

DIMENSIONNEMENT ET RELISATION D'UNE MACHINE FRIGORIFIQUE SOLAIRE A ADSORPTION D'AMMONIAC SUR CHARBON ACTIF

Hassan Boushaba¹, Abdelaziz Mimmet¹, Manuel Perez Garcia², Mohamed Asbik³, Mohamed El Ganaoui⁴

1 Laboratoire d'Energétique, Faculté des sciences. BP 2121, 93000 Tetouan. Maroc.

2 Dpto. de Fisica Aplicada – Universidad de Almeria. E-04120 Almeria Espagne.

3 Laboratoire de Physique des Matériaux et Modélisation des Systèmes (LP2MS), Unité associée au CNRS, URAC :08, Faculté des Sciences, B.P. 11201 Meknès, Maroc

4 Institut Universitaire de Technologie de Longwy, Université de Lorraine, 186, rue de Lorraine F-54400 Cosnes et Romain, France

1. Introduction

Actuellement, la technologie nous offre une variété de moyens permettant d'obtenir le froid. Ainsi, de nombreux scientifiques et écologistes se prononcent donc pour une technologie capable d'assurer le futur écologique de notre planète. La disponibilité et la gratuité de l'énergie solaire, d'une part, et la protection de l'environnement, d'autre part pourraient rendre les machines à adsorption de plus en plus compétitives dans le marché relatif à cette industrie.

De nombreuses études théoriques [1-18] ont montré la faisabilité de ce genre de machines dans le climat marocain, notamment dans les zones ensoleillées. Ces éventuels appareils pourraient répondre aux besoins des utilisateurs dans plusieurs domaines d'applications du froid : ménages, petites et moyennes entreprises, dépôts de conservation des produits alimentaires et médicaux.

Le Maroc dispose d'un gisement solaire important, 30% du territoire reçoit annuellement plus de 2000 KWh par m². En effet, il est intéressant d'exploiter cette ressource naturelle dans le domaine de la production de froid surtout dans les zones rurales isolés.

C'est dans ce concept que se situe notre travail dont le but est de construire une machine frigorifique solaire (en cours de réalisation). Le couple adsorbant/adsorbat est le Charbon actif/ammoniac.

2. Description du phénomène d'adsorption

L'adsorption est un phénomène qui apparaît lors d'un équilibre entre un gaz et un solide. Les molécules d'un fluide (gaz ou liquide) appelé adsorbat ou fluide frigorigène, se fixent sur la surface d'un solide appelé un adsorbant. Le terme surface du solide correspond à la totalité des surfaces externes engendrées par le réseau de pores et cavités à l'intérieur de l'absorbant. On distingue deux types d'adsorption, chimique ou physique selon la nature de la fixation des molécules de gaz et leurs énergies mises en jeu. Dans le cas de l'adsorption chimique, la fixation des molécules d'adsorbat sur la surface d'adsorbant se fait par des liaisons chimiques fortes dont l'énergie de liaison est assez grande de l'ordre de 50 à 400 kJ/mole. Alors que pour l'adsorption physique est un processus qui résulte de liaisons physiques plus faibles, avec des énergies d'interaction de l'ordre 20 KJ/mole. Cette fixation des molécules du fluide sur la surface du solide se fait essentiellement à l'aide de forces de Van der Waals. Ainsi, l'adsorption physique est parfaitement réversible c'est-à-dire que les molécules adsorbées peuvent être facilement désorbées en augmentant la température.

Du point de vue thermodynamique, l'adsorption physique est considérée comme une transformation d'état du fluide d'une phase gazeuse à une phase adsorbée. Cette transformation s'effectue à pression et température constante.

3. Fonctionnement de la machine à adsorption

Dans une machine frigorifique solaire à adsorption, les éléments essentiels de l'unité sont le réacteur qui contient le mélange adsorbant/adsorbat, le condenseur et l'évaporateur.

Le couplage d'une masse d'adsorbant avec des sources à des températures différentes (condenseurs et évaporateur) permet la réalisation de cycles intermittents où l'adsorbant joue le rôle de compresseur chimique, refoulant l'adsorbat vers le condenseur pendant qu'il est chauffé et aspirant l'adsorbat de l'évaporateur pendant qu'il est refroidi. 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.

Phase de chauffage (Jour)

Le long de la transformation (1→2 Fig 1) l'adsorbent est isolé. Sous l'effet de chauffage la pression et la température du mélange augmentent, tandis que la masse totale du réfrigérant adsorbée reste constante et égale à m_{\max} . Cette phase de pressurisation s'achève dès que la pression devient égale à celle qui règne dans le condenseur P_c (point 2). L'adsorbent est mis en communication avec le condenseur et la désorption du frigorigène commence (2→3), l'adsorbent est alors en haute pression et suit l'isobare imposée par le condenseur. Tout en continuant le chauffage, la température du mélange dans l'adsorbent augmente jusqu'à la température maximale T_3 . Cette phase est généralement appelée génération car c'est celle qui rend l'adsorbent propice à une nouvelle phase de production frigorifique.

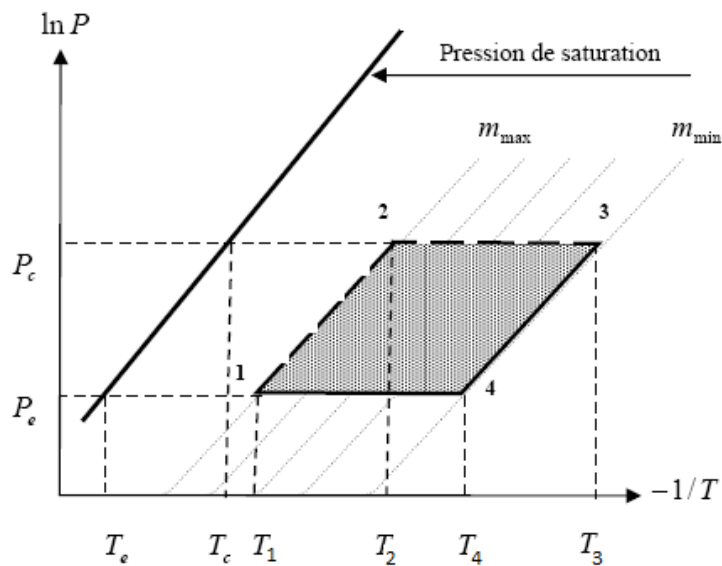


Figure 1 Trajet thermodynamique d'un cycle frigorifique de base dans un diagramme de Clapeyron

Phase de refroidissement (Nuit)

Le refroidissement du mélange adsorbant/adsorbat commence au point 3 (3→4), 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_4 (point 4). La masse totale du fluide adsorbée reste constante dans cette phase et est égale à m_{\min} . Au point 4, commence l'évaporation du réfrigérant en produisant le froid dans l'évaporateur. La vapeur produite s'adsorbe de nouveau dans l'adsorbent, jusqu'à ce que la température du mélange adsorbant/adsorbat devienne minimale T_1 . Le système suit l'isobare imposée par l'évaporateur, et qui correspond à la pression de saturation du réfrigérant à la température d'évaporation. À ce moment, la machine est prête pour un nouveau cycle.

4. Description et dimensionnement de l'installation expérimental

Au cours de ces trois dernières décennies, plusieurs prototypes frigorifiques solaires à adsorption ont été testés avec succès. Wang et al. [19], ont combiné un chauffe-eau solaire et un système de fabrication de glace. Pons et Guillemot [20] ont développé un prototype avec le couple méthanol/charbon actif. Li et al. [21] ont réalisé des expériences sur un système solaire de fabrication de glace, dont le charbon actif/méthanol. Buchter et al. [22] a réalisé un système solaire de fabrication de glace à adsorption fonctionnant avec le couple charbon actif/méthanol, il a été évalué au Burkina Faso. Le même prototype a été réalisé au Maroc par Boubakri et al. [23,24] mais sans volet de refroidissement. Lemmini et Errougani [25] ont testé, à Rabat (Maroc), un réfrigérateur solaire à adsorption qui fonctionne avec le couple CA35-méthanol.

La principale différence entre ces systèmes et notre prototype est à la fois le système fonctionne avec le couple Ammoniac/charbon actif et la présence des volets de ventilation.

La machine à construire est présentée dans la figure 2 :

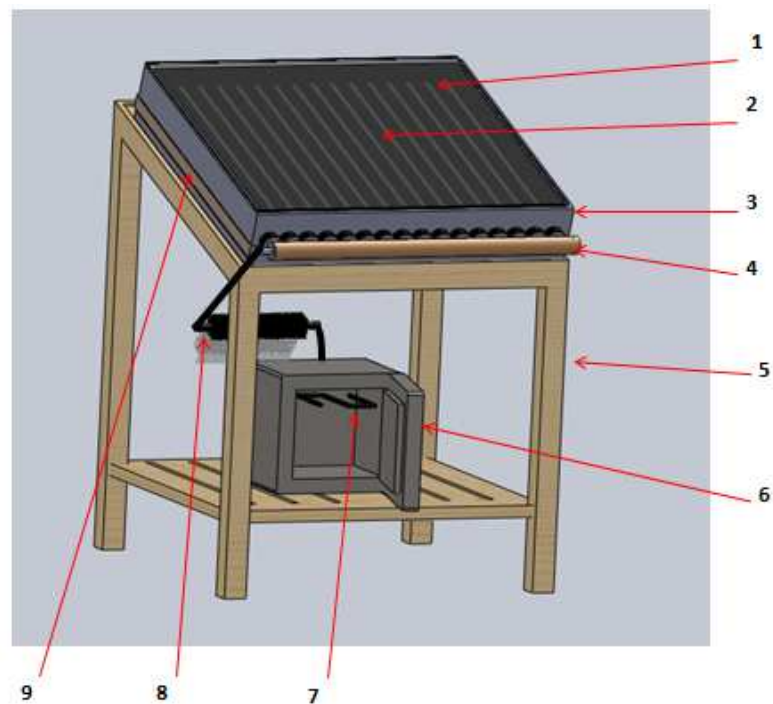


Figure 2. Schéma de la machine frigorifique solaire à adsorption

1-Vitrage ; 2-Adsorbeur ; 3-Boîtier du capteur ; 4- Collecteur ; 5- Support ; 6- Chambre froide ; 7- Evaporateur; 8- Condenseur ; 9- Volets de refroidissement.

Dans le réacteur si on se fixe l'objectif d'atteindre une température de l'ordre de 80 à 90 °C, la température et la pression de saturation du condenseur est $T_s=30^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{cond}}=11,66$ bar et celle de l'évaporateur $T_s=0^{\circ}\text{C}$, $P_{\text{ev}}=4,29$ bar[1].

Les éléments de la machine à construire sont :

Un capteur plan normal de dimension 1mx1m, contenant un ensemble de tubes cylindriques d'aciers de diamètre intérieur $d=5,5$ cm. Un condenseur à air. Une chambre froide contenant un évaporateur à air. Tuyauteries de liaison

Le capteur plan de dimension 1mx1m est composé d'un boîtier de forme rectangulaire (en

aluminium, bois...) servant à conserver la chaleur au sein du capteur. Le matériau d'isolation utilisé est la laine de verre ou polyuréthane. (Fig3) et d'une vitre permettant de créer un effet de serre à l'intérieur du boîtier. Une excellente transparence, un coefficient de réflexion proche de zéro ainsi qu'un faible coefficient d'absorption et une grande isolation thermique sont requis. Le verre étant le matériau utilisé.

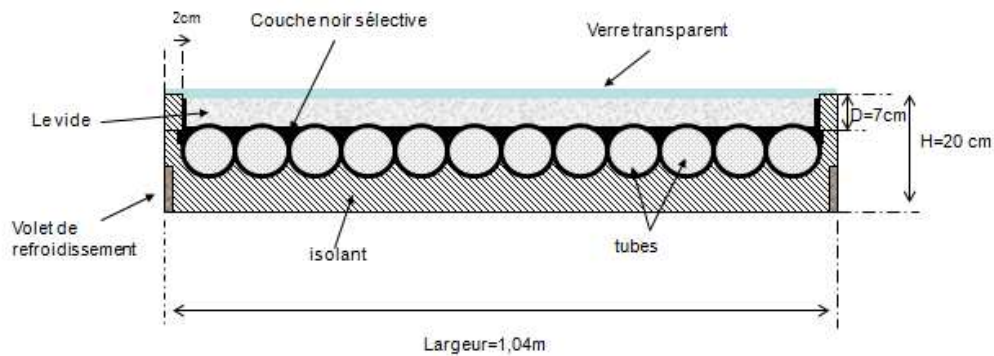


Figure 3 Coupe longitudinale du boîtier

L'absorbeur de chaleur sera constitué de tubes cylindriques en acier inoxydable de longueur 1m et de diamètres 5,5 cm, remplis de charbon actif, enfermés aux extrémités par un grillage fine, pour conserver le charbon actif à l'intérieur des cylindres. La surface externe des cylindres est teintée en peinture sélective (couleur Noir); ce dernier, est relié aux autres éléments de la machine par une connexion soudée dans l'extrémité des tubes.

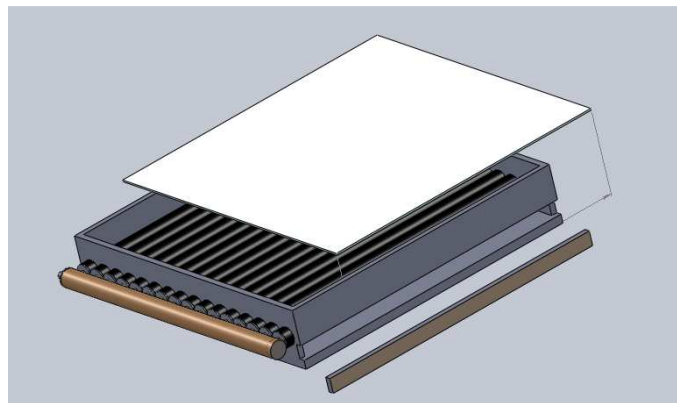


Figure 4 Vue en perspective du boîtier

Le capteur occupe 16 tubes, la masse totale de charbon actif contenu dans les tubes est de 18,4 kg. La masse d'ammoniac cyclé pour 1kg de charbon actif dans le système est donnée expérimentalement par $\Delta m_1 = 0,078$ Kg/Kg ca Ref [1]. Ainsi La masse d'ammoniac cyclé dans la machine pour 18,4 kg de charbon actif est donnée par $\Delta m_2 = 1,43$ Kg.

Le condenseur (Fig 5) à air proposé est constitué d'un tube de diamètre intérieur ($d_i = 2$ cm) et de diamètre extérieur ($d_e = 2,6$ cm) et contient 58 ailettes espacées de 0,5 cm. Les ailettes sont de formes carrées de 6,5 cm de côté et d'épaisseur 0,2 cm. La longueur du tube calculé est de 30,65 cm.

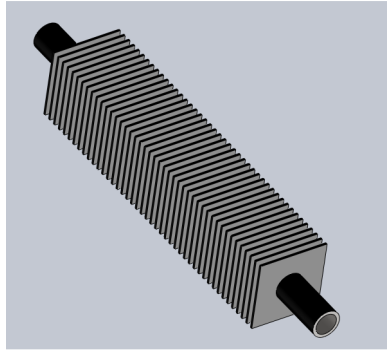


Figure 5

L'évaporateur (Fig 6) est sous forme d'un tube cylindrique de diamètre intérieur $d_i = 1$ cm et de diamètre extérieur $d_e = 1,6$ cm. La longueur du tube calculé est de $L_{tubv} = 74,72$ cm

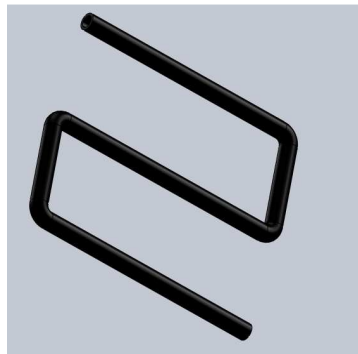


Figure 6

L'évaporateur est posé à l'intérieur d'un parallélépipède de dimension 40x40x30 cm, supposé comme chambre froide.

5. Conclusion

Ce travail a permis de concevoir un prototype pour une machine frigorifique solaire. Le couple adsorbant/adsorbat est le Charbon actif/ammoniac. L'étude du dimensionnement des éléments de la machine a été réalisée. La réalisation du projet est en progression, dans le cadre d'un projet d'action intégré Maroc Espagnol (code n° A1 /042875/) avec l'université d'Almeria en Espagne. Une étude technico-économique est également prévue pour l'exploitation de cette machine.

6 Bibliographie

- [1]A. Mimet «Etude Théorique et expérimentale d'une machine Frigorifique à adsorption d'Ammoniac sur Charbon Actif », thèse de doctorat, faculté polytechnique de Mons (Belgique) 1991
- [2]M. Karagiorgas « Etude du comportement dynamique d'une pompe à chaleur à adsorption solaire », thèse de doctorat, université Paris VII (France) 1985.
- [3]W.Chekirou « étude et analyse d'une machine frigorifique solaire à adsorption », thèse de doctorat université Mentouri-Constantine (Algérie) 2008
- [4]M. Louajari « Etude d'une machine frigorifique solaire à adsorption d'ammoniac sur charbon actif utilisant un adsorbant équipé d'ailettes externes », thèse de doctorat, Faculté des sciences Tétouan (Maroc) 2010.

- [5] A. ALMERS; A. MIMET "Numerical study of heat and mass transfer in adsorption porous medium heated by solar energy : Boubnov-galerkin method", *Heat and mass transfer* 2005, 41, 717 - 723
- [6] M. Louajari; A. Ouammi; A. Mimet "Sustainable development of a solar adsorption cooling machine", *MANAGEMENT OF ENVIRONMENTAL QUALITY*. 2010, 21, 589 – 601
- [7] AGHBALOU; A.MIMET; BADIA "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* 2004, 24, 2537 – 2555
- [8] M. Louajari; A. Ouammi; A. Mimet "Sustainable development of a solar adsorption cooling machine", *Management of environmental quality (Online)* 2010, 21, 589 - 601
- [9] M. LOUJARI; A. MIMET; A.OUAMMI "Study of the effect of finned tube adsorber on the performance of solar driven adsorption cooling machine using activated carbon—ammonia pair", *Applied energy* 2011, 88, 690 – 698
- [10] A.EL FADAR; A. MIMET; A. AZZABAKH "Study of a new solar adsorption refrigerator powered by a parabolic trough collector", *Applied thermal engineering* 2009, 29, 1267 - 1270
- [11] A. EL FADAR; A.MIMET; PEREZ-GARCIA "Study of an adsorption refrigeration system powered by parabolic trough collector and coupled with a heat pipe", *Renewable energy* 2009, 34, 2271 – 2279
- [12] AHACHAD; A. ALMERS; A. MIMET "Solar-based comparison of adsorption and absorption refrigerating machines", *International journal of sustainable energy (Print)* 2005, 24, 199 - 206
- [13] A.AL MERS; A.AZZABAKH; A.MIMET "Optimal design study of cylindrical finned reactor for solar adsorption cooling machine working with activated carbon-ammonia pair", *Applied thermal engineering* 2006, 26, 1866 - 1875
- [14] A. 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, 11 mai 2002, Faculté des Sciences de Tétouan, Maroc
- [16] A. Azzabakh « Comparaison des performances de deux machines frigorifiques solaires à adsorption utilisant les couples charbon actif BPL/ Ammoniac et charbon actif AC35/ methanol », Thèse de Doctorat, 17 mai 2008 à la Faculté des Sciences Tétouan, Maroc
- [17] A. EL FADAR « Etude d'une machine frigorifique solaire à adsorption d'ammoniac sur charbon actif utilisant un concentrateur solaire cylindro-parabolique couplé à un caloduc », Thèse de Doctorat, 15 juillet 2009 à la Faculté des Sciences Tétouan, Maroc
- [18] H. EL KALKHA « Évaluation des performances d'une machine frigorifique solaire à adsorption d'ammoniac sur charbon actif en fonction de la carte d'irradiation solaire marocaine », Thèse de Doctorat , 18 avril 2012, Faculté des Sciences de Tétouan, Maroc
- [19] Wang RZ, Li M, Xu YX, Wu JY. An energy efficient hybrid system of solar powered water heater and adsorption icemaker. *Solar Energy* 2000;68(2):189–95.
- [20] Pons M, Guillemot JJ. Design of an experimental solar powered, solid-adsorption ice maker. *J Sol Energy—Trans ASME* 1986;108(4):332–7.
- [21] Li M, Wang RZ, Xu YX, Wu JY, Dieng AO. Experimental study on dynamic performance analysis of a flat-plate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker. *Renew Energy* 2002;27(2):211–21.
- [22] Buchter F, Dind P, Pons M. An experimental solar powered adsorptive refrigerator tested in Burkina-Faso. *Int J Refrig* 2003;26(1):79–86.
- [23] Boubakri A, Arsalane M, Yous B, Ali-Moussa L, Pons M, Meunier F. Experimental study of adsorptive solar powered ice makers in Agadir (Morocco)-1. Performance in actual site. *Renew Energy* 1992; 2(1):7–13.
- [24] Boubakri A, Arsalane M, Yous B, Ali-Moussa L, Pons M, Meunier F. Experimental study of adsorptive solar powered ice makers in Agadir (Morocco)-2. Influences of meteorological parameters. *Renew Energy* 1992;2(1): 15–21.
- [25] F. Lemmini, A. Errougani, Building and experimentation of a solar powered adsorption refrigerator, *Renewable Energy* 30 (2005) 1989–2003.