

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



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes

2^{ème} Année Master

Etude d'une machine de réfrigération à adsorption solaire

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Présenté par : NDZEBELE Aldrich Déo Gracias

Sous la direction de :

Prof. Ould- Lahoucine cherif

Devant les membres du Jury :

Président : Prof. Moussaoui Abdelkrim

Examineur principal : Dr. Tamersit Khalil

Juin 2023

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents pour leur soutien et leur
Encouragement durant toute ma carrière d'étude

Mes frères,

Toute ma grande famille,

Ainsi qu'à tous mes amis et tous qui me connaissent

Remerciements

Avant tout, je remercie Dieu pour m'avoir donné le courage et la patience de mener ce modeste travail.

J'adresse mes remerciements à mon encadreur le Professeur **OULD C. LAHOUCINE** pour sa direction de ce mémoire, ainsi que pour ses conseils précieux.

Je tiens à adresser mes plus sincères reconnaissances aux membres du jury, A mes chers et fidèles amis et à tous ceux qui me connaissent

Sommaire

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Sommaire	iii
Liste des Figures.....	v
Liste des Tableaux.....	vi
Nomenclature	vii
Résumé du mémoire.....	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre I - Etat de l'art sur la réfrigération solaire à adsorption	4
I.1. Définition du phénomène d'adsorption	5
I.2. Type d'adsorption	5
I.2.1. Adsorption chimique	5
I.2.2. Adsorption physique	6
I.3. Sélection du couple solide/fluide pour la production de froid par adsorption	6
I.3.1. Choix du solide adsorbant	6
I.3.2. Choix du fluide adsorbant	7
I.4. Couples de travail	8
I.4.1. Gel de silice- Eau	9
I.4.2. Charbon Actif – Méthanol.....	10
I.5. Charbon actif.....	10
I.5.1. Le Maxsorb III	11
I.5.2. Fibre de charbon actif.....	12
I.6. Avantages et inconvénients des machines à adsorption	13
I.6.1. Avantages	13
I.6.2. Inconvénients :	13
Chapitre II - Présentation du système de réfrigération à adsorption solaire	14
II.1. Introduction :	15
II.2. Description du Cycle de fonctionnement	16
II.2.1. Machine avec un seul lit :	19
II.3. Composants du système - capteur absorbeur.....	21
II.3.1. Collecteur :	21
II.4. Le lit d'adsorbant :	22
II.5. Plaque absorbante	23
II.6. Couverture de vitrage	23
II.7. Isolation où Espace :.....	23
II.8. Condenseur	23

II.9. Réservoir et vannes.....	24
Chapitre III - Modélisation d'une machine frigorifique solaire à adsorption	25
III.1. Introduction	26
III.2. Analyse en 6 points	26
III.3. Données d'entrée des simulations	28
III.3.1. Calcul de la Pression de saturation en utilisant la simulation online :	29
Chapitre IV - Résultats et discussions.....	31
IV.1. Introduction :.....	32
IV.2. Explication de l'équation d'état de Dubinin-Astatakhov :	33
IV.2.1. Influence des niveaux de pression.....	33
IV.2.2. Influence de la température maximale	35
IV.2.3. Influence de la température d'adsorption.....	35
IV.3. Effet de la température d'adsorption.....	36
IV.4. Effet de la température de désorption	39
IV.5. Validation.....	41
Conclusions Générale et perspectives	43
Futur travail et perspectives	44
Annexe	45
Références bibliographiques	47

Liste des Figures

Chapitre I : *Etat de l'art sur la réfrigération solaire à adsorption*

Figure I.1 : Schéma dispositif du phénomène adsorption	5
Figure I.2 : Structure poreuse de l'adsorbant	12

Chapitre II - *Présentation du système de réfrigération à adsorption solaire*

Figure II.1 : Schéma récapitulatif d'une machine frigorifique solaire à adsorption	16
Figure II.2 : Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique théorique simple effet, dans un diagramme de Clapeyron	17
Figure II.3 : Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique théorique simple effet, dans un diagramme de Clapeyron	17
Figure II.4 : A : Phase de chauffage	18
Figure II.5 : b : Phase de refroidissement	19
Figure II.6 : Composants du lit d'adsorption	21
Figure II.7 : Lit d'adsorption tubulaire et rectangulaire	22
Figure II.8 : Exemple d'un condenseur.	24

Chapitre III : *Modélisation d'une machine frigorifique solaire à adsorption*

Figure 11 : Fenêtre pour le calcul de la pression de saturation online sur le site Saecanet.....	30
--	----

Chapitre IV : *Résultats et discussions*

Figure IV.1 : Diagramme de Clapeyron pression-température pour un cycle d'adsorption d'une journée	32
Figure IV.2 : Absorption d'adsorbant - diagramme de température du lit avec température de condensation variable.....	34
Figure IV.3 : Influence de l'augmentation de la température maximale/désorption du lit.....	35
Figure IV.4 : Influence de la diminution de la température d'adsorption/minimale du lit.....	36
Figure IV.5 : Effet de l'augmentation de la température ambiante (adsorption)/du condenseur sur le COP de la machine à adsorption	36
Figure IV.6 : Effet de la température ambiante (adsorption)/du condenseur sur la production de la glace (kg) de la machine à adsorption.	38
Figure IV.7 : Températures ambiantes et précipitations pour la ville de Ouargla (Algérie)....	38
Figure IV.8 : Températures ambiantes et précipitations pour la ville de Lubumbashi (RDC).39	
Figure IV.9 : Effet de la température de désorption (température maximale du lit) sur le COP de la machine à adsorption.....	40
Figure IV.10 : Effet de la température de désorption (température maximale du lit) sur la production de la glace (kg) de la machine à adsorption.....	41

Liste des Tableaux

Chapitre I : *Etat de l'art sur la réfrigération solaire à adsorption*

Tableau I.1 : caractéristiques physiques des adsorbants	7
Tableau I.2 : Propriétés thermodynamiques d'adsorbats	8
Tableau I.3 : Données expérimentales pour le charbon actif avec du méthanol comme fluide de travail,.....	10
Tableau I.4 : Les propriétés du Maxsorb.....	11

Chapitre II - *Présentation du système de réfrigération à adsorption solaire*

Tableau II.1 : Fonctionnement de système de la Machine frigorifique solaire à adsorption avec cycle simple effet	20
--	----

Chapitre III : *Modélisation d'une machine frigorifique solaire à adsorption*

Tableau III.1 : Paramètre utilisés dans la simulation.	29
---	----

Chapitre IV : *Résultats et discussions*

Tableau IV.1 : Températures de condensation pertinentes et leurs pressions de saturation correspondantes pour le Méthanol.	33
Tableau IV.2 : Températures d'évaporateur pertinentes et leurs pressions de saturation correspondantes pour le Méthanol	33

Nomenclature

Symbole	Description	Unité
P	Pression	KPa
T	Température	°C
X	Masse adsorbée	Kg/kg
R	Constante de gaz	J/kg k
D, n	Paramètres caractéristiques du couple d'adsorbant/adsorbé	-
Δx	Masse cyclée	Kg/kg
Q_{evap}	Quantité de froid produite à l'évaporateur	KJ
Q_{tot}	Quantité d'énergie totale	KJ
m_{glace}	La quantité totale de glace produite	Kg
C_p	Chaleur spécifique	K/kg k
COP	Coefficient de performance	-
C_{pAC}	Chaleur Spécifique de AC	KJ/kg
C_{pwall}	Chaleur Spécifique de la paroi d'adsorbéur	KJ/kgK
C_{pice}	Chaleur spécifique de glace	KJ/kgK
T_{ad}	Température d'adsorption	°C
T_g	Température régénération	°C
T_{con}	Température de Condensation	°C
T_{eva}	Température de l'évaporateur	°C
T_{iw}	Température initiale d'eau	°C
m_{eva}	Masse d'Evaporation	Kg
P_{cond}	Pression du condensateur	KPa
P_{evap}	Pression d'évaporateur	KPa
P_{sat}	Pression de saturation	KPa

Indices	Description	Unité
AC	Charbon actif	-
sat	Saturation	-
con	Condensation	-
eva	Évaporation	-
ads	Adsorption	-
g	Régénération	-
Dés	Désorption	-

Résumé du mémoire

La part du continent Africain en général et la région d’Afrique du nord en particulier dans les pertes et gaspillages des produits agricoles est estimée par la FAO comme très importante ; le disfonctionnement adéquat de la chaîne de froid en est la raison principale à cet état de fait. Par conséquent, en plus d’améliorer la productivité alimentaire, il est essentiel d’explorer tous les moyens possibles pour réduire les pertes et les gaspillages alimentaires dans les systèmes de distribution. La chaîne du froid fait référence à une combinaison de transport à température contrôlée et de chaîne d’approvisionnement. La logistique de la chaîne du froid est définie comme les solutions de congélation nécessaires pour maintenir la qualité et la durée de conservation de produits tels que les fruits de mer, les médicaments pharmaceutiques, les produits agricoles frais entre autres. Ce mémoire de master s’attaque à ce problème crucial du Nexus Energie – produits agricoles, en étudiant une machine de production de la glace par adsorption solaire utilisant le couple Maxsorb III-méthanol. Parmi les résultats des simulations et études paramétriques, il a été trouvé qu’une consommation d’énergie thermique d’origine solaire de l’ordre de 9582 kJ, donne un COP et produit une quantité de glace de 0.4 et 9 kg, respectivement. Ces résultats sont en bon accords avec des études similaires (théoriques et expérimentales) effectuées par d’autres chercheurs.

Mots clés : Adsorption solaire, production glace, COP, modélisation, simulation, étude paramétrique.

Abstract of the thesis

The share of the African continent in general and the region of North Africa in particular in losses and waste of agricultural products is estimated by the FAO as very significant; the adequate dysfunction of the cold chain is the main reason for this state of affairs. Therefore, in addition to improving food productivity, it is essential to explore all possible means to reduce food loss and waste in distribution systems. Cold chain refers to a combination of temperature-controlled transport and supply chain. Cold chain logistics is defined as the freezing solutions needed to maintain the quality and shelf life of products such as seafood, pharmaceutical drugs, fresh agricultural produce among others. This master's thesis tackles this crucial problem of the Nexus Energy - food, by studying a machine for producing ice by solar adsorption using the Maxsorb III-methanol couple. Among the results of the simulations

and parametric studies, it was found that a thermal energy consumption of solar origin in the order of 9582 kJ, gives a COP and produces an amount of ice of 0.4 and 9 kg, respectively. These results are in good agreement with similar studies (theoretical and experimental) carried out by other researchers.

Key words: Solar adoption, ice production, COP, modeling, simulation, parametric study.

الرسالة ملخص

تقدر منظمة الأغذية والزراعة حصة القارة الأفريقية بشكل عام ومنطقة شمال أفريقيا بشكل خاص في خسائر وهدر المنتجات الزراعية على أنها كبيرة للغاية ؛ الخلل الكافي في سلسلة التبريد هو السبب الرئيسي لهذه الحالة. لذلك ، بالإضافة إلى تحسين إنتاجية الغذاء ، من الضروري استكشاف جميع الوسائل الممكنة لتقليل فقد الأغذية وهدرها في أنظمة التوزيع. تشير سلسلة التبريد إلى مجموعة من النقل الذي يتم التحكم في درجة حرارته وسلسلة التوريد. تُعرّف لوجستيات سلسلة التبريد بأنها حلول التجميد اللازمة للحفاظ على الجودة وفترة صلاحية المنتجات مثل المأكولات البحرية والأدوية والمنتجات الزراعية الطازجة وغيرها. تتناول أطروحة الماجستير هذه المشكلة الحاسمة في العلاقة بين الطاقة والزراعة ، من خلال دراسة آلة لإنتاج الثلج عن طريق الامتزاز الشمسي باستخدام زوج Maxsorb III-methanol. من بين نتائج المحاكاة والدراسات البارامترية ، وجد أن استهلاك الطاقة الحرارية من أصل شمسي في حدود 9582 كيلو جول ، يعطي COP وينتج كمية من الجليد تبلغ 0.4 و 9 كجم على التوالي. تتوافق هذه النتائج بشكل جيد مع الدراسات المماثلة (النظرية والتجريبية) التي أجراها باحثون آخرون.

الكلمات الدالة

اعتماد الطاقة الشمسية ، إنتاج الجليد ، COP ، النمذجة المحاكاة ، دراسة البارامترية.

Introduction générale

Contexte et motivation

L'Algérie se trouve dans une région en situation d'insécurité alimentaire et importatrice nette d'aliments. Elle produit beaucoup moins de nourriture qu'il n'en faut en raison de nombreux facteurs, tels que des terres arables limitées due en partie une pénurie de ressources en eau et une faible pluviométrie ; ceci engendre une productivité agricole inférieure à la moyenne mondiale dans de nombreux cas. De plus, dans la région d'Afrique du nord, presque la totalité des pays de cette région souffrent de pertes et de gaspillages alimentaires excessifs. L'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) a estimée récemment que les pertes et gaspillages alimentaires dans le monde s'élèvent à environ 1,3 milliard de tonnes métriques, et la part de la région d'Afrique du nord dans ces pertes et gaspillages est estimée par la FAO comme très importante. Par conséquent, en plus d'améliorer la productivité alimentaire, il est essentiel d'explorer tous les moyens possibles pour réduire les pertes et les gaspillages alimentaires dans les systèmes de distribution. De tels efforts augmenteront la disponibilité, la salubrité et la sécurité des aliments, réduiront la pénurie alimentaire et assureront la sécurité alimentaire en Algérie et dans la région dans son ensemble. Ainsi, la mise en place d'une infrastructure adéquate de la chaîne du froid et une application d'une gestion adéquate sont essentielles pour assurer la sécurité alimentaire. Les coûts de mise en place d'une industrie de la chaîne du froid efficiente du point de vue économique et environnementale, peuvent être plus que compensés par les avantages du maintien de quantités d'aliments agricoles non seulement importantes mais aussi ayant des qualités selon les normes requises.

S'il semble incroyable qu'en moyenne 50% de la nourriture produite dans les pays africains soit gaspillée, selon la (FAO), c'est parce que la majeure partie de la nourriture en Afrique est produite par 60% de la population qui sont de petits exploitants agriculteurs. Ce sont ces agriculteurs qui ont réussi à passer de l'agriculture de subsistance à la production d'un excédent pouvant être vendu au marché, qui malheureusement manquent de capacités de stockage au froid et qui ont besoin d'aide.

La chaîne du froid fait référence à une combinaison de transport à température contrôlée et de chaîne d'approvisionnement. La logistique de la chaîne du froid est définie comme les solutions de congélation nécessaires pour maintenir la qualité et la durée de conservation de produits tels que les fruits de mer, les médicaments pharmaceutiques, les produits agricoles frais entre autres. Les chaînes du froid sont bénéfiques pour éviter les surcapacités, maintenir la qualité des produits, allonger la période de commercialisation et réduire les goulots d'étranglement du transport en période de pointe.

Approche proposée

La disponibilité d'une alimentation électrique fiable est l'un des enjeux majeurs pour les agriculteurs en Afrique en général et dans les régions isolées en Algérie en particulier. D'où des solutions simples s'appuyant sur des sources d'énergie renouvelables telles que le solaire pourraient être efficaces. Un système d'adsorption fonctionnant par intermittence produira de la glace pendant la nuit en utilisant l'énergie solaire disponible pendant la journée. Un prototype de réfrigérateur solaire à adsorption autonome utilisant le couple Maxsorb III-méthanol est étudié dans ce travail de master. Sa capacité de produire la glace est de 9 kg environ ; ce choix d'une petite machine est délibéré, car la maîtrise de la technologie du froid solaire à adsorption suppose de considérer au début un prototype de petite dimensions idéal pour le transport, avant de passer aux machines de grandes capacités de fabrication de la glace.

Limitations de l'étude

Tenant compte de la limitation du temps alloué au travail de fin d'étude de master ; seul la modélisation et la simulation du réfrigérateur sont abordés dans ce mémoire. De plus, l'étude de la machine en régime transitoire et son interaction avec les conditions climatiques variables au cours d'une journée (les différents modes de transferts de chaleur de et vers la machine frigorifique et l'environnement) ne sera pas étudiée. L'approche de modélisation est de type thermodynamique, car elle considère la machine en régime quasi-permanent où la moyenne des échanges énergétiques entre la machine et l'environnement sur un intervalle de temps est seule prise en compte.

Organisation du mémoire

Ce mémoire est constitué de quatre chapitres avec un premier chapitre sur l'état de l'art sur la réfrigération solaire à adsorption. Le second chapitre sera consacré à la présentation du système de réfrigération à adsorption solaire avec la description des différents composants de la machine, le cycle à adsorption solaire sur un diagramme de Clapeyron du couple Maxsorb III-méthanol. La modélisation thermodynamique de la machine avec présentation de toutes les équations utilisées dans les simulations fera l'objet du chapitre trois. Les résultats des simulations avec une étude paramétrique avec discussion, constituent l'essentiel du chapitre quatre. Il sera finalisé par une validation des résultats des simulations par comparaison avec des mesures expérimentales de M. Pons et J.J. Guilleminot. Une conclusion générale constitue la dernière partie de ce mémoire de master.

Chapitre I

Etat de l'art sur la réfrigération solaire à adsorption

I.1. Définition du phénomène d'adsorption

En 1711, Fantana et Schelle [1] ont fait une découverte majeure concernant le phénomène d'adsorption, qui est illustré dans la Figure 1.1. Ce phénomène décrit la capture de molécules de gaz (appelées adsorbats) à la surface d'un solide (appelé adsorbant). Cette capture se traduit par une augmentation de la concentration des molécules de gaz à la surface du solide par rapport à la quantité totale de gaz initialement présente. Il est important de noter que cette capture se produit sans modifier le volume de l'adsorbant.

L'adsorption dépend de manière quantitative des propriétés physiques (comme la porosité et la surface spécifique), des propriétés chimiques (comme l'acidité) et de la nature des molécules adsorbées. Pendant le processus d'adsorption, le gaz ne subit pas de transformation chimique, et le solide conserve son intégrité physique ainsi que son architecture cristallographique. Plus précisément, il n'y a pas de gonflement du solide.

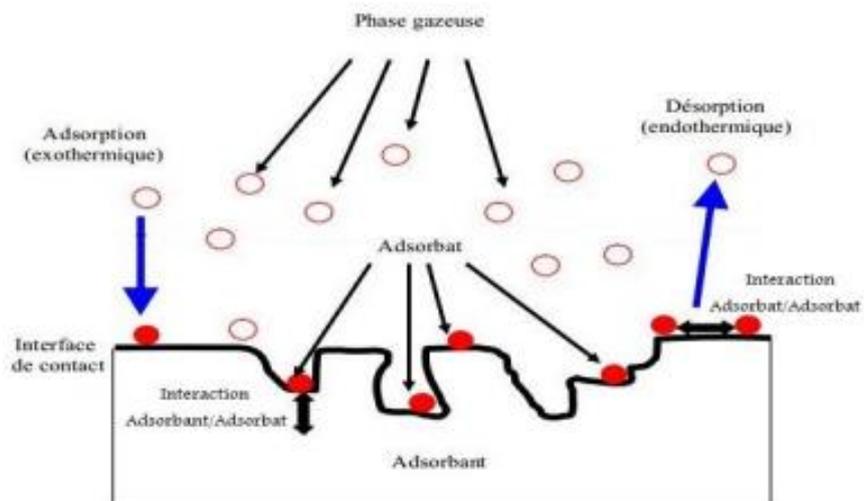


Figure I.1 : Schéma dispositif du phénomène adsorption [1].

I.2. Type d'adsorption

I.2.1. Adsorption chimique

Dans le cas de l'adsorption chimique, le processus résulte d'une réaction chimique dans laquelle des liaisons chimiques se forment entre les molécules de l'adsorbant (réfrigérant) et la surface de l'adsorbant (solide). Il s'agit d'une liaison relativement forte avec une énergie

de liaison d'environ 50 à 400 kJ/mol [2]. C'est un phénomène irréversible et favorisé par des températures élevées.

I.2.2. Adsorption physique

La liaison des molécules d'adsorbat (réfrigérant) sur le solide d'adsorbant se fait essentiellement par les forces de Van der Waals et les forces dues aux interactions électrostatiques de polarisation, dipôle et quadripôle pour les adsorbants ayant une structure ionique. Cette liaison faible, avec des énergies d'interactions de l'ordre 20 kJ/mol [2].

C'est un phénomène réversible c'est-à-dire que les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées en augmentant la température.

I.3. Sélection du couple solide/fluide pour la production de froid par adsorption

La production de froid par adsorption repose sur la compatibilité entre le réfrigérant et l'adsorbant. Cependant, il est essentiel de sélectionner soigneusement ces composants, car l'efficacité de la machine dépend de certaines caractéristiques physiques et chimiques clés.

En outre, l'évaluation de l'efficacité de la machine repose sur plusieurs facteurs tels que les conditions thermodynamiques (température, pression, etc.), la complexité de manipulation, le domaine d'utilisation et les préoccupations environnementales, entre autres [3,4,5]. Par conséquent, notre prochaine discussion se concentrera sur une étude détaillée de chaque composant du couple de travail.

I.3.1. Choix du solide adsorbant

Dans l'étude du phénomène d'adsorption, il existe un large choix d'adsorbants. Les sélections d'adsorbants sont généralement basées sur plusieurs critères. [6,7,8] :

- Leurs fortes conductivités thermiques pour avoir un bon transfert de chaleur au sein de l'adsorbant.
- La capacité d'adsorption doit être plus élevée à la basse température, et à la pression d'équilibre dans l'évaporateur. Au contraire, elle doit être faible à la température élevée du cycle associée à la pression d'équilibre dans le condenseur.
- Il doit être non toxique et non corrosif.
- Il doit être largement disponible.

- Grande surface spécifique d'adsorption. Le tableau 1.1 donne la surface spécifique, les tailles des pores ainsi que la porosité interne des différents adsorbants utilisés dans l'adsorption selon la classification de [9].

Tableau I.1 : caractéristiques physiques des adsorbants [9]

Adsorbant	Surface spécifique (m^2/g)	Taille des pores (nm)	Porosité interne
Charbons actifs	400 à 2 000	1.0 à 4.0	0.4 à 0.8
Tamis moléculaire carbonés	300 à 600	0.3 à 0.8	0.35 à 0.5
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
Alumines activées	200 à 400	1.0 à 6.0	0.3 à 0.6

I.3.2. Choix du fluide adsorbat

Les fluides frigorigènes naturels utilisés dans les systèmes de réfrigération à adsorption ont généralement un impact environnemental nul. Les réfrigérants les plus couramment utilisés sont l'ammoniac, le méthanol, et l'eau. Ils ont des valeurs de chaleur latente relativement élevées (1368, 1160 et 2258 kJ/kg, respectivement), et de faibles volumes spécifiques (de l'ordre de $103 m^3 / kg$) [6].

L'eau prospère la meilleure chaleur latente de vaporisation. Il a l'avantage d'être non toxique. Sa prise en glace à $0\text{ }^\circ\text{C}$, ce qui limite son utilisation pour la production de froid aux basses températures [4]. L'ammoniac et le méthanol ont une chaleur latente inférieure à celle de l'eau, mais ils ont l'avantage sur ce dernier de pouvoir produire du froid à des températures plus basses. Pour plus de détaille Le tableau 2.2 donne les propriétés thermodynamiques de ces réfrigérants [7].

L'eau et le méthanol travaillent à des faibles pressions, et nécessitent des unités étanches fonctionnant sous vide, par rapport, à l'ammoniac. Ce dernier, travail dans des pressions élevés, qui se pose des problèmes de sécurité au niveau de l'installation [4].

Le choix du fluide frigorigène est fait de sorte qu'il doit :

- Avoir une forte chaleur latente de vaporisation afin de produire le maximum de froid à l'évaporateur.

- Soit facilement adsorbable à basse température et plus difficilement à haute température.
- Avoir une molécule facilement adsorbable par l'adsorbant choisi.
- Ne provoque pas la corrosion des éléments de la machine.
- Être ininflammable et non explosif en mélange avec l'air.
- Faible viscosité.

Tableau I.2 : Propriétés thermodynamiques d'adsorbats

Réfrigérant	Température (°C)	Pression vapeur (bar)	Pression vapeur (bar)
Eau	0	2485	0.0063
	20	2442	0.0236
	40	2397	0.0747
Ammoniac	-30	1359	1.195
	-10	1296	2.909
	0	1262	4.294
	30	1146	11.665
Méthanol	-50	1190	0.01
	-10	1182	0.04
	30	1122	0.25

I.4. Couples de travail

Les couples les plus étudiés dans le cas de la production du froid sont : zéolithe-eau, charbon actif-méthanol, charbon actif-ammoniac, et silica gel-eau. Le choix d'un bon couple de travail dépend aussi de l'application [8, 9, 10].

Ces exemples ne représentent qu'une partie des nombreux couples de travail possibles pour les systèmes d'adsorption. Le choix du couple de travail dépend des conditions de fonctionnement, des performances requises et des contraintes spécifiques de l'application. Il est important de sélectionner un couple de travail qui offre une adsorption efficace et une désorption optimale pour assurer le bon fonctionnement du système d'adsorption.

Pour qu'un réfrigérant soit considéré comme idéal, il doit répondre à plusieurs exigences :

- Il doit avoir une chaleur latente élevée de vaporisation par unité de volume ou de masse. Cela signifie qu'il peut absorber une grande quantité de chaleur lorsqu'il passe de l'état liquide à l'état de vapeur, ce qui facilite le processus de refroidissement.
- Il doit être thermiquement stable, c'est-à-dire qu'il ne doit pas se dégrader ou se décomposer facilement lorsqu'il est exposé à des températures élevées. La stabilité thermique garantit une durée de vie plus longue et une performance constante du réfrigérant.
- Il doit être respectueux de l'environnement, ininflammable et non toxique. Cela est essentiel pour garantir la sécurité des utilisateurs et réduire les impacts négatifs sur l'environnement lors de la manipulation et de la dispersion du réfrigérant.
- Sa pression de saturation, c'est-à-dire la pression à laquelle il passe de l'état liquide à l'état de vapeur à une température donnée, doit être comprise entre 1 et 5 atm (atmosphères) dans l'intervalle de températures de travail. Cela permet une manipulation plus facile et une utilisation efficace du réfrigérant dans les systèmes de réfrigération et de climatisation.

I.4.1. Gel de silice- Eau

Silica-gel-eau est idéal pour les applications de l'énergie solaire en raison de sa faible température de régénération. Il nécessite une source de chaleur de qualité faible, généralement inférieure à 85 °C. En outre, l'eau a l'avantage d'avoir une chaleur latente supérieure à d'autres réfrigérants conventionnels. Il est adapté pour les applications de conditionnement d'air avec des flux d'eau glacée haute, où les températures élevées d'évaporation peuvent être utilisés (il est largement utilisé dans les refroidisseurs d'adsorption) [11].

Cependant, cette paire a une capacité d'adsorption faible ainsi que la pression de vapeur faible, ce qui peut entraver le transfert de masse. En outre, cette paire de travail nécessite des conditions de vide dans le système. Donc tout gaz non condensable va provoquer une réduction significative de la performance du système [6, 11,12].

I.4.2. Charbon Actif – Méthanol

Le charbon actif-méthanol est l'une des couples de travail les plus courantes dans les systèmes d'adsorption de réfrigération. Elle opère également à des températures de régénération faible (il faut prendre soin car les températures de régénération supérieures à 120 °C favorisent la décomposition du méthanol), tandis que sa température ascenseur d'adsorption d'évaporation est limitée à 40 °C [6].

Le tableau 1 suivant montre des données expérimentales pour le méthanol comme fluide de travail et différents types de charbon actif. Les constantes (X_o , D , n) sont ajustées à l'équation de Dubinin-Astakhov, X_o montre combien le CA peut absorber au maximum d'un fluide de travail, et Maxsorb III a l'absorption la plus élevée. La température indique l'intervalle de température de l'expérience où fait.

Tableau I.3 : Données expérimentales pour le charbon actif avec du méthanol comme fluide de travail, [13] [14].

Méthanol				
Type de charbon actif	Température [°C]	X_o [Kg/kg]	D [K^{-n}]	n [-]
LH	20 - 110	0.860	2.574×10^{-4}	1.32
ACF (A-35)	10 - 120	0.425	5.02×10^{-7}	2.15
Maxsorb III	20 - 60	1.24	4.02×10^{-6}	2.0

I.5. Charbon actif

Le charbon actif est une forme poreuse de carbone qui peut être fabriquée à partir d'une variété de matières premières carbonées. Les principaux produits commerciaux sont fabriqués à partir de noix de coco, de charbon, de tourbe ou de bois. Le processus d'activation implique le traitement de la matière première avec de la vapeur ou des produits chimiques, développant ainsi une structure poreuse. Il est parfois imprégné chimiquement pour améliorer les performances par chimisorption lorsque l'affinité d'adsorption pour des contaminants particuliers est trop faible pour être efficace. [15]

Ce qui distingue le charbon actif des autres types d'adsorbants, c'est sa caractéristique de surface. En effet, toute la surface du charbon actif est revêtue d'une matrice d'oxydes et de certains matériaux inorganiques, ce qui la rend non polaire ou faiblement polaire. [16]

Lorsqu'il s'agit de la chaleur d'adsorption des paires de charbon actif, il convient de noter qu'elle peut être inférieure à celle d'autres matériaux adsorbants. La chaleur d'adsorption fait référence à l'énergie thermique libérée ou absorbée lors du processus d'adsorption d'un gaz ou d'une vapeur par le charbon actif.

Le Maxsorb III est aujourd'hui le meilleur charbon actif sur le marché.

I.5.1. Le Maxsorb III

Maxsorb III possède de nombreuses propriétés inhérentes supérieures aux autres charbons actifs. Par exemple, Maxsorb III a une grande surface et une cinétique d'adsorption interparticulaire rapide [17]. Actuellement l'adsorbant avec les propriétés les plus performantes est le Maxsorb III, Le développement rapide de la nanotechnologie découvrira de nouvelles structures matérielles, qui augmentera encore l'efficacité des systèmes d'adsorption.

Maxsorb III est principalement composé de micropores de différentes largeurs et l'adsorbant est adsorbé sur des sites à haute énergie, c'est-à-dire des pores étroits. Au fur et à mesure que les régions à haute énergie sont remplies, l'adsorbant remplit progressivement les pores plus grands. Ici, l'affinité est plus faible et moins d'énergie est nécessaire. Ensuite, l'adsorbant s'adsorbera à la position d'énergie inférieure [18].

Tableau I.4 : Les propriétés du Maxsorb III

Maxsorb III		
Paramètre	Unité	Valeur
C_p	J/kg	$200 + 2T + \frac{3605410}{T^2}$
d_p	μm	105
K	W / mK	0.066
ρ	K_g / m^3	281

I.5.2. Fibre de charbon actif

La fibre de charbon actif se distingue nettement des charbons actifs granulaires normaux, et elle offre des capacités d'adsorption/désorption rapides et efficaces. La présence de charbon actif sous forme de fibre facilite souvent la fabrication d'articles, car les fibres peuvent être dispersées de manière uniforme et/ou co-tissée conjointement dans des moules ou des tissus. Cela simplifie le processus de fabrication en permettant une distribution homogène du charbon actif dans les matériaux. [19]

Les fibres de charbon actif présentent des caractéristiques avantageuses par rapport au charbon actif, notamment une surface spécifique supérieure, des pores plus uniformes et de meilleures performances de transfert de chaleur. Cependant, elles présentent également certains inconvénients, tels qu'une conductivité thermique anisotrope et une résistance thermique de contact plus élevée entre la fibre et la paroi de l'adsorbent par rapport au charbon actif granulaire. [16].

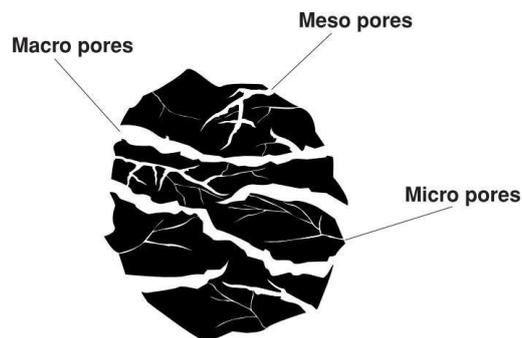


Figure I. 2 : Structure poreuse de l'adsorbant [20].

La figure (1.2) présente une représentation schématique de la structure des pores du charbon actif, qui varie en fonction du type. La structure poreuse du charbon actif se compose de canaux irréguliers et les pores sont classés en fonction de leur diamètre : macro-, méso- et micropores. Il est important que le diamètre des molécules du fluide de travail soit inférieur à celui des pores. Sinon, les molécules obstrueraient la zone d'adsorption à l'intérieur des pores. C'est grâce à la grande surface disponible à l'intérieur des pores que de grandes quantités d'adsorbat peuvent être adsorbées.

I.6. Avantages et inconvénients des machines à adsorption

I.6.1. Avantages

Les machines frigorifiques à adsorption présentent comme avantages principaux :

- L'absence de compression mécanique, donc pas de vibrations et de bruits.
- La possibilité d'utiliser une énergie calorifique disponible et d'éviter ainsi la consommation électrique du compresseur.
- L'intermittence du cycle de base associé à ces machines représente une caractéristique utile dans les applications solaires où l'énergie solaire n'est que discontinuement disponible. Ces machines sont donc parfaitement adaptables à cette énergie.
- La parfaite autonomie.
- La durée de vie de ces machines peut être longue, si l'on s'est prémuni contre la décomposition du frigorigène et contre les phénomènes de corrosion.
- Le fonctionnement intermittent permet de diminuer le nombre de composant du système.
- Des coûts de fonctionnement et d'entretien très réduits et durée de vie de ces machines peut être longue [21].

I.6.2. Inconvénients :

Coup d'inconvénients de ces machines qui sont des obstacles pour la réelle mise en pratique globale du procédé font actuellement l'objet d'études, nous citons :

- Le coefficient de performance thermique de ces machines étant limité (< 0.5) [22] il est donc plus faible que celui des systèmes à compression et à absorption.
- Fortes puissances thermiques à évacuer vers l'extérieur.
- Avec l'eau, l'impossibilité de produire du froid au-dessous de 0°C .
- Les performances du système de captation des machines frigorifiques solaires à adsorption sont particulièrement sensibles aux conditions environnementales (vent, température ambiante et rayonnement solaire), ce qui renforce le caractère aléatoire de la production frigorifique provenant du caractère fluctuant de l'énergie solaire.
- La production discontinue de froid imposant un accumulateur externe pour le stockage de l'énergie. Cette solution permet de palier la nature intermittente et aléatoire de l'énergie solaire, mais n'a pas encore reçu de succès économique satisfaisant. Le problème de discontinuité de production de froid peut être résolu en utilisant plusieurs adsorbants, ce qui augmente l'encombrement, le poids et le prix de la machine [1].

Chapitre II

Présentation du système de réfrigération à adsorption solaire

II.1. Introduction :

L'adsorption est le phénomène qui apparaît lors de l'établissement d'un équilibre entre un gaz et un solide. La concentration des molécules du gaz est toujours plus grande à proximité de la surface du solide que dans la phase gazeuse. Ainsi, dans tout solide, les atomes de surface sont sujets à des forces d'attraction non compensées, perpendiculaires à la surface. L'équilibre de ces forces est partiellement rétabli par l'adsorption des molécules gazeuses. Il est fréquemment parlé de couple lorsque l'on fait référence à l'adsorption. Le couple est composé d'un adsorbant (solide) et d'un adsorbat (liquide faisant office de fluide frigorigène).

Les objets utilisés comme adsorbants sont généralement des objets avec de très grandes surfaces externes. On peut citer l'alumine activée, le charbon actif, le gel de silice et les zéolithes. Le choix de l'absorbant se fera en fonction de la température souhaitée au niveau de l'évaporateur et de la température disponible au niveau de la source de chaleur (capteur solaire). L'autre partie du couple (l'adsorbat) doit satisfaire à deux conditions de base : elle a une chaleur latente de vaporisation élevée et elle est composée de petites molécules facilement adsorbables. Les fluides ayant ces propriétés comprennent l'eau, l'ammoniac, le méthanol et le dioxyde de carbone. En plus de ces deux conditions "physiques", la nature du fluide et ses dangers (inflammabilité, toxicité, etc.) doivent également être pris en compte.

Les réfrigérateurs tels que conçus dans nos développements comportent quatre éléments principaux (cf. Fig. 2.1) :

- **Le capteur-adsorbant** : partie contenant l'adsorbant qui est chauffé par le rayonnement solaire, avec pour effet la désorption de l'adsorbat.
- **Le condenseur** : cet élément sert à condenser les vapeurs d'adsorbat désorbées dans le capteur-adsorbant.
- **L'enceinte frigorigère** : cet élément est la partie utile du réfrigérateur, composée de l'enceinte isolée et de l'évaporateur comprenant l'adsorbat sous forme liquide et solide.
- **La vanne autonome** : Organe permettant de séparer la partie haute pression de la partie basse pression.

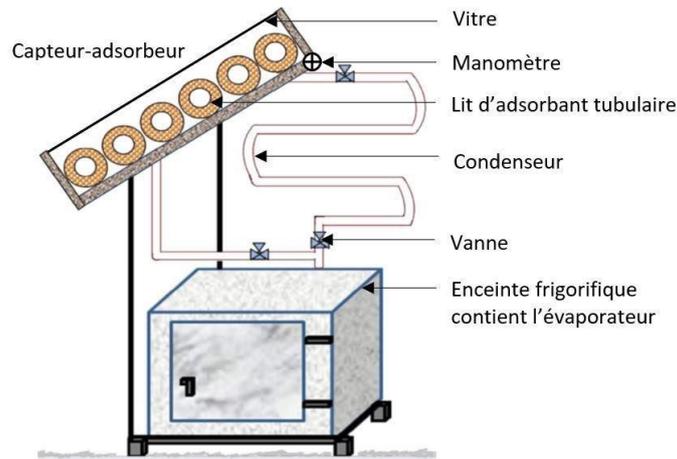


Figure II.1 : Schéma récapitulatif d'une machine frigorifique solaire à adsorption [23]

II.2. Description du Cycle de fonctionnement

Les réfrigérateurs solaires fonctionnent selon un cycle de chaleur à sorption. Le cycle peut être divisé en quatre phases distinctes, comme décrit ci-dessous dans les deux figures 2.2 et 2.3, respectivement.

Nous donnons également le cycle représenté dans le diagramme de Clausius-Clapeyron ($\ln(P)$ (pression) en fonction de $(-1/T)$ (température)). Puisqu'il n'y a qu'un seul lit dans le système, le système fonctionne par intermittence, c'est-à-dire qu'il ne produit pas de froid en continu. Dans ce système, un cycle dure une journée. La température monte le jour et baisse la nuit.

➤ 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 . 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 (voir Fig. 2.4). Cette phase de pressurisation s'achève dès que la pression devient égale à celle qui règne dans le condenseur (point 2).

La température atteinte est dite température seuil de désorption. Cette phase équivalente à " la compression " dans le cycle de compression classique.

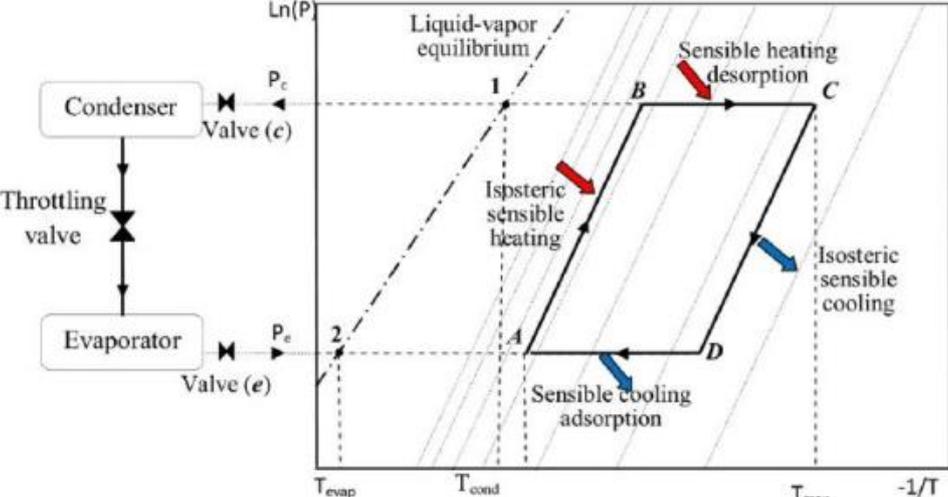


Figure II.2 : Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique théorique simple effet, dans un diagramme de Clapeyron [24].

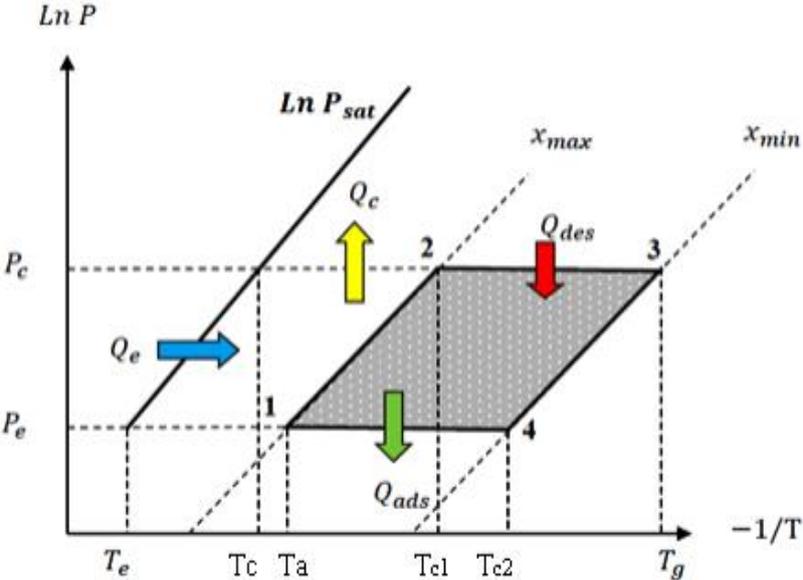


Figure II.3 : Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique théorique simple effet, dans un diagramme de Clapeyron [25].

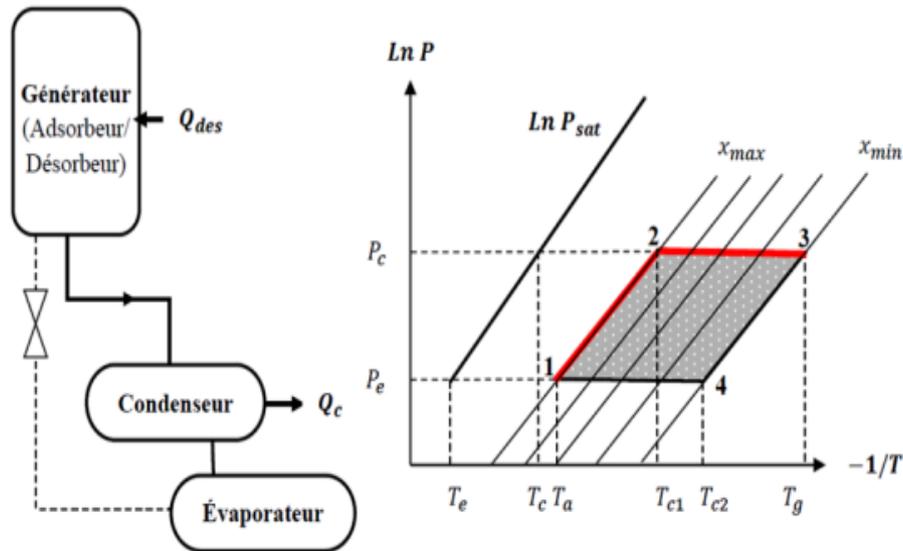


Figure II.4 A : Phase de chauffage [25].

➤ **Phase de refroidissement**

• **Phase de refroidissement isostérique (3-4)**

On isole le générateur par la fermeture de la vanne. Le refroidissement du mélange adsorbant/adsorbant 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 (point 4). La concentration du fluide adsorbé reste constante dans cette phase et est égale à (figure b) 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 provoquer l'adsorbant par adsorber ce dernier, la vapeur produite s'adsorbe donc de nouveau dans l'adsorbent, jusqu'à ce que la température du mélange adsorbant/adsorbant devienne minimale T_a , fixée pour le cycle correspondant. Durant cette phase, le système suit l'isobare imposé par l'évaporateur, et qui correspond à la pression de saturation du fluide frigorigène à la température d'évaporation. A ce moment, la machine est prête pour un nouveau cycle.

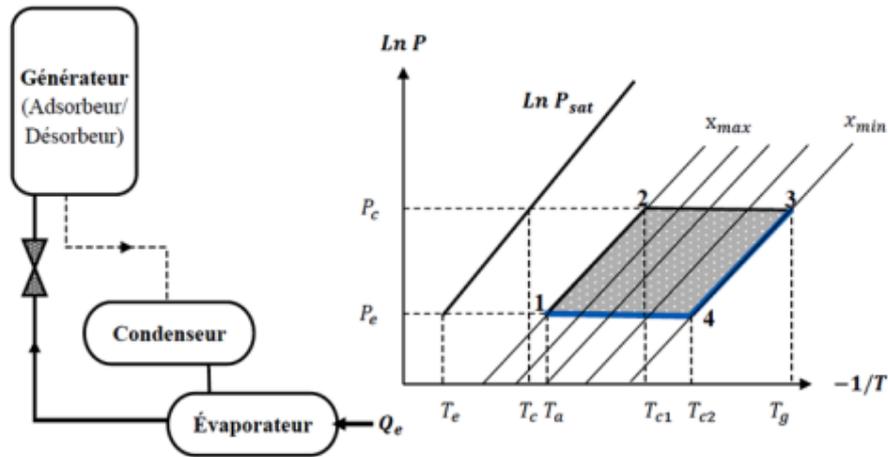


Figure II.5 b : Phase de refroidissement [25].

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.

Les choix de conception et de technologie des réfrigérateurs à adsorption sont guidés par la volonté d'optimiser ce quadruplement de température. Considérer l'alternance de phases (désorption-condensation et adsorption-évaporation). L'évaporation ne se produit que dans une partie du cycle. C'est pourquoi ce cycle est appelé intermittent. Cette intermittence est en phase avec celle de la source d'énergie [25].

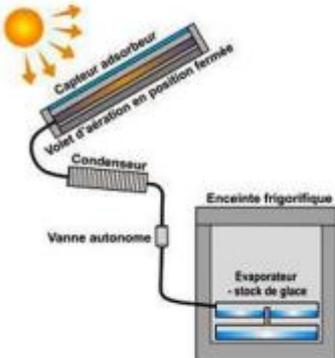
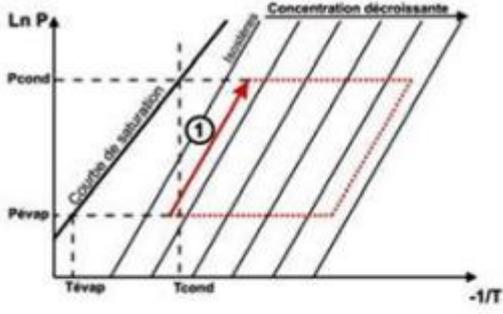
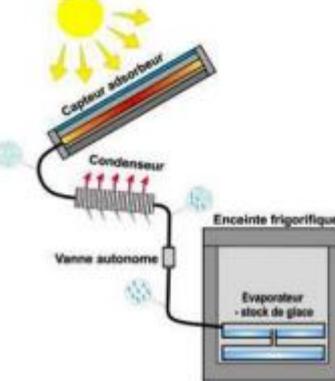
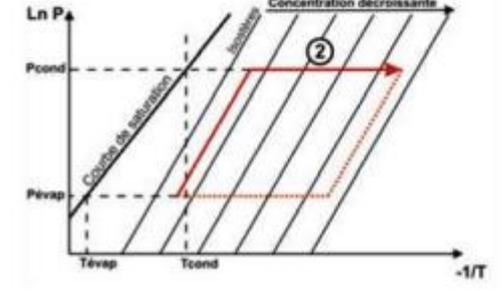
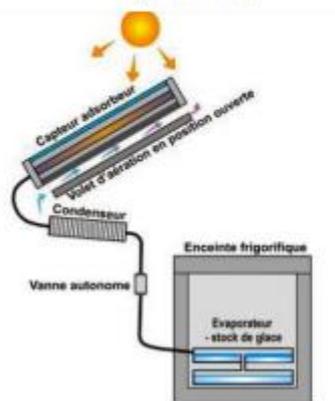
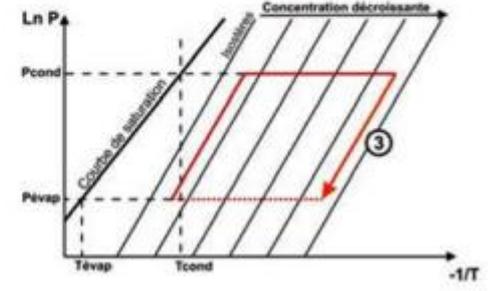
II.2.1. Machine avec un seul lit :

Les machines frigorifiques solaires à adsorption utilisent le cycle simple effet avec un seul lit allumé, qui repose sur deux phénomènes principaux :

- Pendant la journée, les machines frigorifiques solaires à adsorption convertissent le rayonnement électromagnétique en chaleur, qui est ensuite transférée à l'adsorbant.
- Pendant la nuit, elles dissipent l'énergie thermique libérée par le système [26].

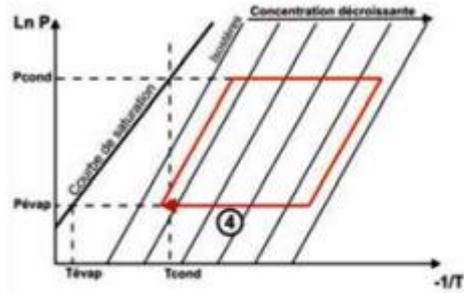
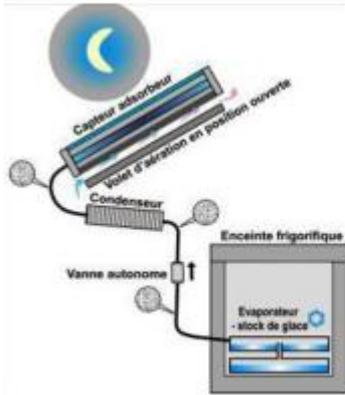
Le cycle de ces machines peut être divisé en quatre phases distinctes, comme décrit dans le Tableau 2.1 ci-dessous également avec le cycle représenté dans le diagramme de Clausius - Clapeyron ($\ln P$ (pression) en fonction de $(-1/T$ (température))) :

Tableau II.1 : Fonctionnement de système de la Machine frigorifique solaire à adsorption avec cycle simple effet [27].

<p>Phase de chauffage isostérique (8h à 10h)</p> 	<p>Le rayonnement solaire chauffe le Collecteur - adsorbent qui contient L'adsorbant. La pression augmente dans le système.</p> 
<p>Phase de désorption (10h à 16h)</p> 	<p>Lorsque le capteur a atteint la pression de saturation correspondant à la Température du condenseur, la vapeur de l'adsorbant se condense et s'écoule dans l'évaporateur.</p> 
<p>Phase de refroidissement isostérique (16h à 19h)</p> 	<p>En fin d'après-midi, avec la diminution de l'ensoleillement, le capteur se refroidit et la pression diminue dans le système. Le refroidissement est éventuellement favorisé par l'ouverture d'un volet d'aération en face arrière du collecteur - adsorbent.</p> 

**Phase d'adsorption
(19h à 08h)**

C'est la phase pendant laquelle le froid est produit. La température et la pression ayant diminué, l'adsorbant se trouve physiquement en déséquilibre et va se "recharger" en adsorbant l'eau contenue dans l'évaporateur. Cette vapeur est produite par évaporation du liquide contenu dans l'enceinte frigorifique, évaporation qui produit du froid par soutirage de chaleur au liquide (chaleur latente d'évaporation). Lorsque le niveau de température atteint le point de congélation, il se solidifie et forme un stock "de froid" qui permet à l'enceinte de rester à basse température pendant la journée suivante, éventuellement plusieurs jours (2-3) en cas de conditions



II.3. Composants du système - capteur absorbant

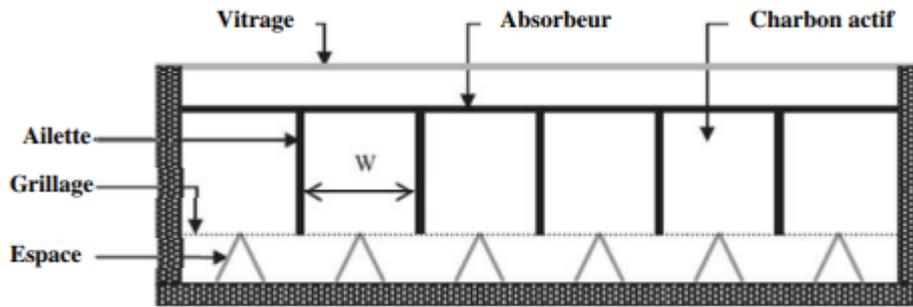


Figure II.6 : Composants du lit d'adsorption [28].

II.3.1. Collecteur :

Le collecteur (Fig. 2.5), dans le contexte de l'énergie solaire, est un dispositif qui capte les rayons solaires et les convertit en énergie utilisable. Il est généralement composé de matériaux spéciaux conçus pour absorber efficacement la chaleur du soleil. [29]

L'optimisation de ce composant est essentielle, car il se compose de quatre parties principales qui revêtent une grande importance : le lit adsorbant, l'isolant, la couverture en verre et la plaque absorbante. Il existe trois processus de transfert de chaleur importants

- L'augmentation rapide de la température dans le lit pendant le chauffage
- Isolation pour atteindre les températures les plus élevées possibles
- Diminution rapide de la température dans le lit pendant le refroidissement.

II.4. Le lit d'adsorbant :

Le lit d'adsorbant (Fig.2.6) fait référence à une couche ou un ensemble de matériaux poreux utilisés dans les systèmes d'adsorption. Il s'agit d'une structure qui permet d'adsorber ou de retenir sélectivement des substances spécifiques à partir d'un fluide, telles que des gaz ou des liquides.

Le processus d'adsorption se produit lorsque les molécules ou les particules de la substance à adsorber se fixent à la surface du matériau adsorbant, formant ainsi une couche d'adsorbant. Le lit d'adsorbant offre une grande surface interne, généralement grâce à sa structure poreuse, ce qui permet une adsorption efficace et une capacité d'adsorption élevée.

Il existe divers types et configurations de lits d'adsorbant, mais principalement deux conceptions sont couramment utilisées pour ce système : lit d'adsorbant rectangulaire et tubulaire. Dans la conception rectangulaire, l'absorbant est réparti uniformément dans une géométrie rectangulaire divisée par des ailettes qui répartissent la chaleur de manière égale. Dans la conception tubulaire, l'adsorbant sera distribué dans des cylindres. Ces tubes sont généralement constitués de métaux ayant des propriétés de conductivité thermique élevées. Une conception tubulaire présente l'avantage d'une construction simple et d'une capacité à résister aux différences de pression.

Cependant, la conception rectangulaire présente l'avantage d'une distribution de chaleur plus facile et offre plus d'espace pour une couche simple de charbon actif.



Figure II.7 : Lit d'adsorption tubulaire et rectangulaire

II.5. Plaque absorbante

Il est préférable d'utiliser une plaque adsorbante en métal présentant une conductivité thermique élevée. Le cuivre peut être une option appropriée si la température du lit est inférieure à 120 °C. Cependant, au-delà de cette température, le cuivre et le méthanol se décomposent en formaldéhyde et en éther diméthylique [30]. L'aluminium, quant à lui, est plus léger, moins coûteux et ne réagit pas chimiquement avec le méthanol à des températures inférieures à 150 °C, bien qu'il puisse être sujet à la corrosion en présence d'impuretés. L'acier inoxydable présente une conductivité thermique inférieure à celle des matériaux mentionnés précédemment, mais reste une option de conception envisageable.

Il est recommandé que la plaque absorbante ait une épaisseur réduite afin de faciliter le transfert de chaleur provenant du rayonnement solaire vers le charbon actif. De plus, la surface de la plaque doit être revêtue d'un matériau ayant une forte capacité d'absorption et une faible émissivité. La quantité de chaleur que le capteur solaire peut accumuler dépend largement de la capacité d'absorption du capteur solaire.

II.6. Couverture de vitrage

Le vitrage d'un capteur absorbant est la fenêtre transparente qui recouvre le capteur solaire thermique et permet le passage de la lumière solaire tout en protégeant l'élément absorbant et en minimisant les pertes de chaleur. Plusieurs conceptions de couverture de vitrage sont étudiées : les couvertures en simple verre, en double ou triple vitrages, les verres isolants, etc.

II.7. Isolation où Espace :

Dans le contexte d'un capteur absorbant, l'isolation fait référence aux matériaux ou techniques utilisés pour réduire les pertes de chaleur et améliorer l'efficacité du capteur. L'isolation est importante car elle permet de limiter les transferts de chaleur indésirables entre le capteur et son environnement, ce qui permet de maximiser la quantité d'énergie solaire absorbée et de minimiser les pertes de chaleur.

II.8. Condenseur

Un condenseur (Fig.2.7) est un élément d'un système ou d'un appareil qui permet de convertir un gaz ou une vapeur en liquide. Dans le contexte d'un capteur absorbant, un condenseur peut

être utilisé pour récupérer la chaleur absorbée par l'absorbeur et le transférer à un fluide caloporteur, généralement de l'eau. Dans les climats chauds, il est préférable de placer le condenseur dans un endroit ombragé et frais, loin de toute exposition directe au soleil. Cela permet d'éviter que le condenseur ne soit surchauffé par les rayons solaires, ce qui pourrait compromettre son efficacité. L'objectif est de maintenir le condenseur à une température aussi basse que possible pour faciliter la condensation du fluide de travail et ainsi favoriser un meilleur transfert de chaleur.

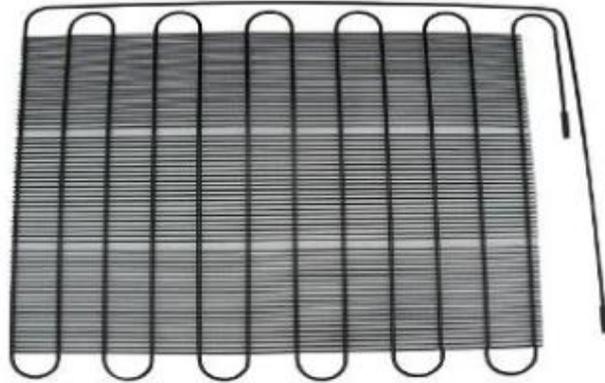


Figure II.8 : Exemple d'un condenseur.

II.9. Réservoir et vannes

Le réservoir permet de stocker le liquide réfrigérant condensé par le condenseur, avant qu'il ne soit envoyé vers l'évaporateur pour la phase d'évaporation.

Par contre la vanne contrôle le débit du fluide de travail et la régulation des températures et des pressions à travers les différentes caractéristiques du système. Lorsque la vanne est ouverte, le fluide de travail circule à travers le système, permettant ainsi le transfert de chaleur et de masse nécessaire pour le fonctionnement du cycle de réfrigération. Quand il est fermé, le flux de fluide est bloqué, ce qui permet de contrôler le fonctionnement du système et de réguler les températures et les pressions.

Chapitre III

Modélisation d'une machine frigorifique solaire à adsorption

III.1. Introduction

La modélisation du système de réfrigération à adsorption se divise en trois parties essentielles. Dans un premier temps, une analyse comparative en six points est réalisée afin de comparer les performances des trois fluides de travail. Ensuite, le profil thermique à l'intérieur du lit est exploré pour établir une cartographie des épaisseurs possibles du lit. Enfin, le fonctionnement du système sur une journée, avec les variations du rayonnement solaire et de la température ambiante, est modélisé pour étudier son efficacité globale.

III.2. Analyse en 6 points

Le modèle en six points utilise les points d'état (A, B, C, D, 1, 2) illustrés à la Figure 3.1 pour étudier le fonctionnement du système. Les variables de température et de pression sont ajustées afin de comprendre le comportement du système. Comme précédemment mentionné, il y a seulement deux niveaux de pression qui sont déterminés par la température de l'évaporateur et du condenseur, et qui influent également sur les points d'état 1 et 2.

Tandis que les points d'état (A, C) sont déterminés par la température maximale et minimale atteinte par le système. Le point d'état B est donné par la relation de l'équation 1.

$$\frac{T_B}{T_{cond}} = \frac{T_A}{T_{evap}} \quad (1)$$

L'équation 1 est valide tant que T/T_{sat} est constant le long d'un isostère, voir Figure 2.1. Il en va de même pour le point d'état D.

$$\frac{T_D}{T_{evap}} = \frac{T_C}{T_{cond}} \quad (2)$$

L'équation d'état de Dubinin-Astakhov dépend de la température et de la pression (voir le prochain chapitre), et avec les températures des points d'état dans l'équation 1 et l'équation 2, tous les points pourraient être décidés.

Chauffage isostérique (Etape 1 A → B)

Pour l'étape de chauffage isostérique, l'apport d'énergie sert à augmenter la température et la pression dans le lit. L'apport d'énergie dans le système est donné par l'équation 3, où Q_{AB} est l'apport d'énergie nécessaires pour atteindre p_{con} et T_B . C_p Représente la chaleur spécifique,

est la masse de chaque composant dans le lit et x_{max} est l'absorption maximale de fluide de travail. Les indices sont w pour les parois latérales, AC pour le charbon actif et ω pour le fluide de travail.

$$Q_{AB} = \int_{T_A}^{T_B} (C_{p,\omega} m_{\omega} + C_{p,AC} m_{AC} + C_{p,\omega f} m_{AC} x_{max}) dT \quad (3)$$

Désorption isobare (Étape 2 B → C)

Dans l'étape de désorption, il y a un terme supplémentaire de l'équation du bilan thermique, voir l'équation 4. Ce terme représente la chaleur de désorption q_{st} c'est-à-dire la chaleur nécessaire pour évaporer le fluide de travail et le séparer du charbon actif.

$$Q_{BC} = \int_{T_B}^{T_C} (C_{p,\omega} m_{\omega} + C_{p,AC} m_{AC} + C_{p,\omega f} m_{AC} x_{min}) dT + \int_{x_{max}}^{x_{min}} (m_{AC} q_{st}) dx \quad (4)$$

Refroidissement isostérique (étape 3 C → D)

Une fois la température maximale atteinte, le processus de refroidissement du système démarre. La chaleur nette sera négative, c'est-à-dire hors du lit, et la pression et la température diminueront. Cette étape est similaire à l'étape 1. x_{min} Est la quantité minimale de fluide de travail dans le lit.

$$Q_{CD} = \int_{T_C}^{T_D} (C_{p,\omega} m_{\omega} + C_{p,AC} m_{AC} + C_{p,\omega f} m_{AC} x_{min}) dT \quad (5)$$

Adsorption isobare (Étape 4 D → A)

L'étape 4 est le processus d'adsorption. Le lit dégage de la chaleur dans l'environnement et la température diminue. Le lit adsorbe le fluide de travail jusqu'à ce que la température minimale soit atteinte T_A .

$$Q_{DA} = \int_{T_D}^{T_A} (C_{p,\omega} m_{\omega} + C_{p,AC} m_{AC} + C_{p,\omega f} m_{AC} x_{min}) dT + \int_{x_{min}}^{x_{max}} (m_{AC} q_{st}) dx \quad (6)$$

Fluide de travail

Le fluide de travail d'un cycle est la quantité que le lit peut adsorber et désorber en kg/kg multipliée par la quantité de charbon actif.

$$m_{\omega f} = (x_{max} - x_{min}) m_{AC} \quad (7)$$

Besoin de chaleur

La chaleur totale requise pour faire fonctionner le système est donnée par les équations 3 et 4.

$$Q_{input} = Q_{AB} + Q_{BC} \quad (8)$$

Production de froid

La production de froid dépend de la quantité de fluide de travail, des pertes d'étranglement et de la chaleur latente de vaporisation.

$$Q_{cold} = m_{\omega f} y' h_{evap} \quad (9)$$

L'équation 10 définit la production de glace. Il est choisi d'inclure la masse de l'évaporateur car la boîte contenant le charbon actif est également incluse dans les calculs.

$$m_{ice} = \frac{Q_{cold} - m_{evap} C_{p.wall} (T_{iw} - T_{ice})}{(h_{ice} + C_{p.water} (T_{iw} - 0) + C_{p.ice} (0 - T_{ice}))} \quad (10)$$

COP

L'équation 11 définit le COP pour l'analyse en 6 points. Il est important de noter comment le COP est défini pour comprendre pourquoi le COP de cette simulation est si élevé. L'apport d'énergie n'est que le minimum, c'est-à-dire pas de pertes de chaleur, etc.

$$COP = \frac{Q_{cold}}{Q_{input}} \quad (11)$$

III.3. Données d'entrée des simulations

Les paramètres fondamentaux du cycle simulé sont répertoriés dans le Tableau 3.1. Les performances de la machine, en tenant compte de l'adsorbeur fonctionnant avec le couple (méthanol), ont été étudiées en utilisant les paramètres de l'équation de Dubinin-Astakhov. Les critères de performance ont été évalués et analysés pour évaluer l'efficacité du système.

Tableau III.1 : Paramètre utilisés dans la simulation.

Symbol	Paramètre	Valeur	Unité
Capteur solaire /adsorbeur			
C_{pwall}	Chaleur Spécifique de la paroi d'adsorbeur	0.480	KJ/kgK
C_{pAC}	Chaleur Spécifique de AC	0.920	KJ/kg K
m_{eva}	Masse d'Evaporation	4	Kg
m_{AC}	Masse de AC	20	Kg
R	Constantr du gaz	259.5	J/kg k
Propriétés thermo-physique			
C_{pw}	Chaleur spécifique d'eau	4.180	KJ/kg k
C_{pice}	Chaleur spécifique de glace	1.922	KJ/kg k
Paramètres de l'équation de (D-A)			
D	Paramètre caractéristique du Méthanol	4.022.	-
n	Paramètre caractéristique du Méthanol	2,0	-
Température de fonctionnement			
T_{ad}	Température d'adsorption	40	°C
T_g	Température régénération	100	°C
T_{con}	Température de Condensation	30	°C
T_{eva}	Température d'évaporation	-5	°C
T_{iw}	Température initiale d'eau	30	°C

III.3.1. Calcul de la Pression de saturation en utilisant la simulation online :

On a aussi vérifié l'exactitude des calculs de la pression de saturation calculée avec l'équation d'Antoine en les comparants avec ceux obtenus par un outil de simulation online. La concordance entre les deux résultats est excellente.

Calculation of Antoine equation

1	Temperature: T	<input type="text"/> °C	
2	Antoine's constant:	A: <input type="text"/> B: <input type="text"/> C: <input type="text"/>	See below Remarks.
3	Graph	x-axis: T(°C), y-axis: P(kPa) ▼	Plot Input Data: <input type="button" value="Yes"/> ▼

You need to upgrade your Flash Player

Export Graph Image.

Keyword-Reference-Remarks-History

LaTex

$$\log_{10} P = A - \frac{B}{C + T} \cdot P(\text{mmHg}), T(^{\circ}\text{C})$$

Keyword
Antoine equation, vapor pressure, temperature, Antoine coefficients

Reference
[1]: [Vapor Pressure by Antoine's Equation](#)

Remarks

- Vapor pressure: P(mmHg)
- Temperature: T(°C)
- Example of Coefficient and valid temperature. All data is cited from Reference[1].

Compound name	A	B	C	Tmin(°C)	Tmax(°C)
carbon-monoxide	6.24020	230.270	260.010	-210	-165
carbon-dioxide	9.81060	1347.790	273.000	-119	-69
methane	6.69561	405.420	267.777	-181	-152
ethyl-alcohol	8.21330	1652.050	231.480	-3	96
acetone	7.23160	1277.030	237.230	-32	77
butane	6.80896	935.860	238.730	-78	19

Figure III.1 : Fenêtre pour le calcul de la pression de saturation online sur le site Saecanet.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction :

Il est important d'examiner l'effet de la variation des principaux facteurs ou paramètres influents du système. Pour ce faire, certaines valeurs du système sont considérées comme constantes.

Il existe deux niveaux de pression principaux dans le système, marqués P_{evap} et P_{cond} sur la Figure 4.1 ci-dessous. Les niveaux de pression sont déterminés par les pressions de saturation correspondantes aux températures T_{evap} et T_{cond} , respectivement.

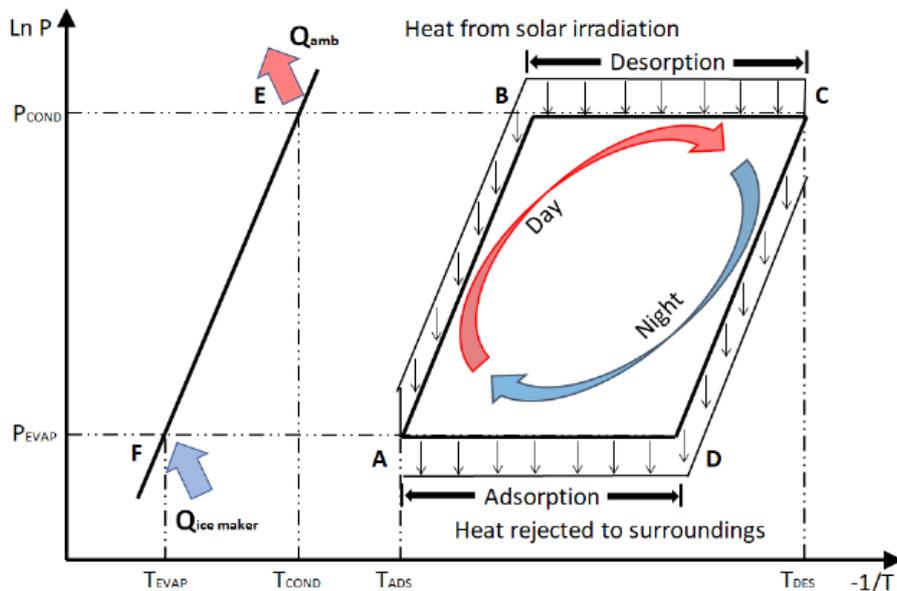


Figure IV.1 : Diagramme de Clapeyron pression-température pour un cycle d'adsorption d'une journée [31].

Pour P_{cond} , c'est la température du condenseur qui détermine la pression de saturation. Quand le méthanol se résorbe du lit (charbon actif) dans l'étage 2, il s'écoule à travers le condenseur. La température du condenseur doit être réglée plus haut que la température ambiante, qui varie de jour en jour. Par exemple, si la température ambiante est de 25°C, cela signifie que la température dans le condenseur doit être à peu près 30°C, dans le cas où on choisissait une différence de température $\Delta T = 5^\circ\text{C}$. La pression de saturation est fonction de la température, et par connaissance de la température du condenseur, le niveau de pression correspondant a pu être trouvé. Les niveaux de pression du méthanol sont donnés dans le **Tableau IV.1** ci-dessous.

La même logique s'applique pour le P_{evap} , mais c'est la température de l'évaporateur T_{evap} qui décide de la valeur de la pression de saturation.

Le but de la réfrigération à adsorption est de fabriquer de la glace ; ainsi, la température doit donc être inférieure à 0°C. Cependant, si la température est trop basse, l'efficacité du système diminuera. En outre, si la température est réglée trop près de 0°C, il n'y aura pas de force motrice dans l'évaporateur. Une sélection des températures et de leurs pressions correspondantes est présentée dans le **Tableau IV.2**. Il convient de noter que les niveaux de pression pour le méthanol est inférieur à la pression atmosphérique.

Tableau IV.1 : Températures de condensation pertinentes et leurs pressions de saturation correspondantes pour le Méthanol.

Temperature	Methanol
20°C	12,71
25°C	16,57
30°C	21,39
35°C	27,36

Tableau IV.2 : Températures d'évaporateur pertinentes et leurs pressions de saturation correspondantes pour le Méthanol

Temperature	Methanol
-5°C	2,860
-4°C	3,054
-3°C	3,259

IV.2. Explication de l'équation d'état de Dubinin-Astatakhov :

Pour bien comprendre les résultats des différentes simulations que l'on présentera dans ce qui suit, il est important de présenter au préalable une étude paramétrique sur les paramètres les plus influents de l'équation d'état de Dubinin-Astatakhov.

IV.2.1. Influence des niveaux de pression

Les deux températures fixant les deux niveaux de pression influencent grandement le fonctionnement du système. L'équation d'état de Dubinin-Astatakhov est une fonction de la température et de la pression. Pour comprendre comment la température et la pression influencent le fonctionnement, on introduit donc un diagramme du type x en fonction de la température T c'est-à-dire ($x=f(T)$).

L'axe y de la Figure 4.2 représente l'absorption de fluide de travail (dans le présent cas le méthanol) en kg par kg de charbon actif, tandis que l'axe des abscisses est la température du

lit ou charbon actif. Les lignes représentent l'état de l'équation de Dubinin-Astatakhov à pression constante en fonction des températures croissantes. Comme la température augmente le charbon actif est moins capable de retenir le fluide de travail, c'est-à-dire le charbon actif désorbe. En regardant la ligne noire (une pression de 2,86 kPa), correspondant à une température de saturation de 5 °C, le charbon actif est entièrement adsorbé à 270K tandis qu'il est entièrement désorbé à 340 K. Puis en observant l'isotherme (température constante), par exemple 340 K, l'absorption de charbon actif augmente avec la pression croissante. Pour 2,86 kPa, la valeur de x est égale à 0 kg/kg, pour 9,65 kPa elle est de l'ordre de 0,1 kg/kg, pour 21,39 kPa \approx 0,4 kg/kg, et pour 43,65 kPa \approx 0,9 kg/kg. Ainsi, l'augmentation de la pression rendra le charbon actif capable de mieux retenir (d'absorber) le méthanol.

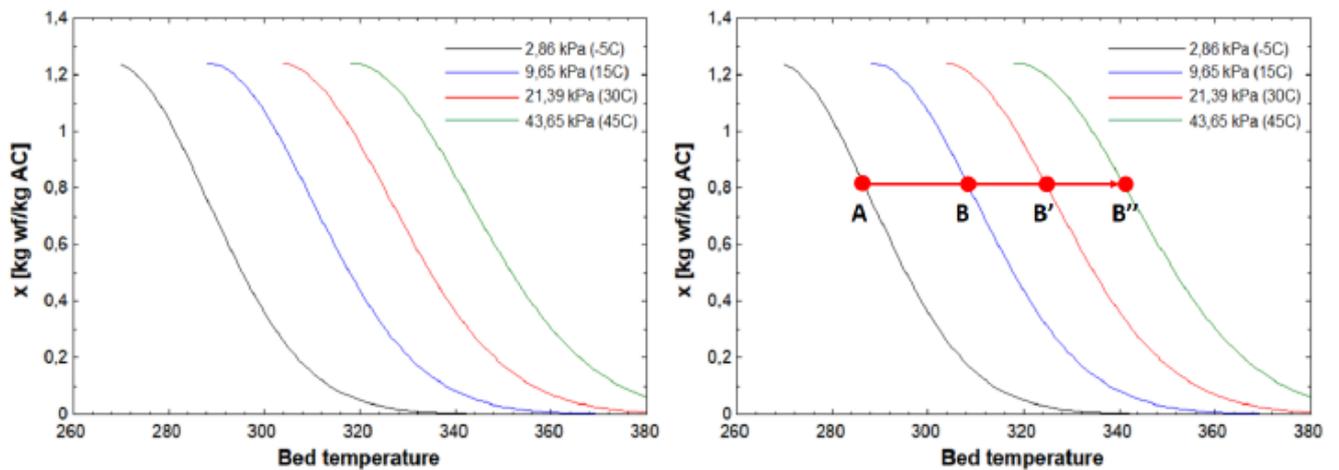


Figure IV.2 : Absorption d'adsorbant - diagramme de température du lit avec température de condensation variable [31].

Comme indiqué à la Figure 4.2, le niveau de pression de condensation augmentera si la température de condensation augmente. Dans la Figure 4.2 ci-dessus, on remarque sur les lignes bleue (15°C), rouge (30°C) et verte (45°C), respectivement, d'un point de vue opérationnel, la distance du point d'état A à B, augmente avec l'augmentation de la différence de pression. De plus, l'énergie nécessaire pour augmenter la pression augmente à son tour. Ainsi, une différence de pression minimale est recommandée pour un fonctionnement optimal.

IV.2.2. Influence de la température maximale

La température maximale T_{des} peut être influencée par la conception du système, qui est influencée par la quantité du rayonnement solaire collectée et les pertes de chaleur. La figure 3 montre l'effet de l'augmentation de la température maximale du lit. Dans le présent cas d'étude, la température d'évaporation est réglée à -5°C avec une valeur correspondante de la pression égale à 2,86 kPa (calculée par l'équation d'Antoine) et une température de condensation de 30°C donnant une pression de 21,39 kPa (calculée par l'équation d'Antoine). Les points d'état de la Figure 4.3 sont les mêmes que ceux de la Figure 4.1. La température maximale dans le lit est donnée à l'état C, tandis que la température d'adsorption est à l'état A. Pour une température maximale de $\approx 340\text{K}$ donne un Δx relativement petit ; cependant, en augmentant la température maximale cela entrainera une augmentation de Δx . Toutefois, il faudra noter que l'augmentation de Δx n'est pas linéaire avec les températures élevées.

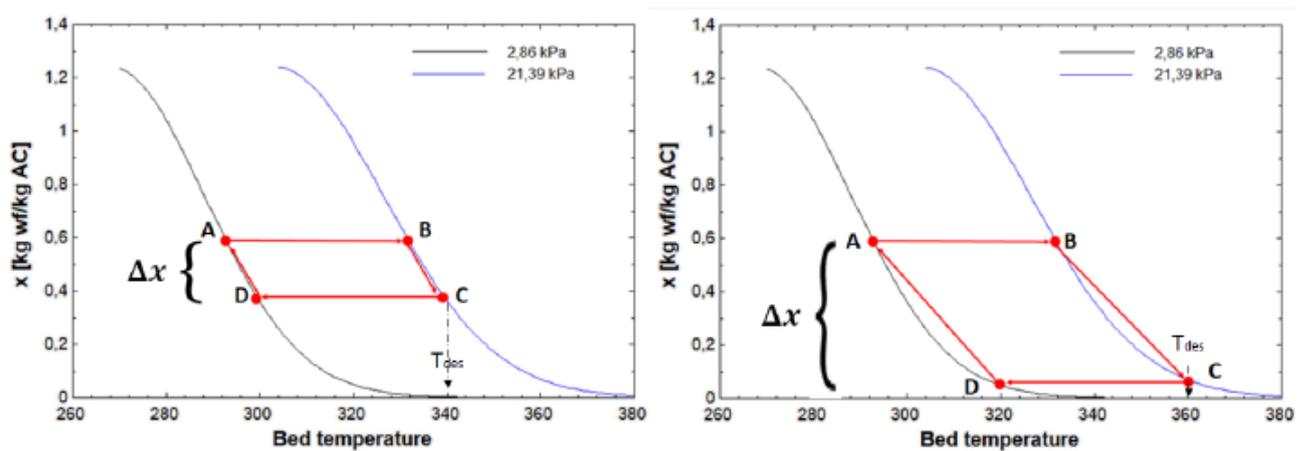


Figure IV.3 : Influence de l'augmentation de la température maximale/désorption du lit [31].

IV.2.3. Influence de la température d'adsorption

Le point d'état d'adsorption est représenté par A sur la Figure 4.4. La température d'adsorption est déterminée par la température la plus basse atteinte par le lit. Cela dépend de la température ambiante et de la conception. La figure montre qu'une diminution de la température d'adsorption augmente le Δx , donc une température d'adsorption plus faible augmente le COP et la quantité de méthanol adsorbé et désorbé.

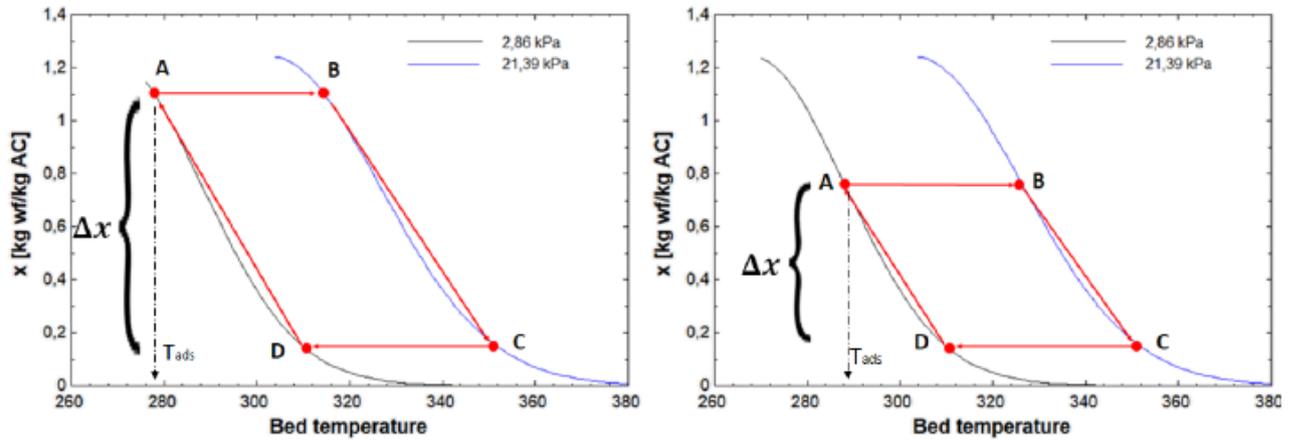


Figure IV.4 : Influence de la diminution de la température d'adsorption/minimale du lit [31].

IV.3. Effet de la température d'adsorption

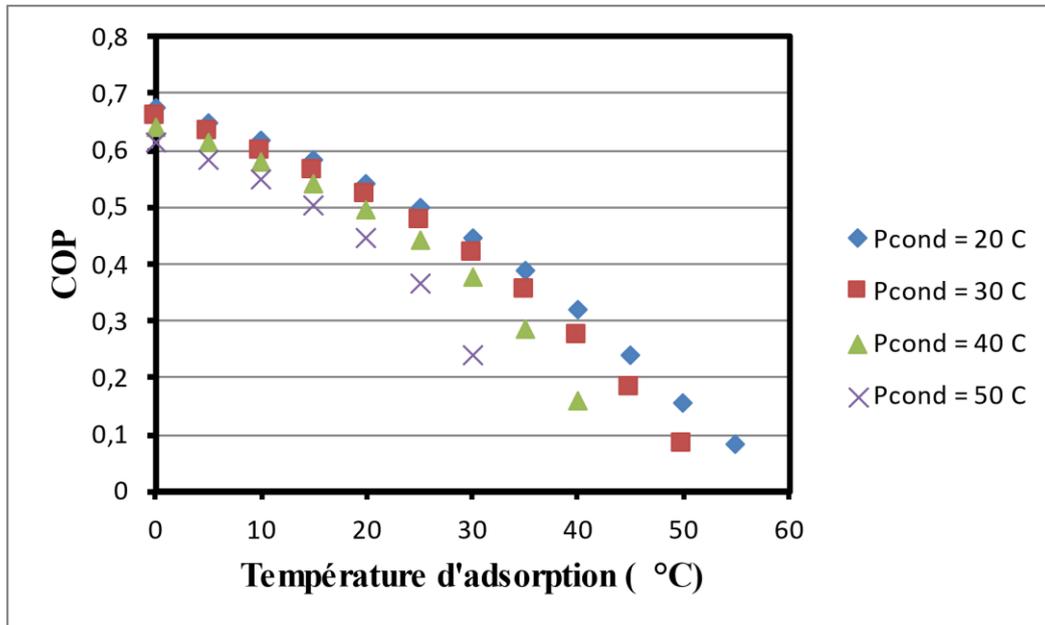


Figure IV.5 : Effet de l'augmentation de la température ambiante (adsorption)/du condenseur sur le COP de la machine à adsorption

La température d'adsorption est la température la plus basse atteinte par le charbon actif pendant la nuit. Sur la Fig. 4.5, l'effet de l'augmentation de la température d'adsorption est montré pour différentes valeurs de températures de condensation ; 20, 30, 40 et 50 °C, respectivement. On remarque que le coefficient de performance COP diminue légèrement avec l'augmentation de la température d'adsorption de 0 jusqu'à 15 °C ; cependant, vers une valeur de 35 °C, le COP diminue rapidement. De plus, il n'y a pas de grandes différences entre les COP pour différentes valeurs de condensation lorsque la plage des températures se

situe entre 0 et 30 °C pour des températures de condensation de 20, 30 et 40°C. Une température de condensation de 50 °C donne par contre des COP assez faible en comparaison avec les autres températures de condensation et cela à partir d'une température d'adsorption de 25°C.

Pour comprendre la diminution du COP, il est important de regarder la Figure 4.3. Le Δx qui est en fait la différence entre la valeur maximale et minimale de la concentration massique de l'absorbant (méthanol) dans l'absorbant (charbon actif Maxsorb III), diminue lorsque la température d'adsorption augmente. En maintenant les autres paramètres constants qui sont les températures de désorption et d'évaporation, le COP approchera de zéro.

La Figure 4.6 ci-dessous montre que la quantité de glace produite dépend fortement de la température d'absorption. Étant donné que le système ne dépend pour son refroidissement que de l'environnement pendant la nuit, il est possible d'atteindre des températures de l'ordre de 10 à 27 °C dans des régions en Algérie ceci que ce soit en hiver ou en été. On remarquera ainsi à titre d'exemple sur la figure 4.7, que pour la ville de Ouargla dans le sud Algérien, ville réputée très chaude l'été, que les températures minimales pendant la période s'étalant du mois de mai jusqu'à septembre ne dépassent guère 27 °C.

Pour l'Afrique Sub-saharienne, cela dépendra d'un pays à un autre, si pour certains pays la machine à adsorption fonctionnera sans problème ; pour d'autres pays, cependant, des équipements supplémentaires sont nécessaires, car il est peu probable d'atteindre des températures aussi basses surtout en été et au printemps sans équipement supplémentaire, c'est-à-dire sans échangeurs de chaleur. Pour l'exemple de la République Démocratique du Congo, et pour la ville de Lubumbashi, on remarque sur la figure 5.8 que les températures ambiantes sont inférieures à 18 °C, mais les températures maximales pendant les jours ne sont pas aussi élevées avec un maximum atteint au mois d'octobre de 32 °C, alors que pour Ouargla elle pourra atteindre une moyenne de 45 °C. Ceci veut dire que la valeur de Δx est beaucoup plus importante à Lubumbashi comparativement à Ouargla, ce qui ne se traduira pas forcément par un meilleur COP et une plus grande production de la glace, car en plus de la valeur de la température d'adsorption qui doit être aussi faible que possible, la température de désorption (température maximale du lit de charbon actif) doit aussi être à son tour élevée, et dans ce cas Ouargla est meilleur que Lubumbashi.

Un des objectifs principaux pour la réalisation d'une machine à adsorption solaire pour produire de la glace est que du point de vue économique elle produira au moins 10 kg de glace pendant un cycle d'une journée. Sur la Figure 4.6, on remarque que cela est possible avec une température d'adsorption de 30 °C et une température de condensation inférieure ou égale à 40 °C.

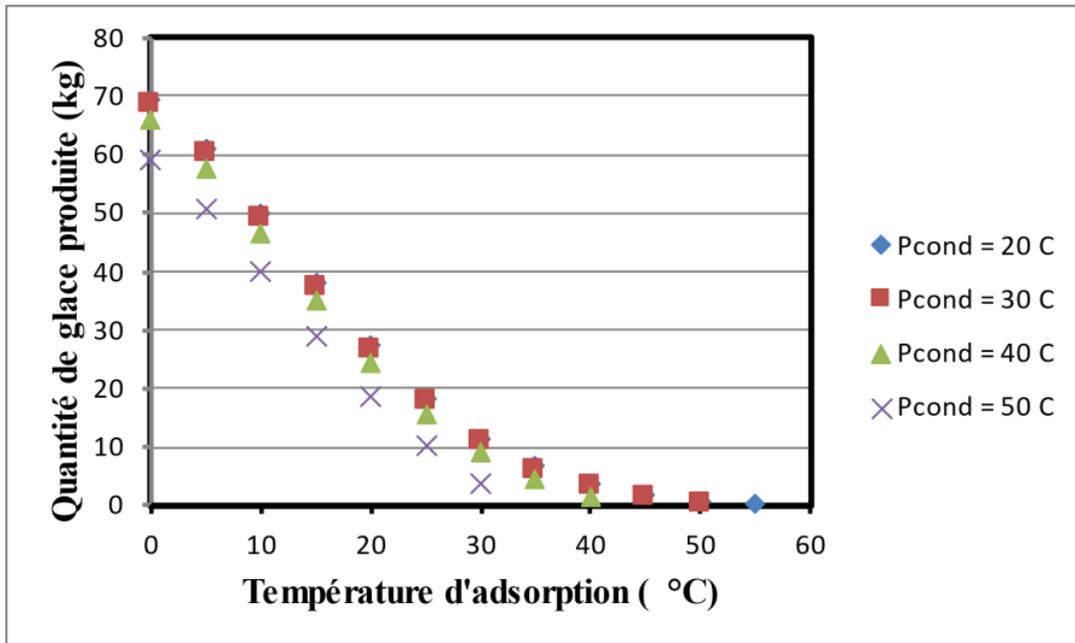


Figure IV.6 : Effet de la température ambiante (adsorption)/du condenseur sur la production de la glace (kg) de la machine à adsorption.

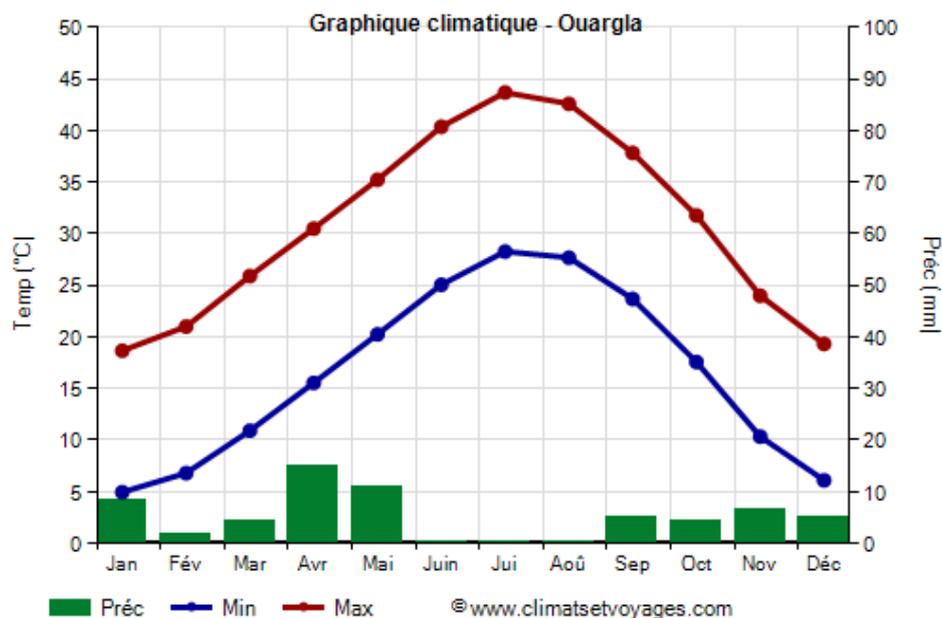


Figure IV.7 : Températures ambiantes et précipitations pour la ville de Ouargla (Algérie).

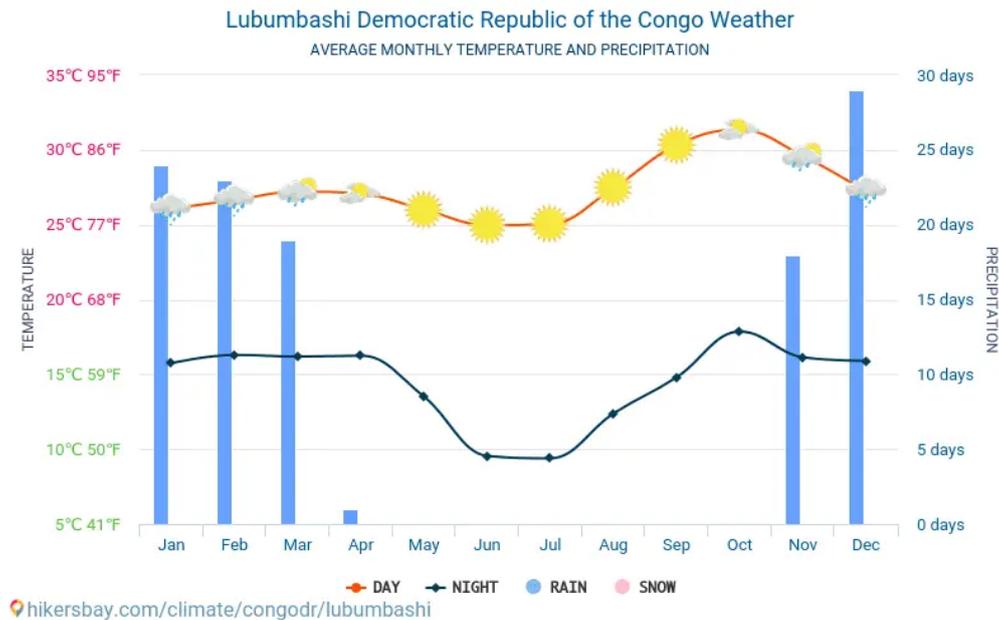


Figure IV.8 : Températures ambiantes et précipitations pour la ville de Lubumbashi (RDC).

IV.4. Effet de la température de désorption

La Figure 4.9 montre l'influence de l'augmentation de la température maximale du lit sur le COP et la Figure 4.10 l'effet sur la quantité de glace produite. Les lignes sont des isothermes, qui représentent les niveaux de température d'évaporation. Plus la température maximale du lit est importante, plus grande est la quantité de glace produite. Cependant, à environ 100 °C, le COP atteint une valeur seuil, et commence à stagner ; dans ce cas l'augmentation n'est que minimale lorsqu'il y a augmentation supplémentaire de la température.

En revenant à la Figure 4.3, la température mise au point ne produit plus de fluide de travail à désorber. La chaleur supplémentaire ajoutée pour augmenter la température ne contribue pas à la désorption du fluide de travail. On voit sur la Figure 4.3, que l'augmentation de Δx n'est pas linéaire avec les températures élevées et qu'à partir de 363 K ou 90 °C, l'augmentation de Δx est très faible donc sans aucune incidence sur la valeur du COP ou de la glace produite. Intuitivement la quantité de glace augmentera avec une température d'évaporateur plus élevée, c'est-à-dire plus proche de 0°C. Cependant, ΔT influence le temps de congélation ; si ΔT est trop réduit, la force motrice dans le système est trop faible pour produire de la glace.

Certaines différences existent en ce qui concerne le graphique de la glace. La production de la glace est donnée sur la Figure 4.10 ; elle augmente avec la température de désorption (température maximale) dans le lit. La stagnation dans la production de la glace existe pour

des températures d'évaporation inférieures ou égales à -7°C ; par contre pour les températures d'évaporation supérieures, on remarque une augmentation de fabrication de la glace de 1 kg pour 10°C environ. La machine fonctionnant avec une température d'évaporation de -3°C reste donc la plus attractive avec une production avoisinant les 10 kg, ce qui est l'objectif fixé pour la machine. Pour ce qui concerne la production de la glace lorsque les températures d'évaporation sont inférieures à -3°C , on notera que la production de la glace est marginale lorsque la température de désorption dépasse les 110°C . Ceci est dû au fait qu'à partir de cette température, il ne reste plus de fluide de travail à désorber. La baisse du COP vient de l'augmentation de la température du lit sans plus de production de glace, donc plus d'apport de chaleur sans aucune puissance de refroidissement supplémentaire produite.

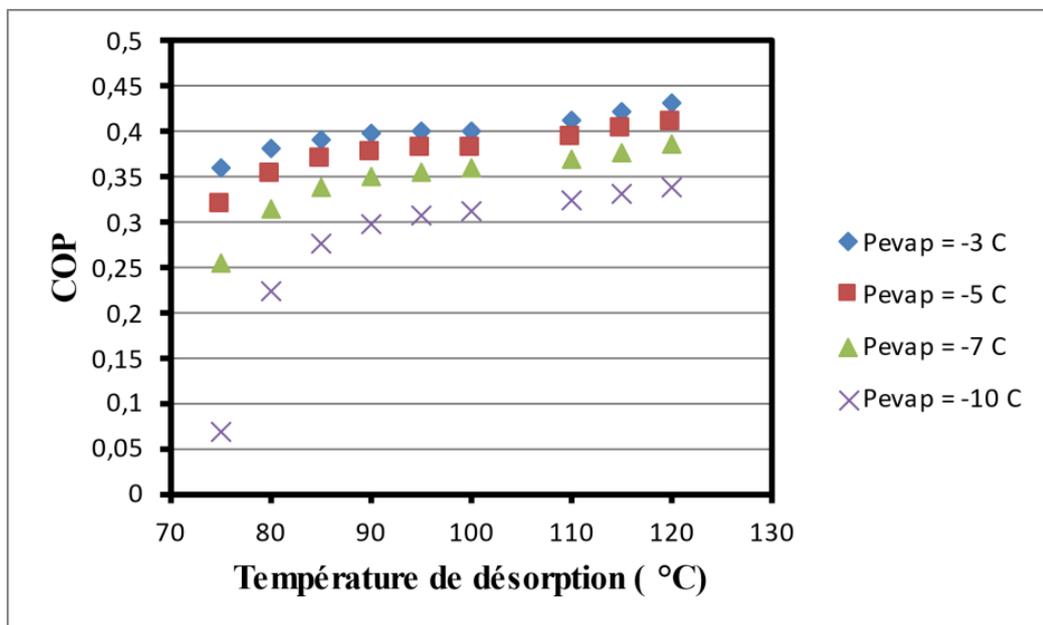


Figure IV.9 : Effet de la température de désorption (température maximale du lit) sur le COP de la machine à adsorption.

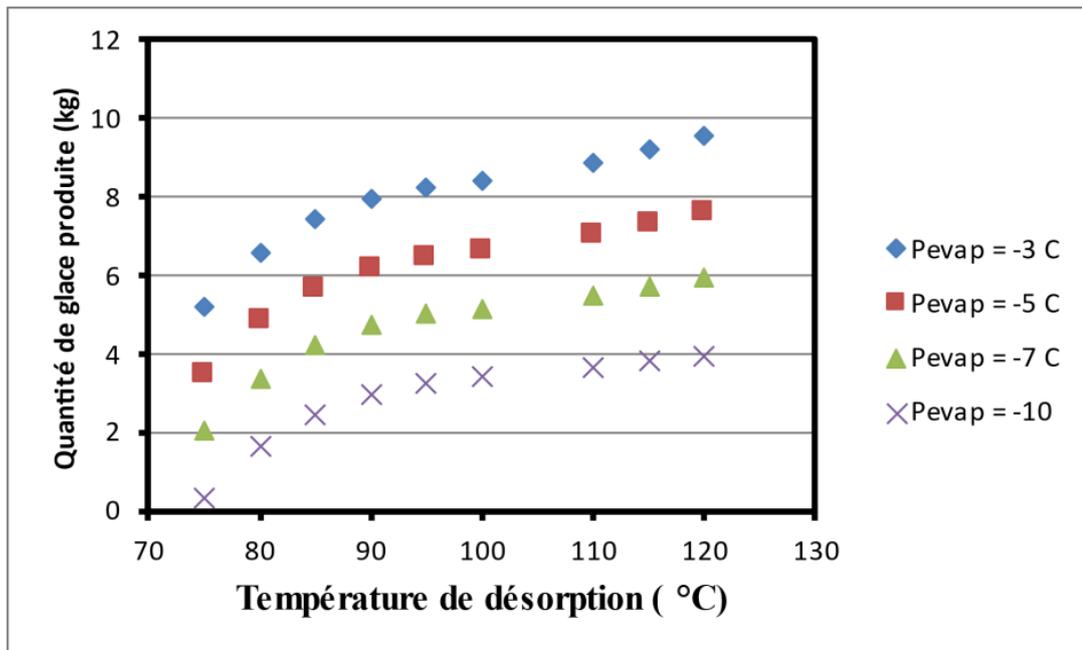


Figure IV.10 : Effet de la température de désorption (température maximale du lit) sur la production de la glace (kg) de la machine à adsorption.

Comme mentionné précédemment dans la section traitant de la température d'adsorption, on remarque que la température de désorption (température maximale du lit de charbon actif) doit aussi être à son tour élevée, et dans ce cas Ouargla est meilleur que Lubumbashi. Une étude tenant compte d'un modèle considérant comme données d'entrée les conditions réelles de températures ambiantes journalières, rayonnement solaire incident journalier et pertes thermiques et optiques du système sera le seul à même de déterminer les COP et productions de glace réelles des deux villes.

IV.5. Validation

De plus, et pour des raisons de validation du présent travail de master, et en comparant par rapport au travail expérimental de M. Pons et J.J. Guillemot qui est considéré comme pionnier et une référence en la matière car d'excellente qualité scientifique, on notera que les valeurs du coefficient de performance (COP) et la glace produite pour une température de désorption de 95°C, une température d'évaporation de -3 °C, une température d'entrée de l'eau de 20°C sont de l'ordre de 0.4 et 9 kg de glace, respectivement. La consommation d'énergie pour notre cas de simulation est égale à 9582 kJ. M. Pons et J.J. Guillemot trouve un COP de 0.43 et la production de la glace de 37 kg, cela pour une énergie consommée de 46200 kJ. On remarque donc que pour le COP, les deux valeurs sont très proches et sont indépendantes des

dimensions du système. Pour la production de la glace, en prenant une consommation d'énergie dans le travail expérimental de M. Pons et J.J. Guillemot similaire à notre cas d'étude c'est-à-dire de 9582 kJ, la production de la glace aurait été égale à 7.67 kg ; donc un écart de l'ordre de 17 %.

Conclusions Générale et perspectives

Le présent mémoire de master concerne la modélisation et la simulation d'une machine à adsorption solaire pour la production de la glace. Cette machine utilise le couple Maxsorb III-méthanol. Le Maxsorb III est considéré actuellement comme le meilleur charbon actif sur le marché et son association au méthanol a permis d'obtenir une production de glace de l'ordre de 6 kg par m² de surface de captation solaire. L'approche de la modélisation et la simulation s'est basée sur un modèle thermodynamique traitant la machine par rapport au cycle de réfrigération, et ne considérant pas le transfert de chaleur entre la machine et l'environnement ni la modélisation effective du capteur solaire thermodynamique où des tubes remplis de l'absorbant Maxsorb III sont insérés à l'intérieur. De même, la partie rayonnement solaire incident sur un capteur plan incliné d'un angle égal à la latitude du lieu géographique où il est installé n'a pas non plus été abordée. Ces deux études requièrent un temps beaucoup plus important que celui alloué à un travail de master, ceci étant en plus de leur complexité scientifique relevant d'un niveau plus élevé.

Parmi les conclusions les plus pertinentes tirées de la présente étude on pourra citer :

- Le coefficient de performance (COP) diminue légèrement avec l'augmentation de la température d'adsorption de 0 jusqu'à 15 °C ; cependant, vers une valeur de 35 °C, le COP diminue rapidement. De plus, il n'y a pas de grandes différences entre les COP pour différentes valeurs de condensation lorsque la plage des températures se situe entre 0 et 30 °C pour des températures de condensation de 20, 30 et 40°C. Une température de condensation de 50 °C donne par contre des COP assez faibles en comparaison avec les autres températures de condensation et cela à partir d'une température d'adsorption de 25°C.
- Un des objectifs principaux pour la réalisation d'une machine à adsorption solaire pour produire de la glace est que du point de vue économique elle produira au moins 10 kg de glace pendant un cycle d'une journée. Nos simulations ont montré que cela reste possible avec une température d'adsorption de 30°C et une température de condensation inférieure ou égale à 40 °C.

- Plus la température maximale du lit dite température de désorption est importante, plus grande est la quantité de glace produite. Cependant, à environ 100 °C, le COP atteint une valeur seuil, et commence à stagner ; dans ce cas l'augmentation n'est que minimale lorsqu'il y a augmentation supplémentaire de la température.
- La production de la glace augmente avec la température de désorption. La stagnation dans la production de la glace existe pour des températures d'évaporation inférieures ou égales à -7°C ; par contre pour les températures d'évaporation supérieures, on remarque une augmentation de fabrication de la glace de 1 kg pour 10 °C environ. La machine fonctionnant avec une température d'évaporation de -3°C reste la plus attractive avec une production avoisinant les 10 kg, ce qui est l'objectif fixé pour la machine.
- La validation du présent modèle à base de cycle de thermodynamique a été faite par comparaison avec les résultats des tests expérimentaux de M. Pons et J.J. Guillemot. En considérant la même consommation d'énergie thermique de l'ordre de 9582 kJ, dans le présent travail de master le COP et la quantité de glace produite sont égaux respectivement à 0.4 et 9 kg de glace ; pour M. Pons et J.J. Guillemot les valeurs sont égales à 0.43 et 7.67 kg.

Futur travail et perspectives

La fabrication de la machine à adsorption reste l'objectif ultime à réaliser ; ce qui constituera une concrétisation de ce travail de modélisation et simulation. En effet, cela reste du domaine du possible tenant compte du fait que la majorité des composants essentiels de cette machine à adsorption solaire sont disponibles sur le marché Algérien et ne sont pas trop chers à acquérir.

Enfin, une modélisation en régime transitoire plus complète et in-fine pourra faire l'objet d'une thèse de doctorat.

Annexe

Annexe A : (Code de calcul sous Matlab)

Calcul des charges thermiques :

```
% Données d'entrée
T_eva = -5 + 273.15; % [K]
T_iw = 30 + 273.15; % [K]
T_ad = 40 + 273.15; % [K]
T_con = 30 + 273.15; % [K]
T_g = 100 + 273.15; % [K]
T_sd = T_con*T_ad/T_eva ;
T_sa = T_g*T_eva/T_con ;
T (1) = T_ad ;
T (2) = T_sd ;
T (3) = T_g ;
T (4) = T_sa ;

% Soit A, B, C, les coefficients de l'équation Antoine
A = 7.20519;
B = 1474.08;
C = 229.18;
p_sat = 35.24; % [kPa]
p_sat2 = 19.42; % [kPa]
p_sat3 = 349.89; % [kPa]
p_sat4=17.37; % [kPa]
p_sat6=0.64; % [kPa]

q_st = 1900; % [kJ/kg]
D = 4.022e-6;
X_0 = 1.24; % [kg/kg]
n = 2.0;
R = 8.314;
C_pwf = 2.53; % [kJ/kg K]

m_AC = 20; % [kg]
m_wall = 5; % [kg]
m_eva = 4; % [kg]
C_pAC = 0.020; % [kJ/kg K]
C_pwall = 0.480; % [kJ/kg K]
C_pw = 4.180; % [kJ/kg K]
C_pice = 1.922;

% Calcul de pressions de vapeur saturante
P_con = 21.75; % tiré d'un tableau
P_eva = 2.90; % tiré d'un tableau

% Point 1: isosteric heating
T (1) = T_ad;
P (1) = P_eva;
P_sat (1) = p_sat;
X (1) = X_0*exp (-D*((T (1) -273) *log (P_sat (1) /P_eva)) ^n) ;

% Point 2 : isobaricdesorption
T (2) = T_sd ;
```

```

P (2) = P_con;
P_sat (2) = p_sat2;
X (2) = x (1);

% Point 3: isosteric cooling
T (3) = T_g ;
P (3) = P_con ;
P_sat (3) = p_sat3 ;
X (3) = X_0*exp (-D*((T (3) -273) *log (P_sat (3) /P_con)) ^n) ;

% Point 4 : Isobaric adsorption"

T (4) = T_sa ;
P (4) = P_eva;
P_sat (4) = p_sat4;
X (4) = x (3) ;

% Calcul de l'énergie d'entrée
DeltaX = x (1) - x (3) ;
Q_12 = (T (2) - T (1)) * (C_pAC * m_AC + C_pwall * m_wall + m_AC * x (1) *
C_pwf) ;
Q_23 = (T (3) - T (4)) * (C_pAC * m_AC + C_pwall * m_wall + m_AC * C_pwf *
(x (1) + x (3)) / 2) + DeltaX * m_AC * q_st ;
Q_tot = Q_12 + Q_23 ;

% Cycle du réfrigérant
m_wfTOT = x (2) *m_AC;

% Point 5: R low pressure
T (6) = T_eva;
P (6) = P_eva;
P_sat (6) = p_sat;
x_quality = 0.2;
x_liquid = 1-x_quality;
h_evap = 1181; % tiré d'un tableau [kJ/kg]

% Ice production

C_pwf = 2.53;
h_water.ICE = 334; % [kJ/kg]
DeltaH = (-0.01*(T_ad-273) ^2-0.673*(T_ad-273) +1181);
Q_cold = DeltaX*m_AC*(-0.087*(T_ad-273) ^2+(C_pwf-12.445) *(T_ad-273)
+1360);
m_ice = (Q_cold - ((m_eva) *C_pw*(T_iw - T_eva)))/ (h_water.ICE +
C_pwf*(T_iw - 273.15) + C_pice*(273.15 - T_eva));

COP = Q_cold / (Q_tot) ;

```

Références bibliographiques

- [1] Chekirou, W. (2008) Etude et Analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption. Thèse de Doctorat d'état. Université Mentouri.
- [2] Gaboriaud R, Thermodynamique, Éléments fondamentaux de l'énergétique et de la cinétique chimique, Edition ellipses 1998.
- [3] Diny, M. (1996) Etude du fonctionnement d'une machine frigorifique à adsorption modélisation des transferts de chaleur et de masse et optimisation du fonctionnement de la machine. Thèse de Doctorat d'état. Université Henri Poincaré. Nancy 1
- [4] Errougani, A. (2007) Fabrication et expérimentation d'un réfrigérateur solaire à adsorption utilisant le couple charbon actif - méthanol dans le site de Rabat. Thèse de doctorat d'état. Université Mohammed V, Rabat, Maroc.
- [5] Chekirou, W. (2008) Etude et Analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption. Thèse de Doctorat d'état. Université Mentouri
- [6] Fernandes, M. S., G. J. V. N. Brites, J. J. Costa, A. R. Gaspar and V. A. F. Costa (2014) Review and future trends of solar adsorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 39:102–123.
- [7] Baysinger, G., L. Berger, R. N. Goldberg, H. V. Kehiaian, K. Kuchitsu, G. Rosenblatt, D. L. Roth and D. Zwillinger (2004) *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, New York.
- [8] Luo, L. (1991) Etude thermodynamique et thermique de machine à cycle inverse à adsorption. Thèse de Doctorat. L'institut national polytechnique de Lorraine., Nancy
- [9] Tangkengsirisin, V., A. Kanzawa and T. Watanabe (1998) a solar-powered adsorption cooling system using silica gel-water mixture. *Energy* 23:347–353.
- [10] Aghbalou, F., A. Mimet, F. Badia, J. Illa, A. El Bouardi and J. Bougard (2004) Heat and mass transfer during adsorption of ammonia in a cylindrical adsorbent bed: thermal performance study of a combined parabolic solar collector, water heat pipe and adsorber generator assembly. *Applied Thermal Engineering* 24:2537–2555.
- [11] Wang, D., J. Zhang, Q. Yang, N. Li and K. Sumathy (2014) Study of adsorption characteristics in silica gel–water adsorption refrigeration. *Applied Energy* 113:734–741.
- [12] Wang, D. C., Y. H. Li, D. Li, Y. Z. Xia and J. P. Zhang (2010) A review on adsorption refrigeration technology and adsorption deterioration in physical adsorption systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:344–353.

[13] Younes, M. M., El-Sharkawy, I. I., Kabeel, A., Saha, B. B., 2017b. A review on adsorbent-adsorbate pairs for cooling applications. *Applied Thermal Engineering* 114, 394-414.

[14] El-Sharkawy, I., Hassan, M., Saha, B., Koyama, S., Nasr, M., 2009. Study on adsorption of methanol onto carbon-based adsorbents. *International Journal of Refrigeration* 32 (7), 1579

[15] <https://www.eurocarb.com/fr/produits/quest-ce-que-le-charbon-actif/>.

[16] Wang, L., Wang, R., Oliveira, R., 2009. A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (3), 518 – 534.

URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108000038>

[17] El-Sharkawy, I., Saha, B., Koyama, S., He, J., Ng, K., Yap, C., 2008. Experimental investigation on activated carbon-methanol pair for solar powered adsorption cooling applications. *International Journal of Refrigeration* 31 (8), 1407- 1413.

[18] Saha, B. B., Habib, K., El-Sharkawy, I.I., Koyama, S., 2009a. Adsorption characteristics and heat of adsorption measurements of r-134a on activated carbon. *International Journal of Refrigeration* 32 (7), 1563 – 1569.

[19] <https://www.etese.com/fr/product-c63285/Activ%C3%A9-en-fibre-de-carbone-Mat%C3%A9riaux.html>

[20] Analysis on Preparation, Application, and Recycling of Activated Carbon to Aid in COVID-19 Protection - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Pores-of-activated-carbon-39_fig1_342924822 [accessed 29 May, 2023]

[21] W. Chekirou, "Etude et Analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption", Thèse de doctorat, Université Mentouri, pp 14, (2008).

[22] D. R. Zejli ; A.Benchirifa ; O.Bennouna ; K.Bouhelal. Analyse énergétique et entropique de la régénération de chaleur dans d'une machine frigorifique à adsorption. *Revue de mécanique appliquée et théorique*, 1.4 :253– 268, 2003.

[23] Contribution à l'étude du transfert thermique dans les échangeurs de chaleur des machines frigorifiques à adsorption.

https://www.researchgate.net/figure/Representation-schematique-du-refrigerateur-solaire-de-F-Bouzeffour-62_fig13_318541200 [accessed 31 May, 2023]

[24] <https://www.semanticscholar.org/paper/A-Review-on-Solar-Adsorption-Cooling-System-with-Pathak-Badhe/a77bd509148bd4e4f0fbb8dfb62e00a2b670d2b3>

- [25] H. Benabdellah, Etude expérimentale de production frigorifique par adsorption solide : application à la conception d'une plateforme de tri génération à partir de biomasse en milieu rural, thèse de Magister, université M'Hamed Bougara Boumerdes, (2011).
- [26] A. El Almers, " Etude du transfert de chaleur et de masse dans un lit fixe de charbon actif réagissant par adsorption avec l'ammoniac – application à la modélisation d'une machine frigorifique solaire", Thèse de Doctorat, Tetouan, (2002).
- [27] C. Hilbrand. Ph. Dind. M. Pons. F. Buchter, "A new solar powered adsorption refrigerator with high performance", Laboratoire d'Energétique Solaire, EIVD (HESSO), Switzerland, (2003).
- [28] El Fadar A, Thermal behavior and performance assessment of a solar adsorption cooling system with finned adsorber. Energy (2015) 1-11.
- [29] Fortuin, S. et G. Stryi-Hipp. (2012). « Solar Collectors, Non-concentrating », Encyclopedia of sustainability Science and Technology, p. 9449-9469.
- [30] Alghoul, M., Sulaiman, M., Azmi, B., Sopian, K., Wahab, M., 2007. Review of materials for adsorption refrigeration technology. Anti-Corrosion Methods and Materials 54 (4), 225-229.
- [31] Erling Vingelsgård. Design and simulation of adsorption based solar ice maker. Master's thesis, Faculty of Engineering, Department of Energy and Process Engineering. Norwegian University of Science and Technology (2019).