République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université M'hamed BOUGARA, Boumerdes
Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Ecole Doctorale en Energétique et Développement Durable

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister

OPTION

Management **d**es **P**rojets **E**nergétiques

Etude Expérimentale de Production Frigorifique par Adsorption Solide : Application à la Conception d'une Plateforme de Trigénération à partir de Biomasse en Milieu Rural

Présenté par : **Hamza MOUSSA BENABDELLAH**

Soutenu le : 29 octobre 2011

Examinateurs :

Jean-Félix DURASTANTI	**Maître de Conférences**	**Univ-Paris XII**	**Président**
Mohand TAZEROUT	**Professeur**	**EMNantes**	**Examinateur**
Mourad BALISTROU	**Maître de Conférences A**	**UMBB**	**Examinateur**
Jean-Castaing LASVIGNOTTES	**Maître de Conférences**	**Univ-Pau**	**Directeur de mémoire**
Madjid HACHEMI	**Maître de Conférences A**	**UMBB**	**Co-Directeur**

Année Universitaire 2010/2011

Remerciments

Je tiens tout d'abord à m'incliner devant la majesté du TOUT PUISSANT, Lui seul pourra nous donner la force d'accomplir tant de choses. Louange à toi.

Je tiens à tout d'abord à remercier tous ceux qui ont contribué de loin ou de près, à ce que ce cursus se tienne dans de bonnes conditions.

Je tiens aussi à remercier Mr. Mohand TAZEROUT et Mr. Mourad BALISTROU pour leur dévouement à ce que ce cursus se déroule dans les meilleures conditions.

Sans oublier, tous les enseignants qui nous ont accompagnés durant cette formation et dont nous avions profité pleinement de leurs connaissances.

A mon encadreur, Mr. Jean-Castaing LASVIGNOTTES pour son engagement pendant toute la durée de ce travail, je lui exprime toute ma reconnaissance.

Je voudrais à cette occasion, remercier les membres du jury pour le temps qu'ils vont consacrer quant à l'examen de ce manuscrit.

A tous mes chers camarades que j'ai côtoyé pendant ces trois années à Boumerdes ; je tiens à leurs présenter toute ma sincère gratitude et hommage pour tous les moments que nous avions passé ensemble.

Dédicace

Il existe dans le monde des êtres chers, à qui nous leurs devons presque tout, et qui compte beaucoup pour nous ; et rien ne pourrait être accompli pour leur rendre tout ce qu'ils nous ont apporté dans la vie.

Je voudrais dédier ce modeste travail à :

Mes Parents,

Mes frères,

Toute ma grande famille,

Ainsi qu'à tous mes amis de Khemis Miliana.

Résume

Les machines frigorifiques à adsorption sont des machines qui font intervenir un phénomène d'adsorption physique. L'objectif de cette étude est l'étude de faisabilité de production du froid d'un équipement de micro-trigénération. Un tel système suscite beaucoup d'intérêt économique et environnemental.

La modélisation et la simulation numérique par logiciel EES (Engineering Equation Solver) de la machine tritherme a été réalisé.

L'expérimentation menée sur un prototype de machine frigorifique à adsorption a permis de valider les résultats de la simulation pour le couple zéolithe/eau.

Mots clés: production frigorifique, adsorption, milieu poreux, biomasse, zéolithe, micro-trigénération.

Abstract

The adsorption chillers are machines that involve a phenomenon of physical adsorption. The objective of this study is the study of feasibility of production of cold from micro-trigeneration equipment. Such a system raises many economic and environmental benefits.

Modeling and digital simulation with EES software (Engineering Equation Solver) of tritherme machine was made.

An experiment conducted on a prototype of adsorption refrigeration machine was used to validate the simulation results for the couple zeolite / water.

Keywords: refrigeration, adsorption, porous medium, biomass, zeolite, micro-trigeneration.

ملخص

آلات التبريد بالامتصاص هي آلات تعمل بظاهرة الامتصاص الفيزيائي. الهدف من هذه الدراسة هو دراسة جدوى هذه الآلات لتوليد البرودة من أجل استخدامها لتزويد ميكرو ثلاثي الطاقة, مثل هذه الآلة تعتبر في غاية الأهمية من الناحية الاقتصادية و غير مضرة للبيئة في آن واحد.

دراسة نموذج و محاكات الرقمية استخدام برنامج EES قد تمت لآلة ثلاثي الحراريات.

التجارب التي أجريت على نموذج أولي لجهاز التبريد بالامتزاز استخدمت للتحقق من صحة نتائج المحاكاة للزوجين الزيوليت / الماء.

الكلمات الرئيسية: تبريد، امتزاز، وسط مسامي، كتلة الحيوية، زيوليت، تزويد ميكرو ثلاثي الطاقة.

Tables des matières

TABLES DES MATIERES ..... **II**

NOMENCLATURE ..... **VII**

LETTRES GRECQUES VII

LES INDICES VII

TABLE DES FIGURES ..... **IX**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XI**

PRESENTATION DE L'ONG PLANETE BOIS **1**

PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL **2**

INTRODUCTION GÉNÉRALE **4**

CHAPITRE I PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES À ADSORPTION **7**

I.1. INTRODUCTION 8

I.2. LE PHENOMENE D'ADSORPTION 9

I.3. COUPLES ADSORBANTS-ADSORBATS 10

I.3.1. Couple zéolithe-eau *11*

I.3.2. Couple charbon-actif-méthanol *12*

I.3.3. Couple gel de silice-eau *14*

I.3.4. Couple charbon-actif- ammoniac *14*

I.4. CHOIX DU COUPLE 15

I.5. CYCLE FRIGORIFIQUE 15

I.5.1. Phase de chauffage *16*

I.5.2. Phase de refroidissement *18*

CHAPITRE II MODÉLISATION **20**

II.1. FONCTION ET EQUATION D'ETAT 21

II.2. MODELE DE DUBININ 23

II.3. MODELISATION DU CYCLE 26

II.3.1. Méthode de modélisation *31*

II.3.2. Influence de la température d'adsorption et de condensation *32*

II.3.3. Influence de la température d'adsorption et d'évaporation *35*

II.3.4. Etude de sensibilité paramétrique et optimisation *38*

CHAPITRE III EXPÉRIMENTATION 41

III.1. DESCRIPTION DU BANC EXPERIMENTAL 42

III.2. MISE EN MARCHE 45

III.3. RESULTATS ET DISCUSSION 45

III.3.1. Évolutions principales 46

III.3.2. Diagramme de Clausius-Clapeyron 52

III.3.3. Influence des pertes de charges 54

CONCLUSION GÉNÉRALE 55

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 57

ANNEXES 63

ANNEXE A : MATERIEL EXPERIMENTAL 64

A.1. Instrumentation de mesures 64

A.2. Vannes et éléments de liaisons 65

A.3. Pompe à vide 68

A.4. Centrale d'acquisition 68

Nomenclature

Cp	chaleur massique, [J/kg.K]
H	chaleur de sorption, [J/kg]
Q	énergie, [J]
Q_c	énergie de condensation du fluide frigorigène, [J]
Q_e	énergie d'évaporation du fluide frigorigène, [J]
Q_{gc}	énergie de production de glace, [J]
Q_T	énergie totale reçue par le système, [J]
L	chaleur latente, [J/kg]
m	masse, [kg]
x_{max}	concentration maximale d'adsorbat en fluide frigorigène, [kg fluide frigorigène/kg adsorbant]
x_{min}	concentration minimale d'adsorbat en fluide frigorigène, [kg fluide frigorigène/kg adsorbant]
T	température, [K]
P	pression, [Pa]

Lettres grecques

η_g	efficacité du générateur
η_e	efficacité de l'évaporateur

Les indices

1, 2, 3, 4	points du diagramme de Clausius-Clapeyron
a	adsorption
ad	adsorbant
ads	adsorption
c	condensation
des	désorption
e	évaporation
ff	fluide frigorigène (adsorbat)
g	régénération
gc	glace
l	liquide

sa	seuil d'adsorption
sat	saturation
sd	seuil de désorption
v	vapeur

Table des figures

Figure 1 - Principaux adsorbants (de gauche à droite) Charbon actif ; Zéolithe ; Gel de silice 10
Figure 2 - Structure de la faujasite (zéolithe type X et Y) 11
Figure 3 - Sachet de gel de silice 14
Figure 4 - Cycle d'une machine frigorifique à adsorption 16
Figure 5 - Phase de chauffage 18
Figure 6 - Phase de refroidissement 19
Figure 7 - Les différents types d'isothermes d'adsorption 22
Figure 8 - Equilibres liquide/vapeur et liquide/solide du couple zéolithe/eau 26
Figure 9 - Cycle d'une machine frigorifique à adsorption 27
Figure 10 - Cycle permettant de calculer la chaleur de désorption et d'adsorption 28
Figure 11 - Cycle permettant de calculer la chaleur latente de condensation et d'évaporation 30
Figure 12 - Cycle explique la méthode de modélisation 31
Figure 13 - Influence de la température de condensation sur le coefficient de performance COP 33
Figure 14 - Influence de la température de condensation sur la quantité de froid produite à l'évaporateur Qe 34
Figure 15 - Influence de la température de condensation sur le coefficient de performance selon Anyanwu [36] (Te=0 °C, Tads=35 °C) 35
Figure 16 - Influence de la température d'évaporation sur le coefficient de performance COP 36
Figure 17 - Influence de la température d'évaporation sur la quantité de froid produite à l'évaporateur Qe 37
Figure 18 - Evolution de COP, capacité de refroidissement, apport de chaleur requis et taux de diminution de l'adsorption en fonction de température de régénération (T_c=35 °C et T_e=0 °C) 39
Figure 19 - Générateur (adsorbeur/désorbeur) 42
Figure 20 - Evaporateur-condenseur 43
Figure 21 - Unité de test expérimentale 44
Figure 22 - Principe de fonctionnement de prototype utilisé 45
Figure 23 - Évolution expérimentale des températures dans le générateur pendant un cycle .. 47
Figure 24 - Évolution expérimentale des températures dans le condenseur-évaporateur pendant un cycle 47
Figure 25 - Évolution expérimentale de la pression du systèmependant un cycle 48
Figure 26 - Production de froid au niveau de l'évaporateur 49
Figure 27 - Températures de générateur en fonction du temps. Simulation par rapport aux résultats expérimentaux 50
Figure 28 - Profiles des températures dans plusieurs positions dans un générateur à zéolithe NaX/eau en fonction du temps. Position 1–5 températures dans déférents positions à

l'intérieur de générateur, position 6 est la température sur la face extérieure générateur selon Jänchen et al. [47] 51
Figure 29 - Résultats expérimentales des températures de condenseur-évaporateur dans plusieurs posions selon Li et al. [49] 52
Figure 30 - Cycle obtenue expérimentalement dans le diagramme de Clausius-Clapeyron 53
Figure 31 - Cycle obtenue expérimentalement par Wu et al. [54] 54
Figure 32 - Thermocouple de type K 64
Figure 33 - Capteur de pression Thyracont VD85 65
Figure 34 - Vanne Edward 65
Figure 35 - collier de serrage 66
Figure 36 - Joint torique 66
Figure 37 - Graisse à vide 67
Figure 38 - Tuyau flexible 67
Figure 39 - Pompe à vide 68
Figure 40 - Centrale d'acquisition 68

Liste des tableaux

Tableau 1 - Principales caractéristiques physiques des adsorbants [23] 11
Tableau 2 - Températures typiques du cycle [26] 38

Présentation de l'ONG Planète Bois

Ce projet est soutenu par L'ONG française Planète Bois dirigée par Madame Françoise Strub. Cette organisation a pour activité le transfert de technologie vers les pays en développement. Plus précisément, elle développe des systèmes permettant de répondre aux besoins énergétiques des sites ruraux et isolés des pays de l'Asie du Sud Est ou de l'Afrique équatoriale.

Les groupes électrogènes, les panneaux photovoltaïques et les gazogènes sont aujourd'hui les seules technologies permettant de satisfaire les besoins d'électricité, de froid et de chaleur dans ces régions. Ces équipements sont peu performants ou polluants, et souvent d'un coût d'usage élevé. Par ailleurs, dans ces pays, la ressource en biomasse sèche est abondante et renouvelable. De plus, son utilisation est soutenue par de nouveaux organismes financiers tels que les crédits carbones.

L'énergie bois représente 90% de l'énergie primaire des pays en voie de développement. Mais cette ressource est souvent brûlée dans des foyers ouverts à très faible rendement et on estime à 1 Gigatonne l'émission annuelle de CO_2 qui en résulte. L'association Planète Bois met donc au point et diffuse des équipements bois énergie à haute valeur énergétique et environnementale, dans le but de pouvoir lier la préservation des forêts et le développement de l'économie dans les pays pauvres.

Planète Bois a mis en place au Cambodge un foyer biomasse performant CLIP (Combustion Latérale Inversée Performante) et souhaite maintenant proposer un équipement de micro-trigénération permettant de produire en simultanée de l'électricité du froid et de la chaleur. L'objectif visé par l'association est de permettre à la population locale de créer des glaçons pour conserver des aliments ou des médicaments. Cette association s'est tournée vers le LaTEP pour évaluer la faisabilité de la production frigorifique par une voie à sorption. Celui-ci a alors envisagé de répondre à cette demande au travers un stage de Master sur le sujet.

Présentation de la structure d'accueil

Le stage s'est déroulé au niveau du Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés (LaTEP) de l'Université de Pau et des Pays de L'Adour (UPPA), sous la direction du maitre de conférences Jean-Castaing Lasvignottes. Le LaTEP est un laboratoire jeune, né en 2003. Il réunit au sein de l'Université de Pau les chercheurs spécialistes de transferts thermiques et de transferts de matière, d'énergétique et de génie des procédés. Tous ces enseignants ont leurs activités pédagogiques dans les différentes formations de l'UPPA relevant de la spécialité.

Le professeur Pascal Stouffs est le directeur du LaTEP et Silvia Alexandrova est directrice adjointe. L'effectif du Laboratoire comprend 24 chercheurs et enseignants-chercheurs permanents et 13 doctorants. Le LaTEP a des partenariats industriels avec ALSTOM, EDF, GDF Suez, France TELECOM, IFP, PROSIM, TOTAL, VEOLIA..., et institutionnels avec l'ADEME, l'ANR, le CNRS, le Conseil régional Aquitaine...

Les compétences scientifiques du LaTEP reposent sur l'expérimentation, la modélisation et la simulation en :

- Thermodynamique des procédés et des systèmes énergétiques
- Transferts multiphasiques
- Changement de phase
- Intensification des transferts et couplages de procédés

Les compétences applicatives du LaTEP portent principalement sur le stockage thermique, les coulis de glace, le rafraîchissement et le froid solaire, la micro-cogénération à partir d'énergie fossile, solaire ou biomasse par moteur Stirling ou Ericsson, le traitement des gaz et des déchets, la qualité de l'air confiné et la biofiltration, l'oxydation hydrothermale, la déshydratation des boues, l'absorption réactive, la pyrolyse et la distillation réactive.

Les thèmes de recherche au sein du LaTEP sont axés comme suit :

- Analyse des systèmes énergétiques
- Stockage et distribution de l'énergie
- Intensification des procédés
- Transport de particules, traitement de l'air et des effluents gazeux
- Valorisation des déchets
- Modélisation et simulation des transports en milieux poreux.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Presque 3 milliards de personnes dans le monde entier utilisent la biomasse comme ressource énergétique [1], et libèrent 2 milliards de tonnes de CO_2 par an [2]. Parmi cette population, 2 milliards n'ont accès ni à l'électricité, ni au gaz, ni au pétrole [3]. La plupart de ces derniers habitent en milieu rural des pays en développement (PED).

Dans ces régions du monde où il n'y a pas une alimentation fiable en électricité, il y a une large demande de réfrigération pour la conservation des aliments et le stockage des produits médicaux. Les systèmes de réfrigération conventionnels à compression mécanique, nécessitent une alimentation fiable en électricité, qui n'est disponible que dans les zones urbaines [4].

Dans ce contexte, la gestion durable de la biomasse-énergie est indispensable. Il s'agit d'utiliser le potentiel élevé de la biomasse pour produire le froid avec des systèmes économiques à haute performance énergétique de combustion. Afin de protéger l'environnement le système doit répondre aux critères du protocole de Montréal relatif à l'appauvrissement de la couche d'ozone et le protocole de Kyoto sur le réchauffement de la planète [5].

Une grande partite de la production de froid est réalisée grâce aux machines frigorifiques traditionnelles à cycle thermodynamique à compression, appelé aussi cycle ditherme. Une machine ditherme, pompe la chaleur d'une source froide et la rejette dans une source chaude. Pour réaliser cette opération, cette machine doit consommer un travail mécanique. Les machines trithemes nécessitent une troisième source de chaleur, remplaçant le travail du compresseur. Au cours des 15 dernières années, des nouveaux procédés ont été développés, basés sur des processus physico-chimiques réversibles, comme les systèmes à adsorption [6], les systèmes à absorption [7], et les systèmes à chimisorption [8].

Ce projet est soutenu par l'organisation non gouvernementale française "Planète Bois". Cette organisation a pour activité le transfert de technologie vers les pays en développement. Plus précisément, elle développe des systèmes permettant de répondre aux besoins énergétiques des sites ruraux et isolés des pays de l'Asie du Sud Est ou de l'Afrique équatoriale, où le bois représente 90% de l'énergie primaire consommée.

Le projet concerne l'étude et la validation du principe de la partie production de froid de l'équipement micro-trigénération que souhaite réaliser Planète Bois. Le but sera de

dimensionner une installation utilisant le principe de l'adsorption et qui soit capable de produire de la glace. Un premier prototype a été réalisé pour comparer différents couples solide/fluide frigorigène, charbon actif/méthanol, et zéolithe/eau [9].

De nombreux chercheurs ont tenté et réussi à concevoir et à construire des systèmes pratiques. Par exemple, Pons et Guilleminot [10], Guilleminot et Meunier [11], Critoph et al. [12], etc. Les thèmes de recherche actuellement poursuivis concernent :

- les différentes phases de travail ;
- le cycle thermodynamique ;
- l'évaluation du COP.

Nous proposons dans ce contexte de présenter dans un premier temps le principe de fonctionnement des machines à adsorption. Un deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des équilibres mis en jeu ainsi que du système complet. Une troisième partie traitera du montage expérimental que nous avons utilisé dans nos essais permettant de valider le modèle

CHAPITRE I
PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MACHINES À ADSORPTION

L'objectif de ce chapitre est de faire une analyse générale sur les installations frigorifiques à adsorption, citant les principaux couples utilisés, et le principe de fonctionnement de ces machines, afin de faciliter l'étude de ses performances et de mieux comprendre les spécificités du cycle envisagé.

I.1. Introduction

L'adsorption a été utilisée dès l'Antiquité, où les propriétés adsorbantes de solides poreux tels que les argiles ou le charbon étaient déjà connues, pour la purification d'huiles ou la désalinisation d'eau par exemple.

En 1777, Fontana (1730-1805), physicien et naturaliste italien, avait remarqué que le charbon fraîchement calciné puis refroidi était capable d'adsorber plusieurs fois son propre volume de différents gaz. Le chimiste suédois Scheele (1742-1786) a constaté que l'air qui se dégage du charbon lorsqu'on le chauffe, peut être piégé à nouveau en refroidissant le solide. C'est en 1814, que Saussure introduit la notion de surface spécifique exposée puis Mitscherlich introduit celle de volumes poreux en 1843.

Le terme "adsorption" est introduit par Kayser en 1881, pour décrire le phénomène de condensation d'un gaz sur une surface, par opposition au terme d'absorption qui fait référence à une molécule de gaz qui pénètre dans un solide sans interagir. On commence alors à parler d'isothermes d'adsorption pour une série de points donnant la quantité adsorbée sur un solide en fonction de la pression, à température maintenue constante. La première relation décrivant une courbe d'adsorption est proposée en 1907 par Freudlich. Puis Langmuir introduit le concept de couche adsorbée monomoléculaire, un concept à la base de la détermination de la surface développée par un solide.

Les cycles thermiques par adsorption ont existé dans la littérature depuis au moins 1909, et les réfrigérateurs étaient disponibles sur le marché dans les années 20. Au début du 20 ème siècle, la réfrigération par adsorption est fréquemment utilisée. Puis plus tard, avec le développement des compresseurs et des moteurs électriques bon marché, l'amélioration des rendements des centrales électriques et l'introduction de CFC dans les années 30, la réfrigération par adsorption devient une technologie de niche.

Ces dernières années, il y a eu un intérêt grandissant pour cette technologie. Les principales raisons en faveur des systèmes à adsorption sont la longue durée de vie, la faible nuisance sonore, les faibles coûts de maintenance et le faible impact sur l'environnement. Le problème écologique qui concerne les émissions de CFC par les unités de réfrigération a stimulé de nombreuses études théoriques et expérimentales sur les systèmes de froid par adsorption. L'avantage principal de l'adsorption est qu'elle utilise des réfrigérants non

polluants et des sources d'énergies renouvelables comme le solaire ou le gaz naturel issu de la biomasse. Les machines à adsorption sont aussi intéressantes car elles peuvent opérer à des niveaux élevés de température où les systèmes à absorption liquide ne fonctionnent pas.

Aujourd'hui il existe des groupes comme Solaref (groupe de commerce coopératif approuvé par l'ONU) qui tente d'installer des systèmes solaires de production de froid par adsorption au Maroc, au Burkina Faso et en Erythrée.

I.2. Le phénomène d'adsorption

L'adsorption est le processus au cours duquel les molécules d'un fluide (gaz ou liquide), appelé adsorbat dans le cas général ou fluide frigorigène dans les procédés de production de froid, se fixent sur la surface d'un solide appelé un adsorbant. Le terme surface du solide correspond à la totalité des surfaces externes et internes engendrées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur de l'adsorbant.

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 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 [13]. Dans le cas d'adsorption physique appelée aussi physisorption, le processus résulte par 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. Seule l'adsorption physique sera abordée dans ce travail.

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.

I.3. Couples adsorbants-adsorbats

Il existe quatre principaux couples adsorbants/adsorbats utilisables pour produire du froid : zéolithe/eau [14-15], charbon actif/méthanol [16-20], gel de silice/eau [21] et charbon actif/ammoniac [22].



Figure 1 - Principaux adsorbants (de gauche à droite) Charbon actif ; Zéolithe ; Gel de silice

Tableau 1 - Principales caractéristiques physiques des adsorbants [23]			
Adsorbant	***Surface spécifique*** $(m^2.g^{-1})$	***Taille des pores (nm)***	***Porosité interne***
Charbons actifs	*400 à 2 000*	*1.0 à 4.0*	*0.4 à 0.8*
Zéolites	*500 à 800*	*0.3 à 0.8*	*0.3 à 0.4*
Gels de silice	*600 à 800*	*2.0 à 5.0*	*0.4 à 0.5*

I.3.1. Couple zéolithe-eau

Les zéolithes sont des cristaux poreux d'aluminosilicates d'origine naturelle. La structure primaire consiste en un assemblage de tétraèdres de SiO_4 et d'AlO_4 [24]. Ces éléments s'assemblent par la mise en commun d'atomes d'oxygène pour former une construction secondaire qui peut être sous forme de cubes, d'octaèdres, etc. L'arrangement final de la zéolithe consiste en un assemblage de ces unités secondaires en une combinaison cristalline régulière comme représenté sur la Figure 2 pour la faujasite qui est la structure des zéolithes de type X et Y. La zéolithe de type X a un rapport Si/Al de 1 à 1.5 alors que pour la Y ce rapport est de 1.5 à 3.0.

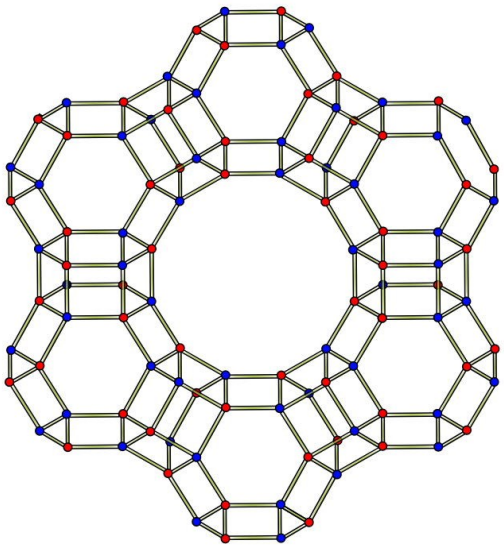


Figure 2 - Structure de la faujasite (zéolithe type X et Y)

Les zéolithes se présentent sous forme de billes brunes/blanches ou de poudre. Elles sont capables d'adsorber des molécules organiques et minérales en phase gaz sans aucune modification structurale. Cette adsorption est due à leurs surfaces spécifiques élevées (Tableau 1), à des effets de surface hydrophobe-hydrophile et à leurs structures. Certaines zéolithes 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 leurs volumes. La régénération a lieu en éliminant l'eau par des effets de pression et/ou de température. Dans d'autres conditions de mise en œuvre, l'eau adsorbée est restituée naturellement lorsque le milieu est trop sec.

Dans le domaine de la production de froid, la zéolithe de type 13X (porosité 13 angström) est la plus utilisée, elle se présente sous forme de billes de 1.5 à 2.5 mm et se compose de 15 à 20% d'argile. Cette zéolithe qui contient initialement 25% d'eau, est activée par chauffage dans un four à 360 °C. Si celle-ci est bien activée, elle produit une réaction très exothermique lorsqu'on la plonge dans l'eau. C'est ainsi qu'on vérifie la bonne activation du produit en mesurant l'augmentation de température de l'eau due à la réaction. Les zéolithes ne présentent aucun danger particulier. Elles peuvent se détériorer au contact de solutions basiques ou acides.

L'eau est un frigorigène parfaitement sûr pour l'homme, disponible, possède de bonnes propriétés thermiques mais sa pression de fonctionnement est faible et inférieure à la pression atmosphérique (20-80 mbar) [25], ce qui nécessite des équipements spéciaux pour éviter les entrées d'air extérieur.

Sa gamme de température de production de froid est réduite (0-10 °C), et ne peut donc pas être utilisée dans des applications de congélation, mais reste bien adaptée pour la climatisation et la production du froid. Plus généralement, l'eau est un fluide "idéal" d'un point de vue de sa toxicité et de son empreinte environnementale.

I.3.2. Couple charbon-actif-méthanol

Le charbon est dit "actif" parce que l'on a créé une porosité à l'intérieur du charbon grâce à de l'acide phosphorique ou de la vapeur d'eau. Ce qui est différent de la zéolithe qui est dite "activée" lorsque l'eau est désorbée. Les charbons actifs sont des carbones que l'on a préparé afin d'accroître leur pouvoir adsorbant. En effet ils peuvent être obtenus à partir d'un grand

nombre de matériaux carbonés (bois, charbon, noix de coco, résidus pétroliers, etc.), par des processus de carbonisation suivis des processus d'activation dûment contrôlés.

Le charbon actif ou charbon activé est une poudre noire, légère, très salissante, constituée essentiellement de matière carbonée à structure microporeuse. C'est, en fait, une sorte de charbon de bois présentant une très grande surface spécifique qui lui confère un fort pouvoir adsorbant. La surface développée par le charbon actif est élevé : un gramme de charbon actif a une surface spécifique comprise entre 400 et 2000 m² (Tableau 1). Il est hydrophobe. L'adsorption des gaz nécessite des pores de 1 à 2 nm, alors que des pores de 2 à 10 nm suffisent pour l'adsorption des liquides.

Le méthanol (CH_3OH) est un gaz toxique, incolore, et alcalin. Dans des conditions de température et de pression normale, la chaleur latente d'évaporation est importante et est presque égale à la moitié de celle de l'eau et son point d'ébullition est d'environ 65 °C. Sa gamme de température pour produire le froid est comprise entre -15 °C et 10 °C, ce qui en fait un fluide frigorigène intéressant. Les molécules de ce fluide sont petites, de l'ordre de 4 A°, pouvant être facilement adsorbées dans les micropores du charbon actif. La pression de fonctionnement est faible (5 mbar à 100 mbar), comme l'eau, le méthanol nécessite des équipements spéciaux pour éviter les entrées d'air extérieur.

Tout comme la zéolithe, le charbon actif est très présent dans le domaine de la production du froid. Il se présente sous forme de poudre de 15 à 25 particules par µm, granulés tamisés de 4 à 20 mailles, soit environ 0.3 mm à 0.8 mm de diamètre ou granulés extrudés de 4 à 6 mm de longueur et fibres. L'énergie de liaison adsorbat/adsorbant est généralement plus faible pour le charbon actif que pour les autres adsorbants, ce qui diminue la quantité d'énergie nécessaire pour la phase de régénération.

Le charbon actif présente une faible sélectivité (capacité à séparer deux composés) par rapport aux autres adsorbants, du fait de sa large distribution de tailles de pores. Cependant cette grande distribution permet d'adsorber de nombreuses espèces chimiques, et en particuliers beaucoup de composés organiques volatils (COV).

I.3.3. Couple gel de silice-eau

Le gel de silice ($SiO_2.nH_2O$) est une silice synthétique amorphe, dont la structure des pores, créée par l'agglomération des microparticules sensiblement sphériques de dimension à peu près uniforme, est comprise entre 2 et 20 nm. Cette structure est responsable de la très grande surface spécifique, typiquement 500-800 m^2/g (Tableau 1). Il est hydrophobe et son pH est alcalin et présente l'avantage d'adsorber l'humidité. Il est présent dans certains bouchons dessiccateurs mais est aussi utilisé de manière générale comme agent asséchant pour les caméras, les films, les chaussures, etc. Dans ces cas-là, il est enfermé dans de petits sachets de papier poreux (Figure 3).



Figure 3 - Sachet de gel de silice

Le gel de silice a une grande capacité d'adsorption de l'eau (400 g/kg) à une pression de vapeur d'eau proche de la saturation, donc il est largement utilisé avec l'eau comme couple pour la production du froid.

I.3.4. Couple charbon-actif- ammoniac

L'ammoniac (NH_3) est un fluide frigorigène présentant une chaleur latente d'évaporation et une conductivité thermique élevée, sa pression de fonctionnement est importante et supérieure à la pression atmosphérique dans le domaine de notre étude, ce qui peut être retenu comme avantage. La gamme de température de production de froid est large (-50-10 °C). Cependant,

il est toxique et très dangereux car formant avec l'air un mélange explosif et peut donner lieu à des réactions chimiques avec les matériaux de construction de la machine tels que le cuivre. Donc, il nécessite pour son emploi, l'utilisation des matériaux résistants comme l'acier inoxydable.

I.4. Choix du couple

Il est largement identifié que l'un des problèmes les plus significatifs dans la conception d'une machine frigorifique à adsorption est le choix du couple adsorbant/adsorbat approprié [26]. En effet, plusieurs couples ont été utilisés dans ce genre de machines. Cependant, la sélection de ces derniers est essentielle car l'efficacité de la machine dépend de certaines caractéristiques physiques et chimiques prépondérantes, telles les conditions thermodynamiques (température et pression, etc), la complexité dans la manipulation et les soucis environnementaux, etc.

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 pharmaceutiques [27]. Donc, il est évident que notre choix soit porté sur le couple zéolithe/eau.

I.5. Cycle frigorifique

La machine frigorifique fonctionne selon un cycle thermique à adsorption basé sur le principe de la réversibilité de l'adsorption physique; fixation de la vapeur du fluide frigorigène "adsorbat" sur l'adsorbant lorsqu'il est refroidi et libération de celle-ci lorsqu'il est chauffé. A l'équilibre thermodynamique, le système est divariant. Cela signifie que la concentration de fluide frigorigène adsorbée x à l'équilibre est une fonction de la température T et de la pression P. L'équilibre peut être décrit soit par :

- Des isobares d'adsorption donnant, pour des pressions constantes, la concentration adsorbée en fonction de la température;
- Des isothermes d'adsorption (températures constantes) donnant la concentration adsorbée en fonction de la pression, pour plusieurs températures de l'adsorbant;
- Des isostères (concentration d'adsorbant x adsorbée constante) donnant, pour plusieurs concentrations adsorbées constantes, la pression P en fonction de la température T.

Le cycle à adsorption (Figure 4) est représenté généralement dans un diagramme de Clausius-Clapeyron (LnP, -1/T).

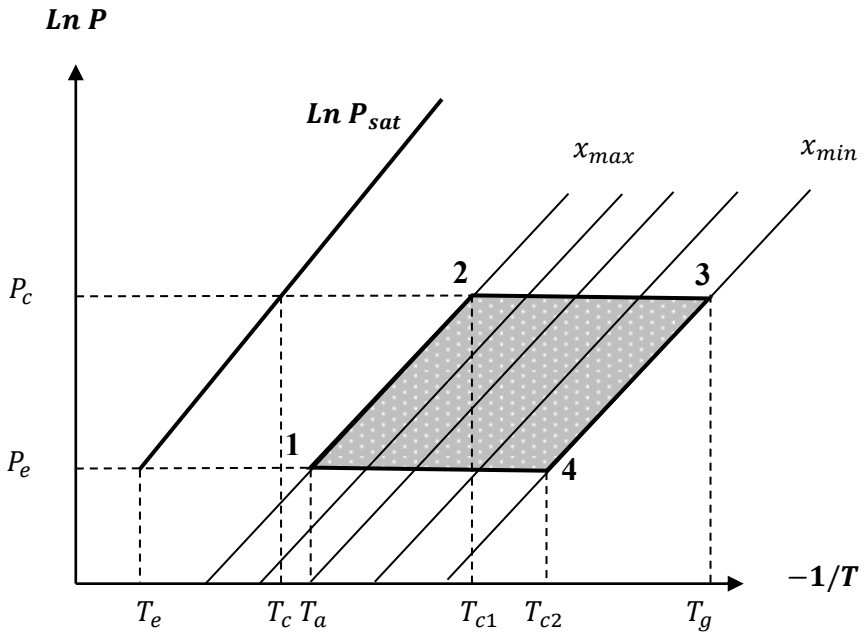


Figure 4 - Cycle d'une machine frigorifique à adsorption

Ce cycle dit idéal, représente l'évolution de l'état du mélange adsorbant/adsorbat contenu dans le générateur (adsorbeur/désorbeur). Chaque cycle comprend deux phases principales régissant le fonctionnement : une phase de chauffage du mélange adsorbant/adsorbat et une autre de refroidissement du même mélange.

I.5.1. Phase de chauffage

Phase de chauffage isostérique (1-2)

Au début du cycle (point 1), le mélange adsorbant/adsorbat est à sa température minimale T_a (température ambiante ou température d'adsorption) et la pression du système est la même que la pression de saturation de l'adsorbat à la température de l'évaporateur T_e (pression d'évaporation $P_e=P_{sat}(T_e)$). A cette étape, le générateur est relié à la source chaude, et est isolé du condenseur/évaporateur par la fermeture d'une vanne.

La chaleur apportée chauffe le générateur, augmentant la température et la pression du système de manière isostérique le long de x_{max} (Figure 5). Cette phase de pressurisation s'achève dès que la pression devient égale à celle qui règne dans le condenseur P_c (point 2). La température atteinte est dite température seuil de désorption T_{c1}. Cette phase équivalente à "la compression" dans le cycle de compression classique.

Phase de désorption-condensation (2-3)

Une fois que la pression du mélange dans le générateur atteint la pression de saturation correspondante à la température T_c du condenseur, ce dernier est mis en communication avec l'adsorbeur (point 2). Durant cette phase l'adsorbant désorbe le fluide qu'il contient et diminue ainsi sa concentration en adsorbat.

La puissance fournie par les fumées continue de faire augmenter la température, mais la pression du système suit l'isobare imposée par le condenseur. La désorption s'achève au point 3 quand l'adsorbant atteint la température maximale T_g (température de régénération) fixée pour le cycle correspondant. Le condensat est évacué vers l'évaporateur par simple gravité lors de sa formation.

Cette phase est généralement appelée régénération car c'est celle qui rend l'adsorbeur propice à une nouvelle phase de production frigorifique. Elle est équivalente à "la condensation" dans le cycle de compression classique.

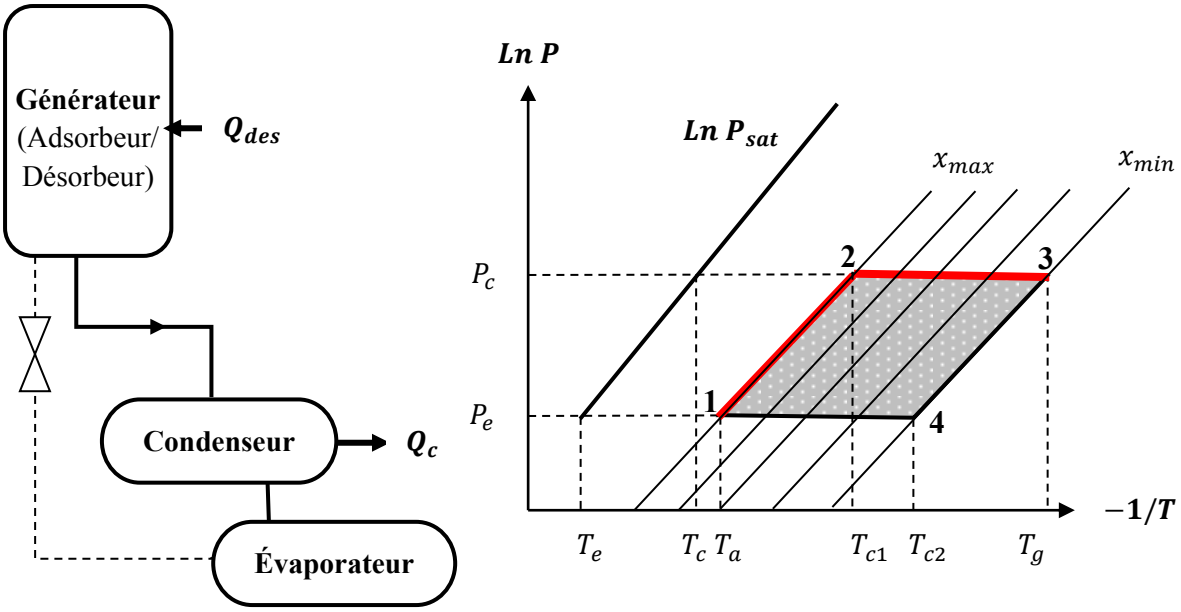


Figure 5 - Phase de chauffage

I.5.2. Phase de refroidissement

Phase de refroidissement isostérique (3-4)

On isole le générateur par la fermeture de la vanne. Le refroidissement du mélange adsorbant/adsorbat commence au point 3, où la température et la pression diminuent jusqu'à ce que la pression devienne égale à celle qui règne dans l'évaporateur. La température atteinte est dite température seuil d'adsorption T_{c2} (point 4). La concentration du fluide adsorbée reste constante dans cette phase et est égale à x_{min} (Figure 6). Cette phase est équivalente à "la détente" dans le cycle de compression classique.

Phase d'adsorption-évaporation (4-1)

Cette phase est la phase motrice du cycle, pendant laquelle le froid est produit. Au point 4, commence l'évaporation du fluide frigorigène en produisant le froid comme dans un cycle à compression classique. On ouvre la vanne qui relie le générateur et l'évaporateur, ce qui laisse l'adsorbant provoque l'adsorbat par adsorber ce dernier, la vapeur produite s'adsorbe donc de nouveau dans l'adsorbeur, jusqu'à ce que la température du mélange adsorbant/adsorbat devienne minimale T_a, fixée pour le cycle correspondant.

Durant cette phase, le système suit l'isobare imposée par l'évaporateur, et qui correspondant à la pression de saturation du fluide frigorigène à la température d'évaporation. A ce moment, la machine est prête pour un nouveau cycle.

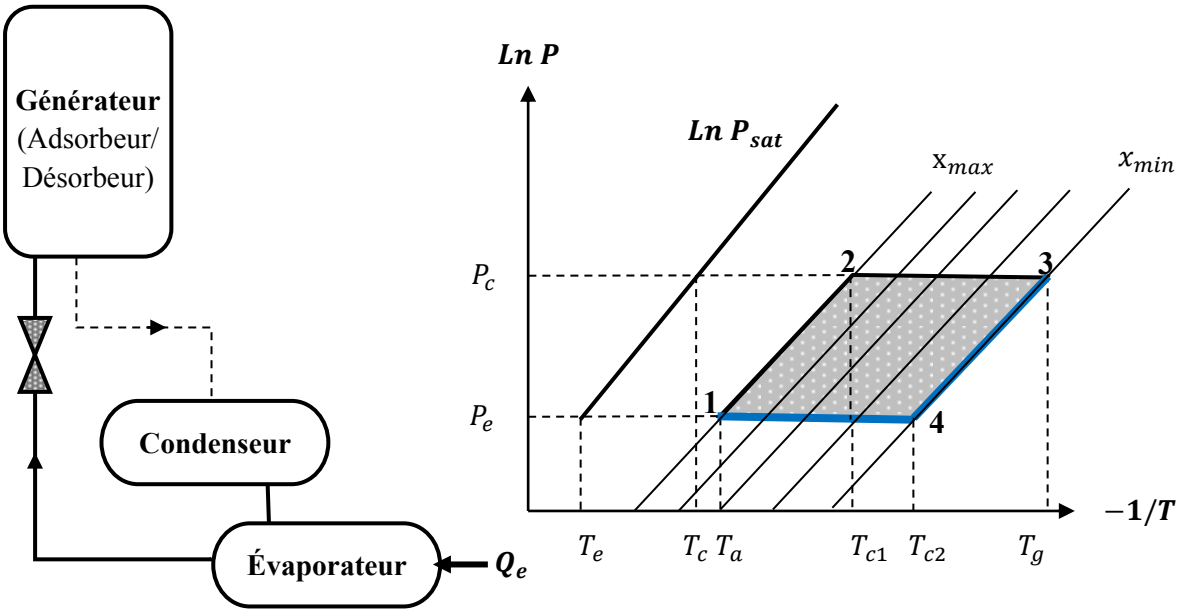


Figure 6 - Phase de refroidissement

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

- T_a: température d'adsorption ; température minimale atteinte par le mélange adsorbant/adsorbat.
- T_g: température de régénération; température maximale atteinte par le mélange adsorbant/adsorbat.
- T_c : température de condensation.
- T_e : température d'évaporation.

La conception et les choix technologiques des machines frigorifiques à adsorption sont guidés par la volonté d'une optimisation de ce quadruplet de température. Vu l'alternance des phases (désorption-condensation et adsorption-évaporation), l'évaporation n'a lieu que pendant une partie du cycle, c'est pourquoi ce cycle est appelé intermittent. Cette intermittence est synchronisée avec celle de la source énergétique.

CHAPITRE II
MODÉLISATION

La modélisation des cycles à adsorption solide nécessite une bonne connaissance du phénomène d'adsorption. Donc, il est essentiel de maîtriser des informations concernant l'équilibre, ce dernier nécessite un choix convenable de modèle d'adsorption (isotherme d'adsorption) qui doit décrire correctement les propriétés d'adsorption du couple utilisé.

II.1. Fonction et équation d'état

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 :

$$f(T, P, x) = 0 \qquad (1)$$

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. 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 selon leurs allures globales d'après la classification de Brunauer, Emmet et Teller [28] (Figure 7).

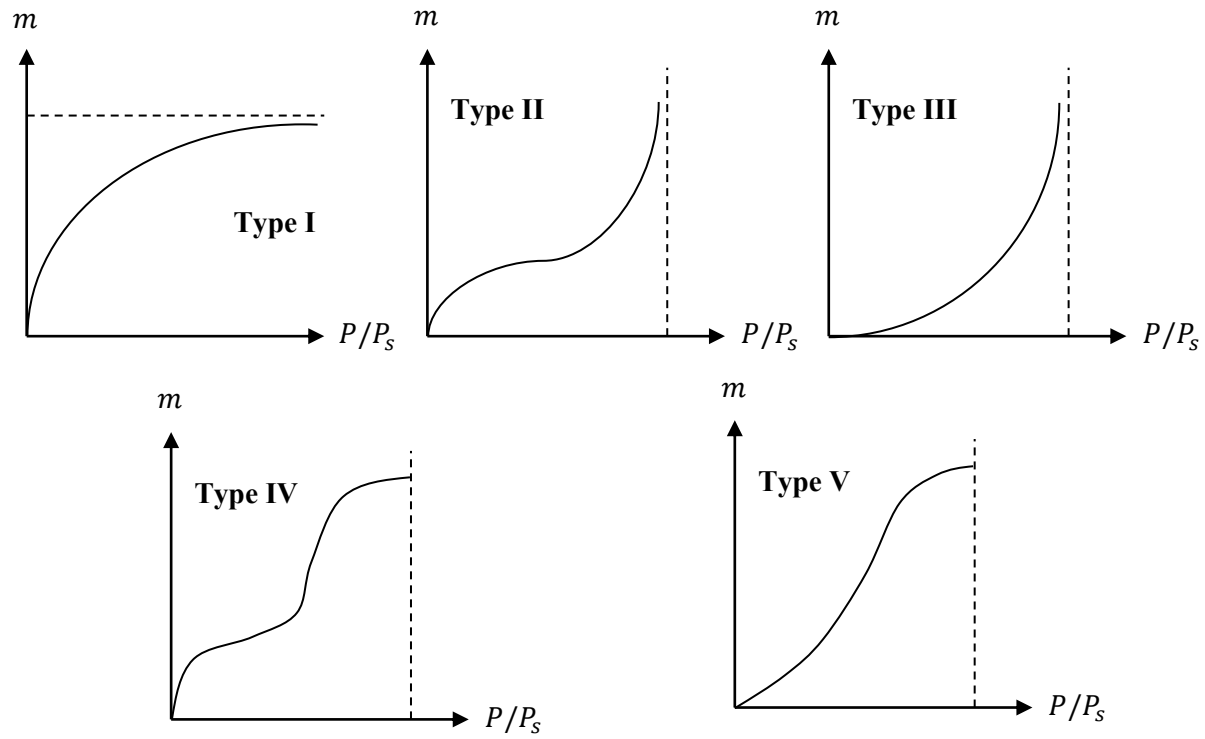


Figure 7 - Les différents types d'isothermes d'adsorption

L'isotherme de 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 [29]. Ce type d'isotherme est caractéristique pour l'adsorption sur les charbons microporeux et les zéolithes [30] et sera celle retenu par notre modèle.

L'isotherme de type II est l'isotherme la plus fréquemment rencontrée, quand l'adsorption se produit sur des surfaces non microporeuses ou ayant des macropores (diamètre supérieur à 500 A° environ), elle est caractéristique d'une supériorité de l'attraction par l'adsorbant vis-à-vis des attractions intermoléculaires de l'adsorbat [31-32].

L'isotherme de type III est relativement rare, elle 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.

L'isotherme de 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.

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

Plusieurs modèles d'isothermes d'adsorption ont été développés, basés soit sur une approche de surface qui considère que l'adsorption est un phénomène de surface, soit sur une approche de volume qui considère que l'adsorption est un phénomène de remplissage de volume. Ici, nous présentons uniquement le modèle de Dubinin qui est établi sur le volume.

II.2. Modèle de Dubinin

La théorie du remplissage des micropores développée par Dubinin dans les années 40 a contribué d'une façon considérable à la description de l'adsorption sur les solides microporeux. L'avantage majeur de cette équation vient du fait qu'elle utilise des paramètres bien définis, indépendants de la température à l'exception de P_0 ce qui permet de décrire les isothermes d'adsorption avec un minimum de données. L'origine de cette théorie est basée sur la corrélation entre la quantité adsorbée et le potentiel thermodynamique de Polanyi [33-35].

En 1947, Dubinin et Radushkevich ont proposé la relation permettant de décrire l'adsorption des molécules organiques par les charbons actifs sous sa forme moderne, l'équation de Dubinin-Radushkevich (DR) s'écrit [36]:

$$V = V_0 exp\left[-D\left(\frac{T}{\beta} Ln\left(\frac{P_0}{P}\right)\right)^2\right] \quad (2)$$

En 1971, Dubinin et Astakhov ont généralisé la relation (2) en introduisant un exposant n variable, ce qui permet de décrire l'adsorption pour les zéolithes et d'autres adsorbants. Cette nouvelle équation dite de Dubinin-Astakhov (DA) s'écrit dans sa forme générale [37] :

$$V = V_0 exp\left[-D\left(\frac{T}{\beta} Ln\left(\frac{P_0}{P}\right)\right)^n\right] \quad (3)$$

L'exposant n reflète l'hétérogénéité du solide. En effet, plus il est élevé, plus la structure du solide est homogène. Dans le cas des zéolithes, la valeur n=2 [38].

Il a été trouvé par Meunier [38] que pour la modélisation de l'adsorption de zéolithe et d'eau, une version simple de l'équation de Dubinin-Astakhov peut être appliquée pour obtenir la pression d'adsorption P_{ads} :

$$P_{ads} = Ln[P_{sat}(T) - Tk] \quad (4)$$

P_{sat} : est la pression de saturation, elle est donnée par :

$$P_{sat}(T) = exp\left[P_{S0} + R[P_{S1} + R(P_{S2} + RP_{S3})]\right] \quad (5)$$

P_{S0}, P_{S1}, P_{S2} et P_{S3} sont des constantes données :

$$P_{S0} = Ln(10).7{,}924966 + Ln\left(\frac{101325}{760}\right) \quad (6)$$

$$P_{S1} = -1602{,}65 + Ln(10) \quad (7)$$

$$P_{S2} = -103979{,}9 + Ln(10) \quad (8)$$

$$P_{S3} = 0 \quad (9)$$

k est une fonction exponentielle donnée par :

$$k = exp(N.Ln\,M)\ si\ M > 0 \quad (10)$$

$$k = -exp(N.Ln(-M))\ si\ M < 0 \quad (11)$$

$$k = 0\ si\ M = 0 \quad (12)$$

N et M sont donnés par :

$$N = \frac{-1}{D_{dub}} Ln\left(\frac{\frac{x}{w_{dub}}}{Rh_0 + T\left[Rh_1 + T[Rh_2 + T(Rh_3)]\right]}\right) \quad (13)$$

Rh_0, Rh_1, Rh_2 et Rh_3 sont des constantes données :

$$Rh_0 = 667{,}141 \quad (14)$$

$$Rh_1 = 2{,}836677 \quad (15)$$

$$Rh_2 = -6{,}98532\ E - 3 \quad (16)$$

$$Rh_3 = 3{,}955813\ E - 6 \quad (17)$$

$$M = \frac{1}{N_{dub}} \quad (18)$$

Nous avons utilisés ses différentes équations afin de modéliser l'adsorption du couple zéolithe/eau utilisé dans cette étude. On trace une courbe de saturation liquide/vapeur utilisant la formule (5) de P_{sat}, ensuite on trace les courbes isostériques sur le même graphique (Figure 8).

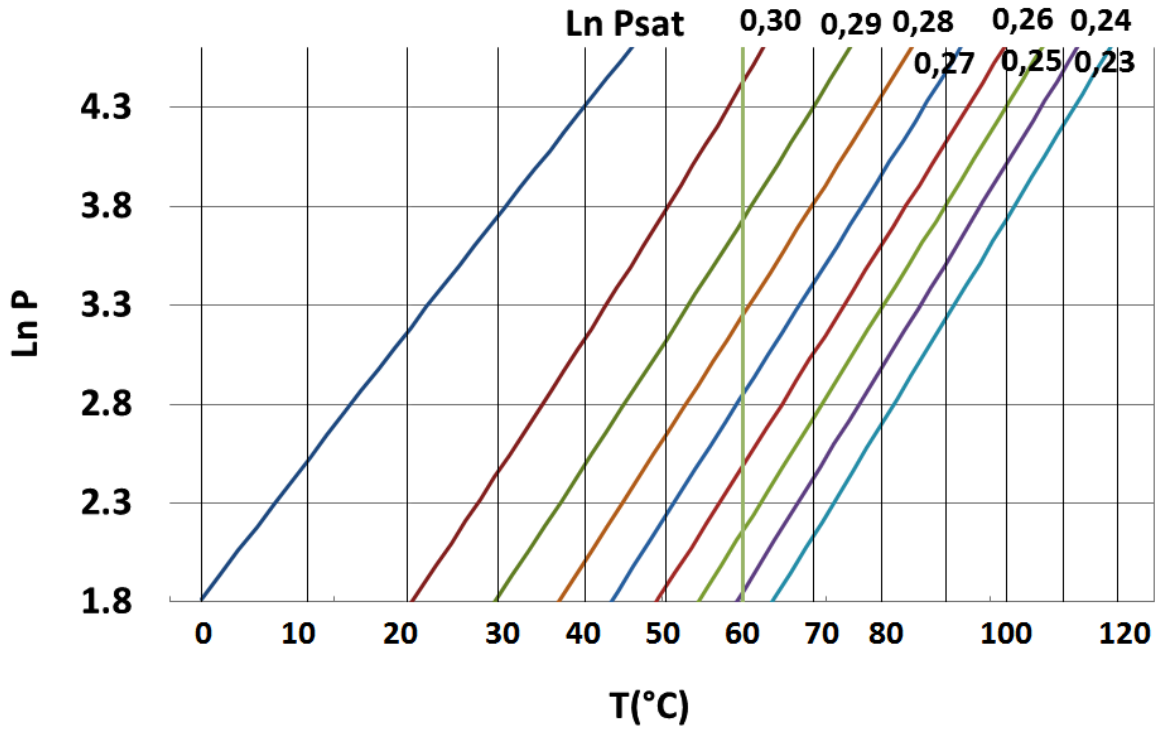


Figure 8 - Equilibres liquide/vapeur et liquide/solide du couple zéolithe/eau

II.3. Modélisation du cycle

Le cycle thermodynamique à adsorption est une succession de deux phases (§I.5), la première consiste à la désorption de l'adsorbat par l'apport d'énergie, alors que la deuxième se déroule sans énergie extérieure, ou l'évaporation et l'adsorption aura lieu.

Le générateur (Figure 9) reçoit une quantité d'énergie dont une partie sera utilisée pour accroitre l'énergie thermique du système (chauffer l'adsorbant et l'adsorbat) et une autre sert à la désorption.

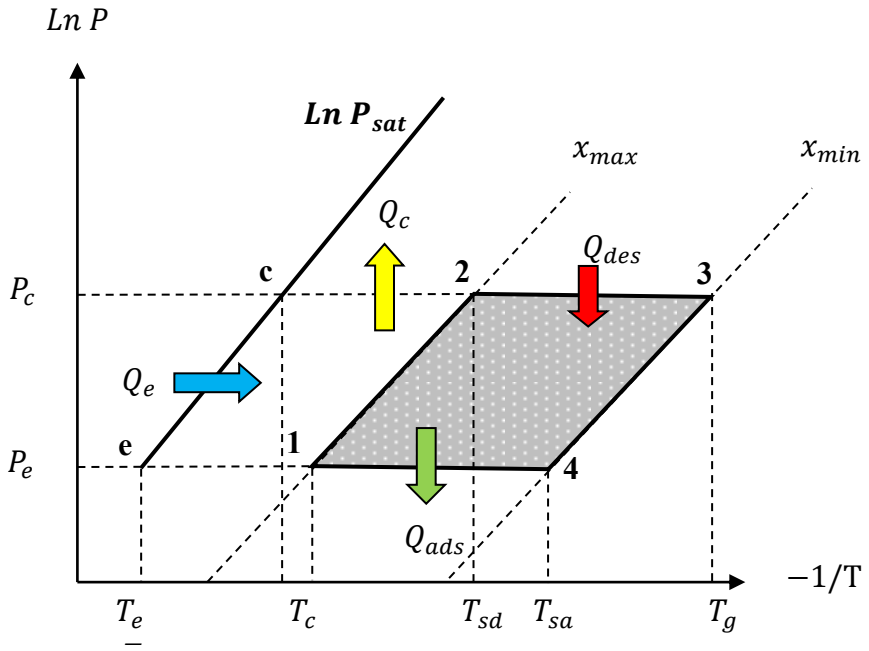


Figure 9 - Cycle d'une machine frigorifique à adsorption

Le cycle commence au point 1 ou l'adsorbant est à la basse température T_a et à la basse pression P_e. Durant le chauffage du mélange d'adsorbat/adsorbant, le système suit l'isostère x_{max}, la pression augmente jusqu'à la valeur $P_c=P_s(T_c)$ au point 2.

Le chauffage progressif du fluide frigorigène de 2 jusqu'à 3 permet à ce dernier de désorber la vapeur de fluide frigorigène. Celle-ci quitte le générateur et est ensuite condensée à T_c. Lorsque le générateur atteint sa température maximale T_3, la désorption s'arrête. L'énergie Q_{des} utilisée pour la désorption de fluide frigorigène est donnée par :

$$Q_{des} = m_{ad}Cp_{ad}(T_3 - T_1) + m_{max}Cp_{ffl}(T_3 - T_1) + \Delta mH_{des} \quad (19)$$

m_{max} la masse maximale de fluide frigorigène qui contient l'adsorbat, donnée par :

$$m_{max} = x_{max}m_{ad} \quad (20)$$

Δm : la quantité de fluide frigorigène desorbée, donnée par :

$$\Delta m = m_{max} - m_{min} = (x_{max} - x_{min})m_{ad} \quad (21)$$

H_{des} est la chaleur de désorption. On a développé une équation qui nous a permet de calculer la chaleur de désorption et aussi l'enthalpie d'adsorption.

On applique le premier principe de thermodynamique sur le cycle (0-1'-1-0') (Figure 10) entre le point de référence 0 de température T_0 et titre x_{max} le point 1 de température T et titre x_{min} a quantité de chaleur échangée entre le point 0 et 1 est donnée par :

$$Q_{0-1} = m_{ad}Cp_{ad}(T - T_0) + m_{max}Cp_{ffl}(T - T_0) + \Delta mH \qquad (22)$$

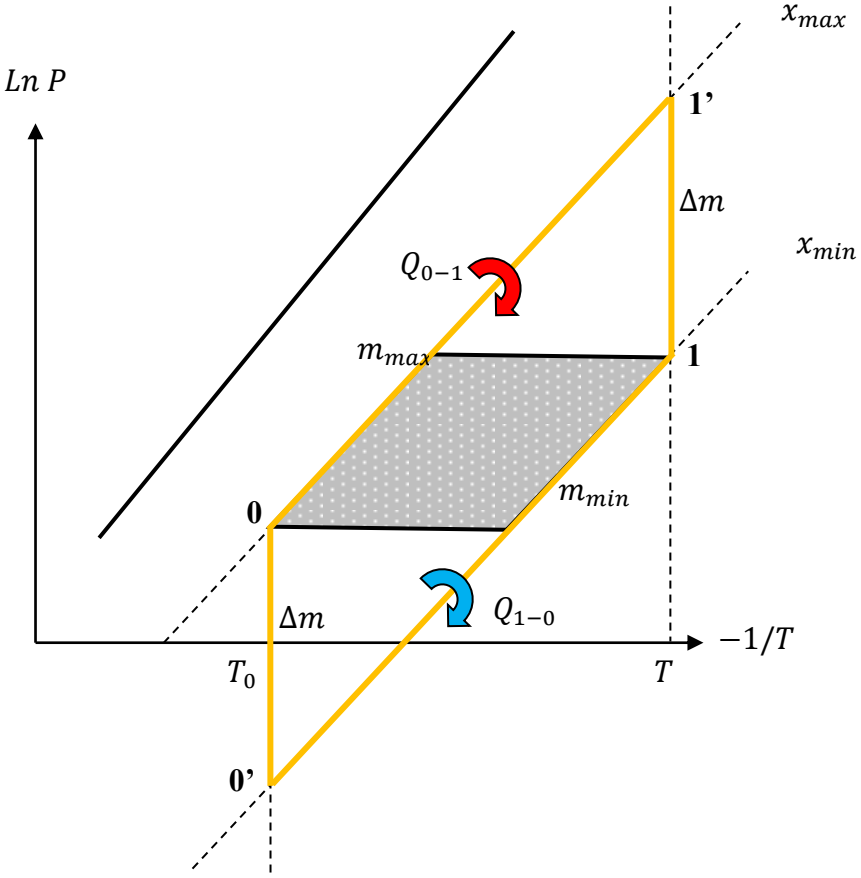


Figure 10 - Cycle permettant de calculer la chaleur de désorption et d'adsorption

Pour faire un cycle, le système échange une autre quantité de chaleur Q_{1-0} :

$$Q_{1-0} = m_{ad}Cp_{ad}(T_0 - T) + m_{min}Cp_{ffl}(T - T_0) + \Delta mCp_{ffv}(T - T_0) - \Delta mH_0 \qquad (23)$$

D'après le premier principe, la somme de des deux équations (22) et (23) est égale à 0, d'où on obtient :

$$H = H_0 - (Cp_{ffl} - Cp_{ffv}).(T - T_0) \quad (24)$$

Durant l'absence de chauffage, la décroissance de la température de 3 à 4 induit la décroissance de pression de P_c à P_e. Ensuite l'adsorption a lieu pendant que l'adsorbant est refroidi de 4 à 1. La chaleur libérée pendant la période de refroidissement Q_{ads} est :

$$Q_{ads} = m_{ad}Cp_{ad}(T_1 - T_3) + m_{min}Cp_{ffl}(T_1 - T_3) + \Delta mCp_{ffv}(T_1 - T_e) - \Delta mH_{ads} \quad (25)$$

H_{ads} la chaleur d'adsorption, calculé par l'équation (24).

L'énergie de condensation de fluide frigorigène Q_c est :

$$Q_c = \Delta m\left[Cp_{ffv}(T_C - T_3) - L_{vc}\right] \quad (26)$$

L_{vc} est la chaleur latente de condensation. Cette chaleur est calculée on appliquant le premier principe sur le cycle de la Figure 11 entre le point 0 de vapeur saturée et le point 1 de température T_1 correspondant au liquide saturée.

$$Q_{0-1} = mCp_{ffv}(T - T_0) - mL \quad (27)$$

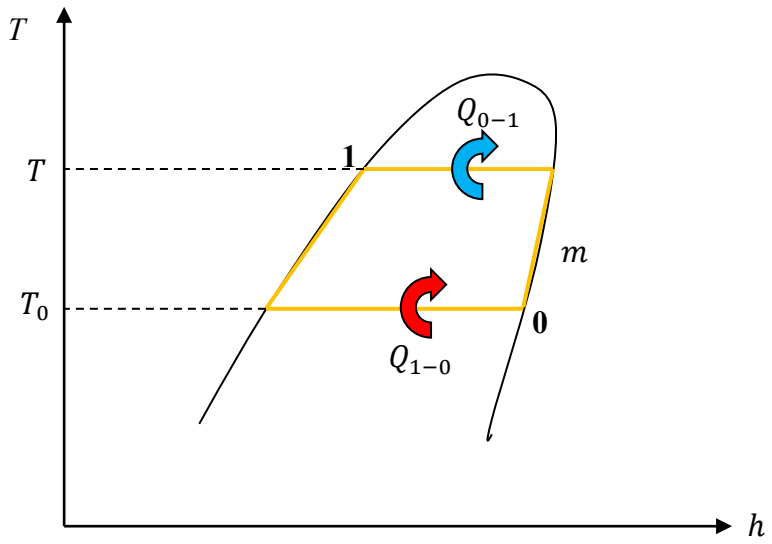


Figure 11 - Cycle permettant de calculer la chaleur latente de condensation et d'évaporation

Pour revenir au point de référence, on calcule $Q_{1\text{-}0}$:

$$Q_{1-0} = mCp_{ffl}(T_0 - T) + mL_0 \quad (28)$$

On applique l'égalité du premier principe, on obtient :

$$L = L_0 - (Cp_{ffl} - Cp_{ffv}).(T - T_0) \quad (29)$$

Enfin, L_{vc} sera donnée par :

$$L_{vc} = L(T_c) = L_0 - (Cp_{ffl} - Cp_{ffv}).(T_c - T_0) \quad (30)$$

L'énergie nette utilisée pour produire la glace Q_e est :

$$Q_e = \Delta m\left[Cp_{ffl}(T_e - T_c) + L_{ve}\right] \quad (31)$$

L_{ve} est la chaleur latente d'évaporation de fluide frigorigène, calculée par l'équation (29), ce qui donne :

$$L_{ve} = L(T_e) = L_0 - (Cp_{ffl} - Cp_{ffv}).(T_e - T_0) \quad (32)$$

L'énergie totale correspondant à la quantité de glace produite m_{gc} après le processus de refroidissement avec l'eau à la température T_1 est :

$$Q_{gc} = m_{gc}\left[Cp_{eau}(T_1 - 0) + L_{gc}\right] \quad (33)$$

L_{gc} est la chaleur latente de fusion de glace à T=0 °C, elle est égale à 330 KJ/Kg.

La performance d'un cycle à adsorption peut s'exprimer par les termes suivants :

- L'efficacité du générateur $\eta_g = \frac{Q_{des}}{Q_T}$ (34)

Q_T : la quantité de chaleur totale fournie au système.

- L'efficacité de l'évaporateur $\eta_e = \frac{Q_{gc}}{Q_e}$ (35)

- Le COP du cycle $COP_c = \frac{Q_e}{Q_{des}}$ (36)

Nous avons utilisé ces équations pour développer un code de calcul permettant de simuler un système à adsorption, afin de voir l'influence de la variation de certaines valeurs sur le comportement statique du cycle.

II.3.1. Méthode de modélisation

Au début de la désorption le système se trouve à la pression de saturation de l'eau dans l'évaporateur P_e=P_{sat}=6.15 mbar correspondante à la température d'évaporation T_e=0 °C et le générateur est à la température ambiante soit 35 °C. Ce qui nous permet de placer le point A sur le diagramme isostérique et de déterminer l'isostère correspondante soit x_{max}=0.283. Cette isostère nous donne la quantité d'eau présente dans la zéolithe avant la désorption (Figure 12).

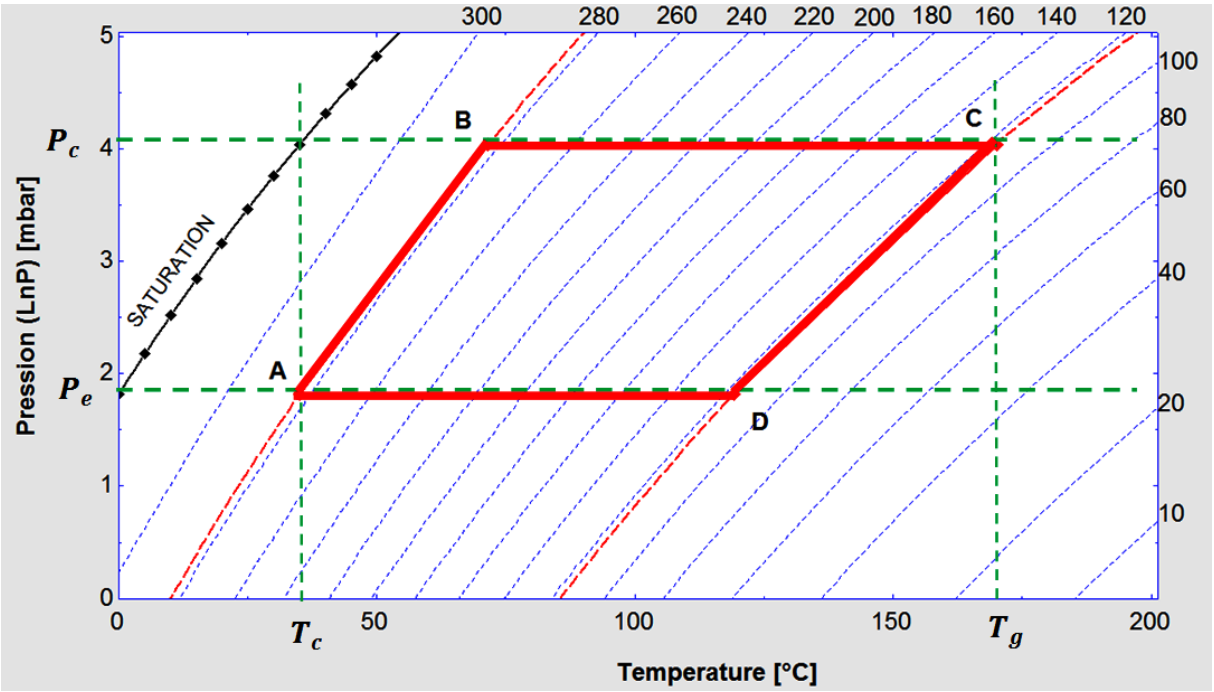


Figure 12 - Cycle explique la méthode de modélisation

Avec le démarrage de chauffage, la pression augmente jusqu'au atteindre la pression de saturation P_c correspondant à la température du condenseur. Sachant que l'on condense le réfrigérant grâce à la température extérieure (T_{sat}=35 °C), l'intersection de la ligne de cette pression et l'isostère correspondante à x_{max} nous permet de placer le point B et tracer la première phase de la désorption A-B qui s'effectue de manière isostérique.

Ensuite, pendant toute la phase BC de la désorption, la pression restera la même que la pression de saturation du condenseur et la zéolithe va chauffer pour atteindre une température maximale (170 °C dans ce cas). Nous pouvons placer le point C sur la nouvelle isostère qui nous indiquera la quantité eau dans l'adsorbant après la phase de désorption.

Au point C on coupe le chauffage et on fait refroidir le générateur en allument son ventilateur, la zéolithe se refroidie de manière isostérique et la pression diminue dans le système. Cela correspond à la phase CD.

Lorsque la pression dans le générateur atteint la pression d'évaporation de l'eau à 0 °C, la zéolithe est alors en déséquilibre et va se recharger en l'eau provenant de l'évaporateur. Ce phénomène correspond à la phase d'adsorption DA pendant laquelle on produit du froid dans l'évaporateur.

II.3.2. Influence de la température d'adsorption et de condensation

Les Figure 14 et Figure 13 montrent l'effet de la température de condensation respectivement, sur le coefficient de performance COP et sur la quantité de froid produite à l'évaporateur Q_e en fonction de la température de régénération T_g. D'après le diagramme de Clausius-Clapeyron (Figure 12), il est facile de vérifier que pour une valeur constante de T_g, la masse m_{min} augmente pour les grandes valeurs de T_c.

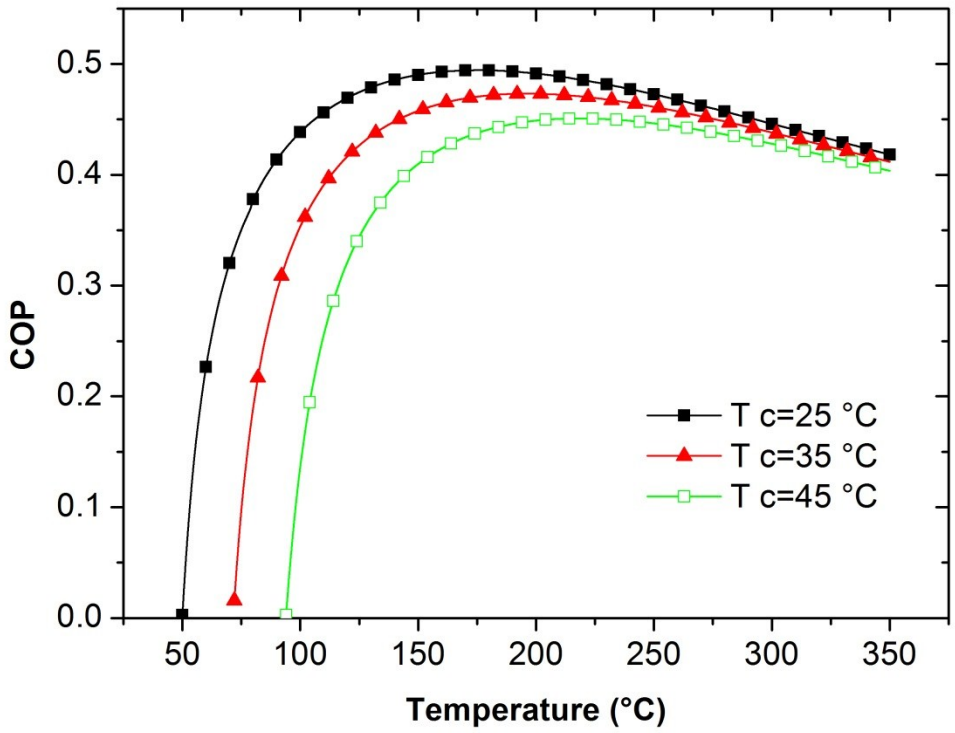


Figure 13 - Influence de la température de condensation sur le coefficient de performance COP (T_e=0 °C et m_{ad}=1 kg)

En fixant T_e=0 °C et en faisant varier T_g et T_c. Le COP du système diminue avec l'augmentation de la température de condensation T_c, ceci peut être interprété par le fait que l'augmentation de T_c entraîne une augmentation de la pression de saturation à cette température $P_s(T_c)$. Donc, la masse désorbée d'adsorbat (eau) $m_{min}(T_g,P_s(T_c))$ augmente, impliquant une diminution de la masse cyclée donnée par l'équation (21) et par conséquent, une diminution de la quantité de froid produite à l'évaporateur Q_e et le COP du système.

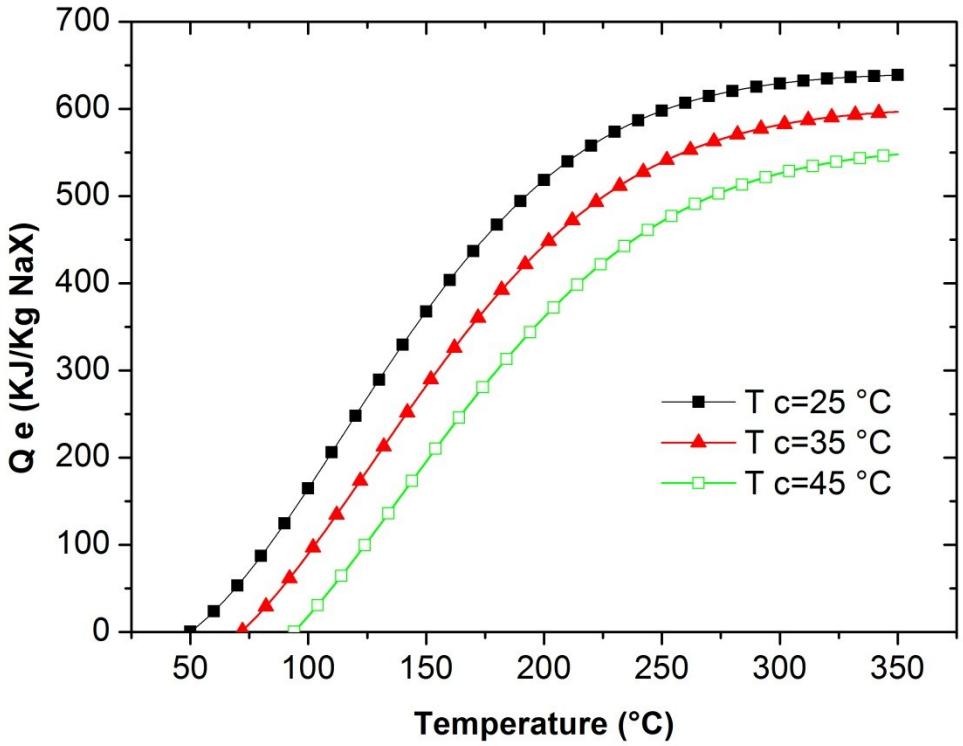


Figure 14 - Influence de la température de condensation sur la quantité de froid produite à l'évaporateur Qe (T_e=0 °C et m_{ad}=1 kg)

En 1994, G. Cacciola et G. Restuccia [39] ont montés que le COP est une fonction de décroissance de la température de condensation T_c, pour les conditions suivantes : T_c=T_{ads}=40 °C, T_e=5 °C.

Plus tard, en 1997, Li Zhi Zhang et Ling Wang [40] ont conclus les mêmes remarques mais, avec des conditions de fonctionnement différentes, T_c=45 °C, T_e=10 °C, T_{ads}=50 °C.

En 2004, E.E. Anyanwu [36], a réalisé une comparaison de la variation de COP entre le couple zéolithe/eau et le couple charbon actif/méthanol, sous les conditions, T_c=40 °C, T_e=0 °C, T_{ads}=35 °C. L'examen des résultats expérimentaux illustrés dans la Figure 15 montre qu'ils sont en concordance avec les résultats de la simulation de notre modèle.

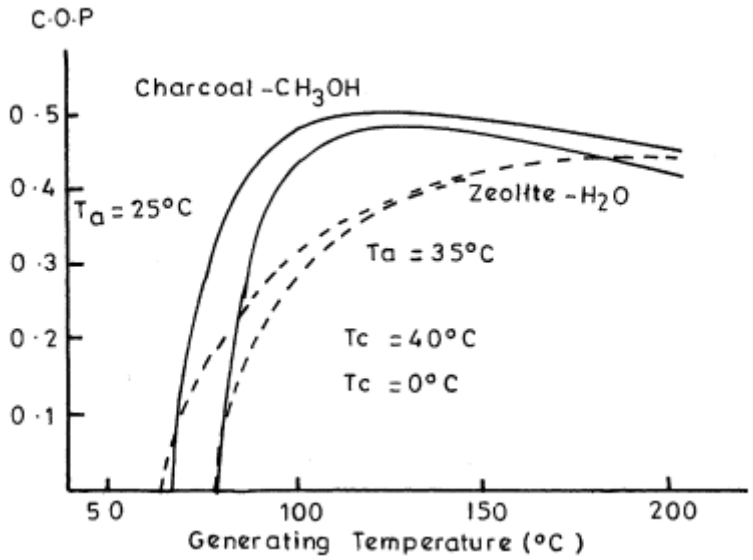


Figure 15 - Influence de la température de condensation sur le coefficient de performance selon Anyanwu [36] (Te=0 °C, Tads=35 °C)

Dans le cas dune machine frigorifique à adsorption, il est difficile de fixer certaines conditions, telle que la température du condenseur. Cette dernière dépend de plusieurs facteurs aléatoires liés au type du climat du site d'application.

II.3.3. Influence de la température d'adsorption et d'évaporation

L'effet de T_e sur la performance du système est montré dans la Figure 16 et Figure 17. On montre le comportement de COP et Q_e comme fonction de T_g et T_e, en fixant les températures T_c=T_a 35 °C et en faisant varie T_g et T_e.

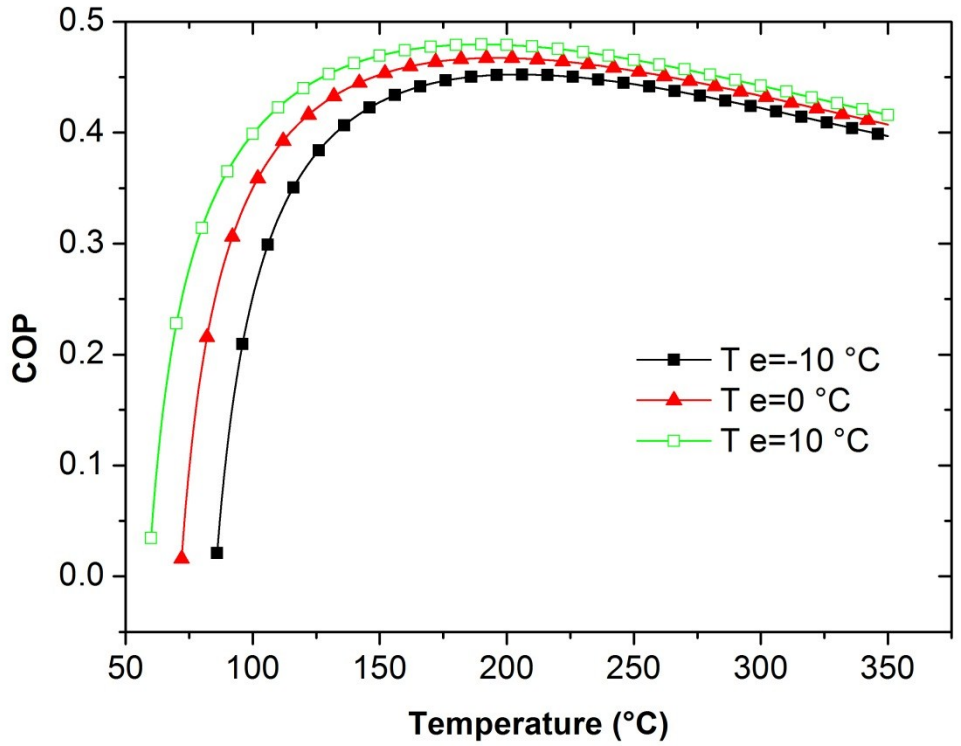


Figure 16 - Influence de la température d'évaporation sur le coefficient de performance COP (T_c= T_a=35 °C et m_{ad}=1 kg)

En effet, l'augmentation de la température d'évaporation T_e implique que la pression de saturation à cette température $P_s(T_e)$ augmente. Donc, la masse adsorbée de l'eau $m_{max}(T_a, P_s(T_e))$ augmente, impliquant une augmentation de la masse cyclée donnée par l'équation (21) et par conséquent, une augmentation de la quantité de froid produite à l'évaporateur Q_e et le COP du système. Il est facile de vérifier l'effet qualitatif de l'augmentation de T_e d'après le diagramme de Clausius-Clapeyron (Figure 12)

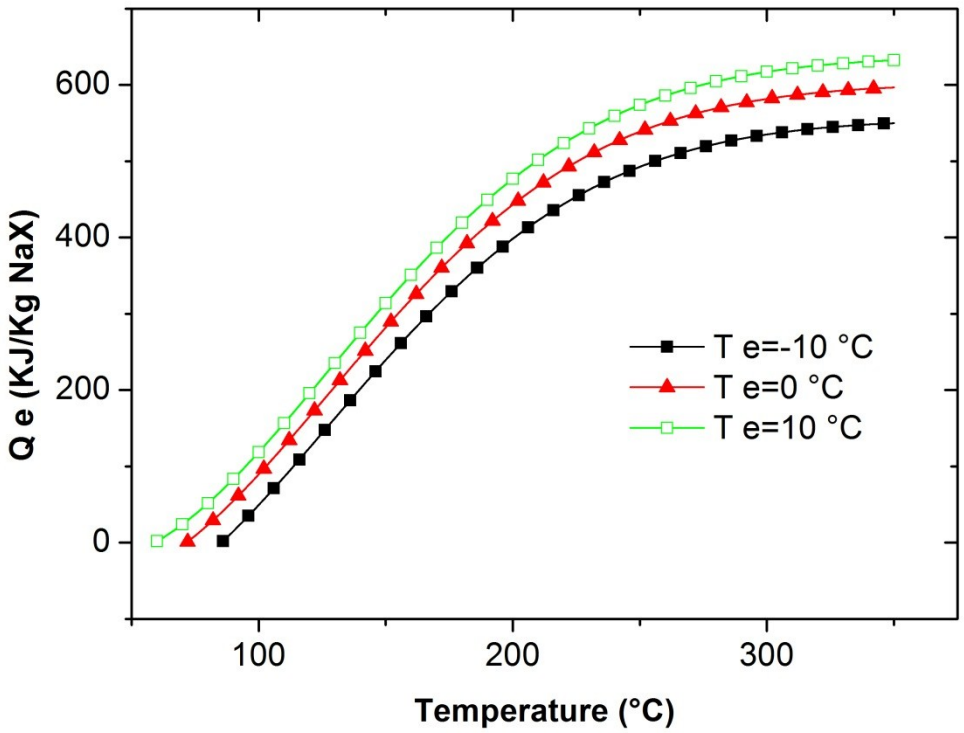


Figure 17 - Influence de la température d'évaporation sur la quantité de froid produite à l'évaporateur Qe (T_c= T_a=35 °C et m_{ad}=1 kg)

Un bon accord est observable entre les résultats obtenus de la simulation de notre modèle et d'autres obtenus par plusieurs auteurs, à propos l'effet de la température d'évaporation sur les performances des machines frigorifiques à adsorption tels que les travaux suivants :

Y. Liu et K. C. Leong [41] ont proposé un modèle mathématique qui tient compte de la cinétique de transfert de chaleur et de masse dans le matériau adsorbant. Ce modèle est basé d'une part sur le modèle LDF pour décrire le transfert de masse, et d'autre part sur le modèle de Langmuir pour décrire l'adsorption de l'eau sur la zéolithe Nax. Les conditions de fonctionnement étaient (T_c=T_a=45 °C et -8<T_e<17).

Généralement, T_e dépend du but d'application [26], à titre d'exemple, pour le cas de la production de glace, T_e peut être d'environ -10 °C, pour le conditionnement de l'air et le stockage de vaccins T_e peut être augmentée, respectivement à 5 °C et 8 °C.

R. E. Critoph [26] a donné quelques combinaisons entre le but d'application et les températures typiques de cycle (Tableau 2).

Tableau 2 - Températures typiques du cycle [26]

Application	*Température ambiante*	T_e (°C)	T_{ads} (°C)	T_{c1} (°C)
Congélation	*Modéré*	-20	25	78
	Chaude	-20	45	126
Production de glace	*Modéré*	-10	25	65
	Chaude	-10	45	112
Conditionnement de l'air	*Modéré*	5	25	46
	Chaude	5	45	91

II.3.4. Etude de sensibilité paramétrique et optimisation

Dans cette partie, l'influence de la température de régénération et la température d'évaporation sur le coefficient de performance, la capacité de refroidissement, ainsi que l'apport de chaleur requis de système zéolite/eau sera analysée. La température de condensation correspondante à la température ambiante moyenne de 35 °C, sera expliquée lors de la conception de la machine pour fonctionner dans un pays en voie de développement.

Figure 18 illustre l'effet de la température de régénération sur le COP, la capacité de refroidissement du système et l'apport de chaleur requis. C'est une connaissance commune avec les systèmes d'adsorption que le COP augmente avec l'augmentation de la température de régénération, qui peut être attribuée à l'augmentation de l'adsorption d'eau. Avec l'augmentation de la température de régénération, le COP atteint le maximum à température de régénération, pour laquelle le taux de la diminution de l'adsorption de l'eau à la température de régénération ($\Delta x/\Delta T$) est maximal. Cette température de régénération est nommée comme la température optimale de régénération. Au-delà de cette température optimale de régénération, le taux de désorption de l'eau ($\Delta x/\Delta T$) se désintègre, de sorte que la COP diminue avec l'augmentation supplémentaire de la température de régénération.

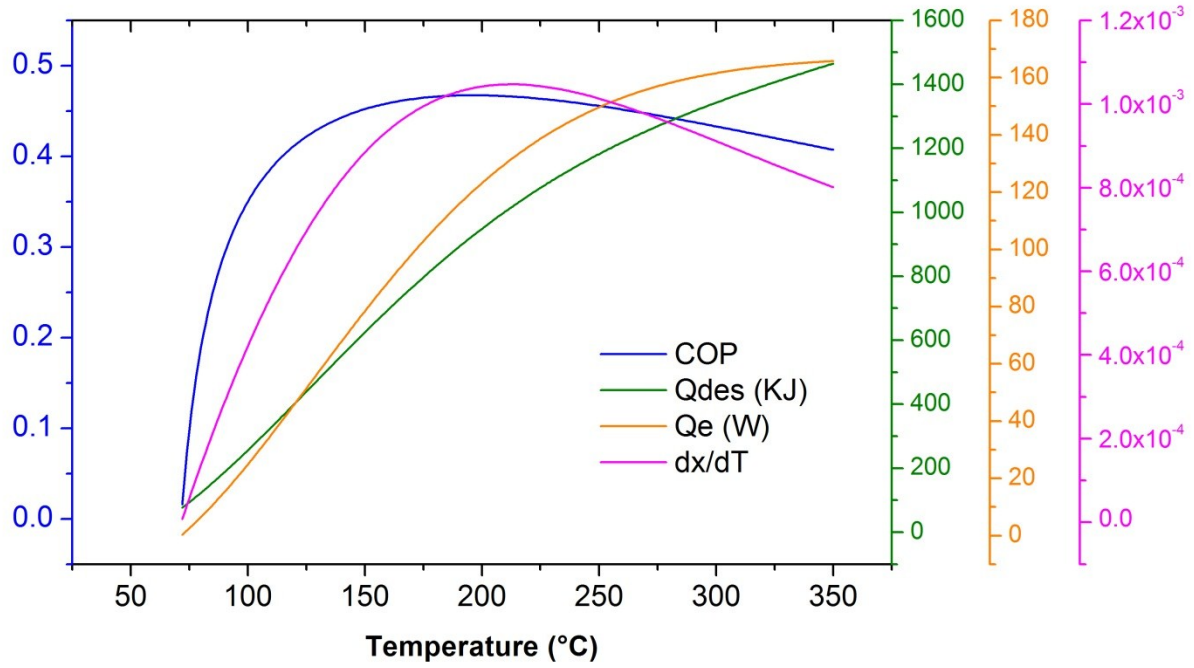


Figure 18 - Evolution de COP, capacité de refroidissement, apport de chaleur requis et taux de diminution de l'adsorption en fonction de température de régénération (T_c=35 °C et T_e=0 °C)

Comme représenté sur cette figure, le COP et le taux de la diminution de l'adsorption de l'eau ($\Delta x/\Delta T$) attentent les valeurs maximales, 0,467 et $10{,}5.10^{-2}$ avec une capacité de refroidissement de 127 W pour une température à l'évaporateur T_e=0 °C correspondant à une température optimale de régénération d'ordre de 205 °C. Cette température est très élevée pour être atteinte pendant quelques heures par la source de chaleur utilisée, dans ce contexte on doit chauffer à une température raisonnable et gardant plus élevées les valeurs de COP et $\Delta x/\Delta T$.

Pour une température de régénération de 170 °C, on peut produire une quantité de froid d'environ 98 W avec des valeurs COP et $\Delta x/\Delta T$ respectivement 0,463 et $9{,}8.10^{-2}$, ce qui représente une diminution de moins d'1% pour le COP par rapport au COP_{max}. Donc, Il est évident que la température de régénération pour un système à adsorption qui utilise le zéolithe/eau sera d'ordre de 170 °C dans les mesures ou la température au niveau de condenseur est environ 35 °C et celle d'évaporateur d'environ 0 °C.

Ces paramètres sont utilisés pour simuler dynamiquement le système, puis pour réaliser les essais expérimentaux sur un prototype d'une machine frigorifique à adsorption. Une comparaison entre les résultats de la simulation et celles de l'expérimentation aura lieu dans la partie de travail expérimental.

CHAPITRE III
EXPÉRIMENTATION

Dans ce chapitre, nous présentons le mode opératoire et les résultats expérimentaux de prototype de la machine frigorifique à adsorption utilisant le couple zéolithe/eau.

III.1. Description du banc expérimental

Le prototype de la machine frigorifique à adsorption utilisé est constitué essentiellement d'un générateur (adsorbeur/désorbeur) (Figure 19) et d'un condenseur/évaporateur (Figure 20). Le générateur est un cylindre de l'inox de deux parois avec une ouverture bridée à l'une des extrémités par laquelle l'on introduit l'adsorbant. A l'intérieur de cylindre on utilise des résistances électriques qui jouent le rôle des fumées issues de l'utilisation du four à biomasse, ces derniers permettent de régénérer le fluide frigorigène piégé dans les ports de l'adsorbant, présentant la phase de désorption. Un deuxième cylindre ouvert aux deux extrémités entoure le premier cylindre en laissant un espace dans lequel l'air peut circuler les ailettes reliant ces deux pièces. Au cours de la phase d'adsorption, cet espace permet de refroidir l'adsorbeur en faisant circuler l'air grâce à un ventilateur fixé au-dessous de celui-ci.



Figure 19 - Générateur (adsorbeur/désorbeur)

L'évaporateur-condenseur est une petite cuve cylindrique avec une ouverture bridée à l'une de ces extrémités pour permettre l'entrée ou la sortie de fluide frigorigène. Nous pouvons suivre l'évolution de la température à l'intérieur de l'évaporateur durant la phase d'adsorption grâce à une petite entrée qui nous permet de l'équiper d'un thermocouple de type K (Figure 32/Annexe A).

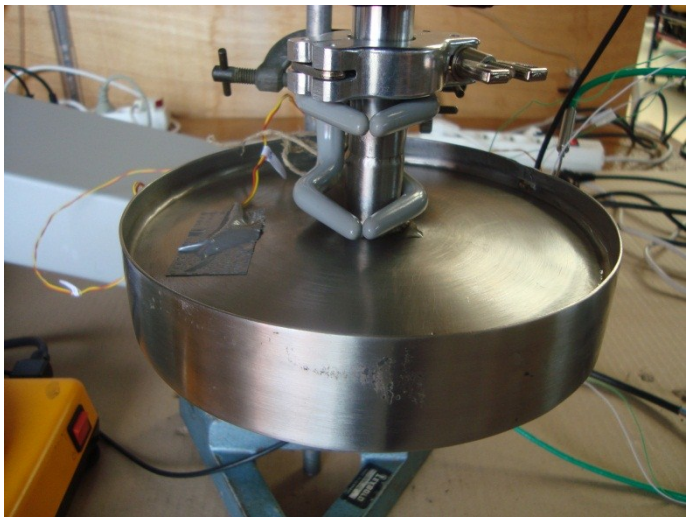


Figure 20 - Evaporateur-condenseur

Nous avons relié le générateur et l'évaporateur-condenseur entre eux par un tube et des vannes de type Edward (Figure 34/Annexe A) permet d'isoler les différentes parties de l'installation (Figure 21). De plus, ce tube de raccordement comporte une dérivation au-dessus avec une vanne qui permet de relier le système à une pompe à vide, pour obtenir une pression au-dessous de la pression atmosphérique.

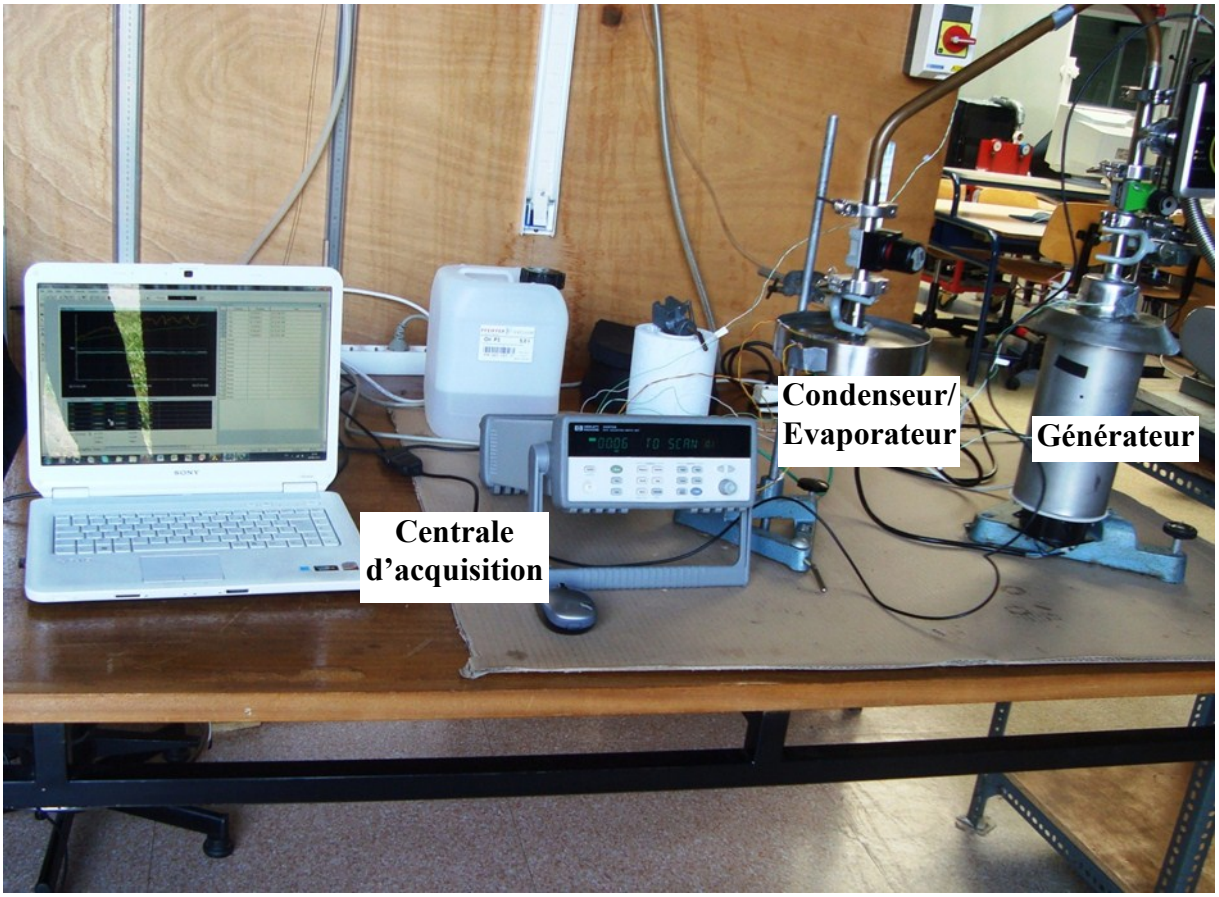


Figure 21 - Unité de test expérimentale

Ce système frigorifique se compose donc de deux vaisseaux liés, l'un des deux contient l'adsorbant et l'autre contient le fluide frigorigène (Figure 22). Les deux vaisseaux sont initialement à basse pression et à basse température (température ambiante) avec un fluide frigorigène à haute concentration dans l'adsorbant. La première étape consiste à chauffer le générateur utilisant la source de chaleur, qui est une résistance électrique, le fluide frigorigène est chassé de l'adsorbant tandis que la pression du système complet augmente (désorption) (a). Le fluide frigorigène désorbé sous forme gazeuse est condensée dans l'évaporateur-condenseur par la chaleur rejetée (b). Lorsque le générateur atteint la concentration minimale ou souhaitable en fluide frigorigène (c), il est alors refroidi à sa température initiale avant d'adsorber le fluide frigorigène, réduisant la pression (adsorption). La pression plus faible entraîne le fluide frigorigène liquide contenu dans l'évaporateur-condenseur à s'évaporer, la chaleur d'adsorption et donc produit l'effet de production du froid nécessaire (d).

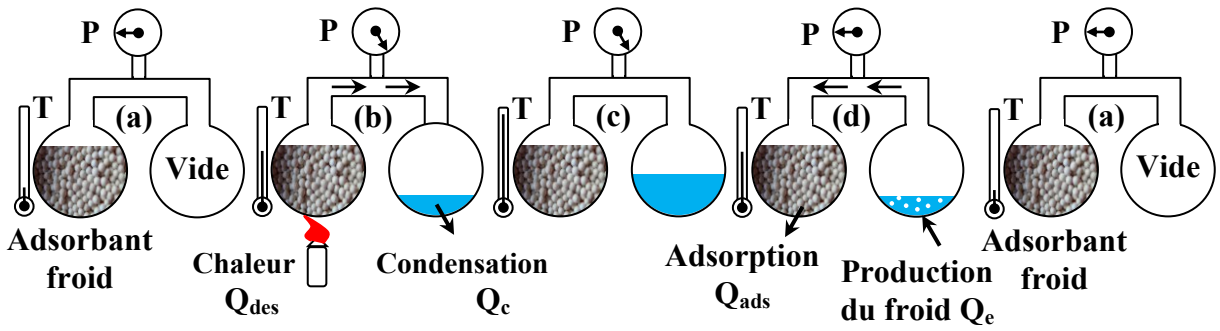


Figure 22 - Principe de fonctionnement de prototype utilisé

III.2. Mise en marche

Comme nous avons cité précédemment, ce type de système frigorifique à adsorption fonctionne à des pressions inférieures à la pression atmosphérique, l'étanchéité entre les pièces de ce système est primordiale pour le bon fonctionnement du couple adsorbant/adsorbat.

Ainsi, avant de procéder la mise en fonctionnement de ce système, nous avons vérifié l'étanchéité de chaque élément. Chaque élément, bien nettoyé, est soumis sous vide de longue durée jusqu'à la pression limite (10^{-4} bar) [42]. Un capteur de pression relié l'élément à tester au système d'acquisition permet de suivre l'évolution de pression en fonction du temps. L'étanchéité est parfaite si la pression reste faible.

Après avoir vérifié l'étanchéité de chaque élément, nous montons le prototype, en utilisant des vannes, des colliers de serrage, muni d'anneau de centrage portant un joint torique. Un tuyau flexible permet de faciliter la connexion de la pompe à vide. Pour les nécessités de l'expérimentation, un capteur de pression et des thermocouples sont installés (Annexe A).

Un pompage sous vide poussé a permis de faire baisser la pression et d'évacuer l'air introduit dans le système. Une fois l'étanchéité de prototype est vérifiée, on procède à l'expérimentation de la machine.

III.3. Résultats et discussion

Les premières expérimentations n'ont pas été ce que nous espérions. En effet nous avons pu constater une baisse de température mais celle-ci étaient trop faible. Pour une température

ambiante de départ d'environ 20 °C nous n'arrivions à refroidir que jusqu'à une température 5 °C pour chaque test. Après avoir contrôlé à nouveau l'étanchéité nous avons déduits que ce problème devait être dû au fait que la pompe n'arrivait pas à atteindre une pression assez basse. Cependant cela pouvait être aussi causé par la présence d'incondensable. Pour contrer ce problème lors des expérimentations suivantes, nous tirons au vide quelques secondes en espérant atteindre la bonne pression après le refroidissement de générateur et juste avant la phase d'adsorption. Cette technique permettait d'améliorer l'adsorption et d'observer des résultats plus intéressants.

Nous avons effectué une série complète d'expériences pour connaître l'évolution des températures et de pression pendant les phases de désorption-condensation et d'adsorption-évaporation. Quelques exemples typiques de résultats expérimentaux sont présentés ici pour le fonctionnement discontinu d'un cycle à adsorption.

Nous obtenons ainsi une meilleure adsorption qui permet à la température de l'eau de baisser jusqu'à 0 °C, à cet instant nous supposons que l'eau se trouve à l'état de surfusion. On le vérifie simplement en effectuant un choc sur l'évaporateur qui provoque la rupture de surfusion. Malheureusement la phase adsorption n'est pas assez importante pour que l'eau contenu dans l'évaporateur cristallise entièrement et continu à soutirer de la chaleur par sublimation. Nous avons vite compris que ce problème était dû au fait que nous avions ajouté dans le système trop d'eau par rapport à la quantité de zéolithe. Pour résoudre cela nous avons laissé la machine adsorber une nuit entière pour que la zéolithe adsorbe la quantité d'eau dont elle a exactement besoin à la température ambiante de fin d'adsorption. Puis nous avons retiré le surplus d'eau de l'évaporateur. Ainsi après la désorption l'évaporateur a exactement la quantité d'eau nécessaire pour l'adsorption.

III.3.1. Évolutions principales

La Figure 23, Figure 24 et représentent l'évolution expérimentale des températures dans le générateur, condenseur-évaporateur respectivement et Figure 25 représente la pression du système, pour ce cycle. Nous allons distinguer trois phases dans ce cycle, désorption-condensation, refroidissement et adsorption-évaporation.

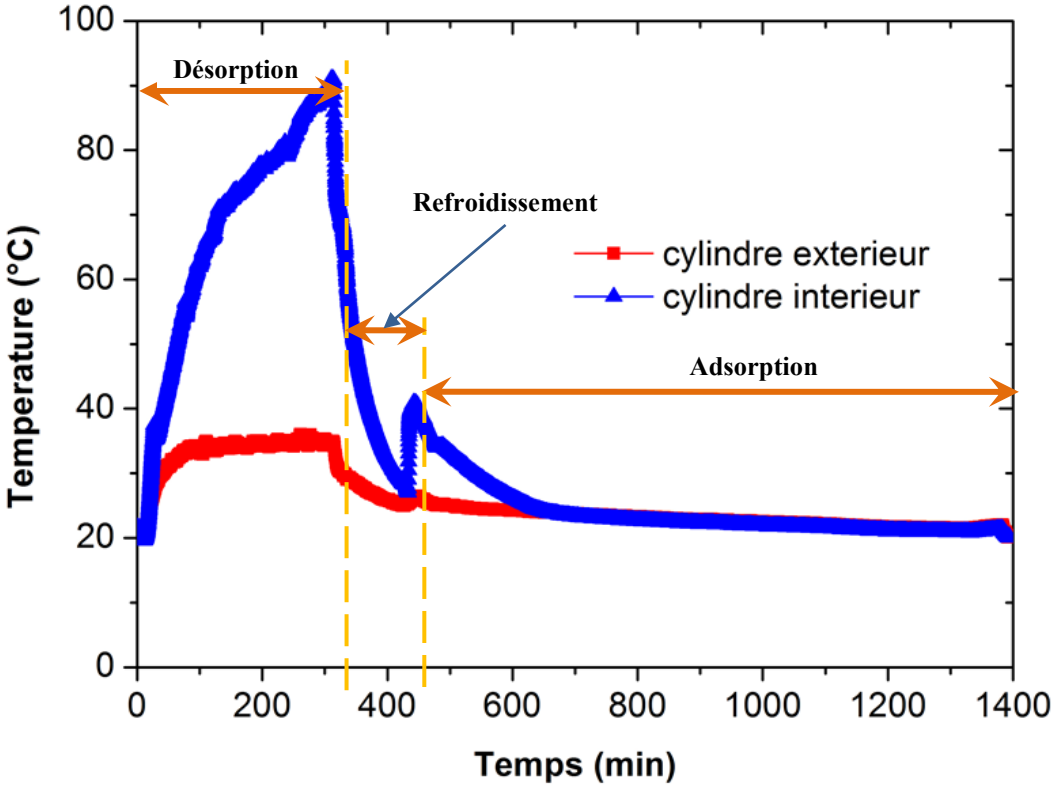


Figure 23 - Évolution expérimentale des températures dans le générateur pendant un cycle

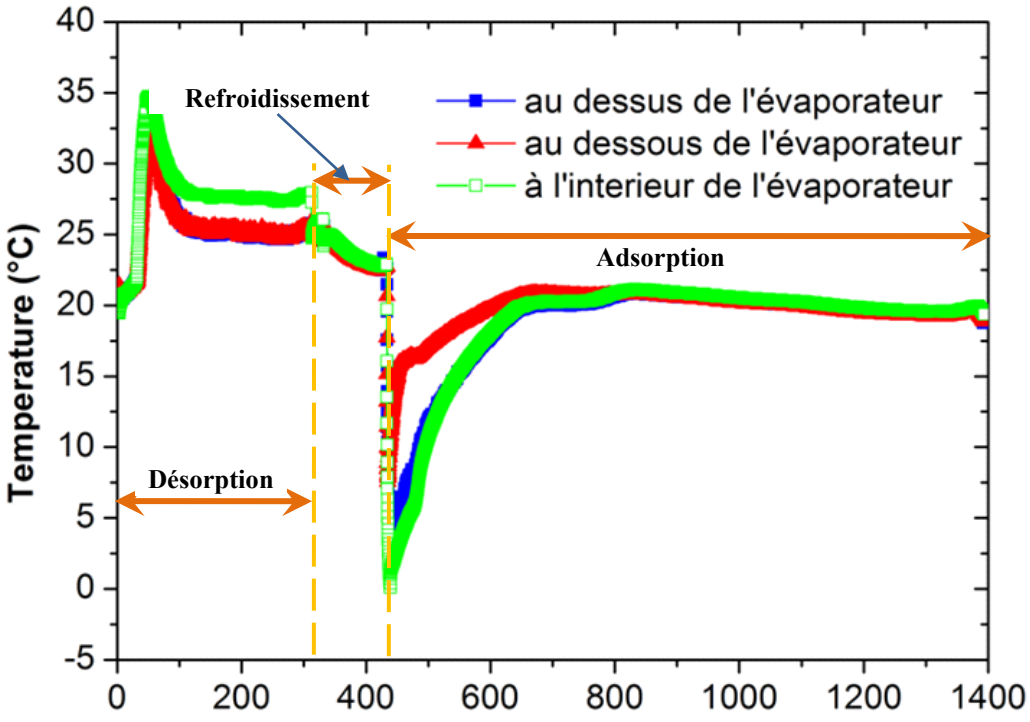


Figure 24 - Évolution expérimentale des températures dans le condenseur-évaporateur pendant un cycle

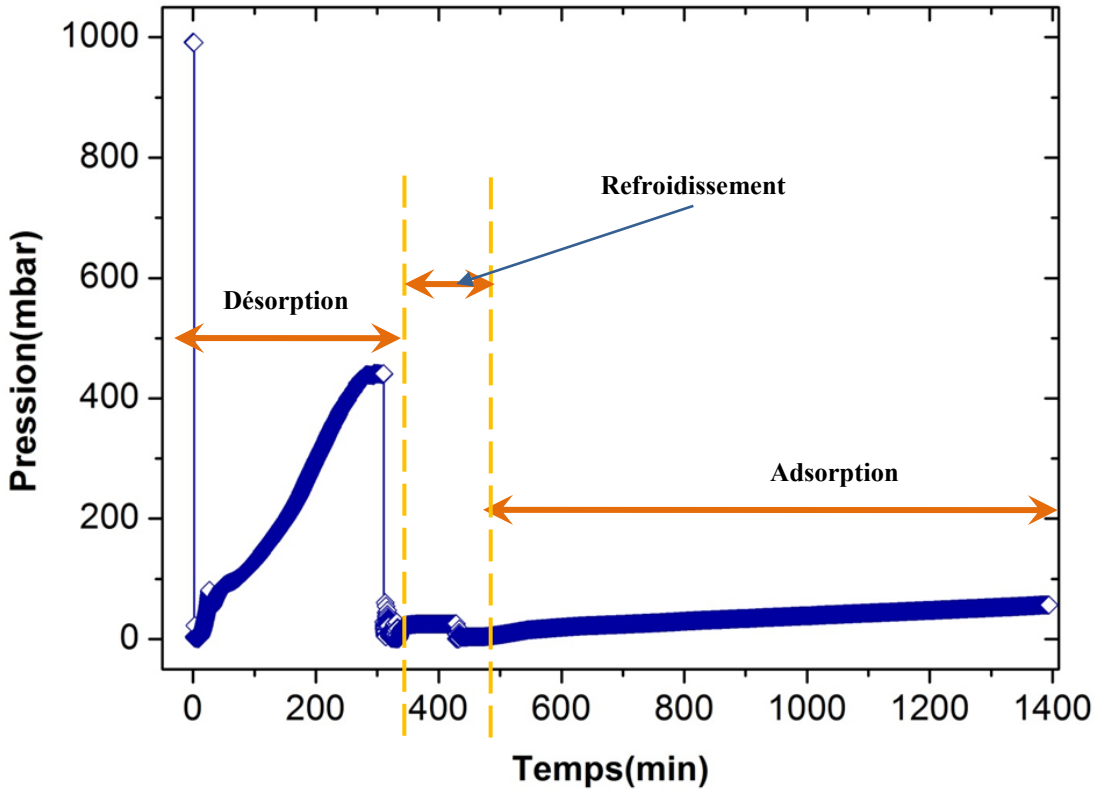


Figure 25 - Évolution expérimentale de la pression du systèmependant un cycle

Phase A. Désorption—Condensation (0-310 min)

On note une forte évolution des températures. Dès le début de cette phase, les températures dans le générateur augmente à cause d'utilisation de chauffage par résistance électrique pour désorber l'eau vers le condenseur. On observe la condensation du liquide dans le condenseur par le fait de stabilité des températures de condenseur, après que la pression atteinte la pression de saturation. Cette pression de système continue en augmentation jusqu'à ce que la zéolithe atteinte la limite de vaporisation de l'eau ou la pression est apparaitre constante quelques minutes avec toujours l'augmentation de température du système. Le chauffage est ensuite interrompu, ce qui entraîne l'arrêt de la désorption.

Phase B. Refroidissement (310-430 min)

L'adsorbeur est refroidi par convection forcée avec l'environnement en allument un ventilateur situé au-dessous de celui. Les températures diminuent vers la température

ambiante et la pression chute rapidement jusqu'à la pression initiale. La machine est prête pour produire le froid.

Phase C. Adsorption—Evaporation (à partir de 430 min)

Apres toute cette préparation, on ouvre la vanne de l'adsorbeur pour permettre à la zéolite l'adsorption de l'eau contenue dans l'évaporateur.

On note dans l'adsorbeur une augmentation rapide des températures due à l'exothermicité de l'adsorption (le maximum est atteint en quelques minutes). Les températures au niveau de l'évaporateur chute très rapidement jusqu'au atteindre une valeur de 0.35 °C, mesurée par un thermocouple placé à l'intérieur de l'évaporateur à la 431 minute.

En ce moment en remarque des gouttelettes d'eau de l'air condensée sur la paroi de l'évaporateur (Figure 26) ce qui permet de dire qu'on est capable de produire de la glace.

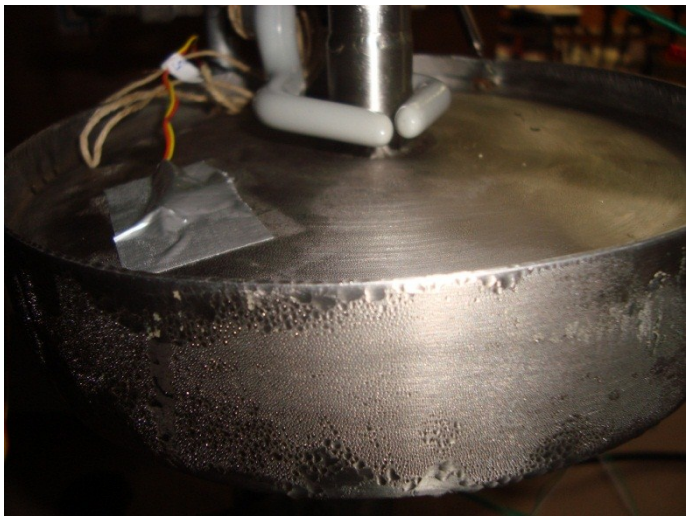


Figure 26 - Production de froid au niveau de l'évaporateur

Afin de valider le modèle développé, une comparaison a été effectuée entre la simulation et les résultats expérimentaux sous une température de source de chauffage de 92 °C, température ambiante de 21°C.

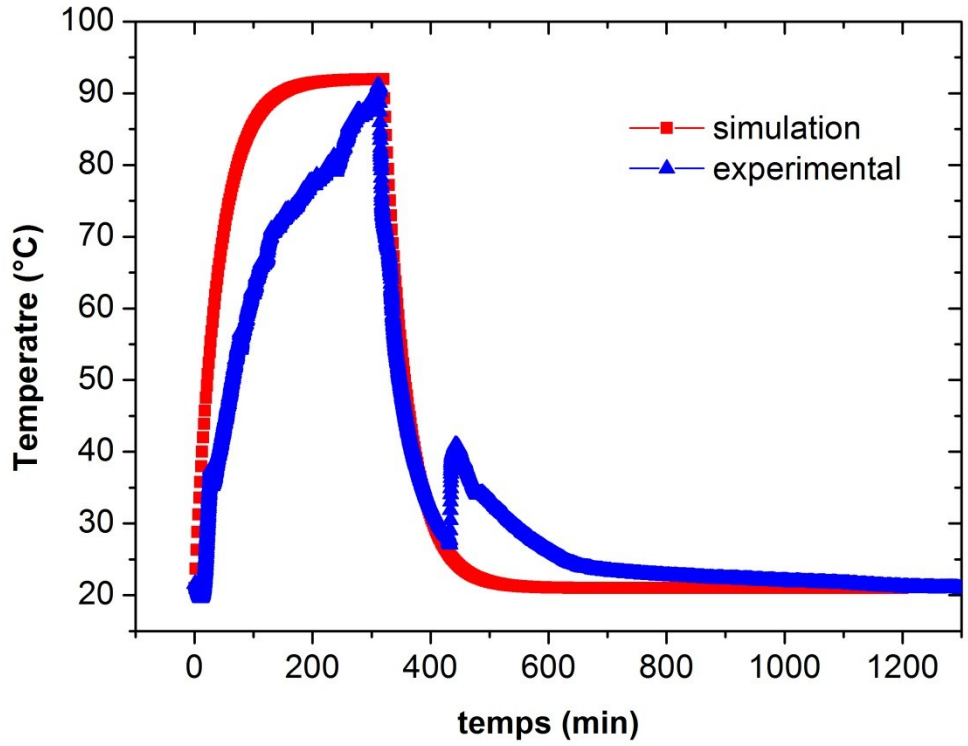


Figure 27 - Températures de générateur en fonction du temps. Simulation par rapport aux résultats expérimentaux

Figure 27 révèle la variation de la température de générateur lors de la désorption-condensation et d'adsorption-évaporation. Comme on peut le constater, il y a une petite différence entre les résultats de la simulation et les résultats expérimentaux, cependant les tendances sont fondamentalement compatibles. Cette figure montre également que la température de générateur au cours de processus chauffage/désorption augmente rapidement en raison de sa grande différence avec la température de chauffage de la source au début du processus et l'augmentation ralentit avec le progrès du processus de chauffage. En raison de la fluctuation de la température de la source de chauffage, la température de générateur également varié au cours de la période chauffage/désorption. C'est ce qui explique le départ périodique des données expérimentales à partir des résultats de simulation.

Dans le même temps, on montre que pendant le processus de refroidissement/adsorption la température de générateur descend très rapidement en raison de sa grande différence avec température ambiante, et avec le progrès de refroidissement, la température est réduite progressivement pour approcher la température ambiante. L'écart maximum entre les données

prédites et mesurées dans la Figure 27 pour la désorption et l'adsorption des processus est de 17 °C et 13 °C respectivement. La différence dans phase de désorption est principalement due aux fluctuations de température de la source de chauffage tandis que le responsable sur la différence dans la partie d'adsorption est la chaleur d'exothermicité libérée par la zéolithe lors l'adsorption de l'eau. Ces caractéristiques de fonctionnement de générateur au cours des deux périodes différentes sont au-dessus similaires aux résultats de simulation dans un système de réfrigération à adsorption rapporté par Saha et al. en 1995 et 2006 [43-44], les résultats de Wang et al. en 2001 [45], les résultats de comparaison expérimental-simulation de Dai et Sumathy en 2003 [46] et les résultats expérimentaux de Jänchen et al. en 2004 [47] (Figure 28).

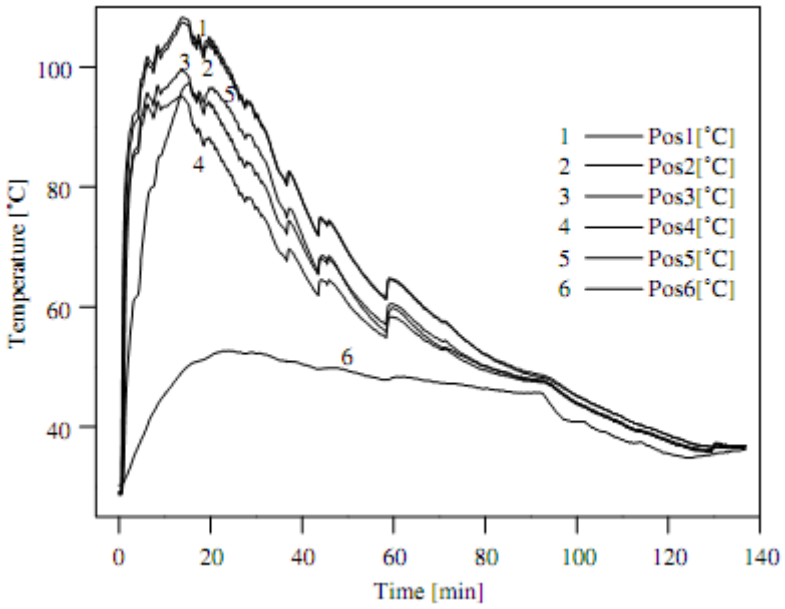


Figure 28 - Profiles des températures dans plusieurs positions dans un générateur à zéolithe NaX/eau en fonction du temps. Position 1–5 températures dans déférents positions à l'intérieur de générateur, position 6 est la température sur la face extérieure générateur selon Jänchen et al. [47]

Les résultats expérimentaux des températures dans le condenseur-évaporateur sont similaires avec les résultats des travaux expérimentaux Saha et al. en 1995 [43], les travaux de Wang et al. en 1998 [48], Li et al. en 2002[49] (Figure 29) et celles de Wang et Wu en 2005 [50].

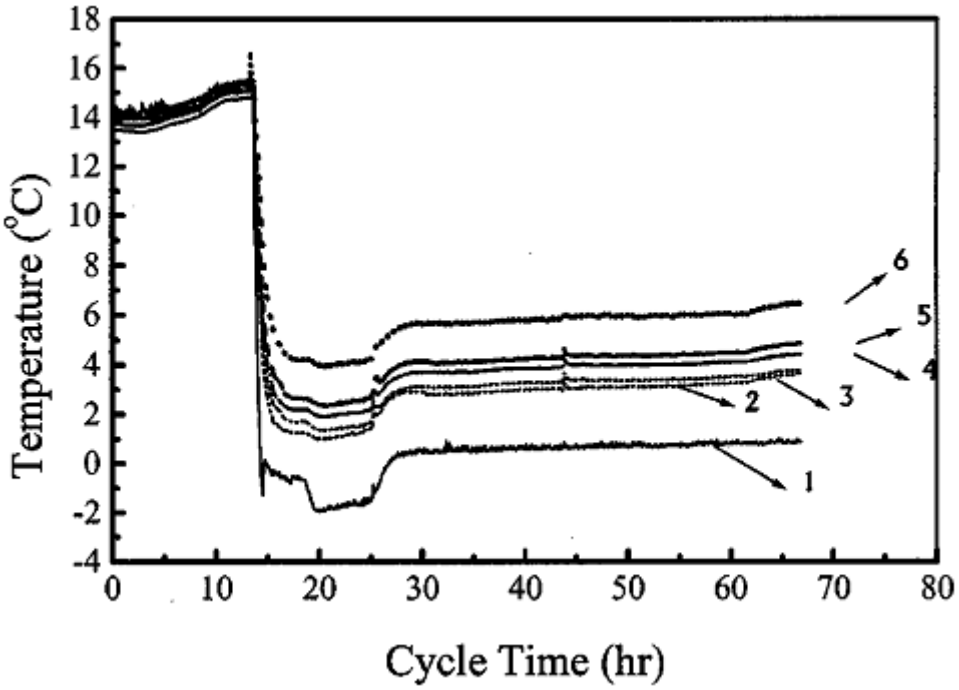


Figure 29 - Résultats expérimentales des températures de condenseur-évaporateur dans plusieurs posions selon Li et al. [49]

III.3.2. Diagramme de Clausius-Clapeyron

Le cycle thermodynamique à adsorption peut être représenté dans le diagramme de Clausius-Clapeyron LnP=f(-1/T). Comme on peut le constater sur la Figure 30, la désorption se présente par une montée de température accompagnée par une augmentation de pression, la température évolue vers une valeur constante qui correspond à celle du chauffage homogène du solide. Ensuite le profil de refroidissement évolue vers la température ambiante et la pression de l'adsorbeur vers celle associée à la concentration minimum d'adsorbat enfermée dans l'adsorbeur. L'adsorption se fait sous basse pression. Pendant cette phase, la température moyenne redescend vers une température voisine de la température initiale.

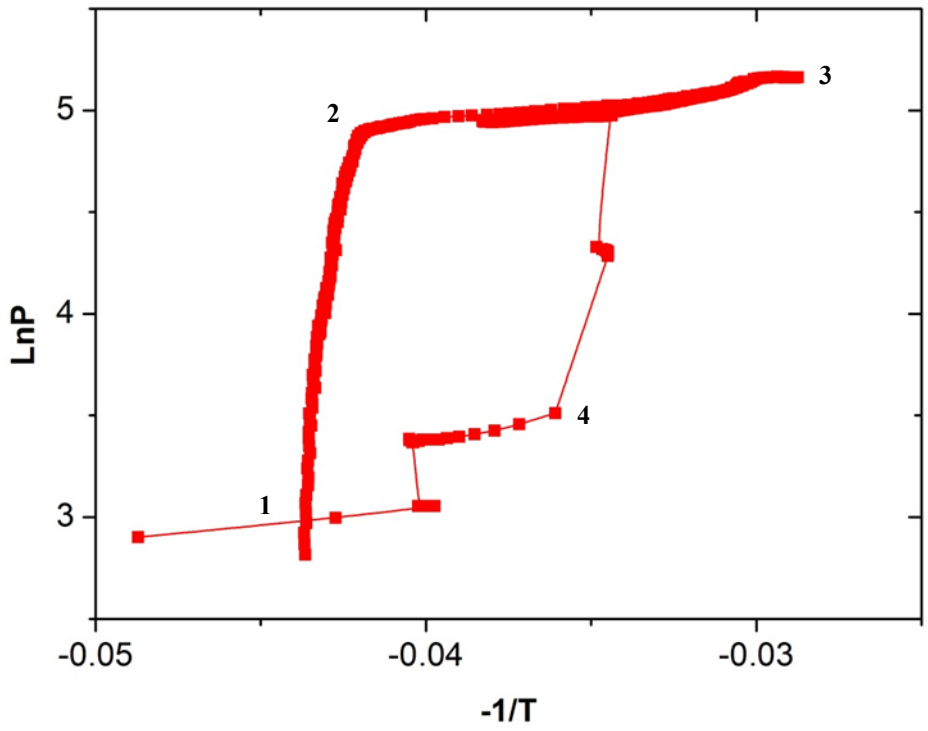


Figure 30 - Cycle obtenue expérimentalement dans le diagramme de Clausius-Clapeyron

Cette évolution du cycle correspond bien aux trois phases précédentes. Mais il apparaît des écarts conséquents par rapport au cycle théorique à cause des pertes thermiques et l'étanchéité du système. Ce cycle est obtenu par plusieurs chercheur, on site par exemple Li et al. en 2002 [49] (Figure 31), Restuccia et al. en 2004 [51], Wang et Wu en 2005 [50], Luo et al. en 2005 [52], Chen et al. en 2007 [53], Wang et al. en 2001 [45], Wu et al. en 2011 [54] (Figure 31), Zhong et al. en 2011 [55] et Lu et al. en 2012 [56].

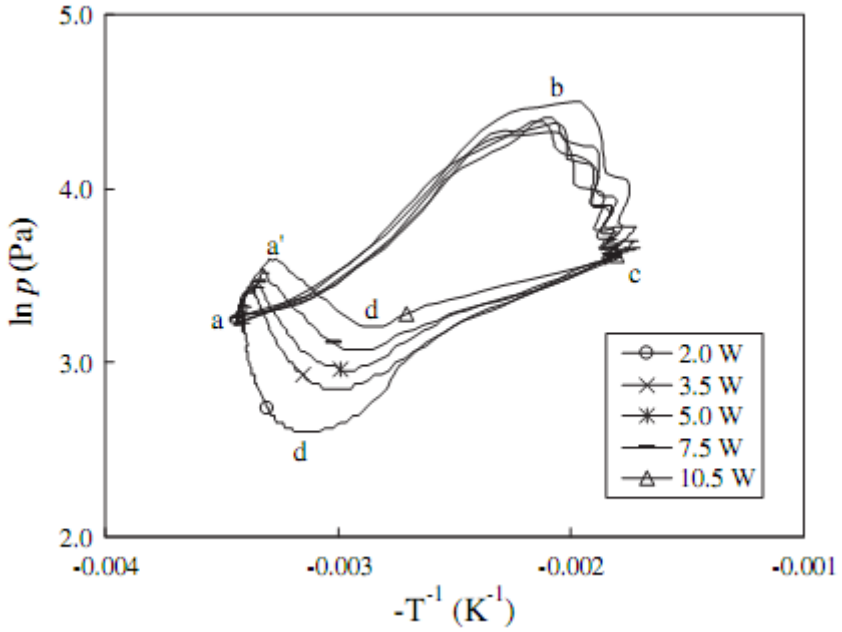


Figure 31 - Cycle obtenue expérimentalement par Wu et al. [54]

III.3.3. Influence des pertes de charges

Nous avons pu voir précédemment que le cycle thermique de l'adsorption pouvait être perturbé en phase d'adsorption par des facteurs tels qu'une pression pas assez basse ou la présence d'incondensable. Un autre problème tout aussi important peu avoir un effet sur la puissance de la machine, il s'agit des pertes de charges dues au dimensionnement du système. Dans le cas de notre prototype ces pertes de charges sont essentiellement causées par les vannes et la conduite de passage de petits diamètres entre l'évaporateur et l'adsorbeur. En effet si l'on souhaite obtenir une grande puissance frigorifique, il faut que l'évaporation s'effectue rapidement. Pour cela la vapeur produite doit être adsorbée au plus vite par la zéolithe. Malheureusement une fois l'eau évaporée, son volume massique est beaucoup plus important et devrait être évacué à une vitesse très importante à travers la conduite pour obtenir une puissance importante.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les résultats expérimentaux sur un prototype d'une machine frigorifique à adsorption qui a été construit récemment dans le laboratoire d'accueil (LaTEP), utilisent la zéolithe et l'eau comme couple adsorbant/adsorbat, ont été présentées dans ce mémoire.

Un modèle numérique a été développé permet de simuler d'une façon stationnaire et instationnaire les performances des machines frigorifique à adsorption. Ce modèle permet également d'étudier l'influence des principaux paramètres de fonctionnement sur les performances du système.

Les analyses sur les résultats expérimentales et les résultats de la simulation numérique ont été effectuées. Un bon accord entre le modèle et les mesures expérimentales a été trouvé, malgré les divers problèmes techniques reconnus.

Cette étude a montré que le couple zéolithe/eau peut être utilisé avec succès pour produire le froid par biomasse utilisant le foyer performant CLIP sachant que l'utilisation de ce couple requiert une plus grande énergie à apporter pour effectuer la désorption. En conséquence, il est commode de construire un système de micro-trigénération que souhaite réaliser "Planète Bois" intègre un système de production de froid par adsorption pour répondre aux différentes exigences du refroidissement dans les applications domestiques. En effet, grâce à ce prototype de configuration simple, nous somme parvenu à produire du froid et parfois même un peu de glace.

Ce que nous avons besoin de dire, malgré le principe de fonctionnement de ses systèmes soit simple, cette installation devra avoir une bonne étanchéité permettant d'éliminer les entrées d'air et de garder le système sous vide, une configuration permettant de réduire au maximum les pertes de charge lors de l'adsorption entre le condenseur-évaporateur et le générateur. De plus le générateur devra être dimensionné de façon à obtenir une température plus uniforme possible à l'intérieur, mais aussi de façon à ce qu'il puisse facilement être refroidit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

[1] **UNESCO.** [En ligne] 16 12 2010. http://www.unesco.org/water/wwap/facts_figures/eau_energie.shtml.

[2] **F. Strub.** *TriGeCLIPTriGeCLIP – Projet de trigénération à partir d'unProjet de trigénération à partir d'un foyer biomasse performant.* Paris : CNAM, 2010.

[3] **The World Bank.** *Rural energy and development for two billion people.*

[4] **B. Dawoud.** A hybrid solar-assisted adsorption cooling unit for vaccine storage. *Renewable Energy.* 2007, Vol. 32, pp. 947–964.

[5] **E. E. Anyanwu et N. V. Ogueke.** Thermodynamic design procedure for solid adsorption refrigiretor. *Renewable Energy.* 2005, Vol. 30, pp. 81–96, pp. 81–96.

[6] **R. E. Critoph.** Rapid cycling solar/biomass powered adsorption refrigeration system. *Renewable Energy.* 1999, Vol. 16, pp. 673-678.

[7] **Y. Wang, Y. Huang et A. P. Roskilly.** Trigeneration integrated with absorption enhanced reforming of lignite and biomass. *Fuel.* 2009, Vol. 88, pp. 2004-2010.

[8] **T. X. Li, et al., et al.** A combined double-way chemisorption refrigeration cycle based on adsorption and resorption processes. *International Journal of Refrigeration.* 2009, Vol. 32, pp. 47-57.

[9] **L. Denglehem et T. Renard.** *Conception d'un prototype de machine frigorifique à adsorption fonctionnant à partir de la chaleur de combustion de biomasse.* Pau : Université de Pau et de Pays de l'Adour (UPPA), 2010.

[10] **M. Pons et J. J. Guilleminot,.** Design of an Experimental Solar-Powered, Solid-Adsorption Ice Maker. *Journal of Solar Energy Engineering-ASME.* 1986, Vol. 108, pp. 332-338.

[11]. **A. Boubakri, J. J. Guilleminot et F. Meunier.** Adsorptive solar powered ice maker: experiments and model Original Research Article. *Solar Energy.* 2000, Vol. 69, Issue 3, pp. 249-263.

[12] **Z. Tamainot-Telto et R. E. Critoph.** Adsorption refrigerator using monolithic carbon-ammonia pair. *International Journal of Refrigeration.* 1997, Vol. 20, pp. 146-155.

[13] **Abdelmoussehel ERROUGANI.** *Thèse: Fabrication et experimentation d'un refrigerateur solaire à adsorption utilisant le couple charbon actif-methanol dans le site de Rabat.* 2007.

[14] **Abdallah Mhimid, Abdelmajid Jemni et Ben Nasrallah Sassi.** Etude theorique des transferts couples de chaleur et de masse lors de la desorption du couple zeolithe 13X-eau. *Revue Générale de Thermique.* 1997, Vol. 36, pp. 697-706.

[15] **Ahmad Al-Ansaria, Hisham Ettouney et Hisham El-Dessouky.** Water–zeolite adsorption heat pump combined with single effect evaporation desalination process. *Renewable Energy.* 2001, Vol. 24, pp. 91-111.

[16] **I. I. El-Sharkawy, et al., et al.** Study on adsorption of methanol onto carbon based adsorbents. *International Journal of Refrigeration.* 2009, Vol. 32, pp. 1579-1586.

[17] **Z. S. Lu, et al., et al.** Performance analysis of an adsorption refrigerator using activated carbon in a compound adsorbent. *Carbon.* 2006, Vol. 44, pp. 747–752.

[18] **Foued Mhiri et Salem El Golli.** Etude d'un réfrigérateur solaire à adsorption solide avec le couple charbon actif-méthanol. *Revue Générale de Thermique.* 1996, Vol. 35, pp. 269-277.

[19] **Fatiha Lemmini et Abdelmoussehel Errougani.** Experimentation of a solar adsorption refrigerator in Morocco. *Renewable Energy.* 2007, Vol. 32, pp. 2629–2641.

[20] **A. P. F. Leite, et al., et al.** *Experimental data on a solar-powered adsorption refrigerator for ice production using activated carbon-methanol pair.* Guanajuato, MÉXICO : ECOS2004 – 17th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environment Impact of Energy and Process Systems, 2004.

[21] **Catherine Hildbrand, et al., et al.** A new solar powered adsorption refrigerator with high performance. *Solar Energy.* 2004, Vol. 77, pp. 311-318.

[22] **R. E. Critoph et S. J. Metcalf.** Specific cooling power intensification limits in ammonia–carbon adsorption refrigeration systems. *Applied Thermal Engineering.* 2004, Vol. 24, pp. 661-678.

[23] **L. M. Sun et F. Meunier.** Adsorption. Aspects théoriques. *Technique de l'ingénieur.* 2003, Vol. J 2 730, pp. 1-20.

[24] **N. C. Srivastava et I. W. Eames.** A review of adsorbents and adsorbates in solid-vapour adsorption heat pump systems. *Applied Thermal Engineering.* 1998, Vol. 18, pp. 707-714.

[25] **Wassila Chekirou.** *Etude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption.* Constantine : Thèse de l'Université de Mentouri, 2008.

[26] **R. E. Critoph.** Performance limitations of adsorption cycles for solar cooling. *Solar energy.* 1988, Vol. 41, pp. 21-31.

[27] **Antonio Pralon Ferreira Leite et Michel Daguenet.** Performance of a new solid adsorption ice maker with solar energy regeneration. *Energy Conversion and Management.* 2000, Vol. 41, pp. 1625-1647.

[28] **S. Brunauer, P. H. Emmett et E. Teller.** Adsorption of gases in multimolecular layers. *Journal of the American Chemical Society-ACS.* 1938, Vol. 60, pp. 309-319.

[29] **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.

[30] **Mohammed Abdelbassat Slasli.** *Modélisation de l'adsorption par les charbons microporeux : Approches théorique et expérimentale.* Neuchâtel : Thèse de l'Université de Neuchâtel, 2002.

[31] **Evandro Ferreira Passos.** *Etude des couples charbon actif/méthanol et de leur application à la réfrigération solaire.* Lausanne : Thèse de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, n° 624, 1986.

[32] **Sophie Lautrette.** *Utilisation des Fibres de Carbone Activé comme catalyseurs de O- et N-glycosylation. Application à la synthèse d'analogues de saponines et nucléosides.* Limoges : Thèse de l'Université de Limoges, 2004.

[33] **Fritz Stoeckli.** Recent developments in Dubinin's theory. *Carbon.* 1998, Vol. 36, pp. 363-368.

[34] **Nick D. Hutson et Ralph T. Yang.** Theoretical basis for the Dubinin-Radushkevitch (D-R) adsorption isotherm equation. *Adsorption.* 1997, Vol. 3, pp. 189-195.

[35] **J. Llobet et V. Goetz.** Rotary system for the continuous production of cold by solid–gas sorption : modeling and analysis of energy performanceSystème rotatif de production. *International Journal of Refrigeration.* 2000, Vol. 23, pp. 609-625.

[36] **E. E. Anyanwu.** Review of solid adsorption solar refrigeration II : An overview of the principles and theory. *Energy Conversion and Management.* 2004, Vol. 45, pp. 1279-1295.

[37] **R. E. Critoph.** Evaluation of alternative refrigerant-adsorbent pairs for refrigeration cycles. *Applied Thermal Engineering.* 1996, Vol. 16, pp. 891-900.

[38] **F. Meunier.** Discussion: "Thermodynamic Analysis of a Solar Zeolite Refrigeration System" (Chang, S. C., and Roux, J. A., 1985, ASME J. Sol. Energy Eng., 107, pp. 189–195). *Journal of Solar Energy Engineering-ASME.* 1986, Vol. 108, pp. 257.

[39] **G. Cacciola et G. Restuccia.** Reversible adsorption heat pump: a thermodynamic model. *International Journal of Refrigeration.* 1995, Vol. 18, Issue 2, pp. 100-106.

[40] **Li Zhi Zhang et Ling Wang.** Performance estimation of an adsorption cooling system for automobile waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering.* 1997, Vol. 17, Issue 12, pp. 1127-1139.

[41] **Y. Liu et K.C. Leong.** The effect of operating conditions on the performance of zeolite/water adsorption cooling systems. *Applied Thermal Engineering.* 2005, Vol. 25, Issue 10, pp. 1403-1418.

[42] **Abdelmoussehel Errougani.** *Fabrication et experimentation d'un refrigerateur solaire à adsorption utilisant le couple charbon actif-methanol dans le site de Rabat.* Rabat : Thèse de l'Université Mmohammed V – AGDAL, n° 2340, 2007.

[43] **Bidyut B. Saha, Elisa C. Boelman et Takao Kashiwagi.** Computational analysis of an advanced adsorption-refrigeration cycle. *Energy.* 1995, Vol. 20, no 10, pp. 983-994.

[44] **B. B. Saha, et al., et al.** Performance modelling of an electro-adsorption chiller. *Philosophical Magazine.* 2006, Vol. 86, No 23, pp. 3613–3632.

[45] **R.Z Wang, et al., et al.** Performance researches and improvements on heat regenerative adsorption refrigerator and heat pump. *Energy Conversion and Management.* 2001, Vol. 42, No 2, pp. 233-249.

[46] **Y.J. Dai et K. Sumathy.** Heat and mass transfer in the adsorbent of a solar adsorption cooling system with glass tube insulation. *Energy.* 2003, Vol. 28, No 14, pp. 1511-1527.

[47] **J. Jänchen, et al., et al.** Studies of the water adsorption on Zeolites and modified mesoporous materials for seasonal storage of solar heat. *Solar Energy.* 2004, Vol. 76, No 1-3, pp. 339-344.

[48] **R. Z. Wang, et al., et al.** Experiments on heat-regenerative adsorption refrigerator and heat pump. *International Journal of Energy Research.* 1998, Vol. 22, pp. 935-941.

[49] **M. Li, et al., et al.** A Combined Cycle of Heating and Adsorption Refrigeration: Theory and Experiment. *Journal of Solar Energy Engineering-ASME.* 2002, Vol. 124, pp. 70-76.

[50] **D.C. Wang et J.Y. Wu.** Influence of intermittent heat source on adsorption ice maker using waste heat. *Energy Conversion and Management.* 2005, Vol. 46, No 6, pp. 985-998.

[51] **G. Restuccia, et al., et al.** modelling, Selective water sorbent for solid sorption chiller: experimental results and. *International Journal of Refrigeration.* 2004, Vol. 27, No 3, pp. 284-293.

[52] **H.L. Luo, et al., et al.** Year round test of a solar adsorption ice maker in Kunming, China. *Energy Conversion and Management.* 2005, Vol. 46, No 13-14, pp. 2032-2041.

[53] **C.J. Chen, et al., et al.** Studies on cycle characteristics and application of split heat pipe adsorption ice maker. *Energy Conversion and Management.* 2007, Vol. 48, No 4, pp. 1106-1112.

[54] **Wei-Dong Wu, Hua Zhang et Chuan-lin Men.** Performance of a modified zeolite 13X-water adsorptive cooling module powered by exhaust waste heat. *International Journal of Thermal Sciences.* 2011, Vol. 50, No 10, pp. 2042-2049.

[55] **Yongfang Zhong, Tiegang Fang et Kevin L. Wert.** An adsorption air conditioning system to integrate with the recent development of emission control for heavy-duty vehicles. *Energy.* 2011, Vol. 36, No 7, pp. 4125-4135.

[56] **Z.S. Lu, L.W. Wang et R.Z. Wang.** Experimental analysis of an adsorption refrigerator with mass and heat-pipe heat recovery process. *Energy Conversion and Management.* 2012, Vol. 53, No 1, pp. 291-297.

ANNEXES

Annexe A : matériel expérimental

A.1. Instrumentation de mesures

A.1.1. Mesure de la température

Des thermocouples de type K (Figure 32) sont utilisés pour mesurer la température :

- À l'intérieur de générateur
- De la face extérieure de générateur
- Au-dessus de l'évaporateur
- Au-dessous de l'évaporateur
- À l'intérieur de l'évaporateur

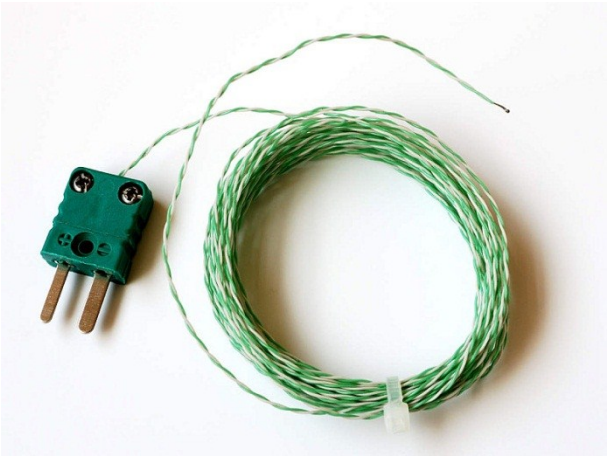


Figure 32 - Thermocouple de type K

A.1.2. Mesure de la pression

Pour mesurer la pression du système, un instrument compact de vide a été utilisé. Thyracont VD85 (Figure 33) est utilisé pour mesurer et télécharger des données dans un ordinateur via un port USB permet et un logiciel VacuGraph 8.0.

L'instrument VD85 peut être actionné à partir de sa batterie interne ou à partir d'une alimentation d'énergie externe. L'instrument est attaché à l'article d'essai avec une bride standard de vide de KF.

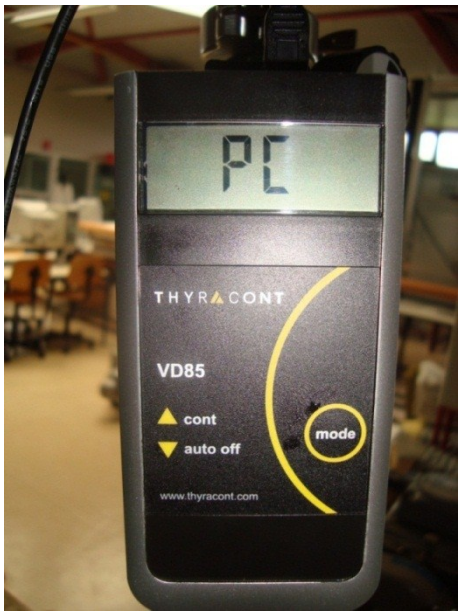


Figure 33 - Capteur de pression Thyracont VD85

A.2. Vannes et éléments de liaisons

A.2.1. Vannes

Nous avons utilisé les vannes manuelles type Edwards (Figure 34) pour isoler le générateur, le condenseur-évaporateur, ou pour isoler la pompe à vide.



Figure 34 - Vanne Edward

A.2.2. Eléments de liaisons

Pour la connections des différents éléments du prototype, nous avons utilisé des colliers de serrage (Figure 35) munis des joints toriques (Figure 36) avec la graisse à vide (Figure 37) pour augmenter l'étanchéité du système.



Figure 35 - collier de serrage



Figure 36 - Joint torique



Figure 37 - Graisse à vide

Un tuyau flexible en inox de 25 mm (Figure 38), a été utilisé pour la connexion de la pompe à vide permet de garder le système stable et sans vibration pendant le fonctionnement de la pompe à vide.



Figure 38 - Tuyau flexible

A.3. Pompe à vide

La pompe à vide utilisée est une pompe à palettes de 822 tours par minute (Figure 39).



Figure 39 - Pompe à vide

A.4. Centrale d'acquisition

C'est une centrale composé d'un ordinateur relie a une unité de communication de type HP 34970A.

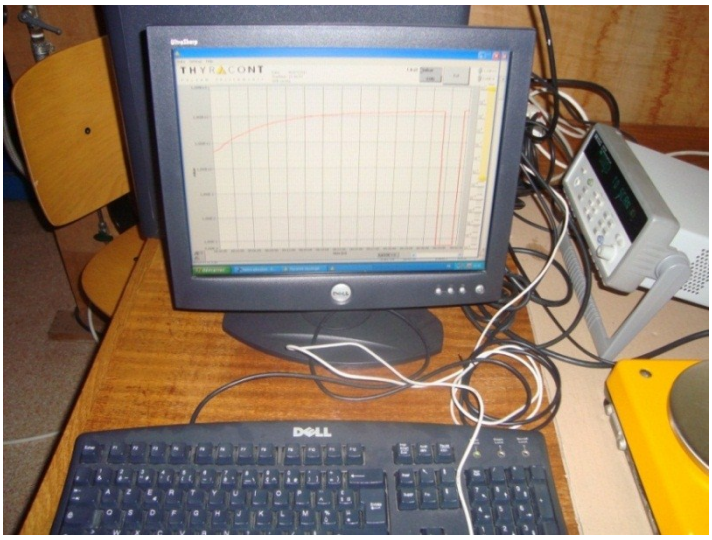


Figure 40 - Centrale d'acquisition