



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

N° : DP202302ME

Université 20 août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département de Physique

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique Energétique

Thème

Optimisation des performances d'un réacteur solaire d'une machine frigorifique à adsorption utilisant le couple zéolithe13X/ Al_2O_3 -eau

Présenté par :

Belaribi Nour El Houda

Soutenu le : 26/06/2023. devant le jury composé de :

F. Mebarek Oudina	Prof	Université de Skikda	Président
K. Bourrich	M.A.A	Université de Skikda	Rapporteur
T. Chelireme	M.A.A	Université de Skikda	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023



Remerciement



Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, le clément et le bienveillant de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Le moment est venu d'exprimer toute ma reconnaissance à mon Encadreur Madame BOURRICH KAWTHAR, de m'avoir fait confiance et puis pour sa disponibilité, sa patience, son suivi constant de ce travail.

Je remercie également le professeur F.MEBAREK OUDINA et Monsieur T.CHELIGHÈME, qui m'ont fait l'honneur de participer au jury.

J'adresse mes plus sincères remerciements à toute ma famille et mes amies, et tous les collègues.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement tous les enseignants de physique énergétique du département de physique, et tous qui ont participé de près ou de loin pour accomplir ce travail.

DEDICACE

Pour chaque début il y a une fin, et ce qui est beau dans toute fin c'est la réussite et l'atteinte du but.

Je dédie ce modeste travail, fruit de très longue années de travail à :

Ceux qui méritent le plus ma connaissance, ma gratitude et mon grand amour, ceux qui m'ont apporté toujours soutien et bonheur dans la vie :

Je dédie ce modeste travail à mes très chers Parents, pour leur soutien Et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et Je leur souhaite bonne santé et longue vie.

A mes chères frères Atef et yasser

A ma chère sœur fairouz pour leurs aides et leurs précieux conseils, pour son chères enfants layane et Mohamed el amine

*A mes amis proches : Rabab, Meriem, Dounia, Manel ,
Amina ,lamia et Nassima, je vous aime beaucoup.*

Toute ma grande famille,

A tous les étudiants de physique énergétique.

Nour el houda

Nomenclature

Symboles	Définitions	unités
A	Constante caractéristique du couple d'adsorption	
α	coefficient de dilatation volumique	
β	Coefficient d'affinité	
C	le nombre de composant dans le système.	
C_1	Chaleur spécifique de l'adsorbat à l'état liquide	kJ/kg.k
COP_{th}	Coefficient de performance thermique	
C_{p2}	Chaleur spécifique de l'adsorbant	kJ/kg.k
C_{pm}	Chaleur spécifique des parois métalliques de l'adsorbent	kJ/kg.k
D-A	Équation de Dubinin-Astakhov	
D-R	Équation de Dubinin-Radshkevich	
E_0	énergie libre d'adsorption de la vapeur de référence	J
ε	Potentiel d'adsorption	
Δm	Masse cyclée de l'adsorbat	kg
ΔC_p	La variation de la chaleur spécifique lors d'un changement de phase	
K	Constante d'équilibre d'adsorption.	
L	Chaleur latente d'évaporation	kJ/kg
m	Masse adsorbée	kg/kg
m_0	quantité d'adsorbat maximale pour former une monocouche	kg/kg
m_a	Masse de l'adsorbant	kg
m_g	Masse des parties métalliques de l'adsorbent	kg
m_{max}	Masse adsorbée maximale correspondent à la température d'adsorption et la pression d'évaporation	kg/kg
m_{min}	Masse adsorbée minimale correspondent à la température de régénération et la pression de condensation	kg/kg
n	Paramètres caractéristiques du couple d'adsorbant/adsorbat	
P	Pression	Pa
P_a	Pression d'adsorption	Pa
P_c	Pression de condensation	Pa
P_e	Pression d'évaporation	Pa
P_g	Pression de régénération	Pa
P_s	Pression de saturation de l'adsorbat	Pa

P_v	Pression d'équilibre du gaz	Pa
ρ^*	masse volumique de la phase adsorbée	kg/m ³
Q_f	Quantité de froid produite à l'évaporateur	kJ/kg
Q_c	Chaleur totale nécessaire pour chauffer l'adsorbent	kJ/kg
Q_1	Chaleur sensible utilisée pour le chauffage de l'adsorbant	kJ/kg
Q_2	Chaleur sensible utilisée pour le chauffage des parties métalliques de l'adsorbent	kJ/kg
Q_3	Chaleur sensible utilisée pour le chauffage de l'adsorbat	kJ/kg
Q_{des}	Chaleur de désorption	kJ/kg
q_{is}	Chaleur isostérique d'adsorption	kJ/kg
R	Constante des gaz parfaits	J/kg.k
T	Température	K
T_0	Température de référence	K
T_a	Température d'adsorption	K
T_c	Température de condensation	K
T_{s1}	Température seuil de désorption	K
T_{s2}	Température seuil d'adsorption	K
T_e	Température d'évaporation	K
T_g	Température de régénération	K
T_i	Température au début de l'adsorption	K
T_{s1}	Température seuil de désorption	K
T_{s2}	Température seuil d'adsorption	K
θ	taux de recouvrement de la surface	
V	Vanne	
w	Volume d'adsorbat adsorbé par unité de masse d'adsorbant	m ³ /kg
w_0	Volume maximal adsorbable par unité de masse d'adsorbant	m ³ /kg

Liste des figures

Figure 1.1	Adsorption-Désorption	4
Figure 1.2	Classification d'isotherme d'adsorption	6
Figure 2.1	<i>Schéma d'une machine frigorifique solaire à adsorption</i>	11
Figure 2.2	<i>Schéma du réacteur étudié</i>	12
Figure 2.3	Schéma d'une machine à adsorption à fonctionnement intermittent	13
Figure 2.4	Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique de base dans un diagramme de Clapeyron	14
Figure 2.5	<i>Organigramme de calcul du COP_{th}</i>	19
Figure 3.1	<i>variation du coefficient de performance en fonction de de T_g</i>	21
Figure 3.2	<i>variation de de la masse désorbée m_{min} et la masse cyclée Δm en fonction de T_g</i>	22
Figure 3.3	<i>Variation de la chaleur totale fournie à l'adsorbeur Q_C et la quantité de froid produite à l'évaporateur Q_f en fonction de T_g</i>	22
Figure 3.4	<i>variation des différentes chaleurs sensibles et la chaleur de désorption en fonction de T_g</i>	23
Figure 3.5	<i>influence de la température de condensation sur le coefficient de performance</i>	24
Figure 3.6	<i>Influence de la température de condensation sur la quantité de froid produite à l'évaporateur</i>	24
Figure 3.7	<i>Influence de la température d'évaporation sur la quantité de froid produite à l'évaporateur</i>	25
Figure 3.8	<i>Influence de la température d'évaporation sur le coefficient de performance</i>	25
Figure 3.9	<i>Influence de la température d'adsorption sur la quantité de froid produite à l'évaporateur</i>	26
Figure 3.10	<i>Influence de la température d'adsorption sur le coefficient de performance</i>	26

Sommaire

	page
Nomenclature	
Liste des figures	
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Etude bibliographique	
1,1 Introduction	3
1,2 Le phénomène d'adsorption	3
1,2,1 Définition	3
1,2,2 Les types d'adsorption	4
12,2,1 Adsorption chimique	4
12,2,1 Adsorption physique	
1,2,3 L'équation d'état d'adsorption	4
1.2.3.1 Les différents types d'isothermes d'adsorption	
1,3 Choix du couple réactif	6
1,3,1 Choix de l'adsorbant	6
1,3,2 Choix de l'adsorbat	7
1,4 Couple choisi : zéolithe 13X/Al ₂ O ₃ -eau	9
1,5 Modèles d'adsorption	12
1,5,1 Modèles moléculaires	12
1,5,2 Modèles thermodynamiques	12
Equation de Dubinin et Radushkevich(D-R)	12
Equation de Dubinin et Astakhov (D-A)	12
1,6 Expression de la masse adsorbée	13
1,7 Chaleur isostérique d'adsorption	13
1,8 La chaleur spécifique massique de la zéolithe	14
1,9 Conclusion	14

Chapitre 2 : Etude thermodynamique du réacteur

2,1	Introduction	14
2,2	Description du système étudié	14
2,2,1	Description de l'adsorbeur	15
2,3	Etude thermodynamique du cycle de base	18
2,3,1	Détermination des températures seuil du cycle	18
2,3,2	Coefficients de performance thermique (COP_{th})	19
2,3,2,1	Expression de la production frigorifique Q_f	19
2,3,2,2	Expression de Q_c	20
2,4	Algorithme de calcul	21
2,4	Conclusion	23

Chapitre 3 : Résultats et discussion

3,1	Introduction	29
3,2	Influence des températures de fonctionnement	
3,2,1	Influence de la température de régénération	24
3,2,2	Influence de la température de condensation	26
3,2,3	Influence de la température d'évaporation	27
3,2,4	Influence de la température de condensation	28
3,3	Conclusion	29
	Conclusion générale	30
	Références bibliographiques	32

Introduction Générale

Introduction Générale

Au début du 20^{ème} siècle, la réfrigération par adsorption était fréquemment utilisée. Plus tard, avec le développement des compresseurs et des moteurs électriques bon marché, l'augmentation de l'efficacité des centrales électriques et l'introduction des CFC dans les années 1930, la réfrigération par adsorption est devenue une technologie de niche. L'intérêt pour cette technologie s'est accru ces dernières années. Les principales raisons en faveur des systèmes d'adsorption sont la longue durée de vie, la faible pollution sonore, les faibles coûts de maintenance et le faible impact environnemental. Les préoccupations écologiques concernant les émissions de CFC des installations de réfrigération ont inspiré de nombreuses études théoriques et expérimentales sur les systèmes de refroidissement par adsorption. Le principal avantage de l'adsorption est qu'elle utilise des fluides frigorigènes non polluants et des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire ou le gaz naturel issu de la biomasse. Les machines à adsorption sont également intéressantes car elles peuvent fonctionner à des températures élevées, alors que les systèmes à absorption liquide ne le peuvent pas.

L'objectif principal à atteindre de ce travail est d'étudier les performances d'un réfrigérateur solaire à adsorption utilisant le couple Zéolite13X/ Al_2O_3 - eau. Ce couple est le mieux adapté pour obtenir des températures supérieures ou égales à 0°C [2] et il est bien utilisé dans le domaine de la climatisation. D'autre part, l'eau présente les avantages d'une grande stabilité et de la non-toxicité.

Ce travail est divisé en trois chapitres, commençant par une introduction et se terminant par une conclusion.

Le premier chapitre est consacré à la revue de la littérature présentant le processus d'adsorption d'un point de vue thermodynamique. Nous introduisons d'abord le phénomène d'adsorption sous ces différents aspects, puis nous présentons les caractéristiques des différents types d'adsorption, puis nous explorons les aspects thermodynamiques de l'adsorption en présentant les différentes théories régissant ce phénomène, tout en insistant sur la théorie de Dubinin, dont nous parlerons tout au long de l'utilisation du travail. Enfin, nous présentons des critères de sélection des couples adsorbant/adsorbat en fonction du phénomène d'adsorption ainsi que quelques données thermophysiques pour les couples sélectionnés.

Le deuxième chapitre étudie et analyse le cycle de base de Clapeyron lié au réfrigérateur à adsorption. Pour cela, nous avons développé un modèle numérique basé d'une part sur l'équation d'état du modèle de Dubinin et d'autre part sur certaines considérations visant à assurer l'optimisation, telles que les propriétés du couple sorbant/adsorbat choisi, dans lequel les équations

utilisées dérivées de données expérimentales disponibles dans la littérature. Le code informatique a été développé pour comprendre l'effet de divers paramètres sur la quantité de refroidissement produite par l'évaporateur, le coefficient de performance thermique de la machine et la qualité de circulation du sorbate dans la machine.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats de calcul et à leur discussion.

Chapitre 1 :

Etude bibliographique

1.1.Introduction

Vu l'importance du phénomène d'adsorption dans l'analyse et l'étude des machines frigorifiques à adsorption, nous avons vu l'importance de consacrer ce chapitre à l'étude thermodynamique de ce phénomène avec ces différents aspects.

Après une brève explication sur le mécanisme d'adsorption, nous avons distingué deux types d'adsorption (physique ou chimique) selon leurs natures de fixation des molécules de gaz et leurs énergies mises en jeu.

Les équilibres d'adsorption permettant de décrire les variations des quantités adsorbées en fonction de différents paramètres (température, pression, nature du gaz, etc.) mais les isothermes d'adsorption sont les plus connues et les plus importantes pour une bonne modélisation du phénomène d'adsorption.

Les principaux modèles qui ont été traités avec succès sont les modèles moléculaires (modèle de Langmuir et modèle B.E.T.) et les modèles thermodynamiques (modèle Polanyi et modèle Dubinin), qui feront l'objet de ce chapitre. Le modèle semi-empirique de Dubinin a été choisi comme base de notre travail.

Un autre aspect très important lors de l'étude des phénomènes d'adsorption, notamment des réfrigérateurs à adsorption, est le choix du couple adsorbant/adsorbat. Ce choix dépend de certains critères physiques et chimiques liés au couple lui-même et aux conditions de fonctionnement de la machine. Par conséquent, tous ces points cités ci-dessus seront discutés et développés ci-dessous.

1.2.Le phénomène d'adsorption

1.2.1. Définition

On peut définir l'adsorption comme étant un phénomène de capture ou de fixation d'une phase gazeuse, appelé adsorbat, par un matériau poreux solide, l'adsorbant. Elle implique simultanément des mécanismes thermophysiques et thermochimiques. L'adsorption est un phénomène de volume au cours duquel un gaz pénètre dans un solide.

L'adsorption libère une chaleur d'adsorption et comme toute réaction exothermique, elle est favorisée par les basses températures. Lorsqu'un adsorbant atteint la saturation, on procède généralement à sa régénération. À l'inverse de l'adsorption, cette opération de désorption est favorisée par les hautes températures et les faibles concentrations. Elle nécessite un apport de chaleur et permet ensuite le stockage d'énergie au sein de l'adsorbant [5].

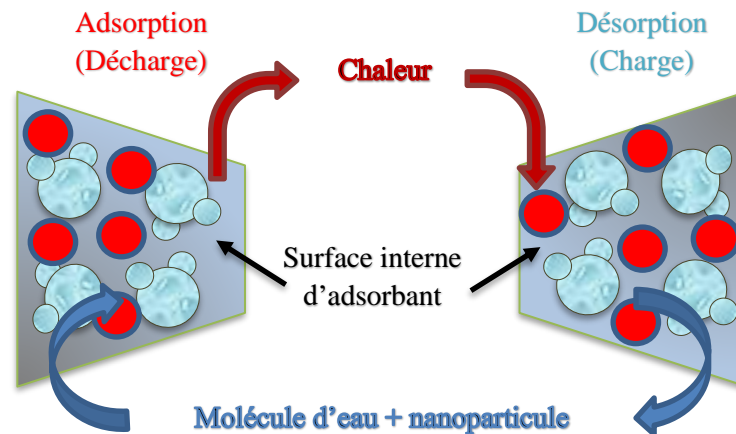


Figure 1.1: Adsorption-Désorption [6]

1.2.2. Les types d'adsorption

Rappelons qu'il existe deux types d'adsorptions qui se diffèrent complètement par les énergies mises en jeu et par leurs natures.

1.2.2.1. Adsorption chimique

Appelée aussi chimisorption, 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 [3].

1.2.2.2. Adsorption physique

Appelée aussi physisorption. Ce processus résulte des liaisons physiques plus faibles, avec des énergies d'interaction de l'ordre 20 kJ/mole, qui ne modifie pas la nature chimique de la molécule de l'adsorbant. Cette fixation des molécules du fluide sur la surface du solide se fait essentiellement par les forces de Van der Waals et les forces dues aux interactions électrostatiques de polarisation. Cette liaison faible de molécules d'adsorbat sur le solide n'entraîne aucune modification de la structure moléculaire du solide mais une simple variation de sa masse. Ainsi, l'adsorption physique est parfaitement renversable c'est-à-dire que les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées en augmentant la température. Du point de vue thermodynamique, l'adsorption physique est considérée comme une transformation d'état du fluide d'une phase gazeuse à une phase adsorbée. Cette transformation s'effectue à pression et température constante. Elle s'accompagne toujours d'un effet thermique dû à la chaleur isostérique d'adsorption, ce qui peut conduire à un échauffement du solide et à une réduction des quantités adsorbées. L'exothermicité d'un système d'adsorption est caractérisée par les chaleurs

d'adsorption qui peuvent être mesurées par des techniques calorimétriques ou estimées à partir des isothermes d'adsorption à différentes températures [4].

1.2.3. L'équation d'état d'adsorption

La capacité des adsorbants à adsorber constitue le facteur le plus déterminant pour les performances du procédé. Il est par conséquent essentiel de bien connaître les propriétés d'équilibre mises en jeu pour pouvoir concevoir et dimensionner correctement un procédé d'adsorption.

L'adsorption est un phénomène divariant : la quantité adsorbée varie en fonction de la pression et de la température. L'équation d'état relie concentration x (masse d'adsorbat par unité de masse d'adsorbant), la pression P et la température T de l'adsorbant selon : $f(T, P, x) = 0$

La représentation la plus utilisée de cet équilibre est l'isotherme d'adsorption, qui à température constante, donne la quantité de gaz adsorbée par le solide en fonction de la pression d'équilibre du gaz $m = f(P)$. Les isothermes d'adsorption sont souvent déterminées expérimentalement. Elles sont ensuite corrélées par des modèles mathématiques qui doivent les représenter au mieux dans une plage étendue de concentration et de température. Selon le couple adsorbant/adsorbat étudié, l'allure de la courbe isotherme peut être largement différente. La grande majorité des isothermes peuvent être regroupées en cinq types (figure 1.2) selon leurs allures globales d'après la classification de Brunauer, Emmet et Teller [5].

1.2.3.1. Les différents types d'isothermes d'adsorption

Type I : est la plus simple et la plus complète, elle est typique d'un adsorbant microporeux ; puisque les diamètres des micropores sont du même ordre de grandeur que les dimensions d'une molécule de gaz où les pores se remplissent même aux faibles pressions. Elle fournit une bonne estimation du volume total de micropores du solide et elle représente le cas d'une adsorption en couche monomoléculaire d'adsorbat. Cette isotherme aussi traduit une interaction relativement forte entre l'adsorbat et l'adsorbant, elle est entièrement réversible sur tout le domaine de pression [6]. Ce type d'isotherme est caractéristique pour l'adsorption sur les charbons microporeux et les zéolithes [7] et sera celle retenue par notre modèle.

Type II : l'isotherme la plus fréquemment rencontrée, quand l'adsorption se produit sur des surfaces non microporeuses ou ayant des macropores (diamètre supérieur à 500 Å environ), elle

est caractéristique d'une supériorité de l'attraction par l'adsorbant vis-à-vis des attractions intermoléculaires de l'adsorbat [8-9].

Type III: est relativement rare, il représente le cas où l'interaction adsorbant/adsorbat est faible par rapport aux interactions adsorbat/adsorbat, mais suffisante pour accroître la tendance des molécules à s'accumuler à la surface de l'adsorbant. Un tel comportement indique que la surface du solide n'est pas homogène, et que l'adsorption s'effectue sur des sites préférentiels. Cette isotherme est caractérisée par une énergie d'adsorption égale au minimum à l'énergie de liquéfaction du gaz.

Type IV : peut résulter de la formation de deux couches successives d'adsorbat à la surface du solide quand les interactions entre les molécules du fluide frigorigène et la surface solide sont plus fortes que les interactions entre les molécules adsorbées. Dans ce cas, les sites d'adsorption de la seconde couche ne commencent à se remplir que quand la première couche est à peu près complète.

Type V : traduit l'existence de plus fortes interactions intermoléculaires que les forces d'interaction entre les molécules du fluide frigorigène et le solide.

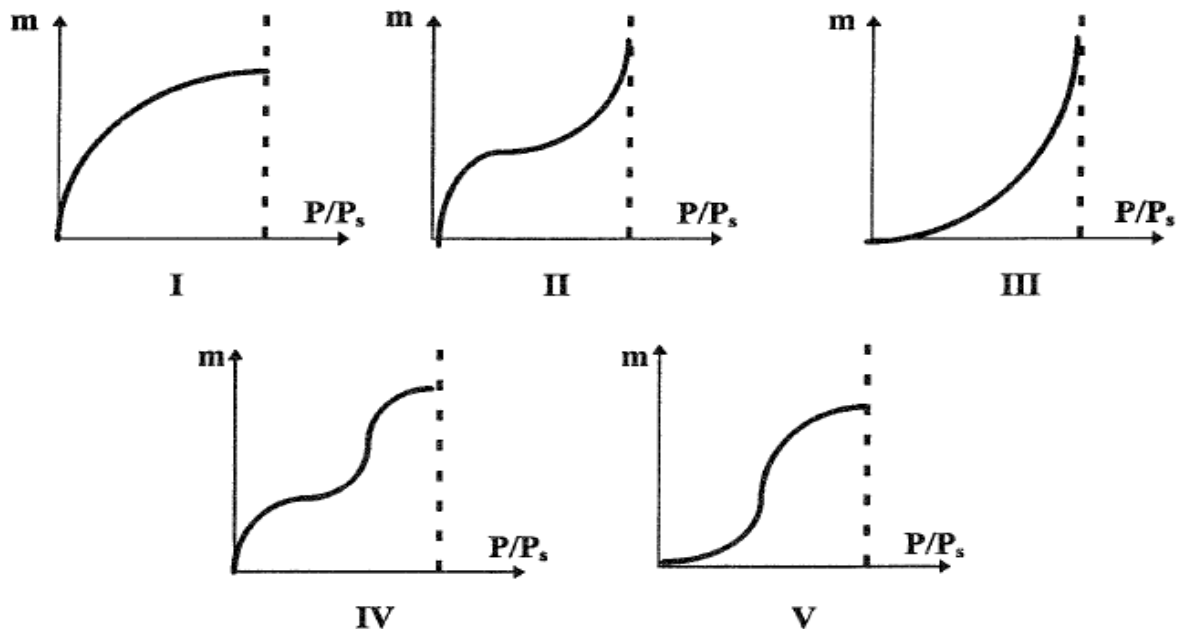


Figure 1.2 : Classification d'isotherme d'adsorption [10]

1.3. Choix du couple réactif

Le choix du couple adsorbant/adsorbat est très important, il se fait en fonction des températures d'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 thermodynamique de fonctionnement du système. [1]

Le choix d'un bon couple dépend aussi de l'application. En effet, les couples zéolithe/eau et charbon-actif/méthanol sont les plus préférables pour la réfrigération, le conditionnement de l'air et la conservation des produits pharmaceutique [12], d'où on a choisi de porter notre étude sur le couple zéolithe/ Al_2O_3 -eau.

Puisque le couple adsorptif est composé d'un adsorbant et adsorbat, une étude séparée de chaque partie du couple est nécessaire ;

1.3.1. Choix de l'adsorbant

Les adsorbants sont souvent choisis en fonction de leurs capacités d'adsorption et leurs fortes conductivités thermiques. La capacité d'adsorption doit être plus élevée à basse température et à la pression d'équilibre dans l'évaporateur. Par contre, elle doit être faible à haute température du cycle associée à la pression d'équilibre dans le condenseur. Comme l'adsorption est un phénomène surfacique, le choix se porte sur l'adsorbant microporeux de plus grande surface spécifique (charbons actifs, zéolithes, gels de silice et alumines activées). [1]

1.3.2. 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.
- Les adsorbants couramment utilisés dans les systèmes à adsorption peuvent être classés par ordre décroissant de la chaleur latente de vaporisation. Il s'agit de l'eau, l'ammoniac et les alcools primaires (méthanol, éthanol) [1]. Nous citons ci-après les études les plus avancées

concernent le couple zéolithes-eau : BOUGARD [13], DUPONT [14], GERNIER [15], MEUNIER [16], ADELL [17], ABDALLAH [18]

1.3.3. Couple choisi : zéolithe 13X/Al₂O₃-eau

La zéolithe 13X est un type spécifique de zéolithe, qui est une substance poreuse utilisée couramment en adsorption. Les zéolithes sont capables de piéger et de retenir certaines substances à l'échelle moléculaire. La zéolithe 13X est souvent utilisée pour sa sélectivité d'adsorption des molécules de taille relativement large, telles que les molécules de gaz. D'autre part, les nanofluides Al₂O₃-eau sont des suspensions colloïdales composées de particules nanométriques d'alumine (Al₂O₃) dispersées dans de l'eau. Les nanofluides sont connus pour leurs propriétés thermiques améliorées et sont utilisés dans diverses applications telles que le refroidissement électronique et les systèmes de transfert de chaleur.

En combinant la zéolithe 13X avec les nanofluides Al₂O₃-eau, il est possible de créer un système d'adsorption qui profite des propriétés adsorbantes de la zéolithe et des caractéristiques thermiques améliorées des nanofluides. Cela peut être utilisé dans des applications telles que la purification de gaz, le stockage d'énergie thermique ou d'autres processus nécessitant à la fois l'adsorption et le transfert de chaleur.

1.4. Modèles d'adsorption

Pour exprimer les relations qui relient le volume de gaz adsorbé à la pression et à la température, les théories sur l'adsorption utilisent deux modèles :

1.4.1. Modèles moléculaires

Ces modèles donnent une description moléculaire du phénomène d'adsorption à partir de la spécification de la cinétique et du nombre de couches de molécules adsorbées.

1.4.2. Modèles thermodynamiques

Plusieurs corrélations ont été proposées, elles se basent toutes sur les travaux de Polanyi de la théorie de potentiel d'adsorption. Cette théorie ne s'intéresse pas à tous les détails tels que

l'interaction entre les molécules ou la structure de l'adsorbant. C'est une approche purement thermodynamique du phénomène d'adsorption, mais le modèle qui a décrit le phénomène avec plus de précision est celui de Dubinin, qui sera développé ici. [20]

1.4.2.1. Equation de Dubinin et Radushkevich (D-R)

A partir du potentiel de Polanyi, Dubinin et Radushkevich [21] ont développé un modèle théorique rendant compte des masses d'adsorbant piégées à la surface d'un adsorbant microporeux.

Cette approche est basée sur deux hypothèses :

Le taux de remplissage θ est une fonction du potentiel de Polanyi :

$$\theta = \frac{w}{w_0} = f\left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right) \dots \dots \dots (1.1)$$

Où β est le coefficient d'affinité.

La distribution des pores de l'adsorbant étant supposée Gaussienne, l'équation de D-R est alors donné par :

$$\theta = \exp\left(-k\left(\frac{\varepsilon}{\beta}\right)^2\right) \dots \dots \dots (1.2)$$

Où k est un paramètre qui régit l'étalement de la distribution des pores.

1.4.2.2. Equation de Dubinin et Astakhov (D-A)

Dubinin et Astakhov ont proposé une forme plus générale de l'équation d'adsorption, basée sur une distribution des pores du type de WEIBUL [22] plutôt que sur une distribution gaussienne :

$$\theta = \exp\left(-\left(\frac{\varepsilon}{\beta \cdot E_0}\right)^n\right) \dots \dots \dots (1.3)$$

Où n varie de 1 à 1,8 pour le charbon actif AC35 et de 3 à 6 pour les Zéolithes.

E_0 est l'énergie libre d'adsorption de la vapeur de référence.

L'équation (1-3) s'écrit :

$$\theta = \exp\left(-\left(\frac{R.T}{\beta \cdot E_0} \cdot \ln \frac{P_S}{P_V}\right)^n\right) \dots \dots \dots (1.4)$$

1.5. Expression de la masse adsorbée

A partir des équations (1-3) de D-R et celle du potentiel de Polanyi on a :

$$\theta = \exp\left[-\frac{k}{\beta} \mathfrak{R}^2 \cdot T^2 \cdot \ln^2 \frac{P_S}{P_V}\right] \dots \dots \dots (1.5)$$

Ou alors :

$$w = w_0 \exp\left[-D \cdot \mathfrak{R}^2 \cdot T^2 \ln^2 \frac{P_S}{P_V}\right] \dots \dots \dots (1.6)$$

Où

w : volume d'adsorbat adsorbé par unité de masse d'adsorbant.

w_0 : volume maximal adsorbable par unité de masse de l'adsorbant

T : Température d'équilibre d'adsorption et $D = k/\beta^2$.

Quand on tient compte de la dépendance de w_0 avec la température, l'équation de D-R prend la forme :

$$w(T) = w_0 \exp \left[-D \cdot \mathfrak{R}^2 \cdot T^2 \cdot \ln^2 \frac{P_S}{P_V} \right] \dots \dots \dots (1.7)$$

Cette équation peut s'exprimer en termes de masse adsorbée dans le générateur en introduisant la masse volumique ρ^* de la phase adsorbée [13], définie par rapport à une température de référence T_0 et à partir du coefficient de dilatation volumique de cette phase :

$$\alpha = - \frac{\partial(\ln \rho^*(T))}{\partial T} \dots \dots \dots (1.8)$$

α est supposé constant, d'où:

$$\rho^*(T) = \rho^*(T_0) \exp[-\alpha(T - T_0)] \dots \dots \dots (1.9)$$

La masse sorbée sera donnée par :

$$m(T) = w(T) \cdot \rho^*(T) = \rho^*(T_0) w_0 \exp \left[-\alpha(T - T_0) - D \cdot \mathfrak{R}^2 \cdot T^2 \ln^2 \frac{P_S}{P_V} \right] \dots \dots (1.10)$$

Ou alors

$$m(T) = m_0(T_0) \exp \left[-\alpha(T - T_0) - D \cdot \mathfrak{R}^2 \cdot T^2 \ln^2 \frac{P_S}{P_V} \right] \dots \dots \dots (1.11)$$

m_0 représente la masse maximale adsorbable par unité de masse de l'adsorbant.

1.6. Chaleur isostérique d'adsorption

L'adsorption est un processus exothermique qui se produit donc par un dégagement de chaleur. On donne l'expression de la chaleur isostérique de sorption sous la forme suivante: [23]

$$q_{is}(T) = L_v(T) + \varepsilon - T \cdot \left. \frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right|_m \dots \dots \dots (1.12)$$

En remplaçant le potentiel de Polanyi par son expression donnée dans l'équation D-R, on a:

$$m = m_0 \cdot \exp \left(-\frac{k}{\beta^2} \cdot \varepsilon^2 \right) \dots \dots \dots (1.13)$$

On obtient:

$$q_{is}(T) = L_v(T) + T \frac{\beta^2}{2 \cdot k \cdot \varepsilon} \cdot \left. \frac{\partial \ln m_0}{\partial T} \right|_m \dots \dots \dots (1.14)$$

Par combinaison des équations (1-8), (1-11) et (1-14), on obtient l'expression de la chaleur isostérique sous la forme suivante : [23]

$$q_{is}(T) = L_v(T) + \mathfrak{R}.T + \frac{2.303}{\sqrt{\beta}} \cdot \left[\sqrt{\ln(\theta)} + \frac{\alpha.T}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\ln(\theta)}} \right] \dots \dots \dots (1.15)$$

1.7. La chaleur spécifique massique de la zéolithe

La chaleur spécifique de la zéolithe est : [24]

$$C_s = 1,04 \text{ kJ/kg.K}$$

1.8. Caractéristiques propres du nanofluide Al₂O₃-eau

En ce qui concerne le nanofluide Al₂O₃-eau, des recherches ont montré que l'ajout de nanoparticules d'Alumina pouvait modifier légèrement les propriétés thermiques de l'eau [24], d'où nous allons prendre pour ce nanofluide les mêmes corrélations que l'eau concernant la variation de chaleur latente et la variation de pression mais pas pour la chaleur spécifique.

L'expression de la chaleur latente de vaporisation en fonction de la température [19] :

$$L(t) = 3164.3 - 2.4237 * T \dots \dots \dots (1.16).$$

L'expression de la pression en fonction de la température [19] :

$$\ln P = 14.02734 - \frac{5214.906}{T} \dots \dots \dots (1.17).$$

L'expression de la chaleur spécifique du liquide en fonction de la température [24] :

$$C_{p_{nf}} = \frac{\varphi(\rho C_p)_{Al_2O_3} + (1-\varphi)(\rho C_p)_{eau}}{(1-\varphi)\rho_{eau} + \varphi\rho_{Al_2O_3}} \dots \dots \dots (1.18).$$

1.10. Conclusion

Ces dernières années, la recherche sur les réfrigérateurs à adsorption solide a fait de grands progrès. De nombreux résultats expérimentaux apparaissent dans la littérature. De ces résultats, on peut constater que chaque chercheur sélectionne un couple pour étudier les prototypes fabriqués, et peu de comparaisons de couples peuvent être trouvées dans la littérature. Une fois le système d'adsorption choisi, se pose la question du couple sélectif. Dans notre travail, ce couple est choisi comme critère, ce critère ne dépend pas de la configuration de la machine, mais uniquement des paramètres thermodynamiques choisis.

Chapitre 2 :
Etude thermodynamique
du réacteur

2.1. Introduction

Dans le cadre de l'optimisation d'un réfrigérateur à adsorption, il est nécessaire d'étudier et d'analyser le cycle Clapeyron de base associé à la machine. Pour cela, nous avons développé un modèle numérique basé d'une part sur l'équation d'état du modèle semi-empirique de Dubinin [25] et d'autre part sur certaines considérations visant à assurer l'optimisation, comme le choix du sorbant/adsorbat paires, nous avons utilisé la littérature Les équations de données expérimentales disponibles dans. Un code de calcul a été développé pour comprendre l'effet de divers paramètres sur la capacité de refroidissement produite par l'évaporateur, le coefficient de performance thermique du réfrigérateur et la masse du cycle d'adsorbat dans l'adsorbeur.

Description du système étudié

Dans notre travail, nous avons choisi d'étudier un système de réfrigération fermé avec des adsorbeurs, comme le montre la figure (2.1), qui sont alternativement connectés à des condenseurs et des évaporateurs.

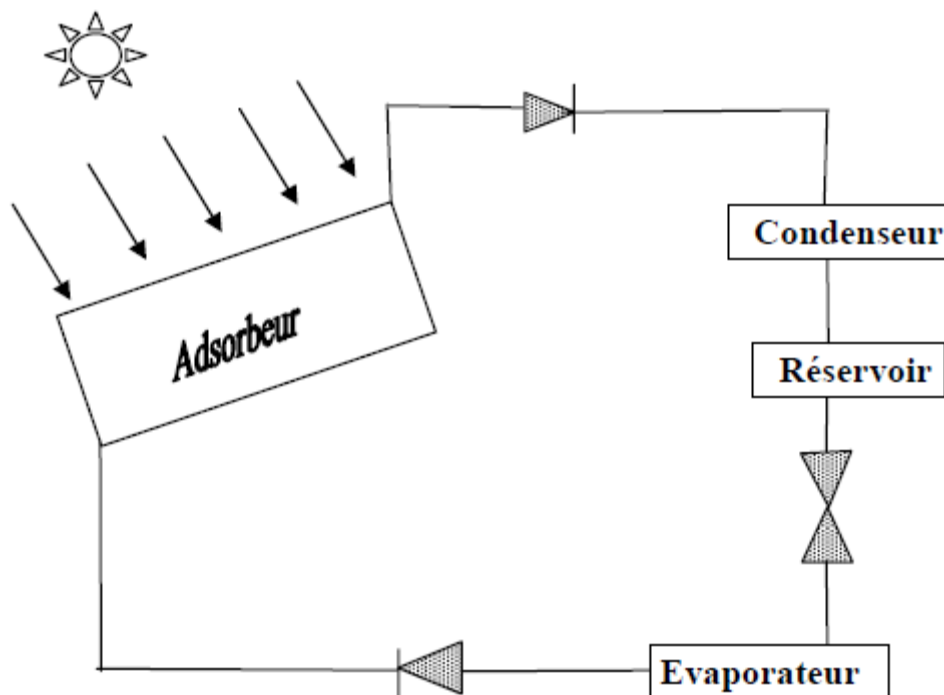


Figure 2.1 : Schéma d'une machine frigorifique solaire à adsorption [23]

La figure (2.2) donne un schéma de principe du collecteur-adsorbeur que nous allons étudier. Le réacteur sera de type modulaire, constitué d'un ou plusieurs tubes. Cette configuration répond mieux aux critères de facilité de construction et de résistance à la compression. Le réacteur est enfermé dans un capteur solaire à panneau plat commun composé d'une isolation arrière et latérale, d'un couvercle transparent et d'une surface absorbante.

Le réacteur solaire utilisé dans un refroidisseur solaire à adsorption est construit selon le même concept que les simples capteurs solaires à panneaux plats utilisés commercialement pour chauffer l'eau domestique. Cependant, les tubes de circulation d'eau utilisés dans les capteurs commerciaux sont ici remplacés par des tubes en cuivre, qui contiennent le mélange réactionnel, à savoir la Zéolithe 13X/ Al_2O_3 –eau.

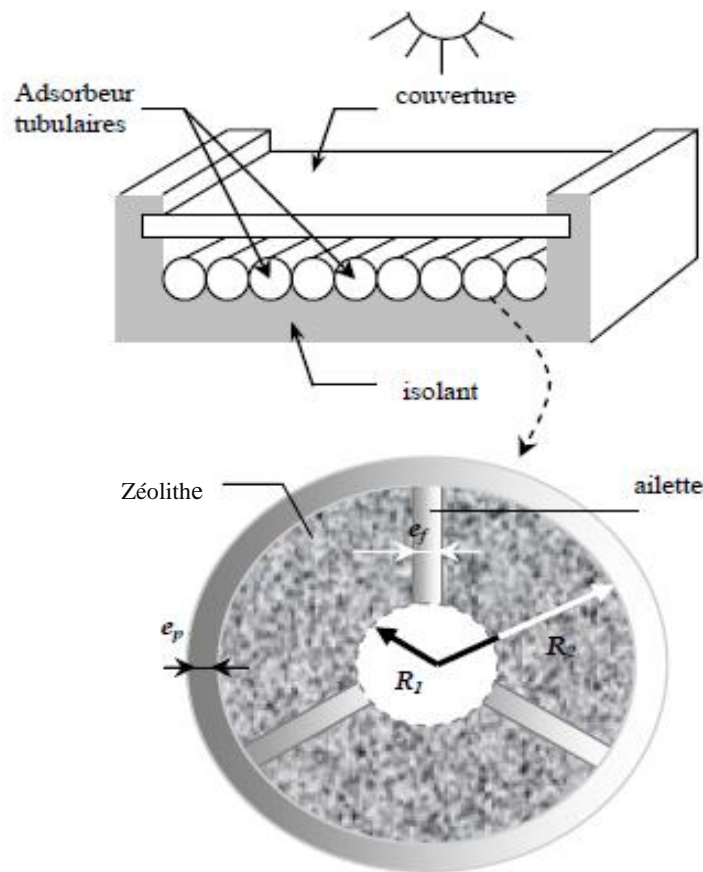


Figure 2.2 : Schéma du réacteur étudié

2.2.1. Description de l'adsorbent

Les adsorbents étudiés sont classiques. Il est constitué d'un fluide caloporteur circulant dans des tubes métalliques entourés d'un lit cylindrique de zéolithe 13X comme le montre la figure (2.2). On considère que le tube est en cuivre, $C_{pm} = 0,37 \text{ kJ/kg.K}$,

Un cycle à adsorption fonctionne de manière similaire à un cycle thermique ordinaire. Les données prises en considération sont les suivantes : le couple Zéolithe 13X/ Al_2O_3 –eau est le couple adsorptif, $m_g = 5 \text{ kg}$ comme masse des parties métalliques de l'adsorbent ; $m_a = 2,5 \text{ kg}$ comme masse de la zéolithe 13X.

Les conditions de fonctionnement sont : température d'adsorption $T_a = 283.15 K$, température d'évaporation $T_e = 278.15 K$, température de condensation $T_c = 308.15 K$ et température de régénération $T_g = 353 K$.

Le principe de fonctionnement consiste à décomposer le cycle en deux demi-cycles. Pendant la première moitié du cycle, le réacteur est chauffé par l'énergie solaire pour la régénération. Cet échauffement provoque une désorption du fluide frigorigène qui se condense dans le condenseur et la chaleur correspondante est rejetée dans le milieu environnant. Dans la seconde moitié du cycle, l'unité peut être complètement autonome et peut donc être transportée vers un point d'utilisation qui peut être différent du point de régénération : l'évaporateur communique avec le réacteur au moment souhaité, par simple ouverture de la vanne. Le réfrigérant liquide s'évapore et les vapeurs de réfrigérant sont transférées vers le réacteur où elles sont absorbées par l'adsorbant.

Le fonctionnement d'un réfrigérateur à adsorption peut être représenté par la figure 2.3 et le diagramme température-masse adsorbée-pression (figure 2.4) pour le générateur et le fluide frigorigène pur ; la description théorique du cycle discontinu suit

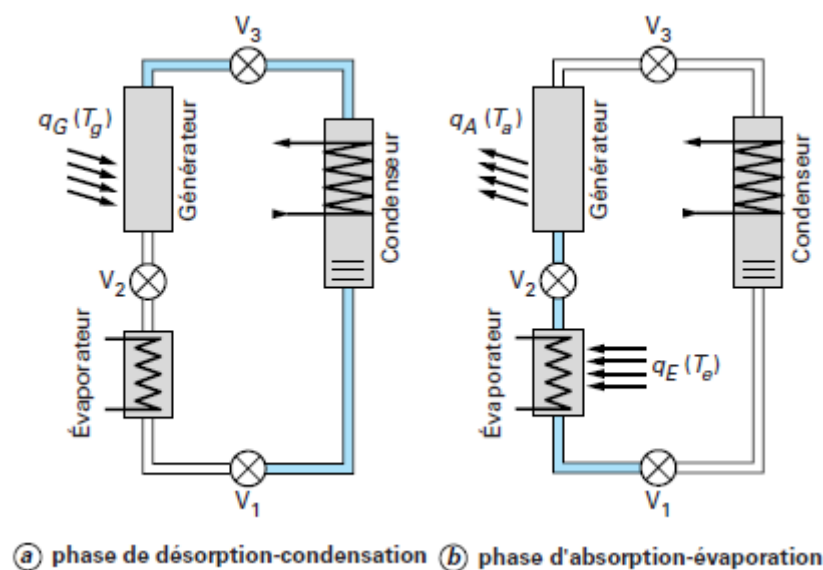


Figure 2.3 : Schéma d'une machine à adsorption à fonctionnement intermittent [26]

Au point 1 du diagramme, le capteur est à sa température la plus basse T_a (dite température d'adsorption). La masse adsorbée est maximale, le clapet V_2 est ouvert et la pression qui règne dans l'ensemble du générateur-évaporateur est P_e .

La régénération commence à cet état d'adsorbant $(m(T_a), P_e, T_a)$. Du point 1 au point 2, le générateur est chauffé à masse constante, V_2 et V_3 restent fermées. Au point 2, la pression arrive à la pression saturante associée à la température de condensation T_c . Le clapet V_3 est ouvert. A cette pression, la température du générateur T_s est dite "seuil", elle marque le début de la

désorption, T_s est la température minimale que doit atteindre le régénérateur pour que le cycle fonctionne.

La régénération commence à cet état d'adsorbant. Du point 1 au point 2, le générateur est chauffé à masse constante, V_2 et V_3 restent fermées. Au point 2, la pression arrive à la pression saturante associée à la température de condensation T_c . Le clapet V_3 est ouvert. A cette pression, la température du générateur T_s est dite "température de seuil » ; elle marque le début de la désorption, c'est la température minimale que doit atteindre le régénérateur pour que le cycle fonctionne.

Du point 2 au point 3, le système a suivi une désorption-condensation isobare. La température du générateur continue à croître et la désorption se poursuit jusqu'au point 3 où le générateur est à sa température maximale T_g (appelée température de régénération).

Remarquons que plus cette température est élevée, plus importante sera la quantité de vapeur extraite du capteur. En ce point, la masse $m(T_g)$ est minimale. En fin de régénération, l'adsorbant atteint l'état d'équilibre $(m(T_g), P_c, T_g)$ (point 3). La vanne V_3 est fermée, le réfrigérant pur est condensé par refroidissement à l'air ou à l'eau froide et se trouve dans un état (T_c, P_c) .

L'adsorbant est alors soustrait à la source de chaleur et se refroidit de façon isostérique. La pression du capteur baisse avec la température jusqu'à la pression d'évaporateur P_e , l'adsorbant s'équilibre à l'état $(m(T_i), P_e, T_i)$ (point 4).

Au point 4, la vanne de détente V_1 et la vanne V_2 s'ouvrent, l'adsorption se poursuit jusqu'au point 1 et s'accompagne d'une production de froid qui met en jeu la chaleur latente d'évaporation $L(T_e)$ au niveau de l'évaporateur. Le processus de vaporisation s'effectue à pression constante, le système revient à l'état $(T_a, m(T_a), P_e)$, un cycle de fonctionnement est terminé.

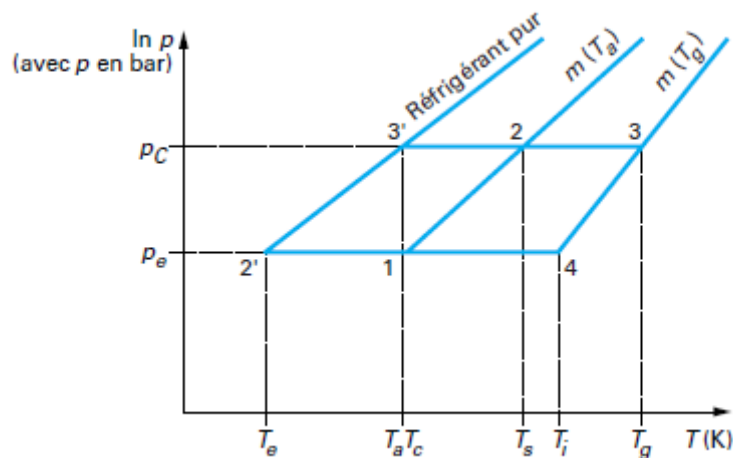


Figure 2.4: Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique de base dans un diagramme de Clapeyron

[26]

1.3. Etude thermodynamique du cycle de base

1.3.1. . Détermination des températures seuil du cycle

La définition du cycle thermodynamique d'une machine frigorifique à adsorption est achevée lorsque les deux points critiques (seuils) de ce cycle sont déterminés et définis. Cependant dans le calcul du coefficient de performance thermique nous n'avons besoin que de la température seuil de désorption T_{s1} . Alors que, T_{s2} est plus convenable dans les calculs des performances des pompes à chaleur.

La température seuil de désorption T_{s1} est définie comme 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_{s2} 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. Pour obtenir les relations analytiques entre T_{s1} et T_{s2} avec la température de condensation et d'évaporation, nous devons tenir compte de la supposition de deux isostères pendant les phases [40], on obtient :

$$m(T_a, P_e) = m(T_{s1}, P_c) \dots \dots \dots (2.1)$$

$$m(T_g, P_c) = m(T_{s2}, P_e) \dots \dots \dots (2.2)$$

En rappelant, que l'équation d'état de l'adsorption est donnée par : [25]

$$m(T, P) = m_0 \exp \left[-A \left(\frac{T - T_a}{T_a} \right)^n \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

A : est une constante caractéristique du couple d'adsorption qui ne dépend pas des températures.

$m_0 = 0,269$ kg/kg zéolithe [25]

A = 4,33 S.I.

Par l'application de l'équation (2.3) aux équations (2.1) et (2.2), on obtient respectivement :

$$\exp \left[-A \left(\frac{T_a - T_a}{T_a} \right) \right] = \exp \left[\left(\frac{T_{s1} - T_a}{T_a} \right) \right] \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\exp \left[-A \left(\frac{T_g - T_a}{T_a} \right) \right] = \exp \left[\left(\frac{T_{s2} - T_a}{T_a} \right) \right] \dots \dots \dots (2.5)$$

Pour obtenir la température T_{s1} , nous devons résoudre l'équation (2.4). On donne des valeurs à la température T_{s1} dans un intervalle $[T_a, T_{s1max}]$, où T_{s1max} est la valeur maximum de T_{s1} (arbitrairement choisie) et chaque fois, on compare les valeurs de la masse adsorbée calculée correspondante à des valeurs de température données précédemment, à $m(T_a, P_e)$ jusqu'à l'obtention de la valeur de T_{s1} correspondant à $m(T_a, P_e) - m(T_{s1}, P_c) = 0$

La résolution de l'équation (2.5) nous donne la température seuil d'adsorption T_{s2} , en utilisant la même procédure que précédemment.

2.4. Coefficient de performance thermique (COP_{th})

Dans cette partie une étude statique, basé sur l'utilisation des équations d'état (adsorbant/adsorbat) à l'équilibre thermodynamique est présentée. Elle ne tient compte ni des effets de la cinétique d'adsorption, ni des différences de température ou de pression dues aux transferts de chaleur et de masse (c'est-à-dire que la température, la pression et la masse adsorbée sont supposées uniformes) et que la condensation et l'évaporation s'effectuent à température constante. On néglige ainsi, l'effet des pertes thermiques associées au chauffage de l'adsorbent. L'efficacité de la machine est traduite par le coefficient de performance thermique COP_{th} , ce coefficient n'a pas de sens physique, mais il est utile pour décrire le fonctionnement de telle machine, il est donné par [27, 28]

$$COP_{th} = \frac{Q_f}{Q_c} \dots \dots \dots (2.6)$$

Q_f est la production frigorifique ou la quantité de froid produite à l'évaporateur.

Q_c est la quantité de chaleur fournie à l'adsorbent.

Le COP_{th} calculé dans cette partie est un COP thermodynamique, c'est-à-dire qu'il ne prend pas en compte les bilans sur l'adsorbant, l'adsorbat et les parties métalliques de l'adsorbent. Mais, le COP réel d'un tel cycle tient compte des bilans thermiques sur l'adsorbent et sur les différents organes de la machine frigorifique à adsorption (condenseur et évaporateur). Les quantités de chaleur mises en jeu dans le cycle seront directement calculées par l'intermédiaire de la relation de (D-R).

2.4.1. Expression de la production frigorifique Q_f

La quantité de froid produite à l'évaporateur Q_f est donnée par [44,45]:

$$Q_f = m_a \Delta m \left[L(T_e) - \int_{T_e}^{T_c} C_{pl}(T) dT \right] \dots \dots \dots (2.7)$$

Le premier terme de cette équation représente la chaleur absorbée pour l'évaporation du réfrigérant à la température d'évaporation T_e .

Le second terme représente la chaleur sensible nécessaire pour amener le condensât de sa température de condensation à celle d'évaporation.

Où :

$L(T)$ et $C_{pl}(T)$ représentent, respectivement la chaleur latente d'évaporation et la chaleur spécifique de l'adsorbat à l'état liquide.

M est la masse de l'adsorbant solide contenue dans l'adsorbent.

Δm est la masse cyclée de l'adsorbat, calculée comme suit :

$$\Delta m = m_{max} - m_{min} = m(T_a, P_e) - m(T_g, P_c) \dots \dots \dots (2.8)$$

m_{max} c'est la masse adsorbée correspondant à la température d'adsorption T_a et la pression d'évaporation P_e , calculée à l'aide du modèle de Dubinin-Astakhov.

m_{min} est la masse adsorbée correspondante à la température de régénération T_g et la pression de condensation P_c (voir figure 2.4), calculée à l'aide du modèle de Dubinin-Astakhov.

2.4.2. Expression de Q_c

L'adsorbent reçoit l'énergie de la source chaude dont une partie sera utilisée pour chauffer les parties métalliques de l'adsorbent, une autre partie sert à chauffer l'adsorbant et l'adsorbat et le reste servant à la désorption.

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_{des} \dots \dots \dots (2.9)$$

Q_1 , Q_2 , Q_3 et Q_{des} sont des chaleurs sensibles, respectivement utilisées pour le chauffage de l'adsorbant, des parties métalliques de l'adsorbent et de l'adsorbat.

Q_{des} est la chaleur nécessaire à la désorption correspondant à la masse de l'adsorbat désorbé.

a) Chaleur sensible de l'adsorbant (Q_1)

Q_1 est la chaleur nécessaire pour porter la température de l'adsorbant solide de la température T_a à la température T_g , elle est donnée par :

$$Q_1 = m_a \int_{T_a}^{T_g} C_{P_2} dT = m_a C_{P_2} (T_g - T_a) \dots \dots \dots (2.10)$$

m_a est la masse de l'adsorbant solide contenue dans l'adsorbent.

C_{P_2} est la chaleur spécifique de l'adsorbant et $m_a C_{P_2}$ représente la capacité calorifique de l'adsorbant.

b) Chaleur sensible des parties métalliques (Q_2)

Q_2 est la chaleur nécessaire pour porter la température des parties métalliques de l'adsorbent de la température T_a à la température T_g , elle est donnée par:

$$Q_2 = m_g \int_{T_a}^{T_g} C_{P_w} dT = m_g C_{P_m} (T_g - T_a) \dots \dots \dots (2.11)$$

m_g est la masse des parties métalliques de l'adsorbent.

C_{P_m} est la chaleur spécifique des parties métalliques de l'adsorbent.

$m_g C_{P_m}$ représente la capacité calorifique des parties métalliques de l'adsorbent.

c) Chaleur sensible de l'adsorbat (Q_3)

Q_3 est la chaleur nécessaire pour chauffer l'adsorbat de la température T_a à la température T_g , elle est donnée par :

$$Q_3 = m_a \int_{T_a}^{T_g} m(T) C_{P_l}(T) = m_a m_{max} \int_{T_a}^{T_{c1}} C_{P_l} dT + m_a \int_{T_{c1}}^{T_g} m(T) C_{P_l}(T) dT \dots (2.12)$$

$m(T)$ est la masse adsorbée à la température T et à la pression de condensation P_c , calculée à l'aide du modèle de Dubinin-Astakhov.

d) Chaleur de désorption (Q_{des})

La désorption se fait sur le trajet (2→3). Aux points 2 et 3 correspondent respectivement, les températures T_{s1} et T_g ; la chaleur de désorption est donnée par [46] :

$$Q_{des} = m_a \int_{m_{max}}^{m_{min}} q_{st} dm = m_a q_{st} (m_{min} - m_{max}) \dots (2.13)$$

Où : q_{st} est la chaleur d'adsorption compte tenu comme constante, on donne pour le couple zéolithe eau $q_{st} = 3.250 \times 10^6 J/kg$ [25]

2.4.3 Algorithme de calcul

L'algorithme de calcul, sous Matlab, utilisé dans notre modèle pour le calcul du coefficient de performance thermique, de la quantité de froid produite à l'évaporateur et des différentes chaleurs contribuées au chauffage de l'adsorbeur, est résumé dans l'organigramme de la figure (2.5).

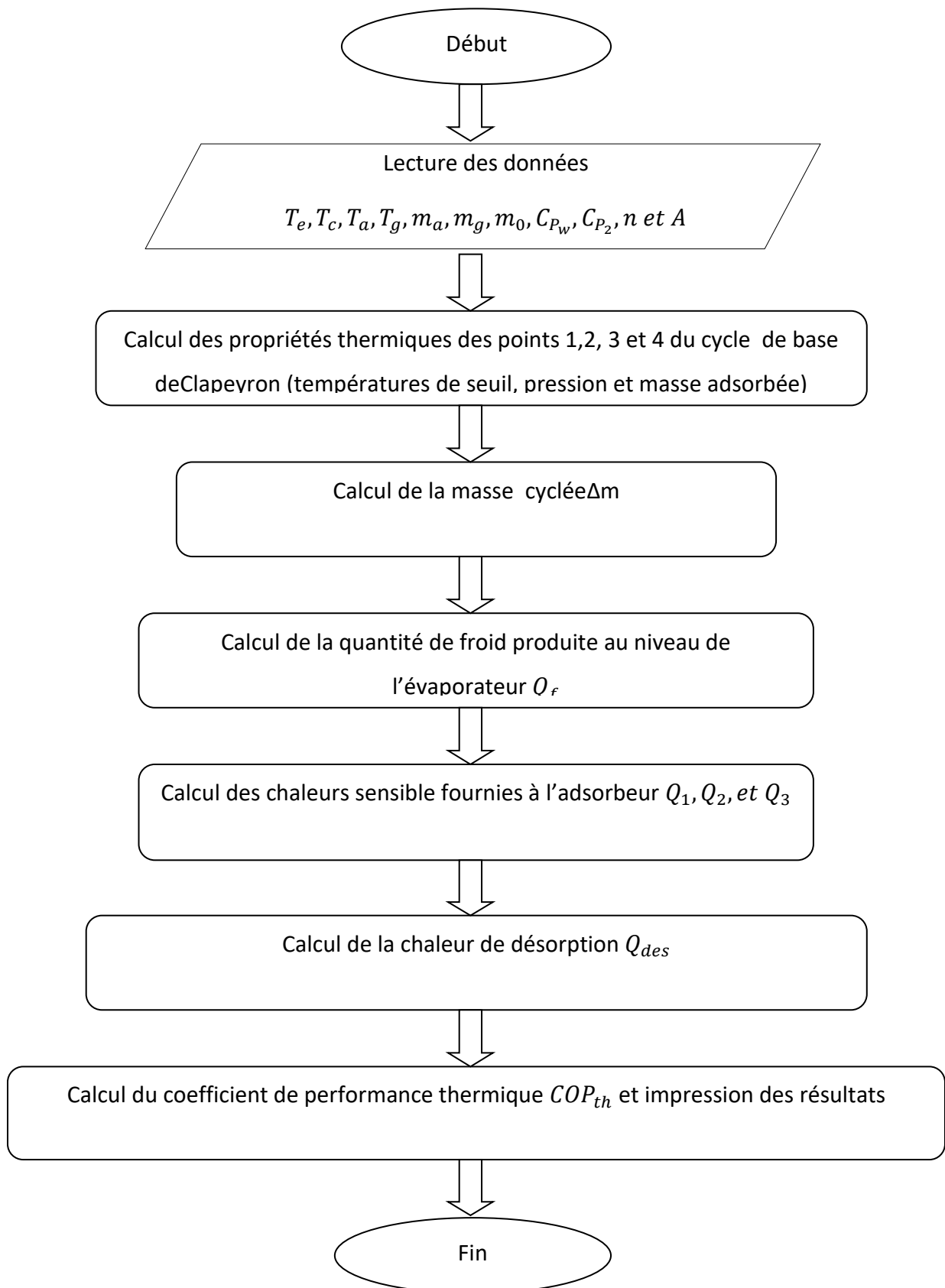


Figure 2.5 : Organigramme de calcul du COP_{th}

2.5 Conclusion

Les équations présentées dans ce chapitre représentent notre modèle mathématique qui va être transféré en modèle numérique à l'aide de l'outil Matlab afin de calculer le coefficient de performance COP de la machine frigorifique à adsorption. Les résultats obtenus seront traités dans le chapitre 3.

Chapitre 3 :
Résultats et discussions

3.1. Introduction

Ce chapitre présente différents résultats obtenus à partir de la résolution numérique des modèles développés dans le chapitre précédent. Le code informatique développé permet de comprendre l'effet de différentes températures de fonctionnement sur l'efficacité de la machine et la quantité de refroidissement produite par l'évaporateur, ainsi que la chaleur totale fournie au système, en faisant varier les paramètres et en gardant tous les autres paramètres constants

3.2. Influence des températures de fonctionnement

3.2.1. *Influence de la température de régénération*

Dans cette section, la température de régénération est variable, tandis que les températures d'évaporation et de condensation sont fixes pour étudier l'effet de la température de régénération sur les performances de la machine.

La figure (3.1) montre le coefficient de performance en fonction de la température de régénération T_g . On voit que l'augmentation de T_g in s'accompagne de l'augmentation de COP jusqu'à ce qu'il atteigne une valeur maximale ($COP_{th}=0.49$) pour une valeur maximale $T_{g_{max}} = 400 K$, puis la vitesse de son évolution commence à diminuer, ce qui signifie que la performance optimale est uniquement pour une valeur T_g spécifique et le chauffage continu n'a pas de sens pour la valeur de température la plus élevée.

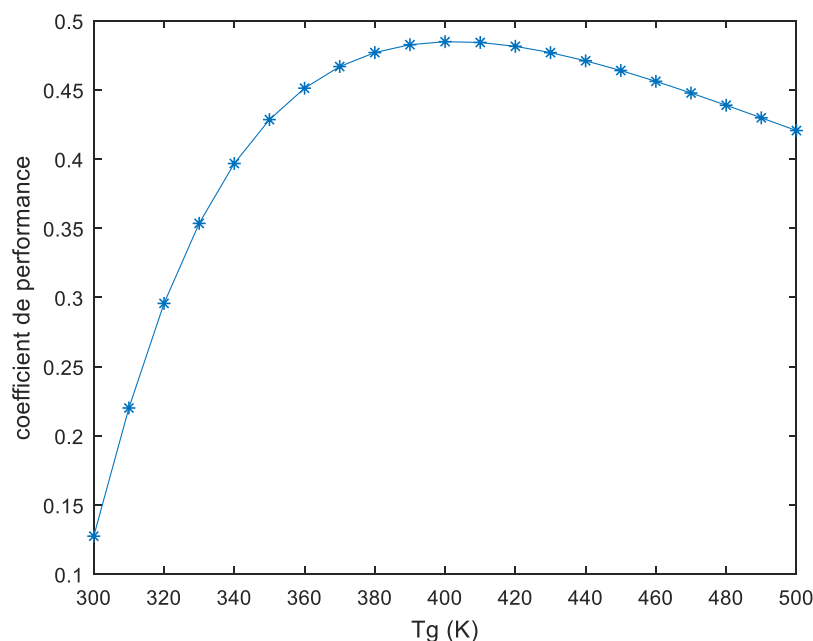


Figure 3.1 : variation du coefficient de performance en fonction de T_g

Les figures (3.2) et (3.3) montrent l'effet de la température de génération respectivement, sur la masse cyclée dm et sur la quantité de froid produite à l'évaporateur Q_f . La masse désorbée m_{min} est devenu plus faible pour les grandes valeurs de T_g , ce qui entraine une augmentation de la masse cyclée (figure 3.2), par conséquent, une augmentation de la quantité de froid produite à l'évaporateur (figure 3.3).

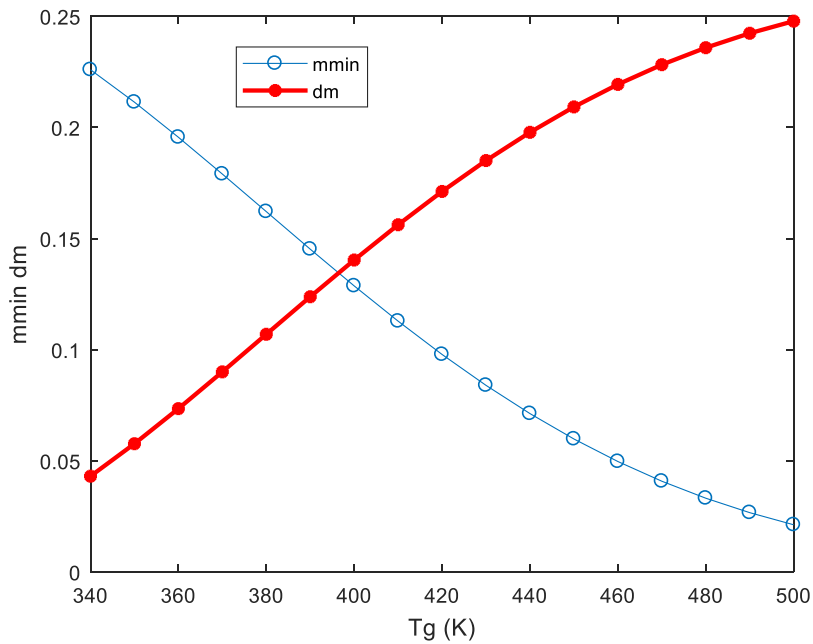


Figure 3.2 : variation de de la masse désorbée m_{min} et la masse cyclée dm en fonction de T_g

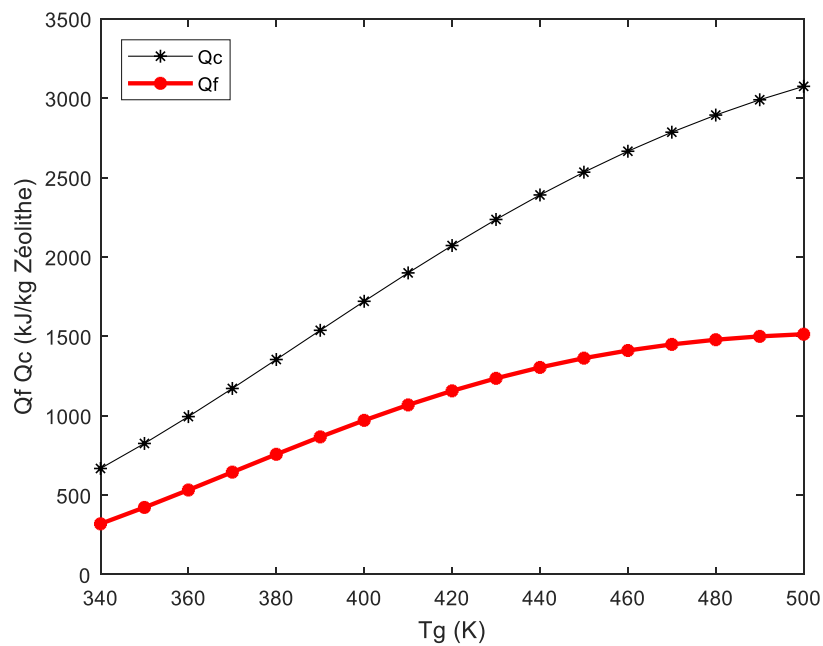


Figure 3.3 : Variation de la chaleur totale fournie à l'adsorbteur Q_C et la quantité de froid produite à l'évaporateur Q_f en fonction de T_g

Nous montrons l'effet de la température de régénération T_g sur différentes chaleurs sensibles et de désorption sur la figure (3.4).

Concernant l'effet des différentes chaleurs sensibles Q_1, Q_2, Q_3 et chaleurs de désorption Q_{des} . La figure (3.4) montre que l'augmentation de la température de régénération entraîne une légère augmentation de la chaleur sensible globale utilisée pour chauffer l'adsorbant Q_1 , les pièces métalliques de l'adsorbant Q_2 et l'adsorbant Q_3 . En revanche, il provoque une forte augmentation de l'endotherme d'hydrolyse.

En général, l'augmentation de la température de régénération se traduit par une augmentation de la chaleur totale fournie à l'adsorbeur Q_C .

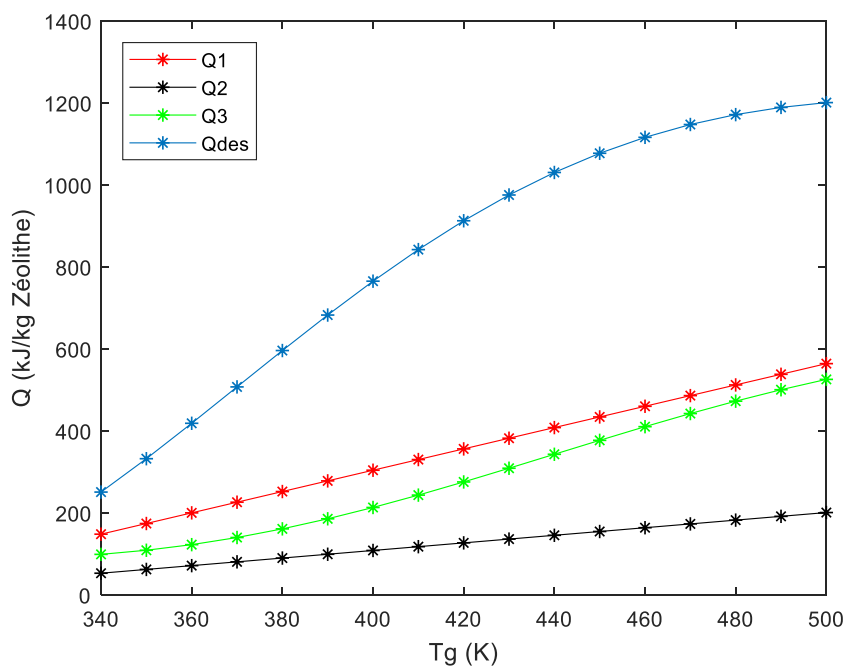


Figure 3.4 : variation des différentes chaleurs sensibles et la chaleur de désorption en fonction de T_g

3.2.2. Influence de la température de condensation

Dans les figures (3.5) et (3.6), l'impact de la température de condensation sur le coefficient de performance thermique et la quantité de froid généré à l'évaporateur Q_f sont affichés $T_e = 278.15 K$ et $T_a = 283.15$. Lors du réglage T_g et T_c de la manipulation des paramètres du système COP_{th} , tels que la variation et la correction de certains aspects, l'efficacité globale du système peut être affectée. En effet, à mesure que la température de condensation T_c augmente, l'efficacité du système diminue. Cette corrélation peut s'expliquer par le fait qu'une augmentation de la température de condensation entraîne une augmentation de la pression de saturation à cette température, également appelée pression de condensation T_c . Ceci, à son tour, provoque la désorption d'une plus grande quantité d'eau, ce qui entraîne une diminution de la

quantité de masse cyclée et une réduction subséquente de la quantité de froid produit à la fois par l'évaporateur Q_f et COP_{th} le système dans son ensemble.

En se référant au diagramme de Clapeyron du cycle de base (figure 2.4), on peut aisément constater que la masse désorbée m_{min} augmente significativement pour des valeurs de T_C .

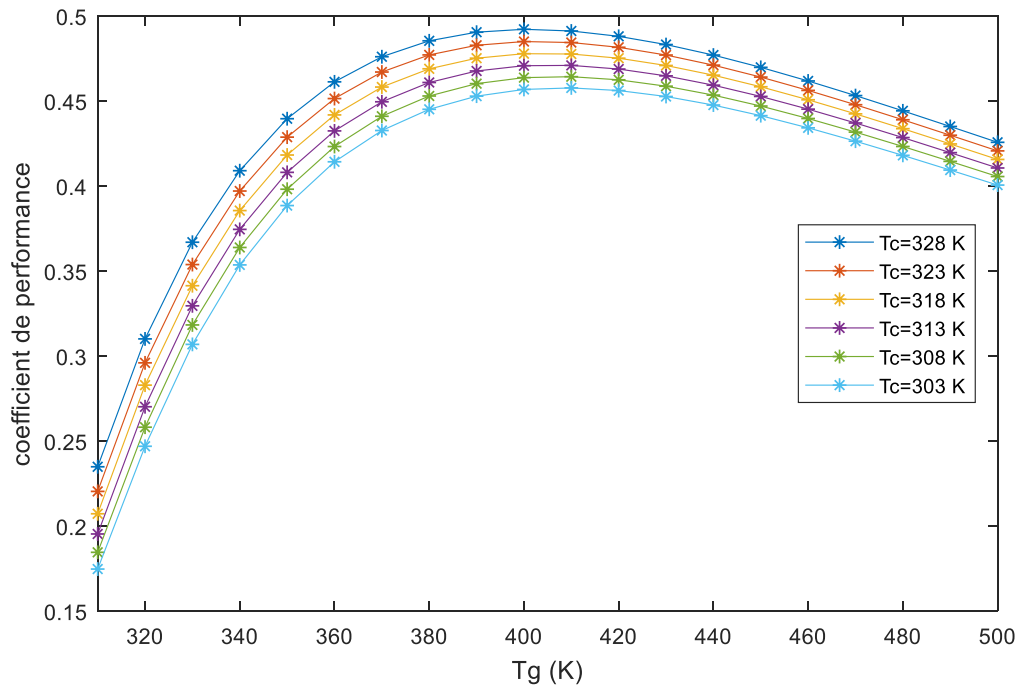


Figure 3.5 : influence de la température de condensation sur le coefficient de performance

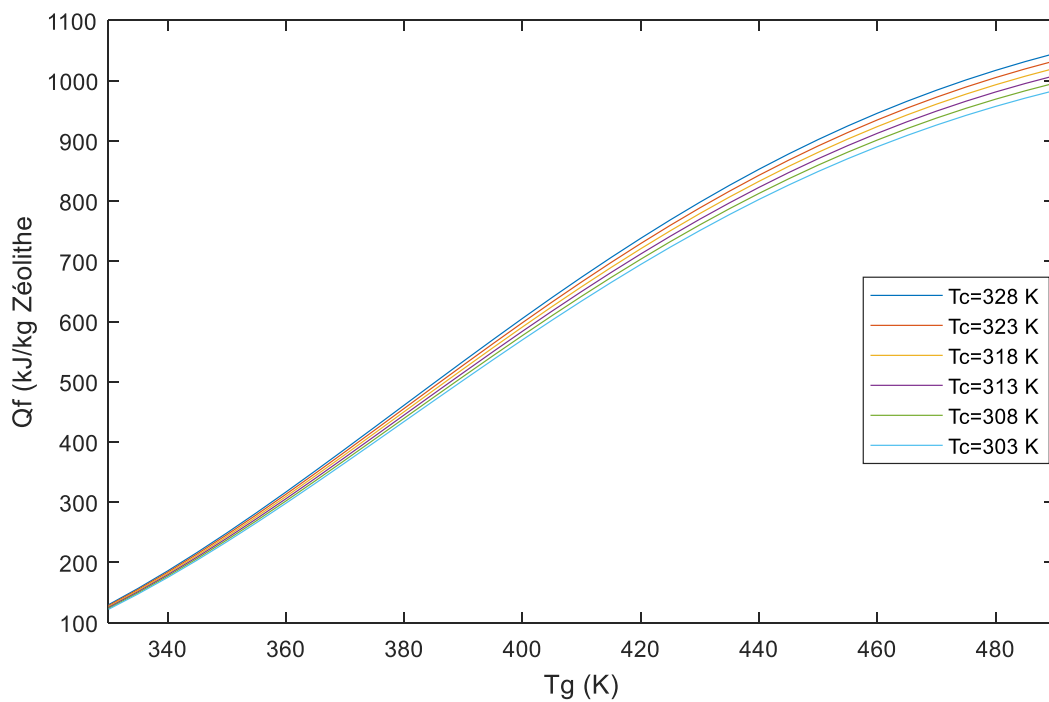


Figure 3.6 : Influence de la température de condensation sur la quantité de froid produite à l'évaporateur

3.2.3. Influence de la température d'évaporation

L'impact sur les performances du système est reconnu dans les figures (3.7) et (3.8). Nous montrons le comportement Q_f du COP en fonction de T_g et T_e , En fixant la température $T_c = 308.15 K$ et $T_a = 283.15 K$ en changeant T_e et T_g

En effet, une augmentation de la température d'évaporation T_e signifie une augmentation de la pression de saturation à cette température $P_s(T_e)$. Par conséquent, la masse d'eau adsorbée $m_{max}(T_e, P_s(T_e))$ augmente, ce qui signifie que la masse circulante donnée par l'équation Dubinin-Astakhov augmente, et donc, la capacité de refroidissement produite par l'évaporateur et le coefficient de performance du système augmentent

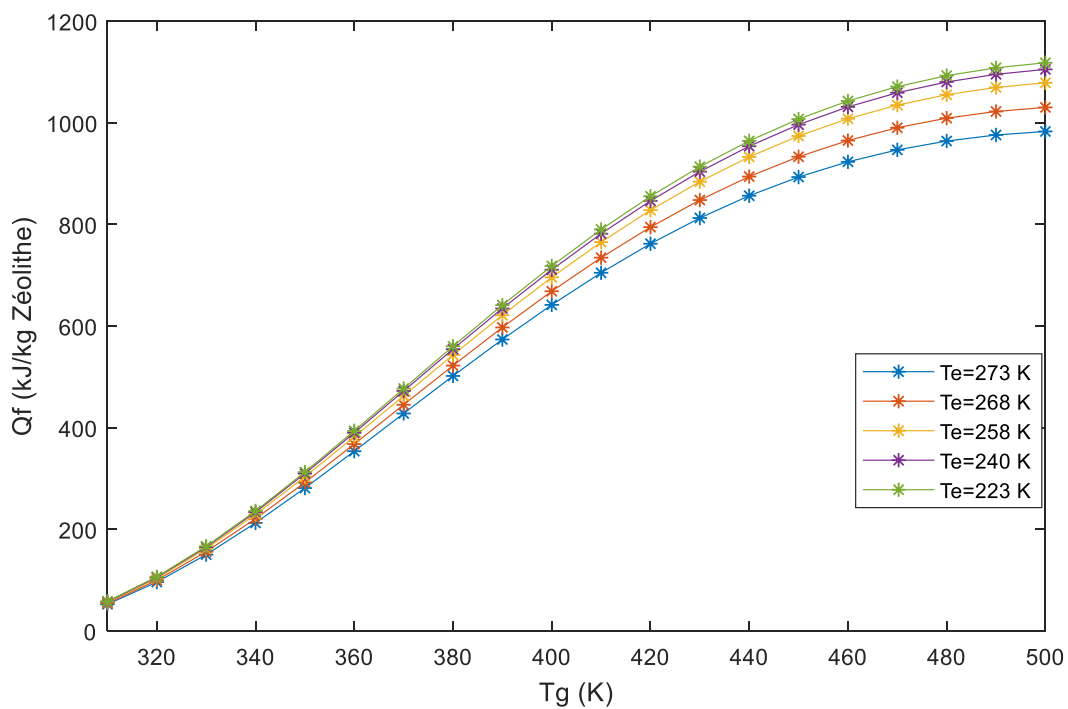


Figure 3.7 : Influence de la température d'évaporation sur la quantité de froid produite à l'évaporateur

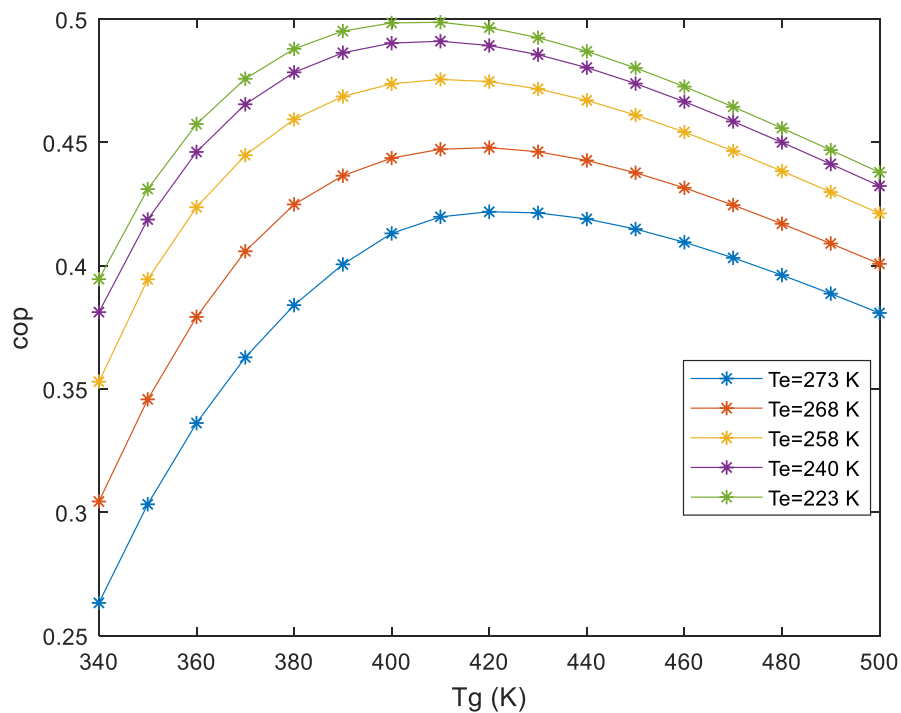


Figure 3.8 : Influence de la température d'évaporation sur le coefficient de performance

3.2.4. Influence de la température d'adsorption

Les figures (3.9) et (3.10) montrent l'effet de la température d'adsorption sur la capacité de refroidissement et le coefficient de performance COP de l'évaporateur Q_f , respectivement.

En fixant $T_e = 278.15$ K et $T_c = 308.15$ K et en changeant T_a et T_g . On voit que l'augmentation de T_a s'accompagne d'une diminution de COP du système, ainsi que de la capacité de refroidissement Q_f , car le chauffage à partir d'une température T_a plus basse nécessite beaucoup de chaleur, ce qui est important pour chauffer l'adsorbent à la température T_g de l'étage de chauffage, ce qui augmente la masse de désorption, ce qui signifie que l'équation (2.3) La masse du cycle donné sera réduite, donc le système et du système seront réduits.

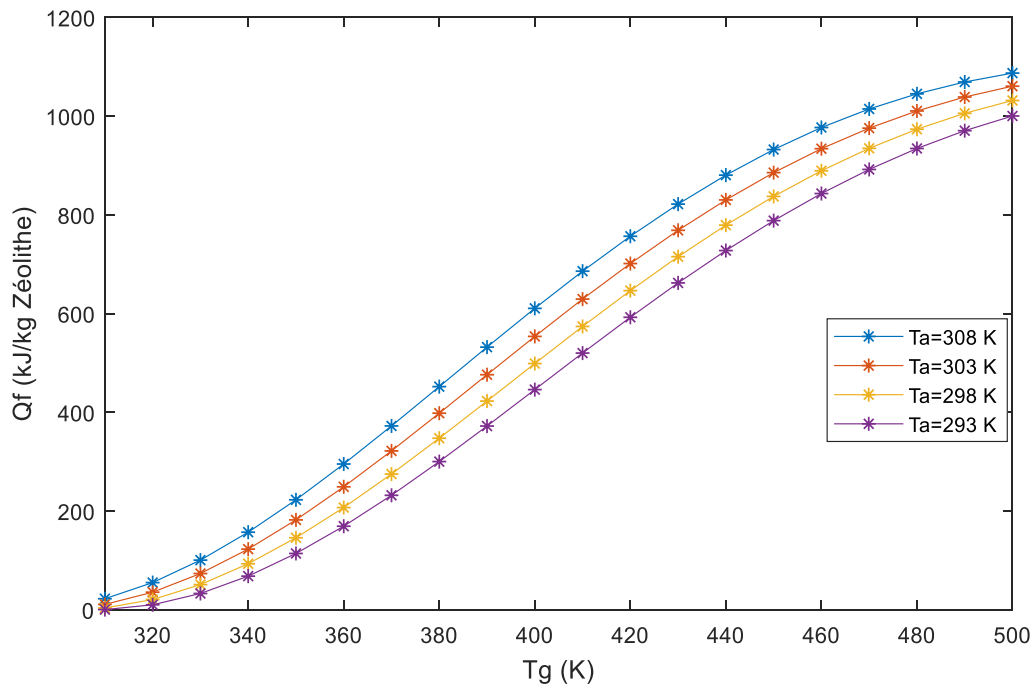


Figure 3.9 : Influence de la température d'adsorption sur la quantité de froid produite à l'évaporateur

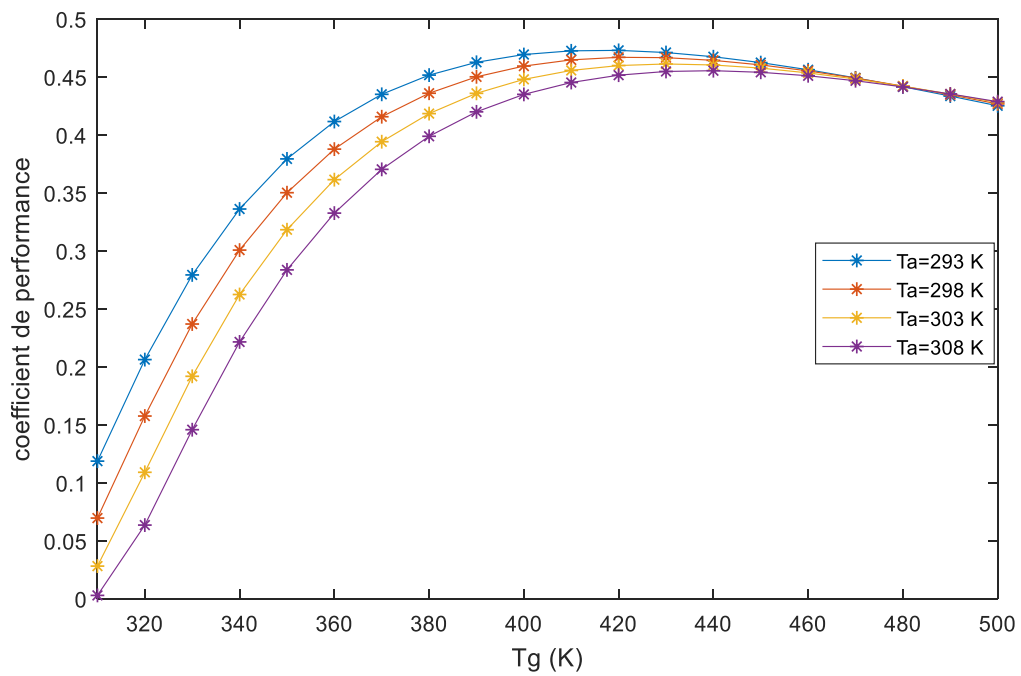


Figure 3.10 : Influence de la température d'adsorption sur le coefficient de performance

3.3. Conclusion

D'après notre étude on peut conclure que pour une température de condensation $T_c = 308.15 K$ et pour une température d'adsorption $T_a = 283.15 K$ et une température d'évaporation $T_e = 287.15 K$ on a pu avoir un $COP_{max} = 0,49$; qui représente un bon résultat comparé aux études faites sur le couple zéolithe-eau [19].

Donc on a fait un bon choix pour la climatisation, l'eau est proposée comme réfrigérant vue sa basse pression de vapeur ; mais si le système de froid est demandé en réfrigération, fonctionnant à pression supérieure à l'atmosphère, l'ammoniac est préférable.

La température du cycle d'un réfrigérateur à adsorption a une influence importante sur les performances de la réfrigération. Ainsi, le choix de ces paramètres peut être la clé principale pour optimiser la réfrigération par adsorption. Nous avons également vu beaucoup d'eau circuler avec notre Zéolithe13X/ $Al_2 O_3$.

Si l'on compare notre étude avec d'autres études citées dans le chapitre 1, on constate que le couple charbon actif-méthanol permet d'obtenir un meilleur COP, mais lorsque la température ambiante est très différente de la température de l'évaporateur, le couple Zéolithe13X/ $Al_2 O_3$ -eau est le meilleur choix.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les réfrigérateurs à adsorption peuvent répondre aux besoins de réfrigération dans une large plage de températures. Ils présentent de nombreux avantages (simplicité, fiabilité, utilisation de diverses sources d'énergie, etc.). Le but de ce travail était d'augmenter l'efficacité de la machine frigorifique en effectuant une analyse thermodynamique classique du bilan énergétique des quatre phases du cycle.

Notre objectif principal à l'aide de la modélisation mathématique est d'étudier le cycle fondamental de Clapeyron associé à un réfrigérateur à adsorption utilisant le couple Zéolithe13X/ Al_2O_3 -eau. Nous avons pu conclure que pour une température de condensation $T_c = 308.15 \text{ K}$ et pour une température d'adsorption $T_a = 283.15 \text{ K}$ et une température d'évaporation $T_e = 287.15 \text{ K}$, on a pu avoir un $COP_{max} = 0,49$; qui représente un bon résultat comparé aux études faites sur le couple zéolithe-eau

Parmi les paramètres les plus importants on peut citer : températures de fonctionnement du cycle (températures de condensation, d'évaporation, d'adsorption et de régénération). En effet, pour des températures d'adsorption, de condensation et d'évaporation fixées, nous avons montré qu'il existe un coefficient de performance thermique optimal, correspondant à une température de régénération optimale dans l'adsorbent. Cependant, la quantité de froid produite par l'évaporateur continue d'augmenter.

L'augmentation de la température de condensation et d'adsorption entraînera une diminution des performances thermiques. En revanche, une augmentation de la température d'évaporation entraîne une augmentation des performances thermiques de la machine.

Résumé

L'objectif de ce travail est l'analyse thermodynamique et l'optimisation du fonctionnement d'un réfrigérateur solaire à adsorption utilisant un couple zéolithe 13X/eau comme couple d'adsorption (adsorbant/adsorbat).

Afin d'optimiser le fonctionnement des réfrigérateurs à adsorption, il est nécessaire d'étudier et d'analyser le cycle Clapeyron de base associé à ces machines. Pour cela, nous avons développé un modèle numérique basé sur l'équation d'état semi-empirique du modèle de Dubinin d'une part et d'autre part certaines considérations visant à assurer l'optimisation, comme la nature de l'adsorbant/adsorbat sélectionné.

Le code de calcul développé a permis de comprendre l'effet de la température de fonctionnement sur l'efficacité de la machine.

Mots clés : adsorption solaire, couple zéolithe 13X/Al₂O₃-eau, réfrigérateur, coefficient de performance.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو التحليل الديناميكي الحراري وتحسين تشغيل ثلاجة الامتزاز الشمسي باستخدام الزيوليت / الماء كصمام ثنائي للامتصاص. من أجل تحسين تشغيل ثلاجات الامتزاز ، من الضروري دراسة وتحليل دورة كلايرون الأساسية ذات الصلة. تحقيقاً لهذه الغاية ، قمنا بتطوير نموذج أساسي يعتمد جزئياً على معادلة حالة دوبرين ، جنباً إلى جنب مع بعض الاعتبارات لضمان التحسين ، مثل خصائص الثنائيات المختارة.

سمح برنامج الحساب المصمم بتقييم تأثير درجة حرارة التشغيل على كفاءة الجهاز .

الكلمات المفتاحية: امتصاص شمسي ، زيوليت مزدوج س 13 أكسيد الألمنيوم / ماء ، ثلاجة ، معامل الكفاءة.

Abstract

L'objectif de ce travail est d'effectuer l'analyse thermodynamique et l'optimisation opérationnelle d'un réfrigérateur à adsorption solaire utilisant le couple zéolithe/eau 13X comme couple d'adsorption (adsorbant/adsorbat).

Afin d'optimiser le fonctionnement des réfrigérateurs à adsorption, il est nécessaire d'étudier et d'analyser les cycles de base de Clapeyron associés à ces machines. Pour ce faire, nous avons développé un modèle numérique basé sur l'équation d'état du modèle de Dubinin, d'autre part basé sur certaines considérations d'optimisation telles que la nature du couple adsorbant/adsorbat sélectionné

Les codes de calcul calculés permettent l'évaluation de l'effet de la température de fonctionnement sur l'efficacité de la machine.

Mots clés : adsorption solaire, couple zéolithe 13X Al₂O₃/eau, réfrigérateur, coefficient de performance.

*Références
bibliographiques*

Références bibliographiques

- [1] **B.Mebarki**, Etude et analyse d'un système de production de froid par énergie solaire pour la climatisation, mémoire de Magistère Université de Constantine1, Département de de Génie Climatique, 2013.
- [2] **E. Dahomé, F. Meunier**, Reversible and irreversible cycles of a chemical heat pump; application to the zeolite 13X/water system. Rev. Gén. Therm. 246, pp. 483-500, 1982.
- [3] **Abdelmoussehel ERROUGANI**. Thèse « fabrication et expérimentation d'un réfrigérateur solaire à adsorption utilisant le couple charbon actif-méthanol » dans le site de Rabat.2007
- [4] **R. Gaboriaud**, « Thermodynamique, Eléments fondamentaux de l'énergétique et de la cinétique chimique », Edition ellipses 1998
- [5] **A.Errougani**, Thèse de doctorat Fabrication et expérimentation d'un réfrigérateur solaire à adsorption utilisant le couple charbon actif-methanol dans le site de Rabat. Université Mohammed V – Agdal, Rabat, Département de physique, 2007
- [6] **Gaëtan Couderc**. Contribution à l'étude de l'adsorption binaire par les carbones non poreux et poreux. Neuchâtel : Thèse de l'Université de Neuchâtel, 2004.
- [7] **Mohammed Abdelbassat Slasli**, « Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux : Approches théorique et expérimental Neuchâtel : Thèse de l'Université de Neuchâtel, 2002.
- [8] **Evandro Ferreira Passos**. Etude des couples charbon actif-méthanol et de leur application à la réfrigération solaire. Lausanne : Thèse de l'école polytechnique fédérale de Lausanne, 1986.
- [9] **Sophie Lautrette**. Utilisation des Fibres de carbones activés comme catalyseurs de O et N-glycosylation. Application à la synthèse d'analogue de saponines et nucléosides. Lomoges : Thèse de l'Université de Limoges, 2004.
- [10] **M .Diny**, " Etude du fonctionnement d'une machine frigorifique a adsorption - modélisation des transferts de chaleur et de masse et optimisation du fonctionnement de la machine", Thèse de doctorat ,Université Henri Poincare, Nancy 1, (1996).
- [11] **M. Clause**, Etude d'un procédé d'adsorption T S A (Temperature Swing Adsorption) à chauffage et refroidissement indirects, thèse de Doctorat, Energie électrique, Conservatoire national des arts et métiers-CNAM, France, 2003.
- [12] **A.P.F.Leite et M. Daguinet**, Performance of a new solid adsorption ice maker with solar energy régénération, Energy Conversion and Management, 2000, Vol 41,pp 1625-1647
- [13] **J. BOUGARD**, "Thermodynamical and technical problems in solar adsorption refrigeration", I.I.F.-I.I.R.-Commissions BI, B2, El, E2-Purdue (D.S.A), pp. 25-32, (1986).

- [14] **M. DUPONT, J. J. GUILLEMINOT, F. MEUNIER, P. NGUYEN**, " Etude de glaciers solaires utilisant le cycle intermittent jour-nuit zéolithe 13X-eau en climat tempéré et en climat tropical", I.I.F.-I.I.R -commission EI, E2-Jérusalem (Israel), pp. 193-207, (1982).
- [15] **P. Grenier, F. Meunier, M. Pons**, "Les différentes possibilités d'application du couple zéolithe 13X-H2O pour le froid solaire en fonction du type de captation de l'énergie solaire", I.I.F.-I.I.R.-Commision EI-E2-Jérusalem (Israel), pp. 200-207.(1982).
- [16] **F. Meunier, B. Mischler**, " Solar cooling through cycles using microporous solid adsorbents", pp. 676-680.
- [17] **A. Adell**, "Description d'un réfrigérateur solaire à adsorption solide. Etude de son refroidissement en climat équatorial", Rev. Gen. Therm., Fr., n° 281, pp. 529-536, (1985).
- [18] **K. Abdellah, Ph. Grenier, N. Coron**, "Etude expérimentale des transferts couplés au sein d'un grain d'adsorbant solide", pp. 171-186.
- [19] **L.LUO**, "Etude thermodynamique et thermique de machine à cycle inverse à adsorption", Thèse de Doctorat INPL, Nancy, Novembre 1991.
- [20] **W. Chekirou**, "étude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption". Thèse de doctorat, Université Mentouri – Constantine, Département de physique, (2008).
- [21] **M. Dubinin, F. Stoeckli. J**, Colloid Interface Sci., Vo1.75, pp. 34, (1980).
- [22] **R. Boussehain**: "Caractérisation thermostatique et cinétique des phénomènes d'adsorption désorption de couples actifs-alcools", Thèse Doctorat d'état des Sciences de l'INPL, Nancy, Juin (1986).
- [23] **A. Oubiri**, Simulation numérique du refroidissement de l'adsorbeur solaire par convection, Université de Mohamed Khider-Biskra, Département de Génie Mécanique, Juin 2012.
- [24] **C. Farhane**, Etude et comparaison de deux circuits frigorifiques avec et sans nanofluides, Université Badji Mokhtar- Annaba, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département d'Electromécanique, 2019.
- [25] **Lap-Keury Lee and D. M. Ruthven** "Analysis of thermal effects in adsorption rate measurements",
- [26] **A. Adell**, Réfrigération solaire à adsorption : choix du meilleur couple d'adsorption, Revue de Physique Appliquée, pp1005-1011, 1984.
- [27] **M. Feidt**, Production de froid et revalorisation de la chaleur : machines particulières, Technique de l'ingénieur, be8096 pp2-11, 2008
- [28] **A. Mimet**. Etude théorique et expérimentale d'une machine frigorifique à adsorption d'ammoniac sur charbon actif, thèse de doctorat. FPMS Mons, Belgique 1991.
- [29] **E. Passos**, Etude des couples Charbon actif – Méthanol et de leur application à la réfrigération solaire PhD. Thesis, federal Polytechnic College of Lausanne, Switzerland, 1986.