d'une substance donnée à l'interface par rapport aux phases voisines est appelé adsorption. Selon le type de phases en contact, ce processus est observé dans les systèmes suivants: liquide-gaz, liquide-liquide, solide-liquide et solide-gaz [23]. Le présent chapitre est consacré à l'étude du phénomène de l'adsorption qui se produit sur les surfaces solides mises en contact avec un gaz ou un liquide. Il débute par la description des différents type d'adsorption, leurs caractéristiques, thermodynamique de l'adsorption, Critères de choix du couple Adsorbant/Adsorbat, Chaleur isostérique, Modélisation mathématique de l'adsorption.

2.1. Description du phénomène d'adsorption

L'adsorption est un phénomène qui apparaît lors d'un équilibre entre un gaz et un solide. Les molécules d'un fluide (gaz ou liquide) appelé adsorbat ou fluide frigorigène, se fixent sur la surface d'un solide appelé un adsorbant[24].

L'adsorption est définie comme l'accroissement de la densité d'une substance dans le voisinage d'une interface entre deux phases (gaz-solide, gaz-liquide, solide-liquide, liquide-liquide). Elle tire son origine du fait que les atomes ou molécules constituant la surface d'une phase ne peuvent pas, contrairement à ceux dans le volume de matière, interagir symétriquement avec leurs voisins. Conséquemment, une asymétrie dans le potentiel d'interaction se manifeste perpendiculairement à la surface de la phase, favorisant ainsi l'attraction de molécules libres présentes dans le voisinage [25].

On distingue deux types d'adsorption, chimique ou physique selon la nature de la fixation des molécules de gaz et leurs énergies mises en jeu. Dans le cas de l'adsorption chimique, la fixation des molécules d'adsorbat sur la surface d'adsorbant se fait par des liaisons chimiques fortes dont l'énergie de liaison est assez grande de l'ordre de 50 à 400 kJ/mole. Alors que pour l'adsorption physique est un processus qui résulte de liaisons physiques plus faibles, avec des énergies d'interaction de l'ordre 20 KJ/mole[24].

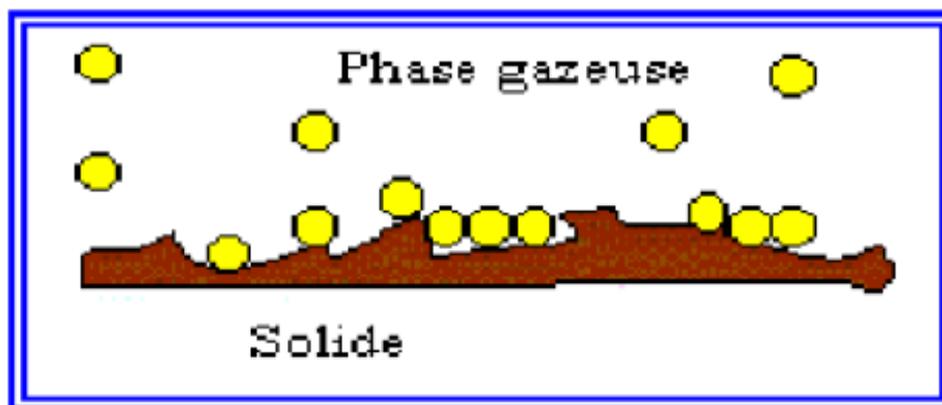


Fig.5 - Schéma simplifié représentant le phénomène d'adsorption [26]

2.2. Définition de l'adsorption

L'adsorption est un procédé de traitement, bien adapté pour éliminer une très grande diversité de composés toxiques dans notre environnement. Elle est essentiellement utilisée pour le traitement de l'eau et de l'air. Au cours de ce processus les molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé adsorbat, viennent se fixer sur la surface d'un solide, appelé adsorbant. Ce procédé définit la propriété de certains matériaux de fixer à leur surface des molécules (gaz, ions métalliques, molécules organiques, etc.) d'une manière plus ou moins réversible. Au cours de ce processus, il y aura donc un transfert de matière de la phase aqueuse ou gazeuse vers la surface solide [27].

Le phénomène inverse, par lequel les molécules adsorbées sur une surface s'en détachent, notamment sous l'action de l'élévation de la température, ou de la baisse de pression, se nomme la désorption [28].

Un adsorbant : est un matériau qui a été optimisé pour un certain type d'adsorption. Il n'existe donc pas une unique liste de caractéristiques permettant de définir un adsorbant, mais plutôt un très grand nombre de types de matériaux pouvant avoir des propriétés très différentes [29]. Les caractéristiques physiques les plus importantes des adsorbants sont le volume poreux, la distribution poreuse et la surface spécifique. Pour la mise en œuvre, il est important à l'écrasement et à l'érosion [30].

Adsorbat : Les adsorbats sont des matériaux qui ont des molécules de petite taille. Les trois adsorbats les plus utilisés sont le méthanol, l'eau et l'ammoniaque. Les caractéristiques les plus importantes des adsorbats sont : la chaleur latente, le volume spécifique, la pression de saturation, la stabilité avec l'adsorbant utilisée et l'impact sur l'environnement [31].

2.3. Type d'interaction de l'adsorption

Selon la nature des interactions qui retiennent l'adsorbat sur la surface de l'adsorbant, l'adsorption peut être classée en deux familles :

2.3.1. Adsorption physique ou physisorption

L'adsorption est un phénomène réversible qui résulte des forces intermoléculaires d'attraction entre les molécules du solide et celles de la substance adsorbée[32].

Adsorption physique ou physisorption met en jeu de très faibles interactions entre entités moléculaires comme les forces d'attraction de van der Waals et des forces dues aux interactions électrostatiques de polarisation. Elle est réversible et peu spécifique. L'adsorption physique est rapide et généralement limitée par les phénomènes de diffusion. La force des interactions mises en jeu peut être estimée par l'énergie d'adsorption qui est comprise entre 5 et 40 kJ.mol⁻¹ et considérée comme faible : la désorption peut se produire et être même totale [33].

2.3.2. Adsorption chimique ou chimisorption

Dite chimisorption est un phénomène irréversible due à une liaison chimique forte de type covalente entre les atomes superficiels du solide et les molécules adsorbées, ce type d'adsorption met en jeu des énergies d'attractions élevées, qui conduisent à des chaleurs d'adsorption élevées, approchant souvent aux énergies de liaisons chimiques covalentes de l'ordre de 20 à 80 Kcal/mol [26].

Elle résulte d'une interaction chimique entre les molécules d'adsorbant composant la surface du solide et les molécules de soluté. Ces forces attractives de nature chimique provoque un transfert ou mise en commun d'électrons et en conséquence, destruction de l'individualité des molécules et formation d'un composé chimique à la surface de l'adsorbant. Ce type d'adsorption se développe à haute température et met en jeu une énergie de transformation élevée [32]. La comparaison des deux types d'adsorption pourrait être appréciée à partir du tableau suivant :

Tableau -4 différences entre l'adsorption physique et chimique [26]

Propriétés	Adsorption physique	Adsorption chimique
Energie d'adsorption	5à10Kcal/mol	20à100Kcal/mol
Température de processus	Inférieur à la température d'équilibre	Elevée
Nature de liaison	Physique (Van der Waals)	Chimique
La désorption	Plus ou moins parfait	Difficile
Energie d'activation	Non appréciable	Peut être mise en jeu
La cinétique	Très rapide	Lente
Etat de surface	Formation de multicouche	Formation de monocouche

2.4. Caractérisations des types d'adsorption

2.4.1. Adsorption physique

2.4.1.1. Energétique et cinétique

Adsorption est un processus exothermique. Toutefois, il est caractérisé par les valeurs faibles enthalpie (20 à 40 KJ/mol), en raison de faibles forces de van der Waals de l'attraction. L'énergie d'activation pour l'adsorption est également très faible et par conséquent, il est pratiquement un processus réversible [34].

2.4.1.2. Effet de la température

Adsorption physique étant un processus exothermique, il se produit plus facilement à des températures basses et diminue avec l'augmentation de la température (principe du Chatelier-Le) [34].

2.4.1.3. Effet de la pression

Dans le cas d'adsorption des gaz sur les solides, du degré d'adsorption augmente avec l'augmentation de pression comme le volume de la diminution des gaz au cours de l'adsorption (principe du Chatelier-Le) [34].

2.4.1.4. Spécificité

Étant donné que les forces du van der Waals sont universelles, une surface donnée d'un adsorbant ne montre pas une préférence pour un adsorbat dans physisorption c'est-à-dire que n'est pas spécifique au sujet de l'adsorbant [34].

2.4.2. Adsorption chimiques

2.4.2.1. Energétique et cinétique

Chimisorption est également un processus exothermique et les valeurs d'enthalpie sont plus élevées (80-240 KJ/ mol) car il implique la formation de liaisons chimiques. Cependant, l'énergie d'activation pour la chimisorption est élevée et se produit lentement [34].

2.4.2.2. Effet de la température

Même si l'adsorption chimique est un processus exothermique, il ne se produit pas lentement à une température plus basse en raison de la barrière d'énergie cinétique élevée. Par conséquent, comme les vidanges plus chimiques, l'étendue de la chimisorption augmente avec l'augmentation de la température jusqu'à une certaine limite et puis après cela il commence à diminuer [34].

2.4.2.3. Effet de la pression

La chimisorption n'est pas sensiblement affectée par petites variations de pression. Cependant, des pressions très élevées sont favorables à la chimisorption [34].

2.4.2.4. Nature de l'adsorbant

Adsorption augmente avec la diminution de la solubilité du solvant. Plus la solubilité, le plus forte le soluté-solvant [34].

2.5. Isothermes d'adsorption

2.5.1. Phase gazeuse

Pour une température T, l'équation caractéristique décrivant le phénomène d'adsorption depuis la phase gazeuse est la quantité d'adsorbat capturée par la surface de l'adsorbant en fonction de la pression d'adsorbat [28].

$$\frac{n_a}{m_s} = f(P) \quad (2.1)$$

n_a : étant le nombre de moles adsorbées

m_s : la masse d'adsorbant. Dans le cas où le fluide n'est pas en état supercritique

P/P_0 : rapport entre la pression d'adsorbat et la pression de vapeur saturante à la température T

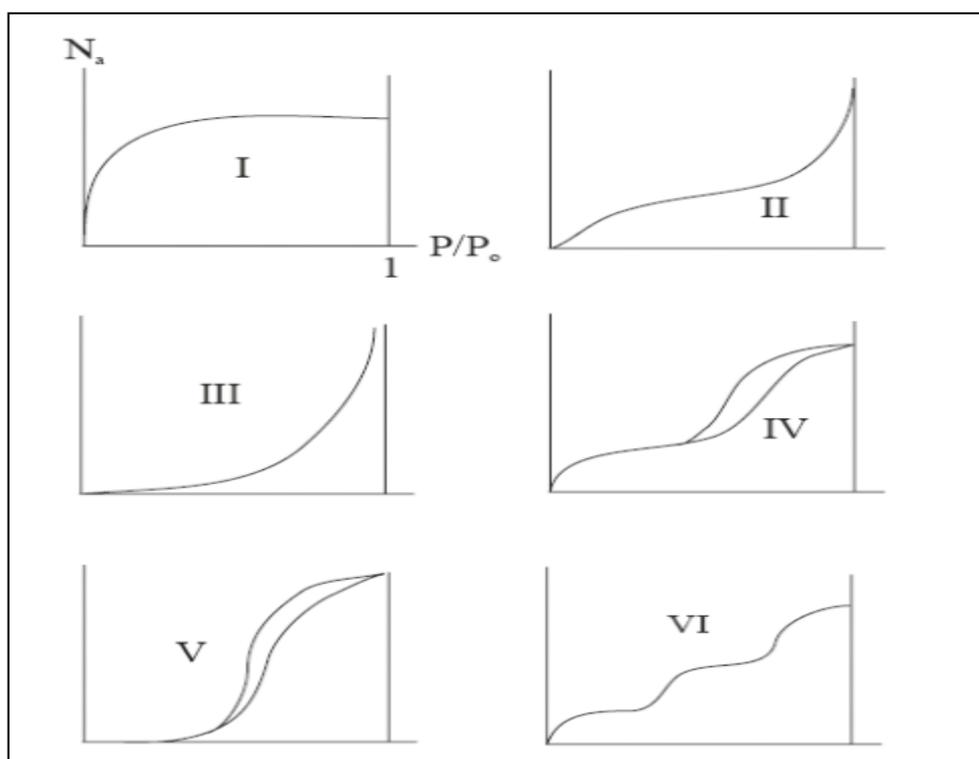


Fig.6- Classification de Brunauer des isothermes d'adsorption en phase gazeuse [30]

2.5.1.1. Les isothermes réversibles de types I

Est caractérisée par une augmentation rapide de la quantité adsorbée dans le domaine des faibles pressions d'équilibre suivie par un palier approximativement horizontal jusqu'à la pression de vapeur saturante (pression des molécules de gaz en équilibre avec la phase liquide pour une température donnée)[35].

2.5.1.2 Les isothermes réversibles de type II

Sont classiquement obtenues avec des solides non poreux ou macroporeux. Elles sont représentatives d'une adsorption multicouche ; le point B, point de départ de la partie linéaire du milieu de l'isotherme correspond au remplissage de la monocouche et au départ de l'adsorption multicouche [30].

2.5.1.3. Les isothermes réversibles de type III

Elles montrent une faible adsorption aux basses pressions liées à un mauvais mouillage de l'adsorbant par l'adsorbat. L'adsorption devient d'autant plus facile que la quantité déjà adsorbée est importante. Cela s'explique à la fois par une faible attraction adsorbat-adsorbant et par de fortes attractions entre molécules adsorbées [35].

2.5.1.4. La caractéristique principale des isothermes de type IV

Est l'hystérèse correspondant à la condensation capillaire dans les mesopores, associée à de l'adsorption sur la surface, comme pour les isothermes de type. Ces isothermes sont fréquentes pour de nombreux adsorbants industriels mes poreux [30].

2.5.1.5. Les isothermes de type V

Sont rares, elles se rencontrent pour certains solides poreux pour lesquels les interactions adsorbant-adsorbat sont faibles [30].

2.5.1.6. Les isothermes de type VI

Est caractéristique de l'adsorption sur une surface uniforme. L'adsorption s'effectue couche par couche ce qui se traduit sur la courbe par une succession de marches sur le tracé de l'isotherme [35].

Ces différents types d'isothermes. Les équations d'isotherme s'ensuivent peuvent alors être utilisées pour prédire que les quantités ont adsorbé basé sur un nombre limité d'expériences. Les nombreux modèles d'isotherme sont fondés sur deux différentes approches :L'approche de Langmuir et L'approche de Gibbs[36].

2.5.2. Phase liquide

Si l'adsorbat et une molécule en solution dans un solvant, l'équation caractéristique devient:

$$\frac{n_a}{m_s} = f(C_A) \quad (2. 2)$$

C_A : est la concentration

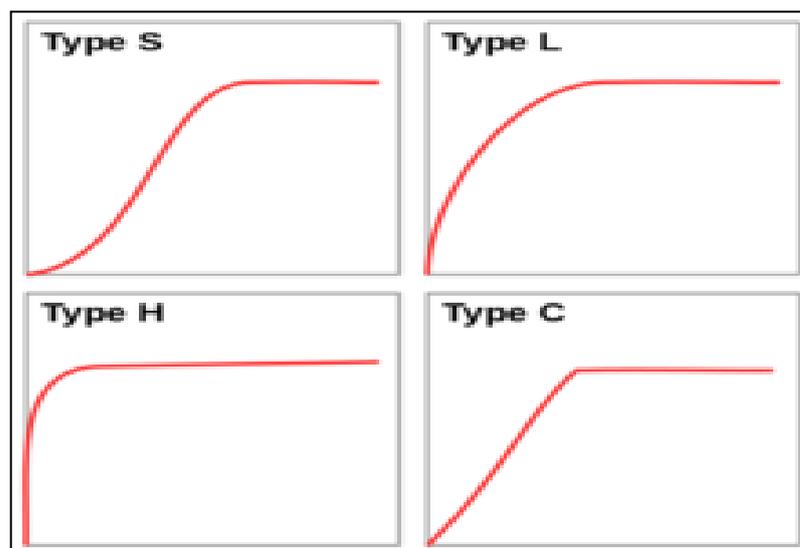


Fig.7 - Groupes principaux de la classification de Giles pour les isothermes d'adsorption en solution. L'abscisse est la concentration C_A , l'ordonnée est la quantité adsorbée [29]

Les formes caractéristiques des isothermes ont été classifiées par Giles en quatre groupes principaux:

2.5.2.1. Courbe du type (S)

Les isothermes de cette classe présentent, à faible concentration, une tourné vers le haute. Les molécules adsorbées favorisent l'adsorption ultérieure d'autres molécules (adsorption coopérative). Ceci est dû aux molécules qui s'attient par des forces de Van der Waals, et se regroupent en ilots dans lesquels elles se tassent les unes contres les autres [37].

2.5.2.2. Courbe du type (L)

Les isothermes de classe L présentent, à faible concentration en solution, une concavité tournée vers le bas qui traduit une diminution des sites libres au fur et à mesure de la progression de l'adsorption [37].

2.5.2.3. Courbes de type (H)

La partie initiale de l'isotherme est presque verticale, la quantité adsorbée apparaît importante à concentration quasiment nulle du soluté dans la solution, ce phénomène se produit lorsque les interactions entre les molécules adsorbée et la surface du solide sont très fortes [37].

2.5.2.4. Courbe de type (C)

Les isothermes de cette classe se caractérisent par une partition constante entre la solution et le substrat jusqu'à un palier. La linéarité montre que le nombre de site libre reste constant au cours de l'adsorption. Ceci signifie que le site est créés au cours de l'adsorption. Ce qui implique que les isothermes de cette classe sont obtenues quand les molécules de soluté sont capables de modifier la texture du substrat en ouvrant des pores qui n'avaient pas été ouverts préalablement par le solvant [37].

2.6. Thermodynamique de l'adsorption

L'état thermodynamique d'un couple adsorbant-adsorbat est caractérisé par une relation bivariable entre trois grandeurs: masse, pression et température (m , P et T). A l'équilibre, la relation bivariable peut s'exprimer par [38]:

- L'isotherme d'adsorption T (m , P)
- L'isobare d'adsorption P (m , T)
- L'isostère d'adsorption M (P , T)

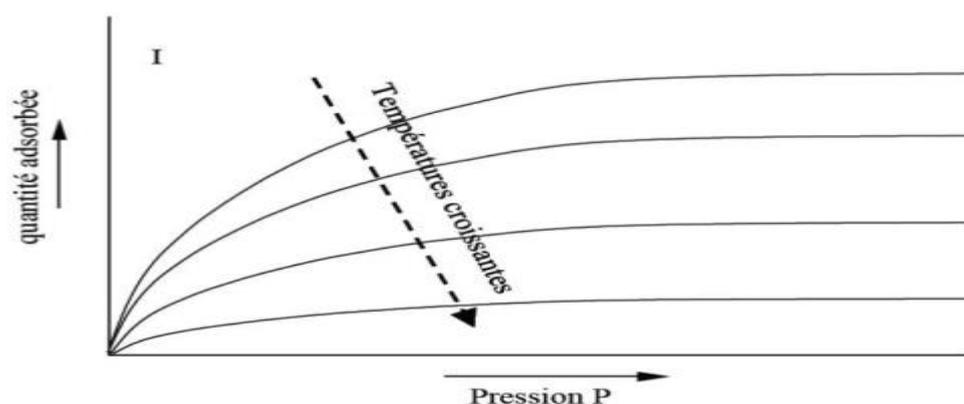


Fig.8 - Diagramme représentant la relation entre la température, la pression et la masse adsorbée [38]

On constate que la quantité de gaz adsorbée diminue lorsque la température augmente; par contre cette quantité augmente avec la pression. De façon pratique, pour l'étude des systèmes frigorifiques à adsorption, on utilise les isothermes d'adsorption, qui représentent, en fonction de la pression de vapeur, la quantité de gaz adsorbée par kilogramme d'adsorbant à température donnée: $m = f(p)$ [38].

2.7. Critères de choix du couple Adsorbant/Adsorbat

Le choix du couple adsorbant/adsorbat est très important. Il se fait en fonction des niveaux de température de l'utilisation frigorifique envisagée (réfrigération, conservation des aliments, climatisation, pompe à chaleur ou stockage d'énergie). Pour une application donnée, le choix du couple solide-gaz repose essentiellement sur le cycle thermodynamiques de fonctionnement du système [31].

2.7.1. Choix de l'adsorbant

Il est généralement choisi en fonction de 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:[39]

- Les corps utilisés en tant qu'adsorbants sont des matériaux poreux ou microporeux qui présentent une très grande surface spécifique
- 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.
- Et présentant un coût abordable en étant largement disponible [39].

2.7.2. Choix de l'adsorbat

Le choix de l'adsorbat est fait de sorte qu'il doit :

- Avoir une forte chaleur latente de vaporisation.
- Une petite taille des molécules pour faciliter le phénomène d'adsorption
- Non toxique, non inflammable et non corrosive.
- Une faible valeur de la pression de saturation (légèrement supérieure à la pression atmosphérique).
- Etre facilement adsorbable à basse température et plus difficilement adsorbable à haute température [39].

2.8. Chaleur isostérique d'adsorption

Généralement, la chaleur isostérique d'adsorption Q_{st} peut être mesurée par des techniques expérimentales ou estimées à partir de plusieurs méthodes analytiques ; choisissant l'une basée sur les lois de base de la thermodynamique développé comme suit [7]:

Le processus d'adsorption étant un processus à l'équilibre, obéit à une équation du type Clausius-Clapeyron [40] :

$$\frac{Q_{st}}{R} = \frac{\partial \ln P}{\partial \left(-\frac{1}{T}\right)} \quad (2.3)$$

$$Q_{st} = R \left(\frac{\partial \ln P}{\partial \left(-\frac{1}{T}\right)} \right) \quad (2.4)$$

Donc la chaleur isostérique est :

$$Q_{st} = R \left(\frac{\ln P_e - \ln P_c}{-\ln\left(\frac{1}{T_e}\right) + \ln\left(\frac{1}{T_c}\right)} \right) \quad (2.5)$$

2.9. Modélisation mathématique de l'adsorption

L'adsorption est un phénomène de fixation des molécules de l'adsorbant sur la surface de l'adsorbant, ce qui forme un film mono ou multicouche de l'adsorbant. A cause de la diminution de la pression à l'intérieur des petits pores, il y aura une apparition du liquide de l'adsorbant (condensation) qui remplira les pores étendus à l'intérieur de la particule [38].

2.9.1. Modèle moléculaires

2.9.1.1 Modèle de LANGMUIR

La première corrélation de l'adsorption a été établie par Langmuir en 1916 [37]. Ce modèle est très utile pour l'adsorption monomoléculaire d'un soluté à la surface monocouche d'un adsorbant.

Il est décrit par l'expression suivante [41] :

$$\frac{Q_e}{Q_m} = \frac{K_L C_e}{1 + K_L C_e} \quad (2.6)$$

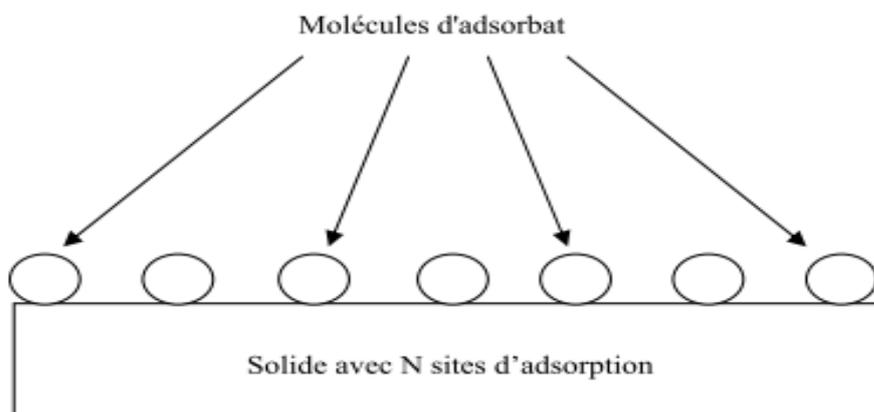


Fig.9 - Modèle d'adsorption en monocouche [7]

2.9.1.2 Modèle de Freundlich

L'isotherme représentée selon le modèle de Freundlich peut convenir dans toutes les situations pour décrire l'adsorption en solution.

L'équation de Freundlich est donnée sous la forme: [41]

$$Q_e = K_F C_e^{n_1} \quad (2.8)$$

2.9.1.3. Modèles de BRUNAUER, EMMET et TELLER (B.E.T)

Elle est basée sur l'hypothèse que l'adsorbant est recouvert de couches multimoléculaires (multicouches). Ce modèle fait intervenir un recouvrement par superposition de couches et est décrit par l'équation suivante, proposée par B.E.T [31].

$$\frac{P}{V_{ads} \cdot (P_s - P)} = \frac{1}{V_0 \cdot C_B} + \frac{(C_B - 1)}{V_0 \cdot C_B \cdot P_s} \quad (2.9)$$

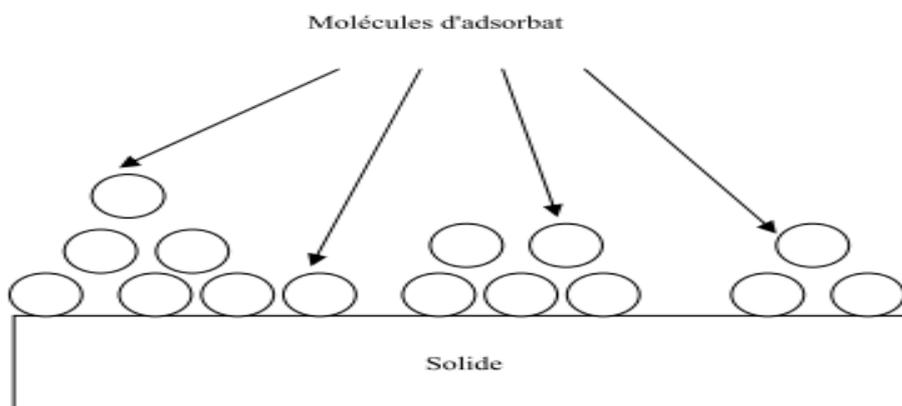


Fig.10 - Modèle d'adsorption en multicouches [7]

2.9.1.4 Modèle de Temkin

Temkin suppose que l'abaissement de la chaleur d'adsorption avec l'augmentation du taux de recouvrement n'est pas logarithmique comme dans le cas des systèmes conduisant à l'équation de Freundlich, mais linéaire notamment à moyen et faible taux de recouvrement .

L'isotherme de Temkin est représentée par l'équation suivante: [41]

$$Q_e/Q_m = (RT)/(\Delta Q) \cdot \ln K_T \cdot C_e \quad (2. 12)$$

Conclusion

Il faut retenir que l'adsorption est un phénomène qui apparaît lors d'un équilibre entre un gaz et un solide. Les molécules adsorbées se fixent sur la surface de l'adsorbant. Selon la nature des interactions qui retiennent l'adsorbé sur la surface de l'adsorbant, l'adsorption peut être divisée en adsorption physique et adsorption chimique. Cinq types d'isothermes avec quatre formes caractéristiques et plusieurs modèles mathématiques ont été exposés dans ce chapitre.

Chapitre 03

Les zéolithes

Introduction

Parmi les procédés de séparation ou de purification mis en œuvre, nombreux sont ceux qui utilisent des zéolithes [42]. Ces derniers sont un sous-ensemble de tamis moléculaires [43]. Le présent chapitre a pour but de mettre de la lumière sur ces tamis moléculaires, leurs structures, types et enfin leurs propriétés et particulièrement de stockage et de déstockage de l'énergie.

3.1. Historique de zéolithe

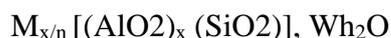
L'histoire des zéolithes a véritablement commencé avec la découverte, il y a environ 250 ans (1756) par le minéralogiste suédois A.F. Cronstedt d'un minéral (la stilbite). Cette nouvelle famille de minéraux considérés comme matériaux inorganiques composé essentiellement de silicates, d'aluminium et d'oxygène [44].

En 1930, les premières structures de zéolithes furent déterminées par Taylor et Pauling. Au milieu des années 1930, on commença à trouver des ouvrages qui décrivent les procédures d'échanges d'ions, les propriétés d'adsorption, de tamisage moléculaire, et les propriétés structurales de zéolithes naturelles et synthétiques. Il établit en 1945, la première classification fondée sur la taille moléculaire des zéolithes connues à l'époque. En 1950, au laboratoire de l'entreprise Union Carbide, Dr. Robert M. Milton synthétisa la faujasite X de manière reproductible avec une grande pureté. Une année après, Dr. Donald W. Breck rejoignit le groupe de Milton et synthétisa, en 1954, la faujasite Y. En 1959, l'Union Carbide commercialisa la zéolithe HY comme catalyseur pour l'isomérisation des paraffines [45].

Une autre étape clé dans l'application des zéolithes fut la démonstration par P.B. Weisz et collaborateurs de la « sélectivité de forme » des catalyseurs zéolithiques provoquée par tamisage moléculaire (1960), qui a eu pour conséquence un développement rapide de la recherche de nouvelles zéolithes synthétiques et d'applications industrielles [46].

3.2. Définition de zéolithe

Les zéolithes sont des cristaux microporeux de silico-aluminates alcalins ou alcalino-terreux de formule générale :



n étant la valence du cation M, x et Y des nombres entiers avec Y/x égal ou supérieur à 1 et w le nombre de molécules d'eau par maille [47].

Les cadres sont 4 composé de $[SiO_4]^{-4}$ et $[AlO_4]^{-5}$ tétraèdres, qui partagent de coin pour former différentes structures. Les tétraèdres sont reliés à la forme de cages reliées par des ouvertures des pores de taille définie ; selon le type de construction, les tailles des pores s'étendent

d'environ 0,3 à 1 nm. La charge négative sur le treillis est neutralisée par la charge positive des cations situés à l'intérieur des pores du matériau. Dans les zéolites de base, ce sont généralement des métaux monovalents et bivalents ou a combinaison. Les cations métalliques peuvent être remplacés par des protons acides par échange d'ions d'ammonium et de calcination ultérieure [48].

Le réseau cristallin des zéolites est composé de tétraèdres de SiO_4 et AlO_4 liés par des ponts oxygène. Il en résulte une structure spatiale complexe de cavités régulières présentant une grosseur de pore de 4 angströms. Dans ces réseaux cristallins, on retrouve des cations, tels que le calcium, le magnésium, le natrium, le potassium etc. Liés à de l'eau de cristallisation. Il existe plus de 100 types de zéolite, qui peuvent être divisés en zéolites fibreuses, zéolites lamellaires et zéolites cubiques [49].

Un grand nombre de zéolithes existe à l'état naturel (chabazite, moderniste, faujasite...) et plus de 150 ont été synthétisées. On s'intéressera ici seulement aux zéolithes utilisées dans le domaine des séparations, qui sont de types A (3A, 4A, 5A), X et Y [47].

La porosité, la taille et la forme des pores et le volume microporeux caractérisent la structure. Chaque structure a un diamètre d'ouverture des pores propre, ce qui peut empêcher les molécules plus grosses à passer dans certains matériaux. C'est l'effet stérique. Par exemple, les molécules au dessus de $6,2 \text{ \AA}$ ne peut être adsorbées dans la ZSM-5. La géométrie des pores est un facteur important sur sa capacité d'adsorption ainsi que la diffusion des composés [50].

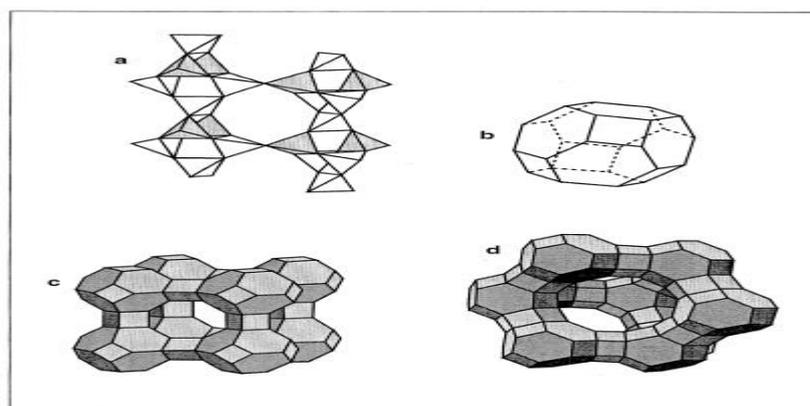


Fig.11 - Structure des zéolithes A, X et Y. a) Assemblage des tétraèdres dans une zéolithe. b) Cage sodalite. c) zéolithe A. d) zéolithes X et Y [47]

3.3. Structure de zéolithe

Les zéolithes sont des aluminosilicates poreux cristallins. Le terme zéolithe a été introduit par Cronstedt qui les a découvertes en 1756. Elles appartiennent à la catégorie des solides nanoporeux (taille de pore $< 5 \text{ nm}$). La structure cristalline donne aux zéolithes des pores de forme et de taille parfaitement homogènes ce qui a des conséquences importantes sur les propriétés du matériau. Elles sont constituées d'un arrangement de tétraèdres TO_4 (où T désigne un atome de silicium ou

d'aluminium) qui sont connectées par leurs sommets. L'arrangement régulier de tétraèdres crée un réseau de cavités dont la forme et le diamètre varient en fonction de la structure cristalline du matériau. Depuis leur découverte en 1756 par Cronstedt, les zéolithes ont été étudiées pendant deux siècles sans que l'on sache les synthétiser. Le travail de Barrer dans les années 1950 a révolutionné le monde des matériaux poreux en montrant qu'il était possible de synthétiser des matériaux zéolithiques. On connaît actuellement 194 structures de zéolithe, dont 62 ont été observées dans des matériaux naturels. Les pores peuvent être cylindriques ou sphériques, connectés ou non. L'International Zeolite Association attribue à chaque structure cristalline un code à trois lettres : LTA, FAU, MFI [51].

3.3. Type des zéolithes

3.3.1. Zéolithes naturelles

Zéolithes sont trouvés dans la nature, et la stilbite minéral zéolite a été première fois découvert en 1756 par le minéralogiste suédois A. F. Cronstedt. Environ 40 zéolithes naturelles sont connues. La plupart zéolithes connus pour se produire dans la nature sont de rapport Si/Al plus faible, puisque les agents organiques – dirigeant de structure nécessaires à la formation des zéolithes siliceux sont absents. Les zéolithes naturelles parfois sont trouvées comme gros monocristaux, bien qu'il est très difficile de faire de gros cristaux en laboratoire. Haute porosité zéolithes comme faujasite (FAU) dont analogues de laboratoire sont zéolites X / Y, sont rare. Ce n'est pas surprenant compte tenu de leurs structures métastables et la conversion en formes plus condensées. Aussi, les zéolithes hautes porosité sont formées dans le laboratoire sous des compositions de synthèse étroites. Deux zéolithes naturelles qui trouvent un usage intensif sont clinoptilolite (HEU) et mordenite (MOR) pour échange d'ions (radioactifs) portés par l'agriculture comme adsorbants ou des absorbants. L'activité catalytique des zéolithes naturelles est limitée par leurs impuretés et de faibles surfaces [52].

3.3.2. Synthèses des zéolithes

Les zéolithes synthétiques sont utilisées dans le commerce plus souvent que les zéolithes naturelles en raison de la pureté des produits cristallins et de l'uniformité des tailles de particules. Les sources de zéolithes synthétisées précocement étaient des réactifs chimiques standards. Une grande partie de l'étude de la science zéolithique de base a été faite sur des zéolithes naturelles. Les principaux avantages des zéolithes synthétiques par rapport aux zéolithes naturelles sont qu'elles peuvent être conçues avec une grande variété de propriétés chimiques et de tailles de pores et qu'elles ont une plus grande stabilité thermique [48].

Tableau -5 Types de zéolithes les plus utilisées [53]

Nomenclature IZA	Nom commun	Nombre de tétraèdres formant les pores	Taille des pores (en Å)	Dimensionnalité du réseau de canaux
FAU	Faujasite	12	7,4 x 7,4	7,4 x 7,4
MOR	Mordénite	12	6,5 x 7,0	6,5 x 7,0
BEA	Beta	12	5,7 x 7,7	5,7 x 7,7
MFI (zeolite Sconoy Mobil-Five)	ZSM-5	10	5,1 x 5,5	5,1 x 5,5

3.4. Propriété de la zéolithe

3.4.1. L'échange ionique

L'opération de l'échange ionique sur un solide constitue à remplacer tout ou une partie des ions fixés sur la surface de ce solide par d'autres ions fournis par une source extérieure. Les zéolithes possèdent des propriétés particulières dues à leur structure tridimensionnelle ouverte [54].

3.4.2. La stabilité thermique

La stabilité thermique des zéolithes varie sur une large plage de température. La température de décomposition pour les zéolites à faible teneur en silice est de 700 ° C, tandis que la zéolite entièrement siliceuse, telle que la silicalite, est stable jusqu'à 1300 ° C. Les zéolithes à faible teneur en silice sont instables dans l'acide, tandis que les zéolithes à haute teneur en silice sont stables dans les acides minéraux bouillants, bien qu'elles soient instables dans une solution basique [52].

3.4.3. L'adsorption et la séparation des molécules

A l'état normal, les zéolithes sont saturées d'eau de cristallisation qui se trouve à l'intérieur des canaux et cavités du réseau cristallin. Les molécules d'eau peuvent être éliminées et remplacées par des molécules de taille inférieure à la dimension des pores sans détruire la structure [54].

3.4.4. Catalyse

La dernière grande application des zéolites est leur utilisation en catalyse. Leur grande surface interne permet de remplacer un catalyseur synthétisé sous forme de poudre. L'adsorption de molécules sur la surface interne de la zéolite modifie les propriétés de cette

molécule, la rendant parfois plus réactive. Les zéolites échangées avec des protons sont des catalyseurs acides particulièrement efficaces [44].

3.5. Applications des zéolites

Les applications des zéolites dans l'industrie sont nombreuses et variées selon leurs caractères [53].

3.5.1. Adsorption des gaz

Les zéolites sont capables d'adsorber des molécules organiques et minérales en phase gaz sans aucune modification structurale. Cette adsorption est due à leur surface spécifique élevée (100 à 800 m²/g), à des effets de surface hydrophobe-hydrophile et à leur structure [55].

3.5.2. Tamis moléculaire

Les pores des zéolites, de diamètre constant, ne laissent pénétrer à l'intérieur de leur réseau que les molécules les plus petites. Elles permettent donc de séparer sélectivement des mélanges gazeux ou liquides : ce sont des tamis moléculaire [55].

3.5.3. Adsorption/ désorption de l'eau

Certaines zéolites ont une très grande affinité pour l'eau. Cela se traduit par une capacité d'adsorption pouvant atteindre jusqu'à 30% en poids et ce, sans aucune variation de leur volume. La régénération a lieu en éliminant l'eau par des effets de pression et/ou de température [55].

3.5.4. Adsorption des liquides organiques et minéraux

Comme pour les gaz et l'eau, les zéolites sont capables d'adsorber des molécules organiques ou minérales en solution aqueuse ou non. Cette adsorption est spécifique à chaque zéolithe. Cette propriété permet d'appliquer les zéolites dans le traitement d'effluents chargés en pesticides, en organo-chlorés, ou encore en hydrocarbures [55].

3.5.5. Capacité d'échange cationique

Le cation assurant l'électroneutralité de la matrice zéolithique peut être échangé par un autre. Cet échange se fait sélectivement en fonction de l'affinité de la zéolithe pour le cation remplaçant. La capacité d'échange cationique totale et la sélectivité sont spécifiques à chaque type de zéolithe [55].

3.6. Caractérisations des zéolites

La diffraction des rayons X sur poudre est la méthode la plus courante pour déterminer la structure de la zéolithe ainsi que sa pureté. À cet égard, le livre Collection de modèles de poudre de

XRD simulés de zéolites est le plus précieux et fournit également des informations sur le groupe d'espace et les paramètres des cellules unitaires [52].

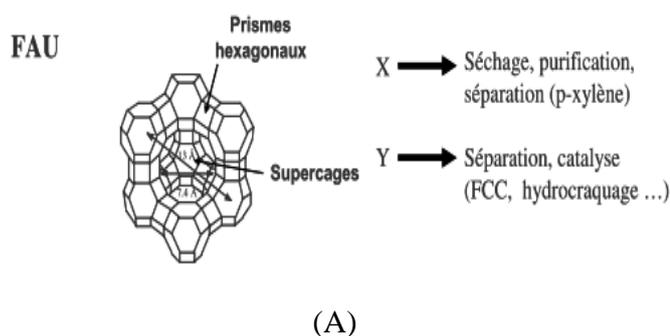
La microscopie électronique à balayage (MEB) est la méthode de choix pour déterminer la taille et la morphologie des cristallites de zéolite. La microscopie électronique à transmission à haute résolution a été largement utilisée pour étudier les plans de failles d'intercroissance et les défauts d'empilement et récemment pour l'analyse structurale [52].

Des méthodes spectroscopiques courantes pour analyser la structure de la zéolite comprennent la spectroscopie de résonance magnétique nucléaire à spin d'angle magique ^{29}Si et ^{27}Al . Des informations concernant l'environnement de coordination autour de Si et Al et le rapport de structure Si / Al peuvent être obtenues. La spectroscopie infrarouge via les fréquences des bandes sensibles à la structure fournit des informations concernant les propriétés du cadre, y compris les rapports Si / Al et la nature de l'acidité par la vibration d'étirement -OH[57].

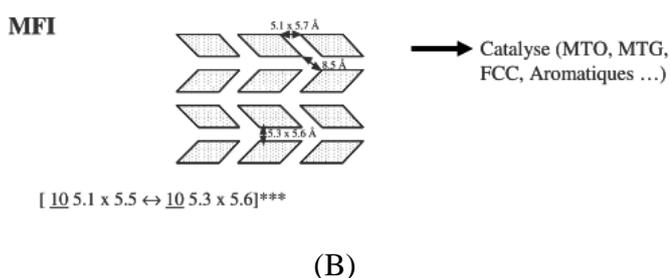
3.7. Sites actifs des zéolites

Chaque type de zéolithe peut être obtenu avec une large gamme de composition, directement par synthèse et/ou après traitement post-synthèse (échange, désalumination, etc.). De plus divers composés peuvent être introduits dans les micropores ou même y être synthétisés. Ceci explique pourquoi les zéolithes peuvent être utilisées comme catalyseurs acides, basiques, acido-basiques, redox, bifonctionnels, les principales applications étant toute foisen catalyse acide et en catalyse bifonctionnelle [46].

Zéolithes à larges pores :



Zéolithes à taille de pore intermédiaire :



Zeolithes à petites pores :

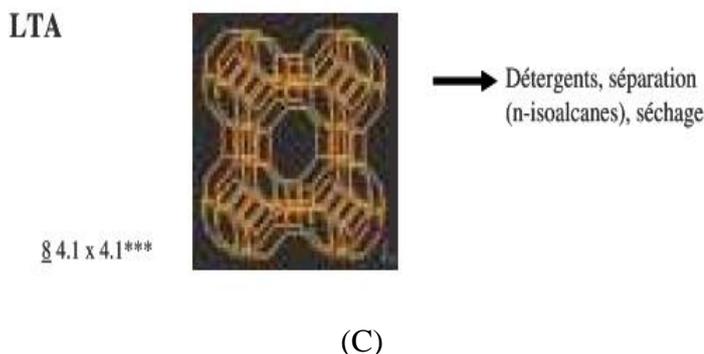


Fig.12 - Schéma (A, B, C) Structure poreuse des principales zéolithes utilisées industriellement [46]

3.8. Facteurs influents sur la synthèse des zéolithes

La synthèse des zéolithes est influencée par de nombreux facteurs dont les plus importants sont:

3.8.1. La nature des réactifs et la composition du mélange

Le type de sources de silice et d'aluminium est très important dans la synthèse des zéolithes. Ainsi une source de silice très polymérisée va mettre plus de temps pour se "solubiliser", mais les cristaux de zéolithe seront généralement plus grands que ceux obtenus avec une source de silice plus réactive ; cette dernière conduisant à la formation des nombreux nucléi et donc à des cristaux plus petits. Le rapport Si/Al du mélange réactionnel utilisé pour la synthèse des zéolithes va, quant à lui, conditionner le rapport Si/Al et le type de zéolithe obtenue. Pour l'instant, seule la Sodalité peut être obtenue pour des rapports Si/Al allant de 1 jusqu'à l'infini. On peut noter également que de nombreuses zéolithes ne cristallisent que dans un domaine de rapports Si/Al étroit (voir tableau) [56].

Tableau -6 Domaine de rapports Si/Al pour quelques zéolithes [56]

Zéolithe (type de structure)	Si/Al
Zéolithes A (LTA)	1 - 3
Zéolithes X, Y et EMO (FAU)	1 - 5
Zéolithes ZSM-5 et Silicalite-1 (MFI)	5 - ∞
Zéolithe Beta (BEA)	10 - ∞
ZéolitheMordenite (MOR)	3 - 15
Zéolithes SSZ-35, ITQ-9 et Mu-26 (STF)	15 - ∞

3.8.2. L'influence du pH (le rôle du minéralisateur)

Le minéralisateur est une espèce chimique qui rend possible la formation d'une phase solide organisée (zéolithe) à partir d'une phase solide non organisée (gel) par un processus de dissolution -

précipitation (cristallisation). Un des rôles du minéralisateur est d'augmenter la concentration des espèces solubles (exemple : espèces silicates) et donc la sursaturation de la solution[56].

3.8.3. Effet du mûrissement

Dans une majorité de cas, la synthèse de zéolithe passe par deux étapes. Lors d'une première étape appelée mûrissement, le milieu de synthèse est homogénéisé à basse température. Cette étape possède une influence décisive sur la durée d'induction, définie comme étant le temps nécessaire à l'apparition des premiers nucléi stables et capables de croître. Ces propos sont illustrés par des résultats obtenus lors d'une étude portant sur la synthèse d'une zéolithe Y (FAU). Les auteurs ont constaté qu'un mûrissement d'au moins 24 heures permet de diminuer grandement la période d'induction, ayant une influence directe sur la cinétique de cristallisation du système. De plus, cette période de mûrissement est favorable à une augmentation du nombre de nucléi formés, se traduisant par l'obtention de cristaux plus petits. Enfin, le mûrissement favorise l'incorporation d'éléments aluminium au sein de la charpente zéolithique formée. [57]

3.8.4. Impact de la température et de la durée de synthèse

La deuxième étape de synthèse, appelée synthèse hydrothermale dans le cas où le solvant utilisé est l'eau, induit la nucléation et la croissance simultanées de zéolithes sous l'action de la température et de la pression autogène pendant une durée définie. La température de synthèse hydrothermale est généralement comprise entre 90 et 210°C, et implique une durée comprise entre quelques heures et quelques mois[57].

3.8.5. La nature et le rôle des agents structurants

Les premiers agents structurants utilisés étaient des cations minéraux (alcalins ou alcalino-terreux), des zéolithes de faible rapport molaire Si/Al étaient alors synthétisées ($1 \leq \text{Si/Al} \leq 5$). Ces cations minéraux favorisent la formation d'unités structurales rencontrées dans les charpentes zéolithiques. Par exemple les cations sodium hydratés ont un rôle de structurant pour les cages de type sodalite et gmelinite mais aussi pour les unités de construction formées par des doubles cycles à six atomes T ou unité D6R, alors que les cations potassium et baryum stabilisent plutôt les cages de type cancrinite[58].

3.8.6. Effet de la température sur la cristallisation des zéolithes

La température influence de différentes façons la synthèse des zéolithes, elle peut contrôler la vitesse de cristallisation, mais aussi le type de zéolithe formée. Généralement des températures de synthèse élevées conduisent à la formation de phases denses. La vitesse avec

laquelle le mélange réactionnel arrive à la température de réaction est aussi un facteur important. Le mode de chauffage le plus rapide est actuellement le chauffage par micro-ondes[58].

3.8.7. Effet de l'agitation sur la cristallisation des zéolithes

L'agitation permet une homogénéisation du mélange réactionnel et conduit à des cristaux présentant une distribution de taille très étroite. Elle peut avoir également une forte influence sur le type de zéolithe synthétisée. Ce dernier effet a été observé avec la synthèse de la zéolithe Bêta (BEA) en milieu fluoré [104]. Ainsi, pour des rapports Si/Al élevés, en milieu non agité la zéolithe Bêta est obtenue alors que la zéolithe ZSM-12 (MTW) cristallise en milieu agité [56].

Conclusion

En conclusion, il faut retenir que les zéolithes sont les catalyseurs les plus utilisés dans les transformations énergétiques, d'hydrocarbures du raffinage du pétrole et de la pétrochimie. Il y a également deux types de zéolithes : - de synthèses et - naturelles. Chaque type de zéolithe peut être obtenu avec une large gamme de composition avec des propriétés comme : l'échange ionique, la stabilité thermique, l'adsorption et la séparation des molécules et catalyse. Elles peuvent être utilisées dans l'adsorption des gaz et des liquides organiques et minéraux, l'adsorption/ désorption de l'eau et dans l'échange cationique. Elles peuvent aussi servir comme tamis moléculaires, catalyse et dans le stockage et restitution de l'énergie.

Chapitre 04

Les pompes à chaleur

Introduction

La pompe à chaleur a reçu une attention croissante ces dernières années [59]. Celle à adsorption représente une technologie alternative pour le chauffage et le refroidissement des locaux, ainsi que pour d'autres applications telles que la réfrigération et le chauffage de l'eau. Différents types de réfrigérateurs à sorption et de pompes à chaleur ont été développés, principalement des combinaisons charbon actif-méthanol, zéolite-eau, $\text{CaCl}_2\text{-NH}_3$ et hydrure-hydrogène [59]. Dans ce quatrième chapitre sont abordés d'une façon suffisamment détaillée l'histoire, le principe de fonctionnement, les composantes, et la classification des pompes à chaleur. Une attention particulière sera accordée à la pompe à chaleur à adsorption, son fonctionnement et ses applications.

4.1. Historique de la pompe à chaleur

Les premières pompes à chaleur apparaissent au début du xx e siècle sous forme de machines frigorifiques à compression de fluide. C'est surtout à partir de 1950 que se développent, en particulier aux États-Unis, les appareils de climatisation à la fois dans l'automobile, le bâtiment et pour certaines applications industrielles [60].

En France, les années 1950 sont marquées par l'équipement de la quasi-totalité des ménages de machines frigorifiques que sont nos réfrigérateurs, symboles du confort moderne pour l'hygiène alimentaire. En 1963, lors de la construction de la maison de la Radio, une pompe à chaleur utilisant comme fluide frigorigène l'ammoniac est mise en place pour assurer à la fois les besoins de froid et de chaud de l'immeuble. En 1980, le programme PERCHE (Pompes à chaleur en relève de chaudières existantes) est lancé sous l'égide d'EDF [60].

Au cours des années 1990, le faible coût des énergies n'incite pas au développement de cette filière énergétique tant dans le secteur domestique que dans celui du tertiaire[60].

La pompe à chaleur est reconnue comme un vecteur de développement des énergies renouvelables. Les professionnels s'organisent avec la création en 2002 de l'AFPAC (Association française pour les pompes à chaleur), la création du label NFPAC et du qualificatif QUALIPAC pour les installateurs [60].

4.2. Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur est une machine thermodynamique qui puise la chaleur d'un milieu naturel appelé « source froide » (eau, air, sol) dont la température est inférieure à celle du local à chauffer. Elle transfère ensuite cette énergie au fluide caloporteur afin d'assurer le chauffage et souvent aussi la production d'eau chaude sanitaire. La chaleur prélevée au niveau de la « source froide » est captée par le fluide caloporteur au niveau de l'évaporateur. Le fluide change d'état et se

transforme en vapeur. Le compresseur comprime cette vapeur, augmentant ainsi sa température. C'est au niveau du condenseur que la vapeur en se condensant transmet sa chaleur au milieu à chauffer. Puis la température du fluide s'abaisse fortement dans un détendeur le rendant prêt pour une nouvelle absorption de chaleur, le cycle peut recommencer. Il existe aujourd'hui des pompes à chaleur dites réversibles qui permettent de produire du chaud et du froid [61].

Les pompes à chaleur sont conçues pour déplacer la chaleur dans le sens inverse du flux de chaleur normal en prenant la chaleur d'un espace plus froid et en la libérant à une température plus chaude. Bien que le processus global semble permettre à la chaleur de s'écouler de la source froide vers la destination chaude, le flux thermique normal de la température élevée à la température basse est respecté à chaque étape du processus. Notez qu'une pompe à chaleur utilise une certaine quantité de travail (alimentation externe) pour effectuer le transfert d'énergie de la source de chaleur vers le dissipateur de chaleur [62].

Selon le sens du dispositif de pompage, une pompe à chaleur peut soit être considéré comme un système :

- de chauffage si l'on souhaite augmenter la température de la source chaude,
- de réfrigération si l'on souhaite abaisser la température de la source froide.

Lorsque le but du dispositif de pompage est, à la fois, de chauffer et de refroidir, le système est alors considéré comme une thermo-frigo-pompe.

Des pompes à chaleur se retrouvent ainsi dans de nombreuses installations telles que des réfrigérateurs, des climatiseurs et divers systèmes de chauffage [63].

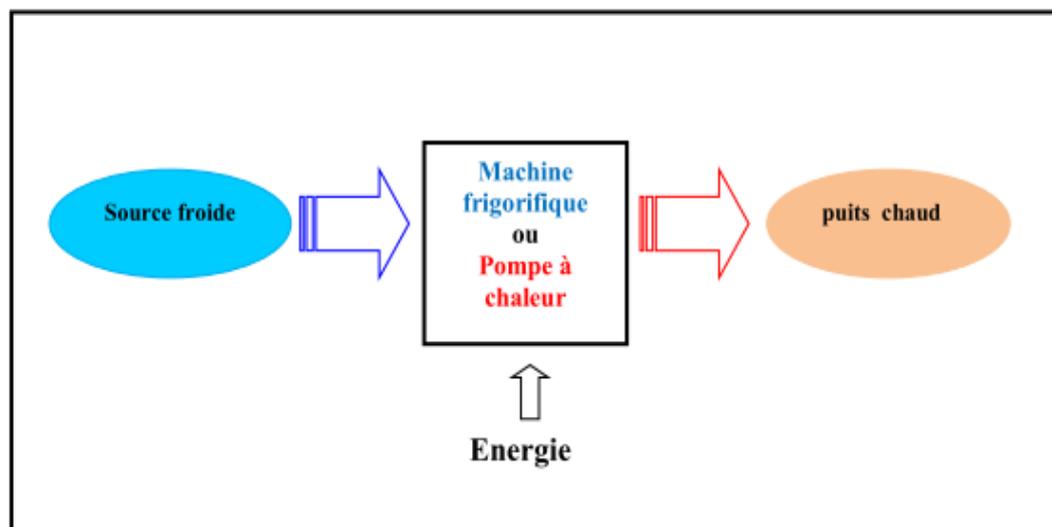


Fig.13 - Principe d'une pompe à chaleur [64]

4.3. Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur

Il va effectuer des échanges de chaleur avec le milieu extérieur et subir des transformations de phase liquide/vapeur successivement dans un sens et dans l'autre. S'il s'évapore, il absorbe des calories, s'il se condense, il en cède. Afin de réaliser ces transformations à la température des deux échangeurs, appelés respectivement de ce fait condenseur (source chaude T_c) et évaporateur (source froide T_e), il faut d'une part comprimer le gaz entre les deux échangeurs, puis le détendre d'autre part [65].

Le choix du fluide est fonction des températures à atteindre, des caractéristiques du compresseur, des dimensions des échangeurs, du coefficient de transfert thermique du fluide réfrigérant, de sa chaleur latente et de son volume spécifique. Comme source froide (l'évaporateur d'où l'on pompe la chaleur) on peut utiliser un cours d'eau, le sol ou encore l'air ambiant [65].

Ce transfert de chaleur du froid vers le chaud ne s'effectue pas naturellement. Pour ce faire, le circuit de la pompe à chaleur met en œuvre un cycle thermodynamique (plusieurs changements d'état successifs d'un fluide) qui nécessite le fonctionnement d'un compresseur qui, tout comme votre frigo, consomme de l'électricité. Ainsi, la pompe à chaleur présente un intérêt énergétique uniquement si sa consommation électrique est largement compensée par la quantité de chaleur qu'elle transfère [66].

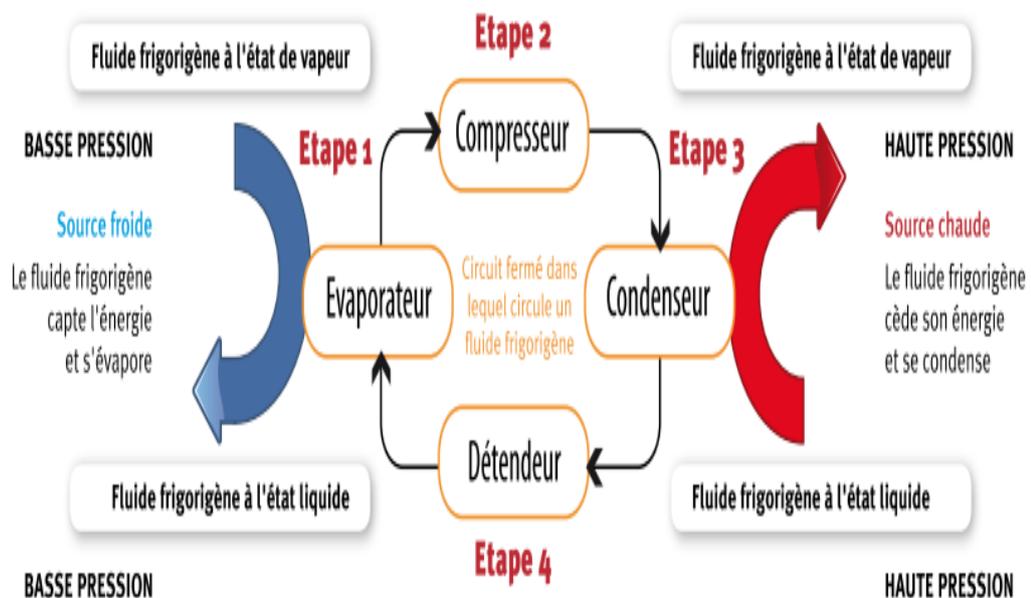


Fig.14 - Schéma d'un circuit de la pompe à chaleur [67]

La PAC a pour principe même de transférer la chaleur de l'air extérieur pour l'injecter à l'intérieur de la maison. Car l'air, même si il est froid, contient de la chaleur. On définit donc deux milieux : la source froide d'où l'on extrait l'énergie et la source chaude où on la réinjecte. La température réelle des sources n'est pas importante, bien que pour avoir une PAC

intéressante, il est mieux d'avoir une source chaude qui a une température plus élevée que la source froide [68].

4.4. Les composantes d'une pompe à chaleur

Tout d'abord, la pompe à chaleur (PAC) est composée de 4 éléments principaux :

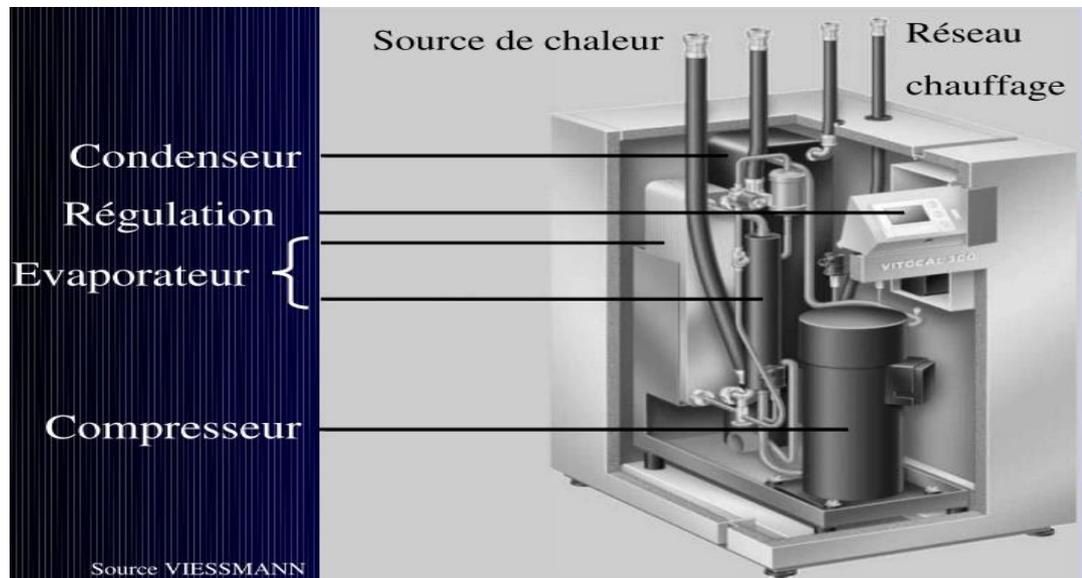


Fig.15 -Schéma d'un Constituant d'une pompe à chaleur [69]

4.4.1. Condenseur

Le gaz chaud va être dirigé vers un échangeur - le condenseur - dans lequel circule un fluide à réchauffer : de l'eau du réseau de chauffage par exemple ou l'air intérieur[68].

En passant dans le condenseur, le fluide frigorigène à l'état vapeur et à haute température cède son énergie thermique à la source chaude (chauffage du bâtiment ou de l'eau sanitaire). De ce fait, la température du fluide frigorigène diminue et il se condense. Le fluide frigorigène sort donc du condenseur à l'état liquide [67].



Fig.16 – Condenseur [67]

4.4.2. L'évaporateur

Le frigorigène, froid et à l'état liquide, va traverser un deuxième échangeur -l'évaporateur - dans lequel circule le fluide extérieur. Le capte l'énergie thermique de la source froide à l'extérieur du bâtiment (l'air, l'eau ou le sol). De ce fait, la température du fluide frigorigène augmente et il s'évapore. Ainsi, le fluide frigorigène sort de l'évaporateur à l'état vapeur, à basse pression et à basse température. Ce dernier va donc récupérer les calories, l'énergie en quelque sorte, de ce fluide extérieur. En récupérant cette énergie, le frigorigène va entrer en ébullition et donc se transformer en gaz, c'est l'évaporation, d'où le nom d'évaporateur [68].



Fig.17 - Échangeur de chaleur à faisceaux tubulaires [70]

4.4.3. Le compresseur

Le compresseur comprime le fluide frigorigène (dans sa phase gazeuse), ce qui a pour effet de l'échauffer. Les principales technologies sont les compresseurs à piston, et les compresseurs rotatifs. Pour les pompes à chaleur de petites ou moyennes puissances qui nous intéressent dans cet ouvrage, tous les compresseurs sont dits hermétiques. Le fluide est confiné dans une enceinte qui comprend le compresseur lui-même, le moteur et l'huile nécessaire à la lubrification. Seuls les conducteurs électriques sortent vers l'extérieur par un bornier étanche. Une expérience très simple permet de bien comprendre le rôle du compresseur : vous constaterez que l'air comprimé échauffe le corps de la pompe [71].



Fig.18 - Compresseur hermétique spiral (Scroll) [70]

4.4.4. Détendeur

L'organe de détente (détendeur thermostatique ou capillaire) abaisse la pression du fluide liquide. Cette phase provoque une chute de température du fluide et un début de vaporisation. Le détendeur thermostatique est composé d'un orifice dont le diamètre est ajusté par un asservissement. Grâce à un bulbe qui mesure par contact la température du gaz aspiré par le compresseur, l'asservissement règle l'orifice du détendeur, afin d'injecter le bon débit de fluide frigorigène dans l'évaporateur. Une expression facile à faire permet de reproduire la détente d'un fluide : constatez le refroidissement de la cartouche d'un aérosol lorsque vous pulvérisiez pendant un long moment. Cela est dû à la chute de pression dans le récipient [71].



Fig.19 - Vanne d'expansion thermostatique [70]

4.5. Classification d'une pompe à chaleur

4.5.1. Classification en fonction des types de source chaude et de source froide

4.5.1.1. La pompe à chaleur air/air

Les pompes à chaleur air-air sont des pompes à chaleur qui utilisent la chaleur de l'air pour chauffer l'air. Les pompes à chaleur air-air sont couramment utilisées dans les climatiseurs [72].

C'est le cas général de tous les climatiseurs de type domestique ou commercial, ou pendant le cycle de chauffage, les calories sont empruntées à l'air extérieur. La source de chaleur est gratuite et disponible en tout temps [73].

La pompe à chaleur la plus populaire est le type de source d'air (air-air) qui fonctionne selon deux modes de base:

- En tant que climatiseur, la batterie intérieure d'une pompe à chaleur (échangeur de chaleur) extrait la chaleur de l'intérieur d'une structure et la pompe vers la batterie de l'unité à l'extérieur, où elle est évacuée vers l'extérieur [74].
- En tant qu'appareil de chauffage, la batterie extérieure de la pompe à chaleur (échangeur de chaleur) extrait la chaleur de l'air extérieur et la pompe à l'intérieur où elle est évacuée vers l'intérieur [74].

4.5.1.2. Pompes à chaleur air / eau

Une pompe à chaleur air-eau extrait la chaleur de l'air ambiant. Comme la capacité calorifique spécifique de l'air est très faible, il faut faire circuler des volumes d'air relativement importants. Par conséquent, il est important que les conduits d'air sur les systèmes compacts aient des dimensions suffisantes. De grands ventilateurs sont nécessaires pour déplacer les volumes d'air requis, et ceux-ci nécessitent des quantités proportionnellement plus grandes de puissance de fonctionnement [72].

Ces systèmes fonctionnent à l'inverse des pompes à chaleur eau-air: ils extraient la chaleur de l'air ambiant ou de l'air d'échappement pour chauffer ou préchauffer l'eau utilisée pour le chauffage des locaux ou des processus. Le système est simplement inversé. La chaleur est extraite de l'air à l'intérieur de la maison et transférée à l'eau et remise dans le sol. Tous les ménages choisissent la température qui rend leurs maisons aussi cool qu'ils le souhaitent [74].

4.5.1.3. Pompes à chaleur eau-eau

Une pompe à chaleur eau-eau extrait de la chaleur de l'eau, généralement de l'eau provenant d'un forage. Cette forme d'extraction d'énergie est appelée génération d'énergie hydrothermale. Le processus de production d'énergie hydrothermale extrait l'énergie thermique de l'eau pompée à partir du puits d'admission. Cela provoque le refroidissement de l'eau. Nous pouvons généralement supposer que l'eau du puits aura généralement une température d'environ 10 ° C et lorsque la pompe à chaleur extrait l'énergie thermique, l'eau se refroidit normalement d'environ 3 K. Elle est ensuite renvoyée au sol par le puits de décharge[72].

4.5.2. Classification en fonction du phénomène physique employé

4.5.2.1. Pompe à chaleur à compression

Le compresseur des pompes à chaleur à compression peut être alimenté soit par de l'électricité (PAC à compression électrique) soit par du gaz (PAC à moteur gaz).Le fonctionnement d'une PAC à compression est comparable à celui d'un réfrigérateur ménager [75].

Du schéma dont nous avons parlé jusqu'à présent, il ressort clairement que le principal les composants des pompes à chaleur à compression sont [75]:

- le compresseur, qui maintient la bonne chute de pression entre l'évaporateur et le condenseur pour maintenir les bonnes températures de changement de phase afin d'interagir avec les sources externes (à la PAC);
- le détendeur, entraînant de manière irréversible le réfrigérant de la pression du condenseur à celui de l'évaporateur;
- le condenseur, où la vapeur surchauffée provenant du compresseur est surchauffé, est d'abord condensé en liquide avec un certain degré de sous-refroidissement pour empêcher la vapeur de

pénétrer dans le détendeur;

- l'évaporateur, où le mélange provenant du dispositif de détente se vaporise. La vapeur sortant peut être saturée (évaporateur humide) ou surchauffée (évaporateur sec). Dans le premier cas, un dispositif approprié (séparateur) est nécessaire pour empêcher le liquide d'entrer dans le compresseur. Dans ce dernier cas, la vapeur sortant de l'évaporateur présente une surchauffe de quelques degrés Celsius dans le même but [75].

4.5.2.2. Pompe à chaleur à absorption

Dans le cas des pompes à chaleur à absorption, l'élévation de température et de pression ne se fait pas via un compresseur mais par l'intermédiaire d'un brûleur à gaz. Les échanges de chaleur reposent, quant à eux, sur la réaction d'une solution composée d'un fluide frigorigène (ammoniac) et d'un absorbant (eau) [61].

Les machines à absorption utilisent les propriétés de solubilité gaz dans un autre corps, à différentes températures, l'ensemble fonctionnant comme un compresseur mécanique [73].

Un liquide frigorigène s'évapore à basse pression dans un évaporateur, en prélevant une quantité de chaleur Q_{ev} . La vapeur produite, au lieu d'être aspirée par un compresseur, passe par un absorbeur ou elle se dissout dans l'absorbant en dégageant une quantité de chaleur Q_{abs} [73].

La solution est envoyée à l'aide d'une pompe de circulation, dans un séparateur ou bouilleur à haute pression, où elle reçoit une quantité de chaleur $Q_{dés}$, qui la porte à une température suffisante pour restituer le fluide frigorigène, tandis que l'absorbante retourne à l'absorbeur sous forme d'une solution pauvre en frigorigène. La vapeur du frigorigène produite au bouilleur se condense dans un condenseur, en abandonnant une quantité de chaleur Q_c et le cycle recommence [73]. L'absorbeur et le condenseur restituent à moyenne température les calories prélevées d'une part à la source froide, et celles fournies d'autre part au bouilleur, par exemple par un combustible [73].

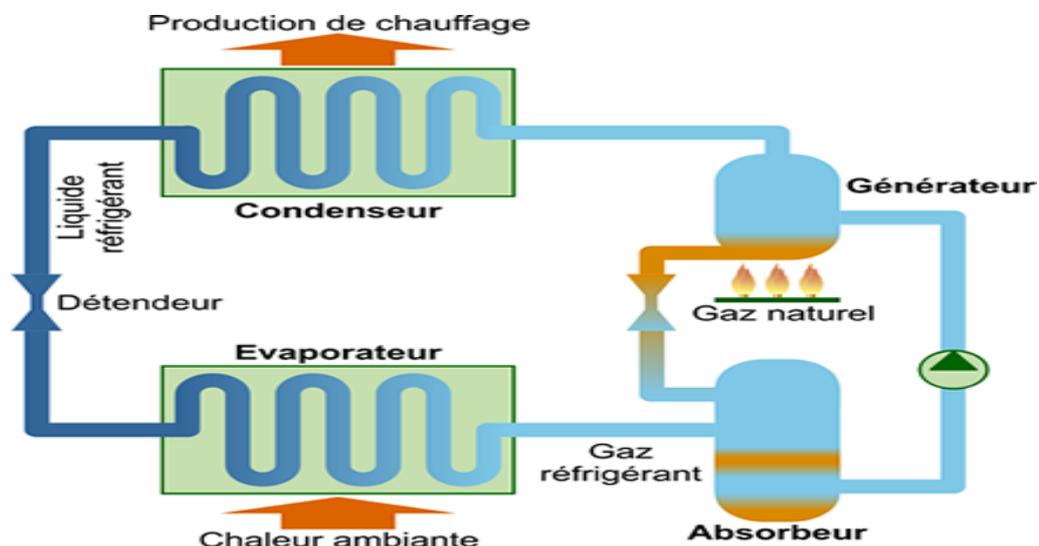


Fig.20 -Schéma de principe de la pompe à chaleur à absorption [76]

4.5.2.3. Pompe à chaleur à adsorption

Un cycle de pompe à chaleur à adsorption de base se compose de quatre parties principales: un adsorbant, qui est un récipient rempli d'un adsorbant (tel que la zéolite, le charbon actif, le gel de silice, etc.); un condenseur; un évaporateur; et une vanne de détente. Fondamentalement, la pompe à chaleur à adsorption fonctionne en cyclant l'adsorbat entre l'adsorbant, le condenseur et l'évaporateur [77].

Contrairement au processus d'absorption où l'absorbant liquide est pompé entre l'absorbant et le désorbant, l'adsorption est un processus discontinu, car l'adsorbant solide ne peut pas facilement être déplacé d'un récipient à l'autre. L'adsorption et la désorption peuvent se produire successivement dans le même récipient [78].

4.5.2.3.1. Principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur à adsorption

La vue schématique d'une pompe à chaleur à adsorption est illustrée à la figure. Deux vannes placées des deux côtés du lit d'adsorbant sont nécessaires pour remplir les processus d'adsorption et de désorption d'un système de climatisation par adsorption de base. [80] Le lit adsorbant est construit selon les paramètres de conception correspondants et rempli de l'adsorbant approprié de la paire sélectionnée. L'adsorbat de la paire est placé dans l'évaporateur. Après la construction de l'ensemble du système, le système est aspiré et toutes les vannes du système sont complètement fermées [79].

Le cycle peut être démarré avec un processus de désorption. Au début de la procédure de désorption, la soupape entre le lit d'adsorbant, qui a été préalablement saturé avec l'adsorbat, et le condenseur est ouverte, en conséquence, l'adsorbat désorbé du lit d'adsorbant est condensé dans le condenseur. Pendant la condensation, le fluide perd sa chaleur et la rejette dans l'environnement (Q_c). Après la condensation, le fluide s'écoule à travers le détendeur et se dilate. L'évaporateur évapore le fluide à l'état de vapeur. Pendant l'évaporation, le fluide gagne de la chaleur et l'éjecte de l'environnement (Q_{ev}). Après évaporation, le fluide s'écoule vers le lit d'adsorption pour être adsorbé sur les particules d'adsorbant [79].

La vanne entre le lit d'adsorbant et l'évaporateur est fermée pendant l'évaporation et la vanne entre le lit et le condenseur est fermée. Puisque l'adsorption est un processus exothermique, la chaleur d'adsorption est libérée pendant le processus. L'adsorption est terminée et plus aucun adsorbat ne peut être adsorbé par l'adsorbant lorsque le niveau de fluide dans l'évaporateur est constant. À la fin du processus d'adsorption, le cycle est terminé. Le cycle suivant débute avec la désorption du fluide, encore une fois, tandis que la chaleur de désorption est éjectée de l'environnement vers le système [79].

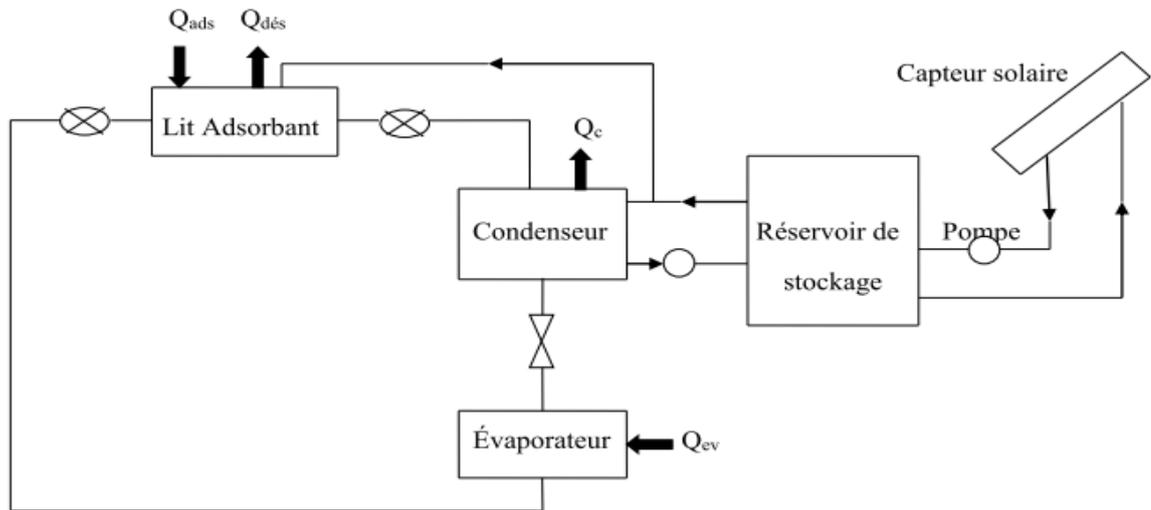


Fig.21 -Schéma du principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur à adsorption

4.5.2.3.2. Application de la pompe à chaleur à adsorption

Comme déjà mentionné, la majorité des pompes à chaleur en utilisation de masse sont utilisées dans le chauffage des maisons individuelles. La puissance de ces pompes à chaleur varie de quelques dizaines à une douzaine (rarement jusqu'à 50) kilowatts au niveau de la source de chaleur à haute température. Ils sont en grande partie des types de cycle de compression de vapeur, habituellement équipés de compresseurs à piston entraînés par des moteurs électriques. La majorité attire la chaleur de l'air atmosphérique. Souvent, ces pompes sont combinées avec un système de chauffage électrique ou central différent, utilisé en série ou en parallèle. Une grande partie de ces pompes fonctionnent comme des pompes à chaleur en hiver et comme appareils de climatisation pendant l'été [80].

La transformation de chaleur avec les systèmes de sorption a reçu une attention accrue au cours des dernières années. Les développements de la technologie des pompes à chaleur à adsorption ont été principalement orientés dans deux domaines d'application. Un domaine d'application est le refroidisseur par adsorption à des fins de refroidissement. Le deuxième domaine d'application est la pompe à chaleur à adsorption à des fins de chauffage [81]. Parce que la pompe à chaleur à adsorption fonctionne sur un processus aussi simple, les temps d'arrêt sont minimales et la maintenance est maintenue à un minimum absolu. La simplicité de fonctionnement rend la pompe à chaleur à adsorption extrêmement fiable et sûre, avec de faibles coûts d'exploitation. Il n'y a pas de substances dangereuses telles que le bromure de lithium ou l'ammoniac dans la pompe à chaleur à adsorption [81].

4.6. Les avantages et les inconvénients de la pompe à chaleur à adsorption

4.6.1. Les avantages

-peut fonctionner avec des sources d'énergie thermiques telles que la chaleur perdue, l'énergie solaire et géothermique, etc.

- peut travailler avec des sources d'énergie à basse température.
- ne nécessitent pas de pièces mobiles pour la circulation du fluide de travail.
- avoir une longue durée de vie.
- fonctionner sans bruit ni vibration.
- avoir un principe de fonctionnement simple.
- Ne nécessitent pas de maintenance fréquente.
- sont respectueux de l'environnement car ne contiennent pas de matériaux dangereux pour l'environnement.
- peut être utilisé comme dispositif de stockage d'énergie thermique [77].
- simplicité.
- faible besoin d'entretien et utilisation de réactifs stables et non toxiques comme adsorbants et adsorbats [82].

4.6.2. Les inconvénients

- Le coefficient de performance est faible
- Principes de fonctionnement intermittents.
 - exigent une haute technologie et des conceptions spéciales pour maintenir un vide poussé.
- Ont un volume et un poids importants par rapport aux systèmes de pompes à chaleur mécaniques traditionnels [77].
- La discontinuité de l'action
- les exigences élevées de conception pour maintenir un vide [82].
- Fortes puissances thermiques à évacuer vers l'extérieur.
- Basses pressions de vapeur avec les frigorigènes utilisés (eau et méthanol).

Avec l'eau, l'impossibilité de produire du froid au-dessous de 0 °C.

- Les performances du système de captation des machines frigorifiques solaires à adsorption sont particulièrement sensibles aux conditions environnementales (vent, température ambiante et rayonnement solaire), ce qui renforce le caractère aléatoire de la production frigorifique provenant du caractère fluctuant de l'énergie solaire [39].

Conclusion

En conclusion, la pompe à chaleur est un dispositif qui transfère l'énergie d'une source de chaleur à un dissipateur de chaleur et améliore l'énergie à un niveau de température plus élevé.

Elle est classée en fonction du type de la source chaude et de la source froide : pompe à chaleur air/air, PAC air/eau et pompe à chaleur eau/eau. Elle peut également être classée en fonction du phénomène physique employé : pompe à chaleur à compression, PAC à absorption et PAC à adsorption. Cette dernière est un dispositif de stockage d'énergie thermique prometteur avec stockage de la chaleur latente et sensible.

Chapitre 05

Étude et analyse du cycle idéal
d'une pompe à chaleur
à adsorption

Introduction

Le fonctionnement des pompes à chaleur à adsorption est basé sur la capacité de l'adsorbant poreux à adsorber la vapeur (adsorbat) à basse température et à la désorber lorsqu'il est chauffé [82]. Les pompes à chaleur à adsorption ont l'avantage d'être écologiques. Elles sont utilisées dans les applications de chauffage et de refroidissement alimentées à partir des sources d'énergie thermique telles que les énergies solaires et géothermiques ou la chaleur perdue des procédés industriels [83].

Ce chapitre est consacré à l'étude du cycle thermodynamique de la PAC à adsorption. Il rassemble également les principes de base, les théories et la thermodynamique des performances de cycle du chauffage solaire à adsorption solide sont présentées. Plus encore, sont exposés lois et expressions mathématiques des différentes chaleurs du cycle: les chaleurs isostériques, d'adsorption et de désorption pour l'évaluation du coefficient de performance (COP) en fonction des températures d'évaporation, de condensation et de la source de chauffage qui est le capteur solaire.

5.1. Le cycle de base d'une pompe à chaleur à adsorption

Le cycle de pompage de chaleur par adsorption est thermodynamiquement similaire au cycle d'absorption. Il se compose des mêmes échangeurs de chaleur principaux: évaporateur, condenseur, et un échangeur de chaleur pour l'adsorption et la désorption. Contrairement au processus d'absorption où l'absorbant liquide est pompé entre l'absorbeur et le désorbeur, l'adsorption est un processus de travail discontinu car l'adsorbant solide ne peut pas facilement être déplacé d'un récipient à l'autre. L'adsorption et la désorption peuvent se produire successivement dans le même récipient [78].

Un cycle de base d'une pompe à chaleur à adsorption par récupération de chaleur continue est représenté sur la figure. La trajectoire de cycle d'un adsorbeur suit a-b-c-d sur la figure. La phase de chauffage peut être divisée en deux processus. Dans le procédé de régénération isostérique, l'adsorbeur est chauffé de T_a à T_{c1} : La chaleur absorbée par l'adsorbeur comprend la chaleur sensible du matériau adsorbant, de l'adsorbant et de l'adsorbat. Dans le procédé de désorption isobare, l'adsorbeur est chauffé de T_{c1} à T_g : En plus de la chaleur sensible, la chaleur absorbée comprend également la chaleur de désorption [84].

De même, la phase de refroidissement est également divisée en deux processus. Dans le procédé de refroidissement isostérique, l'adsorbeur est refroidi de T_g à T_{c2} : La chaleur dégagée par l'adsorbeur comprend la chaleur sensible du matériau adsorbant, de l'adsorbant et de l'adsorbat. Dans le processus d'adsorption isobare, l'adsorbeur est refroidi de T_{c2} à T_a : En plus de la chaleur sensible, la chaleur libérée inclut également la chaleur d'adsorption [84].

En adsorption, l'adsorbat de la pompe à chaleur circule entre l'adsorbeur, le condenseur et l'évaporateur. Le cycle thermodynamique sur un isostère d'une paire adsorbant-adsorbat est présenté à la figure 26. Fondamentalement, un cycle d'adsorption comprend quatre étapes [85] :

- (1 - 2) : chauffage isostérique
- (2 - 3): désorption isobare
- (3 - 4): refroidissement isostérique
- (4 - 1): adsorption isobare [85].

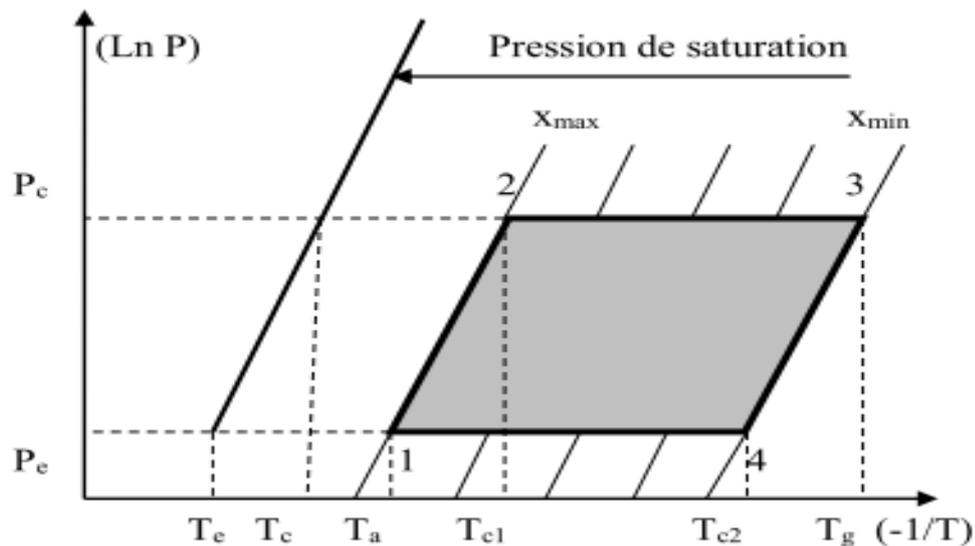


Fig.22 - Le cycle idéal de la pompe à chaleur par adsorption (diagramme de Clapeyron)

5.1.1. Phase de chauffage

5.1.1. 1. Phase de Chauffage isostérique (1 - 2)

Les vannes entre le lit d'adsorbant et le condenseur et l'évaporateur sont fermées. La température du lit d'adsorbant est augmentée de T_a à T_{c1} en chauffant le lit d'adsorbant sans désorption. La quantité de chaleur qui doit être transférée au lit d'adsorbant pour augmenter la température du lit de T_a à T_{c1} [77].

5.1.1. 2. Phase de Désorption isobare (2 - 3)

Après le chauffage isostérique du lit d'adsorbant, le processus de chauffage est poursuivi. La vanne entre le lit d'adsorbant et le condenseur est ouverte. Le processus de désorption est démarré et la vapeur d'eau est condensée dans le condenseur. La pression du cycle reste constante. Comme on le voit d'après l'équation (5. 10), une partie de la chaleur qui est transférée au lit d'adsorbant augmente la température de la paire d'adsorbat-adsorbant et du lit d'adsorbant alors que l'autre partie provoque le processus de désorption [77].

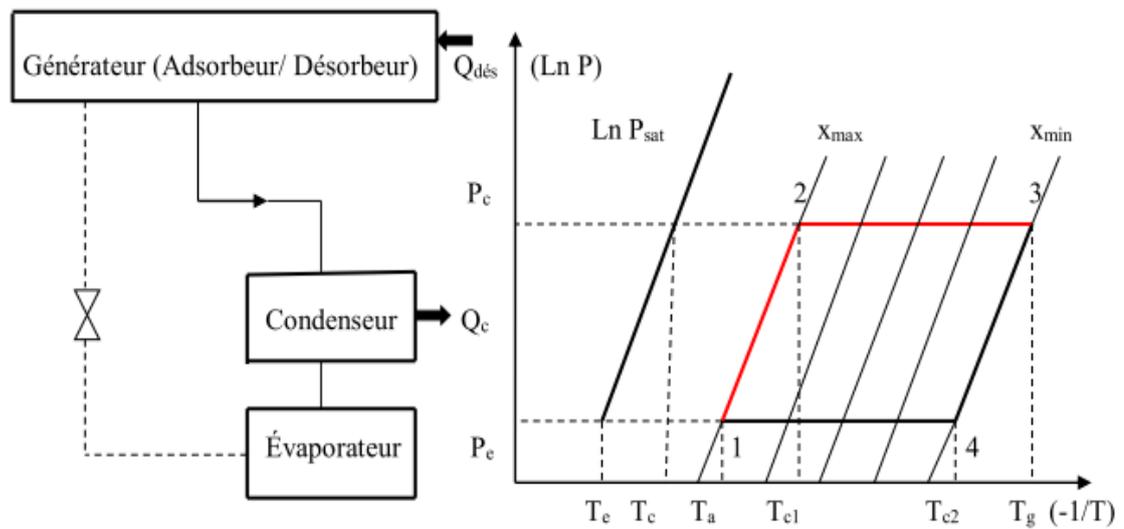


Fig.23 - Phase de chauffage dans le cycle d'adsorption

5.1.2. Phase de refroidissement

5.1.2.1. Phase de refroidissement isostérique (3 - 4)

La vanne entre le condenseur et le lit d'adsorbant est fermée et la température du lit d'adsorbant (T_g), qui est la température maximale du cycle, diminue jusqu'à T_{c2} . Pendant ce processus, la pression et la température du lit d'adsorbant sont toutes deux abaissées aux valeurs de l'évaporateur [77].

5.1.2.2. Phase d'adsorption isobare (4 - 1)

L'ouverture de la vanne entre le lit d'adsorbant et l'évaporateur permet le démarrage de l'évaporation de l'adsorbat dans l'évaporateur. Pendant l'adsorption de l'adsorbat par le lit d'adsorbant, la chaleur d'adsorption est libérée. Cette chaleur générée doit être retirée du lit d'adsorbant et la température de la paire d'adsorbat-adsorbant et du récipient se voit réduire jusqu'à T_a [77].

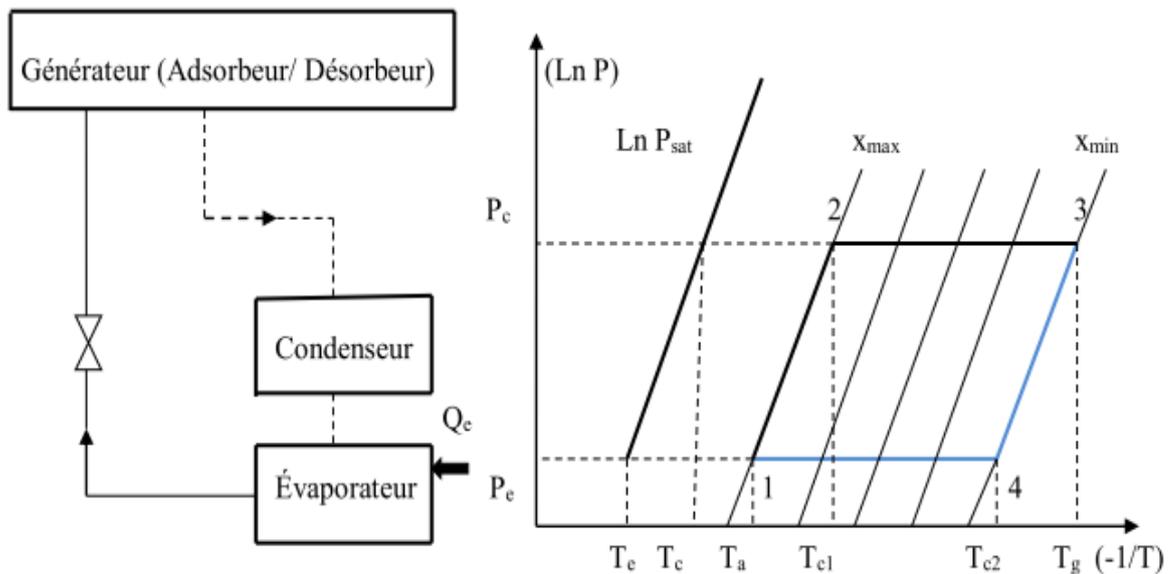


Fig.24 - Phase de refroidissement dans le cycle d'adsorption

Le cycle thermodynamique est totalement défini par les quatre températures de fonctionnement :

T_a : température minimale atteinte par le mélange adsorbant/adsorbé (température d'adsorption).

T_g : température maximale atteinte par le mélange adsorbant/adsorbé (température de régénération).

T_c : température de condensation.

T_e : température d'évaporation. [86]

5.2. Coefficient de performance

Le COP a été introduit pour faciliter l'évaluation thermodynamique d'une pompe à chaleur; il est également utilisé pour l'analyse économique de son applicabilité. [81]

Plus le COP est élevé, plus la pompe à chaleur est performante. Le COP est influencé par la différence et la stabilité de la température entre la source froide et la source chaude et par l'efficacité des échangeurs de chaleur [66].

Par exemple, une PAC qui produit 4 kWh de chaleur pour une consommation de 1 kWh électrique, a un COP égal à 4. Dans ce cas, 3/4 de l'énergie de chauffage provient d'une énergie gratuite et renouvelable (air, eau, sol) alors que 1/4 est d'origine électrique. [67]

Pour les applications de pompage de chaleur, le coefficient de performance, également appelé «coefficient d'amplification» et noté COA. [87]

Le COA de chauffage pour la pompe à chaleur à adsorption a été défini comme le rapport de la chaleur extraite pendant l'adsorption et dans le condenseur à la chaleur isotherme et chaleur désorption [87] :

$$COA_{ch} = \frac{Q_c + Q_{34} + Q_{41}}{Q_{12} + Q_{23}} \quad (5.1)$$

Le coefficient d'amplification réversible est calculé à partir de l'expression suivante [88] :

$$COA_{rév} = \frac{T_a(T_c - T_e)}{T_e(T_c - T_a)} \quad (5.2)$$

Le rendement du système est exprimé comme [89] :

$$\eta = \frac{COA}{COA_{rév}} \quad (5.3)$$

5.3. Détermination des températures de début d'adsorption et de désorption

5.3.1. Equation de Dubinin-Astakhov (D-A)

La quantité de fluide frigorigène adsorbée dépend de la température de l'adsorbant et de la pression du système. Une bonne approximation de la forme de la fonction est donnée par l'équation de Dubinin-Astakhov (D-A) qui est illustrée graphiquement sur la figure 2 et est communément appelée diagramme de Clapeyron. [90]

$$x_a = x_0 \exp\left(-k\left(\frac{T}{T_{sat}} - 1\right)^{n_a}\right) \quad (5.4)$$

Tableau 7 - Les constants x_0 , n_a et k

Paramètre	x_0	n_a	k
Valeur	0.261	1.73	5.36
	0.303	2	4.4

Cependant dans le calcul du coefficient de performance thermique nous n'avons besoin que de la température seuil de désorption T_{c1} . Alors que, T_{c2} est plus convenable dans les calculs des performances des pompes à chaleur. La température seuil de désorption T_{c1} est définie comme étant la température à partir de laquelle le phénomène de désorption commence, elle correspond à l'apparition de la première goutte liquide dans le condenseur. La température seuil d'adsorption T_{c2} 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. [91]

La définition du cycle thermodynamique est terminée lorsque les deux points limites de ce cycle sont donnés et définis. Pour obtenir les relations analytiques entre T_{c1} , T_{c2} et la température

d'évaporation et de condensation, nous avons utilisé la condition d'isostérisme pendant les deux périodes isostatiques (1 - 2) et (3 - 4). [92]

$$m(T_a, P_e) = m(T_{c1}, P_c) \quad (5.5)$$

$$m(T_g, P_c) = m(T_{c2}, P_e) \quad (5.6)$$

Et, par l'application de l'équation (5.4) dans l'équation (5.5) et l'équation (5.6), on obtient: [92]

$$\rho_I(T_a) \exp\left[-D(T_a \ln \frac{P_S(T_a)}{P_e})^{n_a}\right] = \rho_I(T_{c1}) \exp\left[-D(T_{c1} \ln \frac{P_S(T_{c1})}{P_c})^{n_a}\right] \quad (5.7)$$

$$\rho_I(T_g) \exp\left[-D(T_g \ln \frac{P_S(T_g)}{P_c})^{n_a}\right] = \rho_I(T_{c2}) \exp\left[-D(T_{c2} \ln \frac{P_S(T_{c2})}{P_e})^{n_a}\right] \quad (5.8)$$

Pour obtenir la température T_{c1} , nous devons résoudre l'équation (5.7). On donne des valeurs la température T_{c1} dans un intervalle $[T_a, T_{c1max}]$, où T_{c1max} est la valeur maximum de T_{c1} (arbitrairement choisie) et chaque fois, on compare les valeurs de la masse adsorbée calculée correspondant à des valeurs de température données précédemment, à (T_a, P_e) jusqu'à l'obtention de la valeur de T_{c1} correspondant à $m(T_a, P_e) = m(T_{c1}, P_c)$. La résolution d'équation (5.8) nous donne la température seuil d'adsorption T_{c2} , en utilisant la même procédure donnée précédemment. [91]

5.4. Évaluation de des différentes chaleurs du cycle

5.4.1. Chauffage isostérique

L'apport calorifique par unité de masse de l'adsorbant dans la phase de chauffage isostérique lorsque la concentration est x_2 est donné par. [90] :

$$Q_{ch} = Q_{12} = \int_{T_a}^{T_{c1}} [(C_z + x_2 C_w)] dT \quad (5.9)$$

5.4.2. Désorption isobare

L'apport calorifique par unité de masse de l'adsorbant dans la phase de chauffage isobare où la concentration varie est donné par. [93]:

$$Q_{des} = Q_{23} = \int_{T_{c1}}^{T_g} [(C_z + x_c C_w)] dT + \int_2^3 q_{st}(X_c) dX \quad (5.10)$$

5.4.3. Refroidissement isothermique

La chaleur rejetée par unité de masse dans le processus isostérique (3-4) Q_{34} est, par analogie avec le processus (1-2). [90]:

$$Q_{ref} = Q_{34} = \int_{T_g}^{T_{c2}} [(C_z + x_1 C_w)] dT \quad (5.11)$$

5.4.4. Adsorption isobare

La chaleur rejetée par unité de masse dans le processus isobare (4-1) Q_{41} est similaire analogue au processus (2-3). [93] :

$$Q_{ads} = Q_{41} = \int_{T_{c2}}^{T_a} [(C_z + x_e C_w)] dT + \int_4^1 q_{st}(X_e) dX \quad (5.12)$$

OU x: Concentration d'adsorbat dans la particule d'adsorbant, (mol / kg)

C_z : Capacité calorifique de l'adsorbant, (kJ / (kg K)). [93]

C_w : Capacité calorifique de l'adsorbat liquide, (kJ / (Kg K)), calculée à partir de l'expression suivante rapporté dans [93] :

$$C_w = \frac{a+bT+cT^2+dT^3}{M_{H_2O}} \quad (5.13)$$

$a=32,24$, $b=0,1923 \cdot 10^{-2}$, $c=1,055 \cdot 10^{-5}$, $d=-3,595 \cdot 10^{-9}$, et la masse molaire de l'eau $M_{H_2O}=18 \text{ Kg/Kmole}$.

5.4.5. Chaleur de condensation

L'équation de la chaleur de condensation est :

$$Q_c = h_{fc} (X_2 - X_1) \quad (5.14)$$

h_{fc} : L'enthalpie de condensation (Kj/Kg) [79]

5.5. Résultats et discussion

La chaleur isostérique Q_{st} de la zéolithe 13 X a été évaluée et calculée à partir du diagramme $(\ln p, -1/T)$ rapporté dans la thèse (Fig.25). Les résultats de cette évaluation sont rapportés dans le Tab.8.

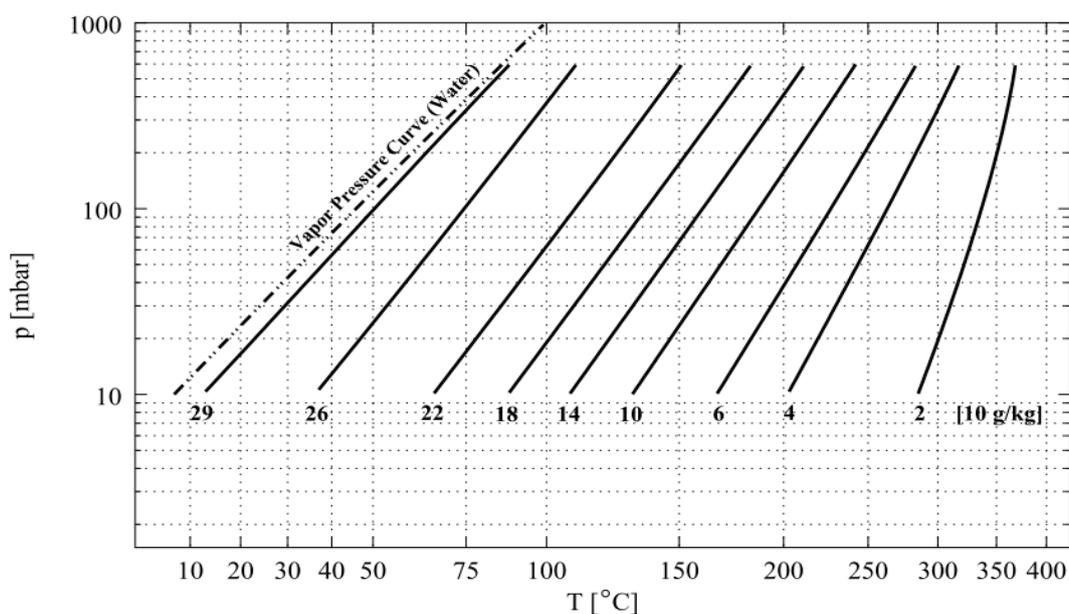


Fig. 25 - Champ isostérique de la zéolithe 13X [94]

Tableau - 8 Calcul de la chaleur isostérique

Paramètres	Valeurs				
xx	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26
Qst	7180	7718	8302	8665	9225

Les résultats de calcul des coefficients de performance COA, COA_{rev} et de η_{II} à partir des expressions (5.1), (5.2) et (5.3) respectivement sont rapportés dans le Tab.9.

Les coefficients de performance COA, COA_{rev} et de η_{II} ont été aussi en fonction de la température de condensation avec la température de l'évaporateur prise à chaque fois fixe. Pour Te= 283 et 288 les résultats sont rapportés dans les Tab.10 et 11 respectivement.

Tableau - 9 les variations des COA, COA_{rev} et η_{II} en fonction de la température d'évaporation

Paramètres	Valeurs			
Te	270	278	283	288
Tc	293	298	304	313
Pe	0,45	0,8725	0,2281	1,7057
Pc	2,3392	3,1698	4,5	7,5
T1=Ta	300	307	310	317
T2=Tc1	320	328	334	340
T3=Tg	346	353	358	366
Qc	83,148	104,83	129,92	167,53
Q ₁₂	28,148	29,572	33,809	32,417
Q ₂₃	-219,424	-220,874	-222,092	-219,17
Q ₃₄	-35,188	-33,854	-32,513	-35,241
Q ₄₁	227,671	226,221	222,141	223,514
COA	1,401	1,457	1,503	1,694
COA _{rev}	4,651	3,454	4,834	7,879
η	0,301	0,422	0,311	0,215

Tableau - 10 les variations des COA, COA_{rev} et η_{II} en fonction de la température de condensation avec Te=283 K

Paramètres	Valeurs		
Te	283	283	283
Tc	293	298	304
Pc	2,3392	3,1698	4,5
T1=Ta	300	307	310
T2=Tc1	320	328	334
T3=Tg	346	353	358
T4	334	334	334
Qc	83,148	104,83	129,92
Q ₁₂	14,079	25,351	33,809
Q ₂₃	-219,424	-220,874	-222,092
Q ₃₄	-16,249	-25,734	-32,513
Q ₄₁	222,141	222,141	222,141
COA	1,38	1,43	1,50
COA _{rev}	2,51	2,81	4,83
η	0,55	0,51	0,31

Tableau - 11 les variations des COA, COA_{rev} et η_{II} en fonction de la température de condensation avec Te=288 K

Paramètres	Valeurs			
Te	288	288	288	288
Tc	293	298	304	313
Pc	2,3392	3,1698	4,5	7,5
T1=Ta	300	307	310	317
T2=Tc1	320	328	334	340
T3=Tg	346	353	358	366
T4	340	340	340	340
Qc	83,148	104,83	129,92	167,53
Q ₁₂	4,225	15,496	23,954	32,417
Q ₂₃	-219,42	-220,874	-222,092	-219,172
Q ₃₄	-8,126	-17,612	-24,39	-35,241
Q ₄₁	223,514	223,514	223,514	223,514
COA	1,41	1,46	1,54	1,69
COA _{rev}	1,74	2,18	3,87	7,88
η	0,81	0,67	0,34	0,22

5.6. Interprétation des résultats

5.6.1. Chaleur isothermique

La variation de la chaleur isothermique (Q_{st}) en fonction de la concentration est représentée sur la fig.25. Q_{st} est proportionnelle à la concentration (x) dans la plage 0,22 et 0,26.

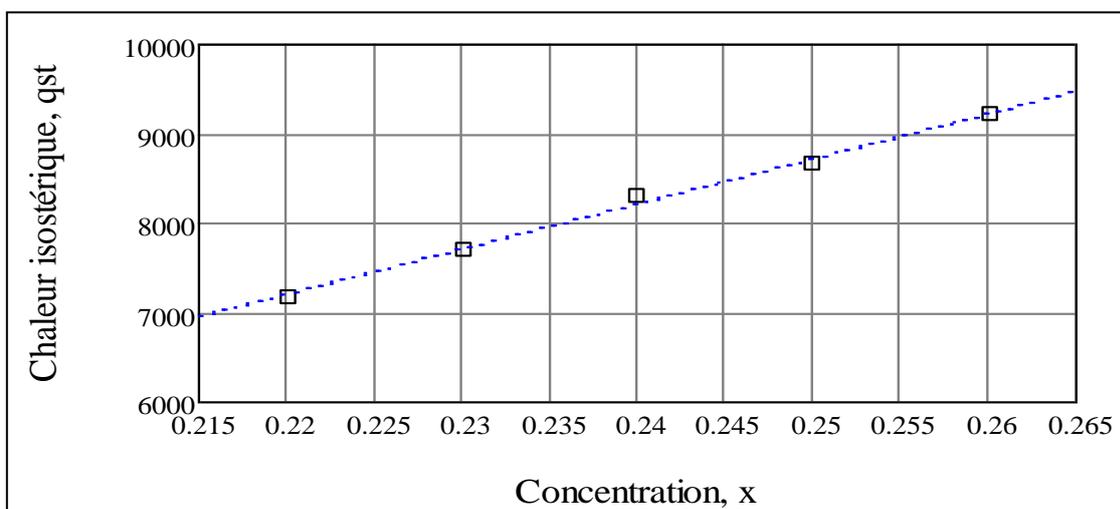


Fig.26 - Variation de chaleur isothermique en fonction de la concentration

La chaleur isothermique est maximale pour $x=0,26$. Cette valeur de Q_{st} témoigne sur l'existence d'emplacements polaires fortement actifs sur la surface du produit (zéolithe).

5.6.2. L'influence de la température d'évaporation

Dans cette partie, la température d'évaporation correspond à la température du milieu extérieur et est supposée varier entre -10°C et 14°C . La température du condenseur correspond à celle du compartiment de moyenne température et est supposée varier entre 20°C et 40°C . Ces plages vont permettre de déterminer l'influence de la température d'évaporation sur le coefficient d'amplification, le coefficient d'amplification réversible et le rendement selon la deuxième loi.

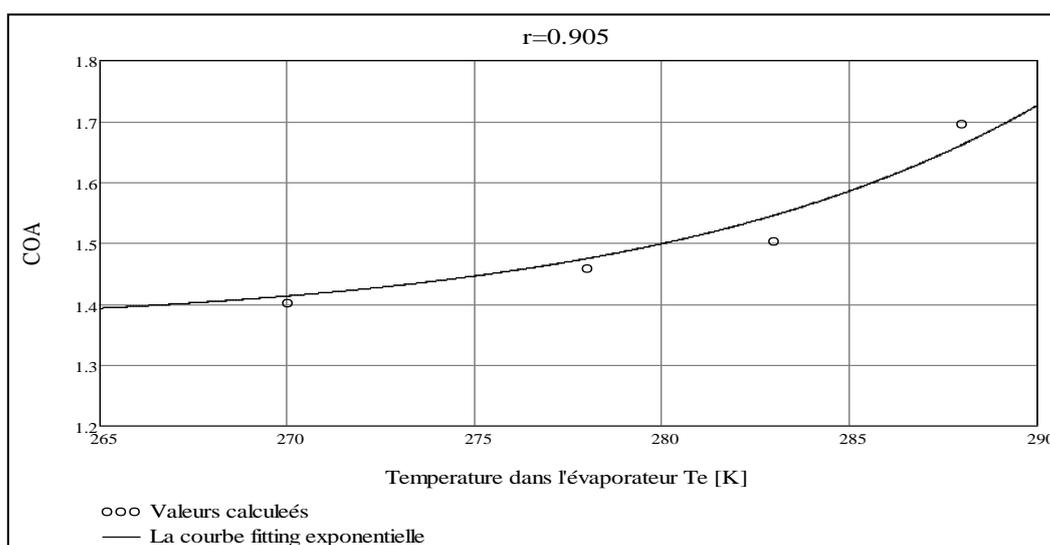


Fig. 27 - Variation du coefficient d'amplification en fonction de la température d'évaporation

La variation du coefficient d'amplification COA en fonction de la température d'évaporation est représentée sur la Fig. 27. Il en ressort que le coefficient d'amplification du système est proportionnel à la température dans l'évaporateur.

On en constate que le COP croit de 20,9% lorsque la température T_e croit de 270 à 288 soit de 6.7%. Ceci peut être interprété par le fait que l'augmentation de la température d'évaporation augmente la pression de saturation $P_s(T_e)$ ce qui provoque une augmentation de la masse d'adsorbat (eau) $m [T_a, P_s(T_e)]$ ce qui implique une augmentation de la masse cyclée. La puissance de refroidissement qui correspond dans ce cas à la puissance épuisée par l'évaporateur du milieu extérieur augmente, ce qui provoque à son tour une augmentation du coefficient de performance.

D'autre part, si T_e augmente, la fraction du liquide qui s'évapore au passage de la vanne de détente diminue, de sorte que la température du mélange liquide-vapeur augmente. La masse de liquide restante qui s'évapore dans l'évaporateur pour produire du froid augmente. Donc le COA augmente.

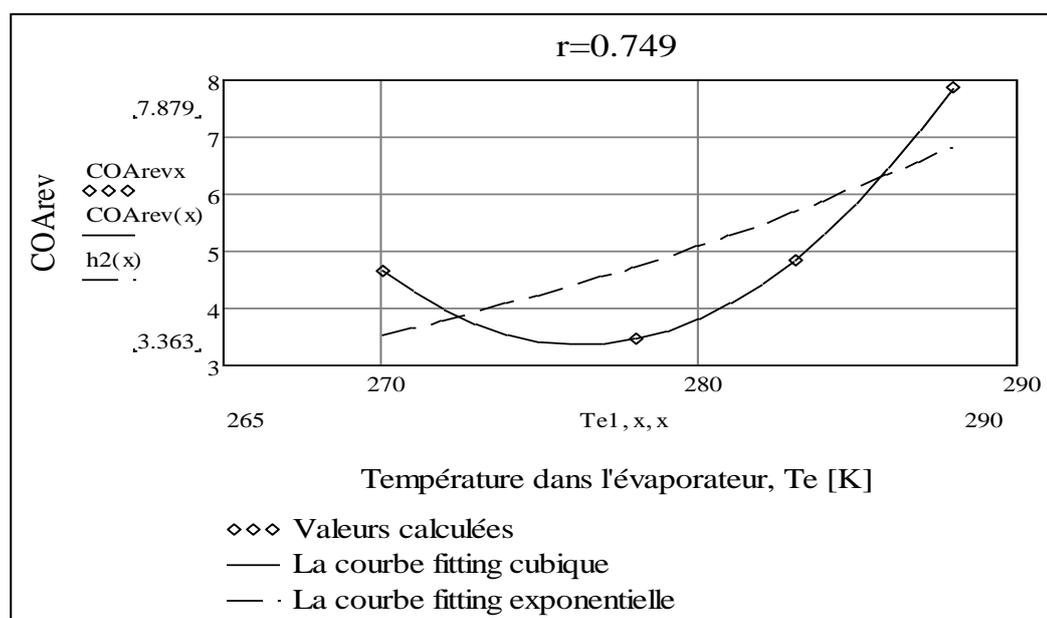


Fig.28 - Variation du coefficient d'amplification réversible en fonction de la température d'évaporation

La figure (Fig. 28) ci-dessus montre l'influence de la température dans l'évaporation sur le coefficient d'amplification.

Nous remarquons que le COA_{rev} décroît de 25,7% lorsque la T_e croit de 270 à 278 soit de 2,96% puis l'allure de son évolution commence à se augmenter le COA_{rev} de 69,4% avec la T_e croit de 278 à 288 soit de 3,6%. Car la température T_e plus élevée réduit la quantité de chaleur nécessaire pour rendre l'eau de la température T_c à la température d'évaporation T_e pendant la phase

d'évaporation, ce qui augmente la quantité de froid produite donc le COA_{rev} augmente. Alors ce qui signifie que la performance optimale est obtenue seulement pour une certaine valeur de température T_e , donc pour la température d'évaporation très faible T_e égale -3°C n'a aucun sens pour des valeurs maximales de température et pour d'échauffement.

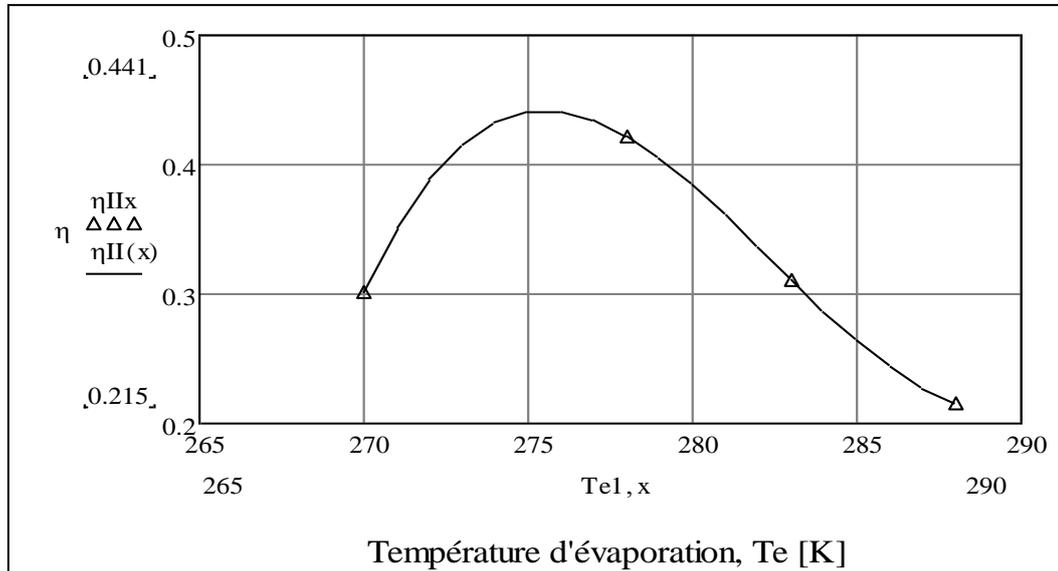


Fig.29 - Variation du rendement en fonction de la température d'évaporation

L'effet de la température dans l'évaporateur sur le rendement du système est montré dans la figure (Fig. 29) au-dessus. L'augmentation de la température dans l'évaporateur (varie entre -3°C et 5°C) s'accompagne avec une augmentation du rendement de la pompe à chaleur à adsorption.

On en constate que le η croît de 40,2% lorsque la température T_e croît de 270 à 278 soit de 2,96%. Cette augmentation est due à la diminution du coefficient d'amplification réversible causée par la diminution de la température de condensation T_c et T_a , le η décroît de 49% lorsque la T_e croît de 278 à 288 soit de 3,6%, est expliquée par la croissance importante de COA_{rev} . Donc COA_{rev} influence négativement sur la valeur du rendement du système. On constate que le rendement augmente à une valeur de la température d'évaporation importante.

5.6.3. L'influence de la température de condensation

Dans cette partie, la température de condensation varie entre 20°C et 40°C et la température d'évaporation fixe à deux valeurs est égale à 10°C et 15°C . Afin d'étudier l'influence de la température de condensation sur le coefficient d'amplification, le coefficient d'amplification réversible, le rendement et la température maximale du capteur thermique.

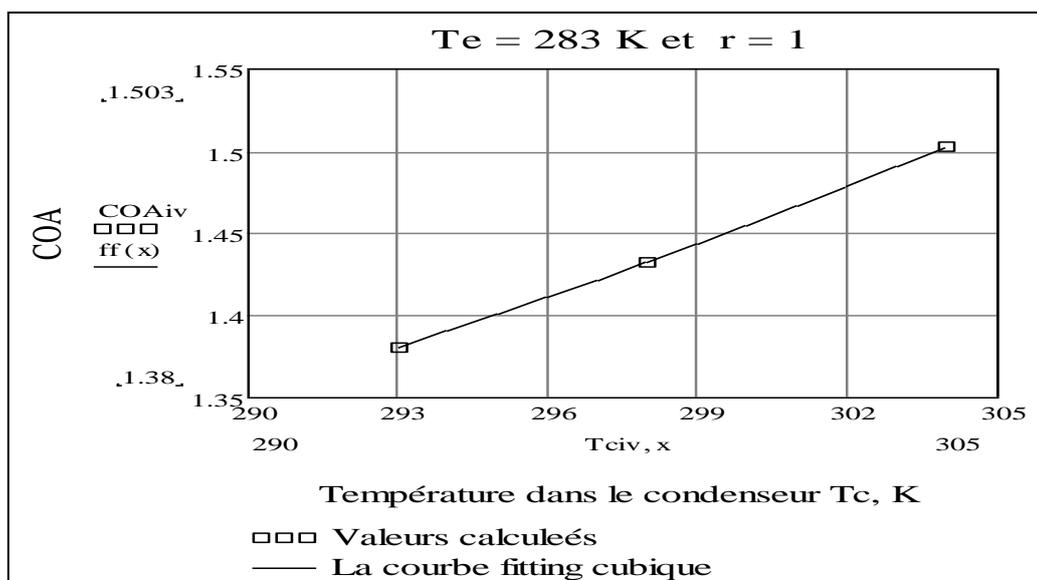


Fig.30 - Variation du coefficient d'amplification en fonction de la température de condensation ($T_e = 10^\circ\text{C}$)

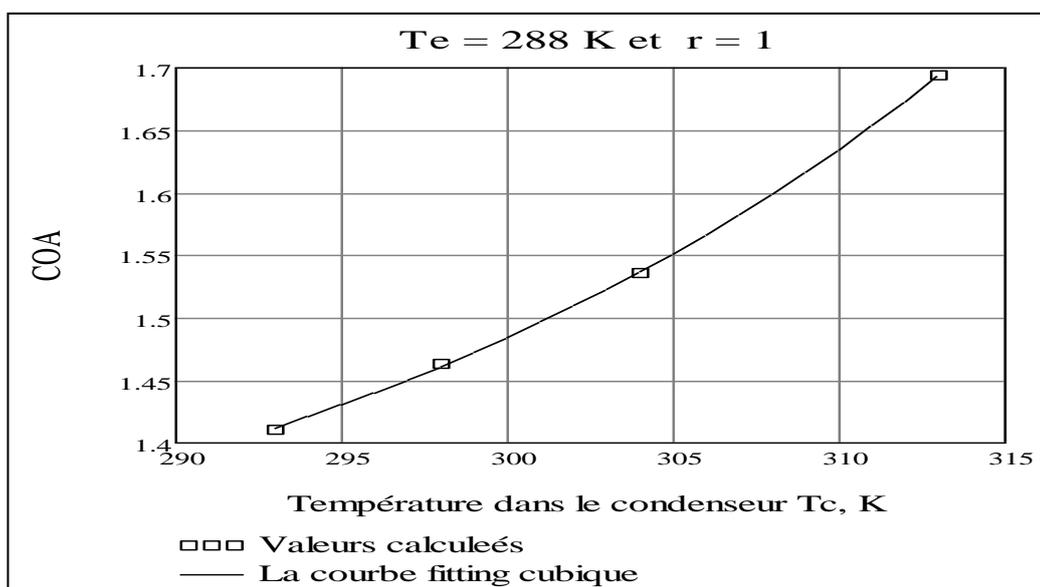


Fig. 31 - Variation du coefficient d'amplification en fonction de la température de condensation ($T_e = 15^\circ\text{C}$)

Les deux figures (Fig. 30 et 31) présentent la variation du coefficient de performance en fonction de la température d'évaporation. L'accroissement de la température de l'évaporateur (T_e) influe positivement sur la valeur de coefficient d'amplification.

On constate que la T_c croit de 293 à 313 soit de 6,8% entraîne une augmentation des COA des valeurs est égale 8,7% et 19,8% correspondant la T_e est égale 10°C et 15°C respectivement, et que le couple zéolithe-eau le plus grand coefficient. Le COA avec la T_e égale à 10°C faible que le COA correspondant la T_e égale à 15°C , alors être un coefficient d'amplification mieux Quand ils sont la T_e et la T_c plus élevée.

Nous expliquons que l'augmentation de la température de condensation, augmente la pression de saturation $P_s(T_c)$ ce qui provoque une augmentation de la masse d'eau

$m[Tg, P_s(Tc)]$ ce qui implique une augmentation de la masse cyclée. La puissance d'échauffement augmente et qui provoque à son tour une augmentation du COA.

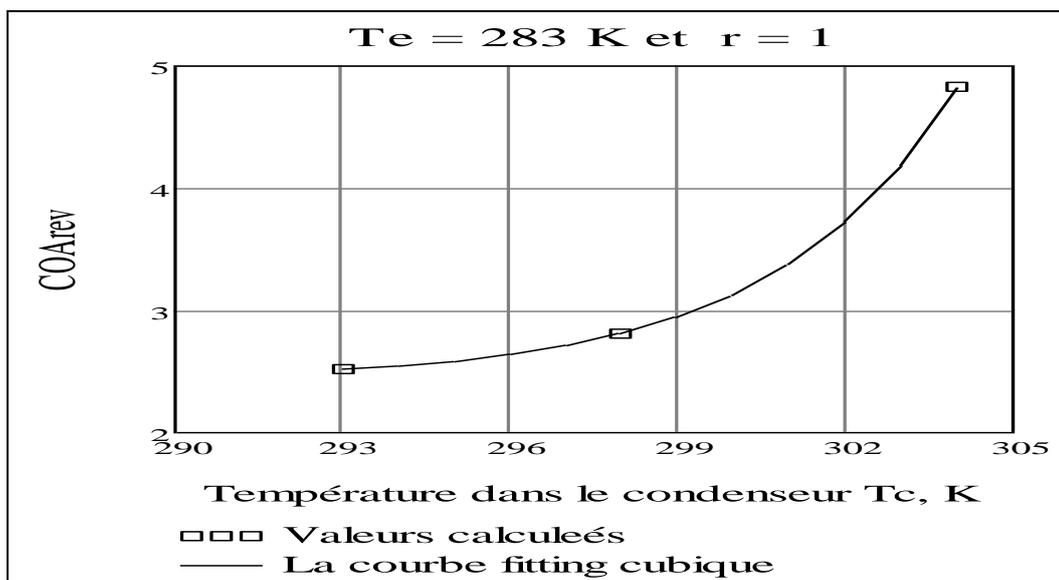


Fig. 32 - Variation du coefficient d'amplification réversible en fonction de la température de condensation ($T_e = 10^\circ\text{C}$)

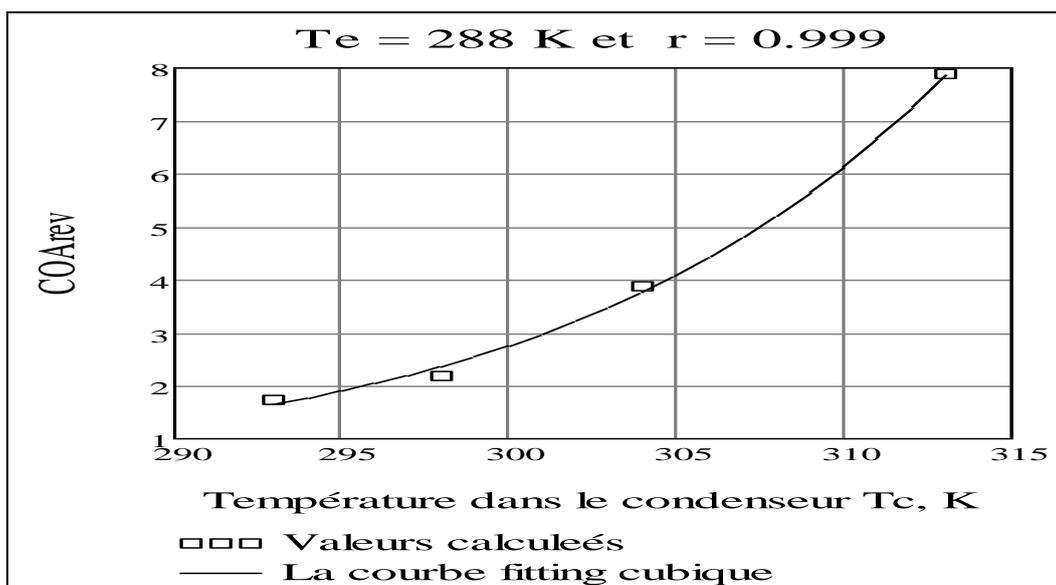


Fig. 33 - Variation du coefficient d'amplification réversible en fonction de la température de condensation ($T_e = 15^\circ\text{C}$)

Les figures 32 et 33 ci-dessus montrent que la variation de coefficient d'amplification réversible du système est proportionnelle à la variation de la température de condensation.

On constate que la T_c croit de 293 à 313 soit de 6,8% entraîne une augmentation des $\text{COA}_{\text{rév}}$ des 92,4% et 99% correspondant la T_e est égale 10°C et 15°C respectivement, et que le couple zéolithe-eau le plus grand coefficient. Le $\text{COA}_{\text{rév}}$ avec la T_e égale à 10°C fort que le $\text{COA}_{\text{rév}}$ correspondant la T_e égale à 15°C , alors on constate plus vous température d'évaporation est élevée, être un coefficient d'amplification réversible est faible.

Ceci interprété la température T_c plus élevée réduit la quantité de chaleur nécessaire pour rendre l'eau de la température T_e à la température de condensation T_c pendant la phase de condensation, ce qui augmente la quantité de chaleur produite donc le COA_{rev} augmente.

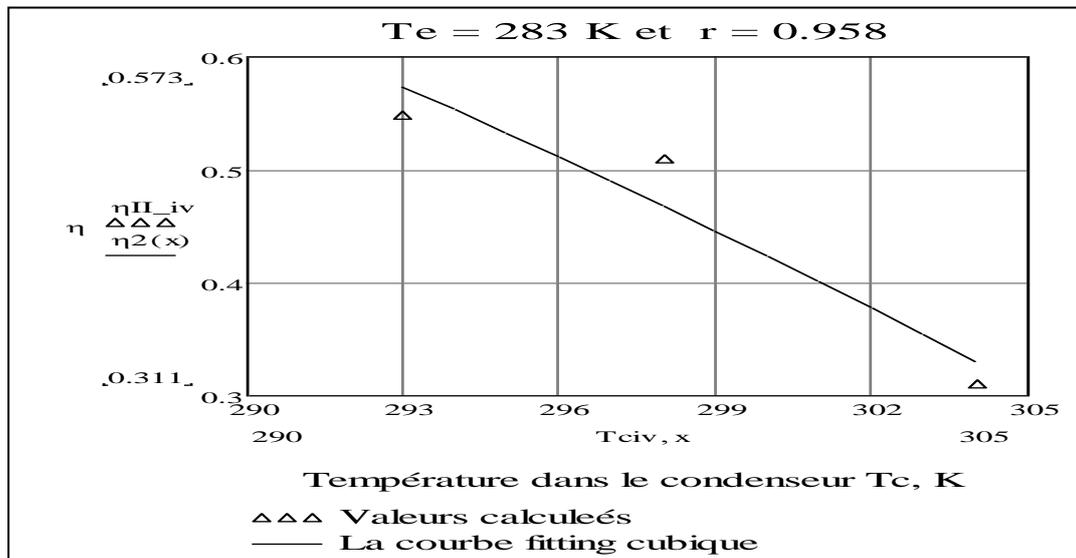


Fig. 34 - Variation de rendement en fonction de la température de condensation ($T_e = 10^\circ\text{C}$)

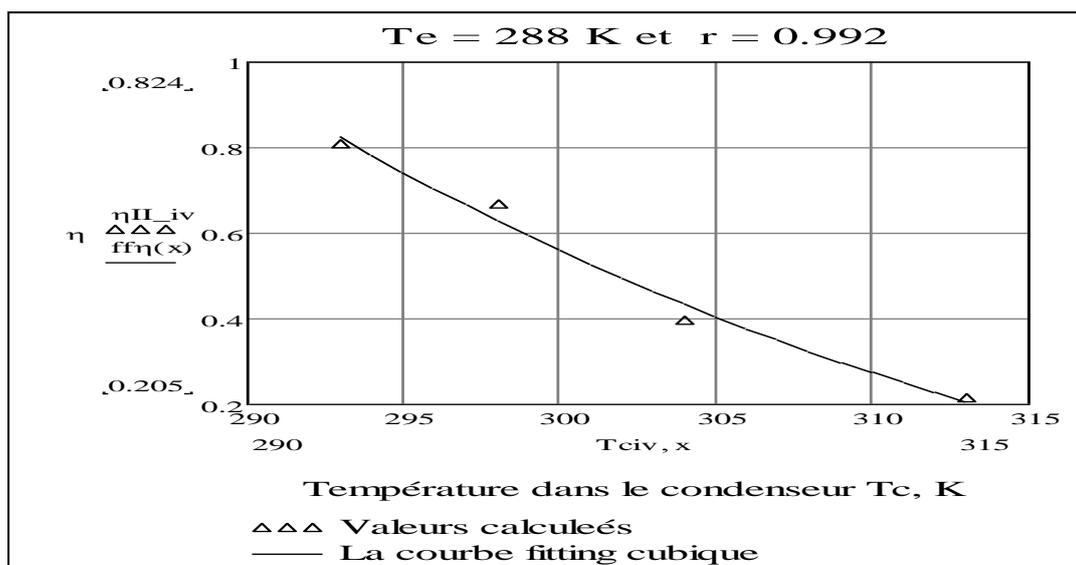


Fig. 35 - Variation de rendement en fonction de la température de condensation ($T_e = 15^\circ\text{C}$)

Les figures 34 et 35 au-dessus représentent l'influence de la température de condensation sur le rendement de la pompe à chaleur à adsorption. La température de condensation (T_c) influence négativement sur la valeur de rendement du système.

Nous remarquons que le η décroît des 43,6% et 67,2% lorsque la température T_c croît de 293 à 313 soit de 6,8% correspondant la T_e est égale 10°C et 15°C respectivement. Cette diminution est due à l'augmentation de coefficient d'amplification réversible, causé par l'augmentation de T_c , tout simplement parce que la valeur de COA_{rev} augmente aussi rapide que la valeur de COA , et les pertes thermiques, ce qui aura pour effet de diminuer d'autant le rendement du système.

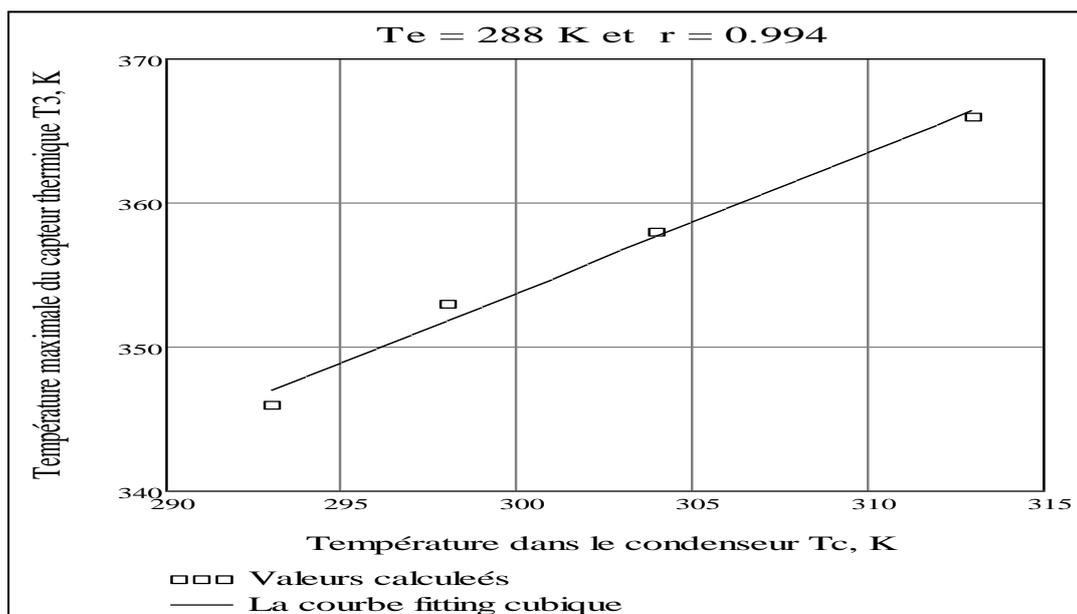


Fig.36 - Variation de la température maximale du capteur thermique en fonction de la température de condensation ($T_e = 10^\circ\text{C}$)

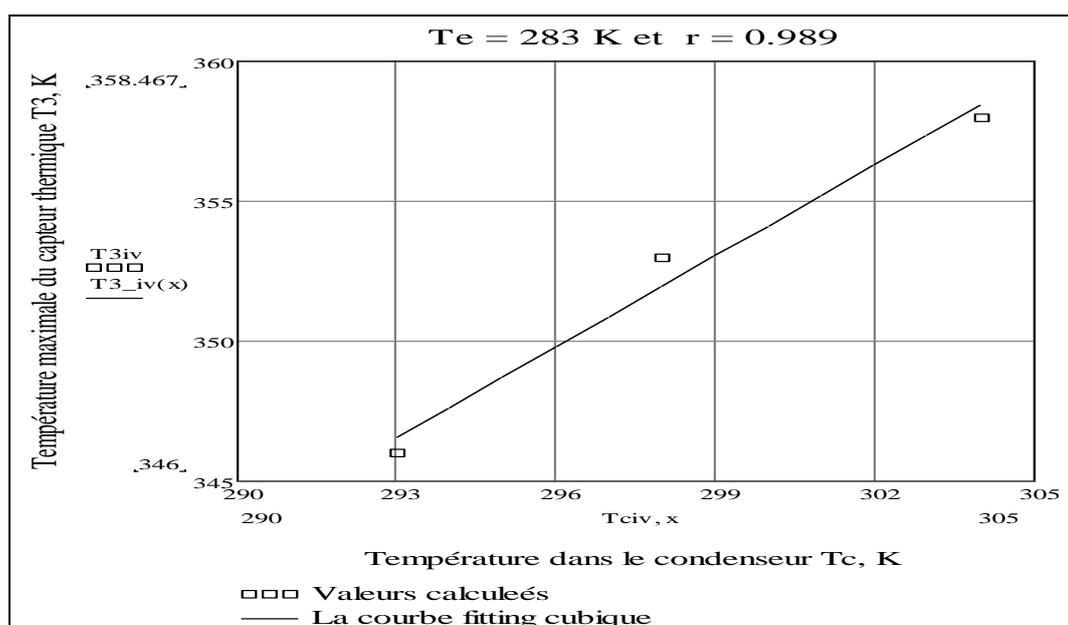


Fig.37 - Variation de la température maximale du capteur en fonction de la température de condensation ($T_e = 15^\circ\text{C}$) thermique

Les deux figures (Fig. 36 et 37) présentent la variation de la température maximale du capteur thermique en fonction de la température de condensation.

On constate que la T_3 croît des 3,5% et 5,8% lorsque la température T_c croît de 293 à 313 soit de 6,8% correspondant la T_e est égale 10°C et 15°C respectivement. Ceci interprété une augmentation de T_c entraîne une augmentation de la masse adsorbée (eau) et par voie de conséquence, ceci a pour effet d'imposer des températures plus élevées au générateur pour voir apparaître un effet utile à condenseur. Donc, T_3 augmente quand T_c augmente.

Conclusion

Dans ce chapitre dédié à l'étude et analyse du cycle idéal d'une pompe à chaleur à adsorption a permis de faire ressortir les conclusions suivantes :

- La concentration augmente avec l'augmentation de la chaleur isostérique.
- L'augmentation de la température d'évaporation induit une croissance du COA.
- La croissance du COA_{rev} est obtenue seulement pour une certaine valeur de la température T_e supérieure à $5^{\circ}C$.
- Le rendement augmente à une valeur de la température d'évaporation importante.
- L'augmentation de la température de condensation est accompagnée par la croissance du COA et du COA_{rev} .
- Le rendement est décroissant avec l'augmentation de T_c .
- L'augmentation de la température maximale du capteur thermique avec la T_c augmente.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail a été, étude théorique des performances d'une pompe à chaleur à adsorption utilisant le couple zéolithe-eau alimenté par un capteur solaire.

Les difficultés d'adsorption des pompes à chaleur sont surmontées une par une. Les systèmes de pompe à chaleur à adsorption commencent à trouver un marché étroit dans l'industrie. Des études sur l'application de pompes à chaleur à adsorption pour l'utilisation de l'énergie solaire en tant que fabricants de glace se poursuivent de plus en plus. Ils ont d'autres problèmes et difficultés lors de la conception et de la production, tels que des fuites, un vide poussé, une masse insuffisante et un transfert de chaleur [78].

Les pompes à chaleur à adsorption ont pris de l'importance en raison de la demande croissante en énergie. Dans cette étude, l'importance de la pompe à chaleur à adsorption, son principe de fonctionnement et ses avantages sont expliqués en détail. Comme le principe de base de ces systèmes est basé sur des phénomènes d'adsorption. Afin de choisir une paire appropriée pour une pompe à chaleur à adsorption, les exigences relatives à l'adsorbant et à l'adsorbat ainsi que leur affinité l'un pour l'autre doivent être bien connus. L'interaction entre un adsorbant et un adsorbat est le problème le plus important pour le choix d'une pompe à chaleur par adsorption, tel que le pair zéolithe-eau utilisée dans le système ont également une grande importance.

En effet, le principal avantage des pompes à chaleur à adsorption n'est pas l'efficacité énergétique, mais la flexibilité des sources d'énergie et la possibilité d'utiliser de l'énergie renouvelable et gratuite. Cependant, malgré ce fait, l'efficacité énergétique ou COP et la taille du système par quantité de chauffage qui détermine le coût initial sont encore des facteurs importants. En conséquence, l'efficacité est un facteur très important à promouvoir pour les pompes à chaleur à adsorption, quelle que soit l'énergie utilisée [95].

Étude théorique des performances d'une pompe à chaleur à adsorption zéolithe-eau alimenté par un capteur solaire a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Le COA croît des 20,9% et 8,7% lorsque la température T_e et T_c croît de des 6,7% 6,8% respectivement. Il faut noter que T_e et T_c correspond à la température d'évaporateur et du condenseur très proche de celle du milieu environnant.
- Le $COA_{rév}$ croît des 69,4% et 92,4% lorsque la température T_e et T_c croît de des 6,7% 6,8% respectivement raison pour laquelle le rendement selon la deuxième loi η chute près de 49% et 43,6%. Il faut souligner que chaque fois que la température T_e et T_c prend une valeur, celle de moyenne potentiel qui est celle du panneau solaire ne soit pas inférieure à un seuil bien déterminé

Les perspectives

De nombreuses perspectives de recherche subsistent; L'optimisation du fonctionnement de la machine permet la réalisation de nombreuses expériences pour étudier l'influence des différents paramètres.

- Il est envisagé que, dans une opération à long terme, le système d'adsorption par pompe à chaleur serait très rentable et impliquerait un entretien minimal, car il aurait très peu de pièces mobiles. Il y a un besoin urgent de développer des technologies rentables pour améliorer l'efficacité du système, en utilisant les concepts de régénération des ondes thermiques, d'adsorbants composites, de suspensions de sels métalliques et pour rechercher d'autres méthodes.
- Une pompe à chaleur utilise de l'énergie renouvelable et peut être utilisée pour la conversion de chaleur et d'électricité à faible coût sur site, c'est un système très important. Cependant, le système doit résister aux fluctuations de la charge, de la source et de l'énergie renouvelable. Certaines nouvelles technologies pour étendre la gamme de conduite, améliorer l'efficacité avec une large gamme de conduite, et fournir un contrôle stable doivent être développées.
- Une expérience plus poussée du déploiement des pompes à chaleur dans le chauffage urbain réduirait l'incertitude entourant les coûts et entraînerait probablement une réduction des coûts grâce à l'apprentissage par la pratique. Un examen détaillé des perspectives de telles réductions de coûts futures n'entre cependant pas dans le cadre de cette étude.

Bibliographies

- [1]Melkon,T., Birgul,T-E,. AyseErdem-S,E,. 1998. A novel approach to enhance heat and mass transfer in adsorption heat pumps using the zeolite–water pair, Chemical Engineering, pp. 2-5;
- [2]Yaïche, M.R., Bekkouche, S.M.A., 2010. Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel.Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, 684 p ;
- [3]Soulayman, S.1952. Economical and Technical Considerations for Solar Tracking: Methodologies and Opportunities for Energy Management,Syria, pp. 191-192-193;
- [4]La protection solaire dans les bâtiments à basse consommation.
- <https://www.fermeture-store.org/.../120829-ES-SO-guidebook-Fevrier-2012-VF.pdf>. Date de la dernière consultation du site: 01/02/2018
- [5]REDDAH, Takieddine., 2015. Etude et dimensionnement d'un système solaire combiné Application: Logement individuel type F3 à Batna, mémoire du diplôme magister, université de Batna, 25 p ;
- [6]INTRODUCTION : II.1. L'énergie solaire reçue sur Terre [14] : II.2. La ...
- <dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/468/3/chapitreII.pdf>. Date de la dernière consultation du site: 06/02/2018
- [7]CHEKIROU, WASSILA., 2008. Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption, université Mentouri-Constantine, pp. 9-20-22-23;
- [8]GUICHERD, Roger., 1974. Etude, réalisation et exploitation payranometre sélectif destine à la définition et à la mesure de l'indice d'éclairément, sciences et Techniques de Saint-Jérôme, pp. 9-10 ;
- [9]MAHDI, Khaled., 2008. Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique, science exacte département du physique de l'université Mentouri-Constantine, pp. 18-27-28
- [10]Les rayonnements solaires et le fonctionnement du couvert végétal.
- www.bibliotheque.auf.org/doc_num.php?explnum_id=285. Date de la dernière consultation du site: 31/01/218 ;
- [11]Cours de l'énergie solaire photovoltaïque, Partie I : Cellule, module et champ photovoltaïques.
- energetique.uae.ma/.../cours.../cours/cours_ajzoul/cours_photovoltaique/Chapitre1.pdf. Date de la dernière consultation du site: 02/ 02/ 2018 ;
- [12]NIA, Mohamed., 2010. Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire, sciences département de physique de l'universite Ferhat Abbas-SETIF, pp. 7-8 ;
- [13] CHAPITRE I : Gisement solaire.
- <dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf>.Date de la dernière consultation du site: 05/ 02/ 2018 ;
- [14]MAHDI, Khaled., 2008. Conception et réalisation d'un concentrateur sphérique, science exacte département du physique de l'université Mentouri-Constantine, pp. 17-18-28
- [15]IBERRAKEN, A., ALILI, R., 2012. Modélisation mathématique et simulation de capteurs solaires. Université A/Mira de Béjaia, pp. 4 ;

[16] Rayonnement diffus - USTO.

web.univ-usto.dz/laboratoires/laar/images/.../These_NAIM_Houcine_partie_2.pdf. Date de la dernière consultation du site: 10/ 03/ 2018 ;

[17]M. Ghodbane., B. Boumeddane., N. Moumami., S. Largot,; H. Berkane., 2016. Study and numerical simulation of solar system for air heating, Mechanical Engineering, pp. 43;

[18]Bilan thermique du chauffe-eau solaire.

dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5279/6/chapitre_IV.pdf. Date de la dernière consultation du site: 10/ 03/ 2018 ;

[19]Les panneaux solaires thermiques.

solen-energie.be/medias/files/fiches/SOLENER03.pdf. Date de la dernière consultation du site:

10/ 03/ 2018 ;

[20]MOGHARBI, M., HALASSA, D., 2010. Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air, université Kasdi MERBAH de Ouargla, pp. 19-20 ;

[21]SAADI, SOUAD., 2010. Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, science exacte département du physique de l'université Mentouri-Constantine, 27 p ;

[22] Brochure technique sur le solaire thermique - Viessmann.

<https://www.viessmann.lu/.../PDFs/...%20Systèmes%20solaires/Brochure%20technique...> Date de la dernière consultation du site: 15/ 03/ 2018 ;

[23]Dabrowski, A., 2001. Adsorption -fromtheory to practice,

[24]Boushaba, H., Mimet, A., Manuel Perez Garcia., Asbik M., El Ganaou, M., Dimensionnement et réalisation d'une machine frigorifique solaire à adsorption d'ammoniac sur charbon actif, universitaire de technologie de Longwy, université de Lorraine, France, 1 p ;

[25]Eric, Poirier., 2000. Etude de l'adsorption d'hydrogène sur des nanostructures de carbon, Université du Québec à Trois-Rivières, pp. 5 ;

[26]Bouacherine, S., 2012. Eliminations des polluants spécifiques par adsorption sur charbon actif et argile traitée et non traitée, Université Mohamed Chérif Messaadia –Souk-Ahras, pp. 11-12 ;

[27]BOUZIANE, N., 2007. Elimination du 2-mercaptobenzothiazole par voie photochimique et par adsorption sur la bentonite et le charbon actif en poudre.Université Mentouri de Constantine, pp. 3 ;

[28]Adsorption — Wikipédia

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Adsorption>. Date de la dernière consultation du site: 16/ 03/ 2018 ;

[29]physisorption.

<https://my-definitions.com/fr/definition/physisorption>. Date de la dernière consultation du site: 14/ 03/ 2018 ;

- [30] WAUQUIER, Jean-pierre., 1998. 2 procédés de séparation : le raffinage du pétrole, Paris, 537 p ;
- [31]MEBARKI, Billel., 2013. Etude et analyse d'un système de production de froid par énergie solaire pour la climatisation, science de la technologie département de génie mécanique, université Constantine, pp. 13-14-15-24;
- [32]Chap II adsorption | meridjadahia - Academia.edu
www.academia.edu/5495084/Chap_II_adsorption. Date de la dernière consultation du site: 20/ 03/ 2018 ;
- [33] ALA, ABDESSEMED,., 2009. Etude de l'élimination l'éthyle violet par adsorption sur la kaolinite et le charbon actif et par des méthodes photochimiques en milieu aqueux, université Mentouri-Constantine, pp. 18 ;
- [34]chapter 3 principles of adsorption - Shodhganga
shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/.../8/08_chapter3.pdf. Date de la dernière consultation du site: 21/ 03/ 2018 ;
- [35]Moulay-Rachid BABAA,., 2004. Contribution à l'étude de l'adsorption physique de gaz sur les nanotubes de carbone mono- et multiparois. Université Henri Poincaré, Nancy-I, pp. 7-8 ;
- [36]Ralph T. Yang., 1985. Gas separation by adsorption processes par, United States of America, pp. 27-28;
- [37] MESSEMECHE, F., 2014. Etude qualitative et quantitative de l'adsorption d'un colorant organique sur le charbon actif. Université Med Khider Biskra, pp. 14-15 ;
- [38] MEBARKI, Billa., 2017. Etude des transferts de chaleur et de masse dans une machine frigorifique à adsorption solaire, université Mentouri-Constantine, pp. 13-14-77-58-59;
- [39]OSMANE, ALI BABA., 2017. Dimensionnement d'une machine frigorifique à adsorption alimentée par énergie solaire, Energétique, Université KasdiMerbeh Ouargla, 10-19-25-26-29-30 p
- [40]ULKU. A. S, MOBEDI. M., 1989. Adsorption in energy storage. University, IZMIR, TURKEY, pp. 491;
- [41] BOULAAJOU, Soumia., 2013. Etude cinétique de l'adsorption statique du 4-Nitrophénol sur charbon actif commercial (NC60), Université KasdiMerbeh Ouargla, 8 p
- [42] SANTOS, V., 2008. Caractérisation et modification de l'acidité résiduelle de zéolithes cationiques, Université de Poitiers, pp. 7 ;
- [43] Jiri,Cejka.,Herman, V. B., Avelino, Corma., Ferdi, Schüth., 2007. Introduction to zeolite science and practice, Amsterdam, 1 p;
- [44] BENMAAMAR, H.,HAMMICHE, S., 2016. Elaboration et caractérisation d'un masque purifiant à base de la zéolite, Université A.MIRA-BEJAIA, pp. 1-5 ;
- [45]Remila, M.,Maouche, M., 2016. Evaluation du pouvoir de captage de la Zéolithe (cas eau polluée), Université A. MIRA – BEJAIA, pp. 3 ;
- [46]Michel, Guisnet., Fernando,Ramôa Ribeiro., 2006. Les zéolithes un nanomonde au service de la catalyse, France, pp. 1-2-3 ;

[47]WAUQUIER, Jean-pierre., 1998. 2 procédés de séparation : le raffinage du pétrole, Paris, pp. 537-542-543;

[48]Ivan, Petrov.,Todor, Michalev., 2012. Synthesis of Zeolite A: A Review, 30 p;

[49] Résuméd'études scientifiques sur le mode d'action de la zéolite (clinoptilolite).

<https://www.nutri-site.com/documents/File/Panaceo-etudesscientifiques.pdf>. Date de la dernière consultation du site: 24/ 03/ 2018 ;

[50] BRODU, N., 2012. Etude d'un procédé d'ozonation avancée sur zéolithe pour le traitement d'effluents organiques gazeux, université de TOULOUSE, pp. 10-11 ;

[51]Marie, Jeffroy., 2010. Simulation moléculaire des propriétés des zéolithes cationiques : Propriétés thermodynamiques et propriétés structurales, l'université Paris-Sud, pp. 9 ;

[52]SCOTT, M.,KATHLEEN, A., PRABIR, K., 2003. Handbook of zeolite science and technology, New York, pp. 3-5-9-10-12-13-17;

[53]TEBANI, Houda., 2015. Elaboration et étude des propriétés structurales et optiques de nanoparticules de PbS incorporées dans la zéolithe Y, université Constantine, 7 p ;

[54] OTMANE, F., 2010. Effet des paramètres de synthèse sur les propriétés des zéolithes de type Y et LTA, université d'ORAN- Mohamed Boudiaf, pp. 8-10 ;

[55]Les zéolithes - Zéolites.

www.zeolitestore.com/les-zeolithes. Date de la dernière consultation du site: 29/ 03/ 2018 ;

[56]HARBUZARU, B., 2003. Préparation de structurants organiques et leur engagement en synthèse hydrothermale des zéolithes. Université de Haute Alsace – Mulhouse. Français, pp. 19-20-28 ;

[57]JÉRÉMY, DHAINAUT., 2012. Vers l'identification d'inhibiteurs de croissance pour la synthèse de cristaux de zéolithes de taille nanométrique, l'université de Haute Alsace, pp. 20-21 ;

[58]MEKKI DAOUADJI, Charifa., 2013. Elaboration et caractérisation des zéolithes de types X et LSX et étude de leurs applications dans l'environnement, université d'ORAN Mohamed Boudiaf, pp. 41 ;

[59]R. Z. WANG., Y. X. XU.,J. Y. WU., W. WANG., 1998. Experiments on heat-regenerative adsorption refrigerator and heat pump. Int. J, pp. 935;

[60]Jean, Lemale., 2012. Les pompes à chaleur, Paris, 1 p ;

[61]Principes de fonctionnement de la pompe à chaleur.

www.enr.fr/userfiles/files/.../2013170202_SERKitPACcomplet201211.pdf. Date de la dernière consultation du site: 02/ 04/ 2018 ;

[62]Anton A. Kiss., Carlos A. Infante Ferreira. , 2017. Heat pumps in chemical process industry, Taylor & Francis, 1 p;

[63]Pompe à chaleur — Wikipédia

https://fr.wikipedia.org/wiki/Pompe_à_chaleur. Date de la dernière consultation du site: 03/ 04/ 2018 ;

[64]LARKECHE, Ouassila Epouse ZERMANE., 2012. Modelisation d'une machine frigorifique à adsorption : application des equilibres se phases, l'universite de Mountouri Constantine, l'universite de Mountouri Constantine, 30 p ;

[65]C4. La pompe à chaleur.

https://sb.epfl.ch/files/content/sites/fsb/files/sph/TPD/FR/C4_Pompe_a_chaleur.pdf..Date de la dernière consultation du site: 04/ 04/ 2018 ;

[66]LA POMPE A

CHALEUR(ER10).document.environnement.brussels/opac_css/.../IF%20Energie%20ER10%20part%20F...

Date de la dernière consultation du site: 04/ 04/ 2018 ;

[67]Les pompes à chaleur - Ef4

www.ef4.be/documents/pompes-a-chaleur/brochure_pac_mars2010.pdf. Date de la dernière consultation du site: 05/ 04/ 2018 ;

[68] Etude et mise en œuvre d'une pompe à chaleur.

https://moodle.insa-rouen.fr/pluginfile.php/15831/.../Rapport_P6-3_2009_25.pdf?.... Date de la dernière consultation du site: 04/ 04/ 2018 ;

[69]POMPES A CHALEUR

www.electrocouffigna.site.ac-strasbourg.fr/site-php/.../exposes/diaporama-gabel.pdf. Date de la dernière consultation du site: 05/ 04/ 2018 ;

[70]Bruno, Beranger., 2009. Les pompes à chaleur, Paris, 18p ;

[71]Pompes à chaleur.

www.fws.ch/tl_files/download_f/publications_specialisees/Manuel_PAC_08F.pdf. Date de la dernière consultation du site: 08/ 04/ 2018 ;

[72] Jürgen, Bonin., 2012. HeatPump Planning Handbook, Umwelt&Technik, Germany, pp. 27-35-51;

[73] D. TOURNAYE., 1979. Les pompes à chaleur, Département géothermie, pp. 3-16-17

[74]Dincer, I., Kanoglu, M., 2003. Refrigeration systems and application, Chennai. India, pp. 293;

[75]Walter, Grassi.,2018. Heat pumps fundamentals and applications, university of Pisa. Italy, pp. 15;

[76]4. La pompe à chaleur gaz à absorption - Ef4.

www.ef4.be/documents/pompes...chaleur/.../dgo4_ef4_pac_rapport techno3_ca4.doc. Date de la dernière consultation du site: 13/ 04/ 2018 ;

[77] H., Mobedi, M., Ulku, S.,2007.A review on adsorption heat pump: problems and solutions, Izmir, Turkey, pp. 1-2383-2385-2400;

- [78]Annett Kühn., 2013. Thermally driven heat pumps for heating and cooling, Berlin, Germany, pp. 3-11;
- [79]Zeynep Elvan, YILDIRIM., 2001. A study on isotherm characteristic of adsorbent-adsorbate pairs used in adsorption heat pump, university alİzmir, pp. 25-26-27-75;
- [88]Kazimierz, Brodowicz ., Tomasz, Dyakowski., 1990. Heat pumps, London, pp. 2-30-31;
- [81]DONG, Lihua. 2012. Study on the hybrid water heater with adsorption heat pump. Nagoya, pp. 15;
- [82]Katarzyna, Zwarycz-Makles., Wladyslaw, Szaflik., 2017. Comparison of Analytical and Numerical Models of Adsorber/desorber of Silica Gel-water Adsorption Heat Pump, University of Technology in Szczecin, 70p;
- [83]Hasan, Demir., 2015. Comparison of Microwave and Conventional Driven Adsorption Heat Pump Cycle Duration, Chemical Engineering, pp. 8;
- [84] J.Y. Wu., R.Z. Wang., Y.X. Xu., 1999. Dynamic simulation and experiments of a heat regenerative adsorption heat pump, Energy Engineering, pp. 1008-1010-1011;
- [85] KINGA, KOWALSK., BOGDAN, AMBROŹEK. 2017. Modeling the performance of water-zeolite 13Xadsorption heat pump. Archives of thermodynamic, pp. 195;
- [86]BENABDELLAH, H. M., 2011. Étude expérimentale de production frigorifique par adsorption solide : application à la conception d'une plateforme de trigénération à partir de biomasse en milieu Rural, université M'hamed BOUGARA, Boumerdes, pp. 19 ;
- [87]M. Pons., F. Meunier., G. Cacciola., R.E. Critoph., M. Groll., L. Puigjaner., 1989. Thermodynamic based comparison of sorption systems for cooling, Physics Dept, pp. 8;
- [88]Zebbar.Dj,Kherris.S, Zebbar. S, Kouider. M. 2012. Thermodynamic optimization of an absorption heat transformer. Int, J. Refrigeration, 35 (2012), pp. 1397;
- [89] BENMERIEM. F. 2009. Contribution à l'analyse de la faisabilité énergétique d'une installation de production de l'eau chaude sanitaire par voie solaire. Université de HassibaBenbouali de Chlef, pp. 43 ;
- [90]R.E. CRITOPH., 1999. Adsorption refrigerators and heat pumps (Chapter 10), in Carbon Materials for Advanced Technologies, pp. 306-307-314-315;
- [91]BENDOB, M., NEDJAI, R., 2016. Etude de la performance d'une machine frigorifique à adsorption alimentée par l'énergie solaire, université KASDI Merbah, Ouargla, pp 29-30 ;
- [92]W.Chekirou., R. Boussehain., M. Feidt., A. Karaali., N. Boukheit., 2011. Numerical results on operating parameters influence for a heat recovery Adsorption Machine, Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée, pp. 206;
- [93] ZEBBAR. DJ., 2018. Etude et analyse thermodynamiques d'un nouveau cycle de transformateur de chaleur à adsorption solide-gaz. pp. 2;
- [94] Dirk, Shawe. 1998. Theoretical and Experimental investigations of an adsorption heat pump with heat transfer between two adsorbers. University Stuttgart zur Erlangung, pp. 135;
- [95]AHMET ONUR YURTSEVER. 2011. Mathematical modeling of adsorption/ desorption systems for chemical heat pumps. Middle East Technical University, pp.23;

Annexes



The 5th International Congress On Thermal Sciences AMT'2018
18-19 April
ENSA-Safi Morocco

PARTICIPATION CERTIFICATE

The organizing committee of AMT'2018 hereby certify that the following paper has been presented at 5th International Congress On Thermal Sciences:

Paper ID : 45

Title : ÉTUDE ET ANALYSE THERMODYNAMIQUES D'UN NOUVEAU CYCLE DE TRANSFORMATEUR DE CHALEUR À ADSORPTION SOLIDE-GAZ

Presenter : Ms/Mr Djallel Zebbar

Co-Authors : Samra Chikh Sahraoui Kherris
Souhila Zebbar Kouider Mostefa
Asmae Guelib Nadia Kaddouri

Communication : Poster

On behalf of AMT'2018 organizers



Publication 01

5^{ème} Congrès International de Thermique-AMT2018

Djallel ZEBBAR ^{*1}
 Samra CHIKH ²
 Sahraoui KHERRIS ¹
 Souhila ZEBBAR ^{1,2}
 Kouider MOSTEFA ¹
 Nadia Kaddouri ¹
 Asma Guelib ¹

¹ Centre universitaire El-Wancharissi, Tissemsilt, Algérie

² Université Djilali Liabes, Sidi Bellabes, Algérie

* djallel.zebbar@gmail.com

ÉTUDE ET ANALYSE THERMODYNAMIQUES D'UN NOUVEAU CYCLE DE TRANSFORMATEUR DE CHALEUR À ADSORPTION SOLIDE-GAZ

Résumé : Le présent travail est consacré à l'analyse thermodynamique d'un cycle de transformateur de chaleur à adsorption solide-gaz. Le couple de travail choisi est le zéolite-eau. Dans une première phase le fonctionnement d'un nouveau cycle hypothétique est exposé. Suivi par l'établissement du bilan d'énergie et la déduction du coefficient de performance du cycle. Ce cycle s'est avéré très prometteur en termes d'efficacité énergétique et affiche un COP égal à 0,583.

Mots clés : transformateur de chaleur, température, cycle, adsorption, zéolite

1. Introduction

La revalorisation des différentes sources d'énergie de bas potentiel reste un moyen coûteux et non attractif pour les énergéticiens du moins pour le moment. Cette situation risque de s'empirer de plus en plus avec la chute du prix du baril de pétrole. Néanmoins, la mise en œuvre de nouveaux cycles pour la revalorisation de la chaleur reste d'actualité. Dans ce contexte, les nouveaux cycles hypothétiques élaborés doivent être analysés et discutés. Tout d'abord, pourquoi le cycle est "hypothétique" ? Hypothétique est lié au fait que le cycle proposé n'est pas encore expérimenté et relève toujours de la phase des études théoriques. Cette dernière est très importante du moment où elle permet de mettre en évidence tout l'aspect théorique du nouveau cycle du moins l'aspect thermodynamique et d'une façon globale le fonctionnement du cycle théorique.

La mise en valeur des flux de chaleur secondaire dans le domaine de l'industrie agroalimentaire, textile, de l'industrie du papier et d'autres industries chimiques est très en avance. Les températures des flux de chaleur disponibles dans les domaines suscités varient de 100 à 300°C. Les technologies mises en œuvre pour la mise en valeur de ces flux sont celles des transformateurs de chaleur à sorption. Un nombre important de travaux de recherche a été consacré au transformateur de chaleur et au stockage par sorption parmi les plus récents on ne peut pas citer les travaux de Cabeza et al. [1] Brucner et al. [2], Frazzica et al. [3 et 4], Glaznev et al. [5], Schaefer et al. [6], Yan et al. [7], Ramji et al. [8], Yuriy I. Aristov [9], Zebbar et al. [10, 11 et 12], Kherris et al. [13] et Critoph [14 et 15].

Il y a lieu de préciser que Cabeza et al. [1] ont passé en revue plus de 375 références bibliographiques toutes dédiées aux technologies et matériaux d'adsorption. De même, Frazzica et al. [3] ont présenté un nouveau protocole expérimental pour l'évaluation et la comparaison des performances thermodynamiques des couples de travail déjà commercialisés ou encore en cours d'étude utilisés dans les pompes à chaleur à adsorption. Plus encore, dans un autre travail Frazzica et al. [4] ont mis en évidence les critères de sélection des couples de travail convenables pour

les applications domestiques de stockage de chaleur compte tenu de la température de désorption située dans la plage de 80-120°C. Aristov et al. [9] ont exposé les principes de création de base de données d'adsorbants pouvant être utilisés dans la thermo transformation. Enfin, l'aspect théorique de l'adsorption, des cycles d'adsorption pour la réfrigération comme pour le chauffage et le choix des couples de travail sont très bien exposés par Critoph R.E. dans la référence [14].

Dans les applications solaires de transformation de chaleur zéolite-eau, la mise en contact de la vapeur d'eau chauffée à partir d'une source de bas et moyen potentiels (collecteur) génère une chaleur dite d'adsorption qui fait croître la température du lit de zéolite jusqu'à une température plus élevée appelée température d'adsorption T_a . La chaleur d'adsorption récupérée du lit peut être utilisée dans des applications nécessitant un plus haut potentiel.

2 Description du nouveau cycle

Le cycle proposé est représenté sur le diagramme ($\ln P, -1/T$) de la fig.1. Au point 5 le lit de l'absorbant (zéolite) est mis en communication avec le condenseur. Ce dernier est maintenu à la pression P_L et à la température de T_C égale à la température T_0 étant refroidi par un flux d'eau de refroidissement. Du moment où la pression de la vapeur absorbée par le lit est supérieure à la pression P_L régnant dans le condenseur, la désorption de la vapeur d'eau du lit prend lieu tout au long de la ligne 5-6 ramenant la température du lit à $T_6 = T_1 = T_C$.

Au cours de cette phase la désorption est alimentée par la chaleur latente du lit. Il est évident que la mise en communication du lit avec le condenseur a pour conséquence la diminution de la concentration de la vapeur dans le lit de X_5 à X_6 .

La désorption isotherme à $T_1 = T_C$ continue le long de la ligne 6-1. Dans ce cas la chaleur de désorption est fournie par la source de moyen potentiel (T_m).

Ainsi, la phase de désorption se termine au point 1, où la pression de vapeur dans le lit soit égale à la pression de condensation $P_C = P_L$. Le chauffage du lit continu moyennant la source de moyen potentiel à la pression constante P_L la désorption continue jusqu'au point 2. La vapeur désorbée est condensée dans le condenseur. Le condensat est envoyé par

une pompe du réservoir intermédiaire vers l'évaporateur. La désorption est suivie par la phase d'adsorption à partir du point 2.

Dans ce cas le lit de zéolite est communiqué avec l'évaporateur maintenu à la température T_m moyennant un flux de chaleur de moyen potentiel.

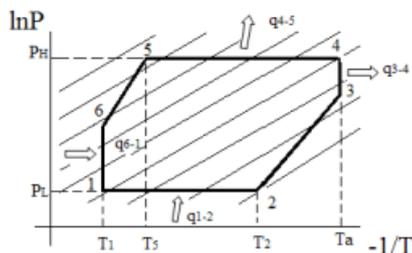


Figure 1 : Représentation du cycle thermodynamique du nouveau transformateur de chaleur à adsorption.

Au point 2 la pression de vapeur de l'eau dans le lit est inférieure à la pression d'évaporation P_H (qui correspond à la température $T_{ev}=T_m$ de l'évaporateur) l'adsorption de la vapeur d'eau prend lieu dans le lit suivant la ligne 2-3 ce qui induit une augmentation de la température jusqu'à $T_3=Ta$. Au même terme, la concentration de l'eau dans le lit de zéolite se voit croître quelque peu de X_2 à X_3 . À partir du point 3 le lit est maintenu à la température Ta par reconduction de chaleur. L'adsorption isotherme de la vapeur émanant de l'évaporateur continue jusqu'au point 4. D'avantage de vapeur d'eau est adsorbée à pression constante P_H tout en reconduisant du lit de zéolite la chaleur d'adsorption. La phase d'adsorption se termine au point 5. La concentration de l'adsorbat augmente de X_4 jusqu'à X_5 . Arrivé au point 5 le cycle recommence à nouveau.

3. Évaluation du COP du nouveau cycle

Le rendement ou le coefficient de performance du cycle est calculé comme étant le rapport entre la chaleur utile et la chaleur dépensée, soit :

$$COP = \frac{q_{3-4} + q_{4-5}}{q_{6-1} + q_{1-2} + q_{ev} + w_p} \quad (1)$$

Où :

q_{1-2} et q_{4-5} sont les chaleurs de désorption et d'adsorption isobares consécutivement calculées conformément à Critoph [15] par les expressions suivantes, en, kJ/(kg zéolite) :

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} (c_z + x \cdot c_w) dT + \int_{X_1}^{X_2} q_{st} dx \quad (2)$$

$$q_{4-5} = \int_{T_4}^{T_5} (c_z + x \cdot c_w) dT + \int_{X_4}^{X_5} q_{st} dx \quad (3)$$

c_z est la capacité thermique du lit de zéolite en kJ/(kg K) ;

c_w est la capacité thermique de la vapeur d'eau en kJ/(kg K), calculée à partir de l'expression suivante rapporté dans [16] :

$$c_w = (a + bT + cT^2 + dT^3)/M_{H_2O} \quad (4)$$

avec :

$a=32,24$; $b=0,1923 \cdot 10^{-2}$; $c=1,055 \cdot 10^{-5}$; $d = -3,595 \cdot 10^{-9}$ et la masse molaire de l'eau $M_{H_2O} = 18\text{kg/kmole}$;

X_1, X_2, X_4 et X_5 sont les teneurs en eau adoptées égales à $X_1=X_5=0,22$ et $X_2=X_4=0,18$;

q_{ev} est la chaleur dispensée dans l'évaporateur. Elle est égale à l'enthalpie d'évaporation de l'eau h_{fg} à la pression P_e en kJ / (kg H_2O), bien évidemment rapportée à la quantité de zéolite dans le cycle ($X_2 - X_1$) kg H_2O /(kg zéolite), soit :

$$q_{ev} = q_{fg} (X_2 - X_1) \quad (5)$$

Le travail de la pompe pour la pressurisation de la machine est calculé en kJ/(kg H_2O) à partir de l'expression suivante:

$$w_p = v_f (P_H - P_L) \quad (6)$$

Cette dernière doit être rapportée au kg de zéolite soit :

$$w_p = v_f (P_e - P_c) (X_2 - X_1), \text{ kJ}/(\text{kg zéolite}) \quad (7)$$

Les chaleurs isothermes q_{6-1} et q_{3-4} sont inconnues. Elles pourront être déterminées une fois les concentrations X_3 et X_6 déterminées. Elles peuvent être exprimées comme :

$$q_{6-1} = \int_{X_6}^{X_1} q_{st} dx \quad (8)$$

$$q_{3-4} = \int_{X_3}^{X_4} q_{st} dx \quad (9)$$

Les positions des points 6 et 3 du cycle sur le diagramme ($\ln P, -1/T$) sont fonction des capacités calorifiques du lit et de la vapeur, c'est-à-dire de la chaleur accumulée en 5.

Un autre constat important peut être tiré en relation avec la conduite en pratique de ces évolutions isothermes. Ces dernières sont difficilement réalisables. Dans ce contexte en éliminant des deux évolutions susmentionnées, on en retrouve le cycle représenté sur la fig.2 (1245) composé des évolutions suivantes : 1-2 désorption accompagnée de chauffage isobare, 2-4 adsorption, 4-5 adsorption accompagnée de refroidissement isobare, 5-1 désorption accompagnée de refroidissement.

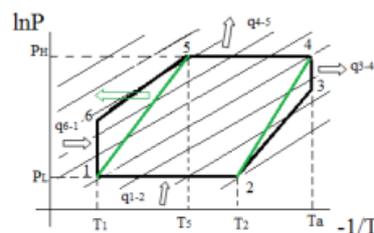


Figure 2 : Représentation du nouveau cycle thermodynamique du thermo transformateur à adsorption après élimination des évolutions isothermes.

Dans ce cas le COP du cycle est calculé à partir de l'expression suivante :

$$COP = \frac{q_{4-5}}{q_{1-2} + q_{ev} + w_p} \quad (10)$$

Le rendement a été calculé pour le cycle dans les conditions suivantes:

$P_H=27$ kPa, $P_L=7,385$ kPa, $T_1=77^\circ\text{C}$, $T_2=128^\circ\text{C}$, $T_4=167^\circ\text{C}$, $T_5=108^\circ\text{C}$.

La valeur du COP retrouvée est égale à 0,583. Cette valeur est proche de celle calculée par Restuccia et al. [17] égale à 0,546.

Il serait important de noter que pour le deuxième cycle, il faut déterminer les positions des deux points 1 et 3 sur le diagramme qui ne sont pas forcément celles du premier cycle. Les nouvelles positions dépendent en grande partie des capacités thermiques de l'adsorbant et l'adsorbat en 1 et 3.

4. Conclusion

Le nouveau cycle hypothétique proposé est très prometteur en termes d'efficacité énergétique. Il pourra servir de maillon intermédiaire dans une cascade de transformateurs de chaleur [11] pour la revalorisation de chaleur et la production de micro puissance dans les zones rurales et les agglomérations de moins de 200 habitations pour la mise en valeur des puits de chaleur y compris solaires de température allant de 80 à 120 °C.

Références

- [1] L.F. CABEZA, A. SOLE, C. BARRENECHE. Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage, *Renewable Energy* xxx pp.1-37, 2016.
- [2] S. BRÜCKNER, S. LIU, L. MIRO, M. RADSPIELER, L.F. CABEZA, E. LÄVEMANN, Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies, *Applied Energy*, No 151, pp.157–167, 2015.
- [3] A. FRAZZICA, A. SAPIENZA, A. FRENI, Novel experimental methodology for the characterization of thermodynamic performance of advanced working pairs for adsorptive heat transformers, *Applied Thermal Engineering* Vol. 72, No 2 pp. 229-236, 2014.
- [4] A. FRAZZICA, A. FRENI, Adsorbent working pairs for solar thermal energy storage in buildings, *Renewable Energy*, Vol.110, pp.87-94, 2017.
- [5] I.S. GLAZNEV, D.S. OVOSHCHNIKOV, Y. I. ARISTOV, Kinetics of water adsorption/desorption under isobaric stages of adsorption heat transformers: The effect of isobar shape *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No 7-8 pp.1774–1777, 2009.
- [6] M. SCHAEFER, A. THESS, One-dimensional model of a closed low-pressure adsorber for thermal energy storage, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 117, pp.571–583, 2018.
- [7] T. YAN, R.Z. WANG, T.X. LI, L.W. WANG, I. T. FRED, A review of promising candidate reactions for chemical heat storage, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 43, pp.13–31, 2015.
- [8] H. R. RAMJI, S. L. LEO, I. A. W. TAN, M. O. ABDULLAH, Comparative study of three different adsorbent adsorbate working pairs for a waste heat driven adsorption air conditioning system based on simulation, *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* Vol.18, No 2, pp.109-121, 2014.
- [9] Y. I. ARISTOV, Adsorptive transformation of heat: Principles of construction of adsorbents database, *Applied Thermal Engineering*, Vol.42, pp.18-24, 2012.
- [10] Dj. ZEBBAR, S. KHERRIS, K. MOSTEFA, T. TRARI, Insight into heat upgrading process. Mathematical modeling of an absorption heat transformer, 8th International Seminar On Systems Mathematical And Physical Modeling, Book of Proceeding, Voronezh, T.3, pp.117-124, 2012.
- [11] Dj. ZEBBAR, S. KHERRIS, S. ZEBBAR, Mathematical simulation of two-stage heat transformer, 11th International Seminar On Systems Mathematical And Physical Modeling, Book of Proceeding, Voronezh, T.1, pp.96-106, 2014.
- [12] Dj. ZEBBAR, S. KHERRIS, S. CHEIKH, Etude et analyse d'une installation énergétique renfermant un transformateur de chaleur pour la production de micro puissance. Colloque International « Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures » CMMS14, 12 - 13 novembre, Tizi Ouzou, Recueil des résumés, p. 53, 2014.
- [13] S. KHERRIS, D. ZEBBAR, K. MOSTEFA, Exergetic analysis of a solar absorption heat transformer, 1^{er} Colloque International sur les Hydrocarbures, Energies et Environnement (HCEE), 23 et 24 Novembre, Ouargla, 2014.
- [14] R. E. CRITOPH, Performance limitations of adsorption cycles for solar cooling, *Solar Energy*, Vol. 41, No. 1, pp. 21-31. 1988.
- [15] R.E. CRITOPH, Adsorption Refrigerators and Heat Pumps (Chapter 10), in *Carbon Materials for Advanced Technologies*, Pergamon, 1999.
- [16] Y. A.CENGEL, M. A. BOLES, *Thermodynamics : an Engineering Approach*, 3rd ed. Mc Graw Hill International Edition, N.Y. , 1998.
- [17] G. RESTUCCIA, G. CACCIOLA, R. QUAGLIATA, Identification of zeolites for heat transformer, chemical heat pump and cooling systems, *International Journal Of Energy Research*, Vol. 12, pp.101-111, 1988.



The 5th International Congress On Thermal Sciences AMT'2018
18-19 April
ENSA-Safi Morocco

PARTICIPATION CERTIFICATE

The organizing committee of AMT'2018 hereby certify that the following paper has been presented at 5th International Congress On Thermal Sciences:

Paper ID : 51

Title : ÉTUDE ET ANALYSE THERMODYNAMIQUES DU CYCLE THERMO HYDRAULIQUE POUR LA PRODUCTION DE PUISSANCE

Presenter : Ms/Mr Djallel Zebbar
Co-Authors : Sahraoui Kherris Souhila Zebbar
Kouider Mostefa Aicha Azizi
Nadia Kaddouri Asma Guelib

Communication : Poster

On behalf of AMT'2018 organizers



Djallel ZEBBAR ¹
 Sahraoui KHERRIS ¹
 Souhila ZEBBAR ¹
 Kouider MOSTEFA ¹
 Aicha AZIZI ¹
 Asma Guelib ¹
 Nadia Kaddouri ¹

¹ Centre universitaire El-Wancharissi, Tissemsilt, Algérie
 * djallel.zebbar@gmail.com

ÉTUDE ET ANALYSE THERMODYNAMIQUES DU CYCLE THERMO-HYDRAULIQUE POUR LA PRODUCTION DE PUISSANCE

Résumé : Ce travail est consacré à l'étude et l'analyse du procédé thermo-hydraulique utilisé pour la production de puissance à partir de puits de chaleur de bas potentiel, entre autres les ressources solaire et géothermique. La machine étudiée fonctionne selon le procédé thermo-hydraulique « CAPILI » en mode de fonctionnement moteur avec production de travail mécanique. Plus encore, l'analyse thermodynamique des différents fluides de travail a fait révéler que le butane R600 convient le plus pour le cycle. Elle a montré aussi que les valeurs des rendements thermique, de Carnot et selon la deuxième loi sont maximales et égales respectivement à 20,3%, 23% et 88% pour des températures du condenseur et de l'évaporateur respectivement égales à 30°C et 120°C.

Mots clés : transformateur thermo-hydraulique, Carnot, fluide de travail, condenseur, évaporateur.

1. Introduction

Le transformateur thermo-hydraulique est une machine thermique pouvant être utilisée dans la production de puissance à partir de puits de chaleur de bas potentiel, entre autres les ressources solaire et géothermique. La machine fonctionne selon le procédé thermo-hydraulique appelé « CAPILI » suivant deux modes : moteur et récepteur. Cependant, le transfert du travail entre le fluide de travail et le milieu extérieur se fait par l'intermédiaire d'un liquide qui agit comme un piston liquide dans des cylindres de transfert.

Le présent travail est consacré à l'étude thermodynamique des performances du convertisseur CAPILI (Carnot à Piston Liquide) moteur. Elle permettra d'effectuer le choix du fluide de travail le plus adéquat pour des plages de température allant de 60 à 120°C, ce qui correspond aux températures pouvant être assurées par des sources géothermique et solaire. Par ailleurs, ce choix est réalisé sur la base des calculs et comparaisons des différents rendements, à savoir : de Carnot (η_c), thermique (η_{th}) et selon la deuxième loi (η_{II}) pour une température du condenseur fixée égale à 30°C et des températures de l'évaporateur variables dans la plage sus mentionnée 60-120°C.

2. Aperçu sur le procédé thermo-hydraulique CAPILI

Dans le procédé CAPILI rapporté et détaillé par Semmari et al. dans [1] et Mauran et al. dans [2] le piston liquide permet de transférer du travail mécanique entre deux phases gazeuses. Le travail est d'abord produit dans le cycle moteur par le piston liquide dont le flux hydraulique entraîne un moteur hydraulique.

Dans cette configuration représentée et détaillée par Stirou dans [3], le procédé ditherme met en œuvre un liquide hydraulique de transfert oscillant entre deux cylindres ayant des pressions de fonctionnement différentes : l'un est connecté à l'évaporateur tandis que le second cylindre au condenseur. L'échange de travail entre la machine et

l'environnement est réalisé par un convertisseur hydraulique/mécanique, traversé par le liquide qui se déplace entre les deux cylindres alternativement connectés à l'évaporateur et au condenseur pendant les phases isothermes du cycle. En mode moteur $T_{ev} > T_c$

3. Le choix du fluide de travail

Le choix du fluide frigorigène le mieux adapté dépend de l'utilisation et du type d'installation. Guoquan Qiu [4] a dressé la liste suivante des critères dans l'ordre d'importance pour le choix du fluide frigorigène :

- le fluide choisi ne doit pas être interdit par la réglementation nationale en cours. Dans ce contexte, le R12 est interdit depuis 1996;
- Les fluides frigorigènes doivent avoir des chutes d'enthalpies considérables, dans le dispositif de détente. Des différences d'enthalpies élevées signifient des puissances et des rendements élevés;
- Le fluide frigorigène est facilement maniable à la température ambiante;
- 4- les fluides isentropiques sont les plus appropriés du moment où les surchauffes ne sont pas prévues pour la machine thermo hydraulique;
- 5- Une chaleur latente importante du fluide frigorigène permet d'obtenir des équipements moins encombrants
- 6- les propriétés thermo physiques adéquates pour éviter la destruction chimique et la décomposition à des températures élevées. Ceci dit que la température du réservoir chaud ne doit pas affecter la stabilité chimique du fluide. Par ailleurs, une conductivité élevée du fluide frigorigène permet aussi d'obtenir des équipements moins encombrants;
- 7- Le fluide frigorigène doit répondre aux normes de sécurité, c'est à dire qu'il doit afficher une toxicité et une corrosivité très basses. De plus le fluide doit être inflammable et non explosif;
- 8- En dernier le fluide frigorigène doit être disponible et à moindres couts.

4. Évaluation des performances de la machine thermo hydraulique

L'évaluation des performances énergétiques de la machine thermo hydraulique passe tout d'abord par l'évaluation des rendements de son cycle thermodynamique. Le cycle moteur de la machine thermo hydraulique est semblable à celui de Carnot et est constitué de deux évolutions isentropiques et de deux autres isothermes (Fig.1).

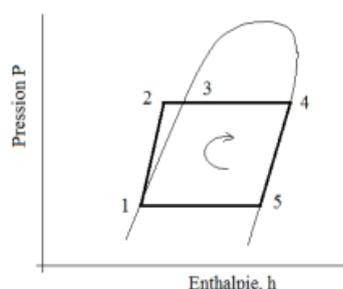


Figure 1 : Cycle moteur CAPILI de 1er type.

L'application du premier principe permet d'écrire ce qui suit:

$$\Delta U = Q + W \quad (1)$$

Avec $\Delta U = 0$, on en retrouve :

$$q + w = 0 \quad (2)$$

Le rendement thermique du cycle peut être exprimé comme :

$$\eta = \frac{w}{q_h} = \frac{q_h - q_L}{q_h} = 1 - \frac{q_L}{q_h} \quad (3)$$

Où q_L est la chaleur rejetée vers le réservoir froid exprimée comme la différence des enthalpies en 1 et 5 (voir fig.1):

$$q_L = h_1 - h_5 \quad (4)$$

Tableau 1 : le rendement thermique et le rendement selon la deuxième loi en fonction de la température

T°C	R-123		R-134a		R-600a		R600		R22		R12		
	η_c	η_{th}	η_{II}										
60	0.09	0.089	0.977	0.067	0.744	0.089	0.988	0.081	0.9	0.066	0.733	0.053	0.588
65	0.103	0.097	0.941	0.062	0.601	0.099	0.961	0.1	0.970	0.06	0.582	0.063	0.611
70	0.116	0.098	0.844	0.052	0.448	0.114	0.982	0.107	0.922	0.044	0.379	0.056	0.482
75	0.129	0.102	0.790	0.047	0.364	0.122	0.945	0.126	0.976	0.029	0.224	0.035	0.271
80	0.141	0.102	0.723	0.0397	0.281	0.139	0.985	0.136	0.964	0.005	0.035	0.02	0.141
85	0.153	0.103	0.673	0.02	0.130	0.149	0.973	0.143	0.934	-	-	0.002	0.013
90	0.165	0.104	0.630	-	-	0.157	0.951	0.159	0.963	-	-	-	-
95	0.176	0.104	0.590	-	-	0.167	0.948	0.173	0.982	-	-	-	-
100	0.187	0.105	0.561	-	-	0.173	0.925	0.177	0.946	-	-	-	-
105	0.198	0.106	0.535	-	-	0.158	0.797	0.188	0.949	-	-	-	-
110	0.208	0.106	0.509	-	-	0.162	0.778	0.194	0.932	-	-	-	-
115	0.219	0.108	0.493	-	-	0.162	0.739	0.2	0.913	-	-	-	-
120	0.229	0.11	0.480	-	-	0.158	0.689	0.203	0.886	-	-	-	-

et q_H est la chaleur reçue par la machine du réservoir chaud et est exprimée comme la différence des enthalpies en 4 et 2:

$$q_H = h_4 - h_2 \quad (5)$$

Enfin, on retrouve l'expression du rendement en fonction des enthalpies dans les points spécifiques du cycle, soit:

$$\eta = 1 - \frac{h_1 - h_5}{h_4 - h_2} \quad (6)$$

En plus du rendement thermique du cycle, un rendement égal au rapport du rendement thermique et de celui de Carnot et appelé rendement selon la deuxième loi peut être évalué, soit :

$$\eta_{II} = \frac{\eta_{th}}{\eta_c} \quad (7)$$

Où η_c est le rendement de Carnot, exprimé en fonction des températures maximale et minimale du cycle:

$$\eta_c = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (8)$$

Les performances du cycle moteur de la machine thermo hydraulique ont été calculées pour les différents fluides frigorigènes. Initialement, la température T_L a été choisie fixe et égale à 30° C. La température du réservoir chaud a été variée intentionnellement dans des plages différentes pour les fluides de travail suivants: R-123, R-134a, Isobutane R-600a, R22, R600 et R12.

Les valeurs des paramètres dans les points spécifiques du cycle (12345) comme la pression, les températures et les enthalpies ont été déterminées. Elles ont permis de calculer les valeurs des chaleurs exprimées par les expressions 4 et 5, des rendements thermiques, de Carnot et du rendement selon la deuxième loi calculées respectivement à partir des expressions 6, 8 et 7.

5. Analyses des performances thermodynamiques de la machine thermo hydraulique

Pour pouvoir se prononcer sur les performances de la machine thermo hydraulique avec tel ou tel fluide frigorigène, et du coup choisir celui avec lequel la machine est la plus performante du point de vue énergétique, il serait important d'effectuer une analyse minutieuse des résultats obtenus. Ceci peut être effectué à partir d'une lecture globale du Tab.1.

On en déduit rapidement du Tab.1 que le cycle thermodynamique de la machine thermo hydraulique fonctionnant avec les fluides frigorigènes : R12, R22 et le R134a développe les rendements thermiques les plus bas égaux à 0.2, 0.5 et 2 % respectivement. Ceci prouve que ces fluides de travail ne sont pas appropriés pour ce type de machine, et plus particulièrement pour la production du travail mécanique dans ces plages de températures allant de 60 à 85°C.

6. Conclusion

L'étude des performances énergétiques de la machine thermo hydraulique moteur et le passage en revue des différents critères adoptés pour le choix du fluide frigorigène ont permis de retenir les deux réfrigérants R600a et R600 pour ce type de machine thermique, d'ailleurs utilisé dans les pompes à chaleur. Par ailleurs, la machine thermo hydraulique atteint des valeurs des rendements thermique, de Carnot et selon la deuxième loi de la thermodynamique maximales et égales respectivement à 20,3%, 23% et 88% pour des températures du condenseur et de l'évaporateur respectivement égales à 30°C et 120°C.

Références

- [1] S. Mauran, M. Martins, D. Stitou, H. Semmari, A novel process for engines or heat pumps based on thermal-hydraulic conversion, *Applied Thermal Engineering*, Vol.37, pp.249-257, 2012.
- [2] H. Semmari, D. Stitou, S. Mauran, A novel Carnot-based cycle for ocean thermal energy conversion, *Energy*, Vol. 43, pp.361-375, 2012.
- [3] D. Stitou, Transformation, Conversion, Stockage, Transport de l'énergie thermique par procédés thermochimiques et thermo-hydrauliques. *Chemical and Process Engineering*. Université de Perpignan, 2013.
- [4] G. Qiu, Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC, *Renewable Energy*, Vol. 48, pp.565-570, 2012.

Résumé

Résumé

Le présent travail est consacré à l'étude théorique des performances d'une pompe à chaleur à adsorption zéolithe-eau alimentée par un capteur solaire. Dans la première partie du mémoire on en retrouve une l'explication détaillée du principe de fonctionnement de la pompe à chaleur à adsorption et ses composants. Dans le mémoire sont également abordées les zéolithes, leurs structures et applications. La dernière partie du mémoire est consacrée à l'étude et à l'analyse thermodynamiques du cycle théorique de la pompe à chaleur à adsorption fonctionnant avec le couple Zéolithe 13X/ eau. L'étude thermodynamique consiste en la formulation détaillée des équations nécessaires à la détermination de toutes les chaleurs échangées durant phase du cycle. La formulation mathématique a permis également de calculer les différents coefficients de performance de la pompe à chaleur à adsorption en fonction des différentes températures du cycle. Il faut retenir que les pompes à chaleur à adsorption sont des systèmes prometteurs en raison de leur capacité à récupérer de la chaleur à basse température et à fournir des effets de chauffage. De plus, elle a l'avantage d'utiliser des sources d'énergie renouvelables, respectueux de l'environnement, sans vibration et des coûts d'exploitation bas.

Mots clés : pompe à chaleur, adsorption, zéolithe, rayonnement solaire, capteur solaire.

Abstract

The present work is dedicated to the theoretical study of the performances of a zeolite-water adsorption heat pump powered by a solar collector. In the first part of the memoir we find a detailed explanation of the operating principle of the adsorption heat pump and its components. In the thesis, zeolites, their structures and applications are also discussed. In the memoir are also discussed zeolites, their structures and applications. The last part of the thesis is devoted to the thermodynamic study and analysis of the theoretical cycle of the adsorption heat pump operating with the Zeolite 13X / water pair. The thermodynamic study consists in the detailed formulation of the equations necessary to the determination of all the heat exchanged during phase of the cycle. The mathematical formulation also made it possible to calculate the various coefficients of performance of the adsorption heat pump as a function of the different temperatures of the cycle. It should be remembered that adsorption heat pumps are promising systems because of their ability to recover heat at low temperatures and provide heating effects. In addition, it has the advantage of using renewable, environmentally friendly, vibration-free sources of energy and low operating costs.

Keywords: heat pump, adsorption, zeolite, solar radiation, solar captor.

ملخص

هذا العمل يخصص الدراسة النظرية لأداء مضخة حرارية امتزاز ماء زيوليت مدعوم بمجمع شمسي. في الجزء الأول من المذكرات نجد شرحا مفصلا لمبدأ التشغيل لمضخة الحرارة الامتزازية ومكوناتها. في الأطروحة ، تناقش أيضا الزيوليت ، هياكلها وتطبيقاتها. الجزء الأخير من الأطروحة مكرس لدراسة وتحليل الديناميكية الحرارية للدورة النظرية لمضخة الحرارة الامتزازية التي تعمل مع زوج زيوليت/ المياه. تتكون الدراسة الديناميكية الحرارية في صياغة مفصلة للمعادلات اللازمة لتحديد جميع الحرارة المتبادلة خلال مرحلة الدورة. جعلت الصيغة الرياضية أيضًا من الممكن حساب المعاملات المختلفة لأداء مضخة الحرارة الامتصاصية كدالة لدرجات الحرارة المختلفة للدورة. يجب أن نتذكر أن المضخات الحرارية الامتزازية هي أنظمة واعدة بسبب قدرتها على استعادة الحرارة عند درجات الحرارة المنخفضة وتوفير تأثيرات التدفئة. بالإضافة إلى ذلك، فإنه يتميز باستخدام مصادر الطاقة المتجددة، الصديقة للبيئة، الخالية من الاهتزازات وتكاليف التشغيل المنخفضة.

الكلمات المفتاحية: مضخة الحرارة، الامتزاز، الزيوليت، إشعاع شمسي، الحاجز الشمسي.