

Simulation en régime dynamique d'un système de réfrigération solaire à adsorption

Kamel Rabhi^{*#1}, Chaouki Ali^{#2}, Habib Ben Bacha^{#3}

[#]Laboratory of Electro-Mechanical System, National Engineering School of Sfax, B.P. W3038, Sfax, Tunisia

¹High Institute of Technological Studies of Gafsa, Mechanical Department, Campus Universitaire Sidi Ahmed Zarrouk - 2112 Gafsa – Tunisia

²Faculty of Sciences Gafsa, Campus Universitaire Sidi Ahmed Zarrouk - 2112 Gafsa – Tunisia

³Salman Bin Abdel-Aziz University, College of Engineering at Alkharj, Mechanical Engineering Department, B.P. 655, 11942 Alkharj – Kingdom of Saudi Arabia

¹Kamel_rabhi1@yahoo.fr

²chaouki_ali@yahoo.fr

³habib.benbacha@enis.rnu.tn

Résumé — Dans ce travail proposé, on s'intéresse à la conception, la modélisation dynamique et la simulation numérique du fonctionnement d'un système de réfrigération à adsorption par l'énergie solaire utilisant un couple le gel de silice et l'eau. Cette technique fonctionne avec l'énergie solaire et utilise des fluides frigorigènes naturels qui non aucun effet sur l'environnement. Le système est étudié numériquement et résolu en utilisant la méthode de volume finie. Nous avons étudié l'effet de grosseur de grain de gel de silice et la température de régénération sur la teneur en eau pendant la phase de désorption.

Mots-clés — Réfrigération par adsorption, gel de silice, modélisation, simulation numérique, énergie solaire.

I. INTRODUCTION

À l'échelle mondiale, la demande d'énergie et surtout pour la réfrigération et le confort thermique augmente d'une façon considérable [1]. Les systèmes de refroidissement classiques sont responsables sur le rejet des grandes quantités de CO₂ dans l'environnement et l'utilisation de fluides frigorigènes nocifs sur l'effet de serre et le potentiel d'appauvrissement de la couche d'ozone.

Les systèmes de réfrigération par adsorption ont reçu beaucoup d'attention en raison de leur production de froid utilisant des sources d'énergie renouvelable. Par conséquent, des recherches intenses au cours des 15 dernières années étaient intéressées à la réfrigération solaire à adsorption. Plusieurs conceptions des systèmes de réfrigération à adsorption ont été étudiées dans la littérature dont nous pouvons présenter quelques exemples : Bidyut Baran Saha et al [2] ont fait la conception d'un système de refroidissement à deux lits d'adsorption de deux lits d'adsorption utilisant le gel de silice comme adsorbant et de l'eau comme adsorbat. K.C. Leong et al [3] ont fait une étude numérique d'un système de réfrigération avec deux lits d'adsorption avec récupération de chaleur et de masse. Ils ont étudiés les effets des dimensions du lit, conductivité thermique de lit, la vitesse du fluide

d'échange de chaleur, la température entraînée et le degré de la récupération de chaleur sur les performances du système.

Y. Hamamoto et al [4] ont étudiés la performance du cycle d'un système de refroidissement à deux lits d'adsorption. Le cycle utilise des fibres de carbone activé (ACF) / méthanol en tant que paire d'adsorbant / réfrigérant. K.C.A. Alam et al [5] ont fait la conception et l'étude d'un système de refroidissement à quatre lits d'adsorption. Le cycle proposé utilise deux niveaux de pression pour améliorer les performances du système.

[6] Nidal H. et al ont présentés la conception d'un nouveau prototype d'une unité de réfrigération solaire à adsorption qui peut être employé pour la climatisation. L'unité emploie comme couple le charbon actif avec le méthanol. Ruud J.H. et al [7] ont conçu et étudié expérimentalement un système de refroidissement à adsorption avec le gel de silice / eau. Le système est composé de deux lits adsorbants identiques fonctionnant en opposition de phase afin d'assurer la production de froid en continu.

II. DESCRIPTION DE SYSTEME DE REFROIDISSEMENT SOLAIRE A ADSORPTION

Le système de réfrigération par adsorption conçu et objet de cette étude est illustré par la fig.1. Il présente le quatrième compartiment qui permet de produire de l'eau froide pour l'unité de conditionnement d'air par l'énergie solaire à adsorption [8-9]. Le système utilise le gel de silice comme adsorbant et l'eau comme réfrigérant et se compose essentiellement de quatre éléments : deux lits d'adsorption/désorption identiques remplis d'adsorbant, un évaporateur et un condenseur. Le lit d'adsorbant est l'élément le plus essentiel du système qui joue le même rôle d'un compresseur dans un système frigorifique à compression. La régénération de gel de silice dans le lit est réalisée par une source d'eau chaude solaire.

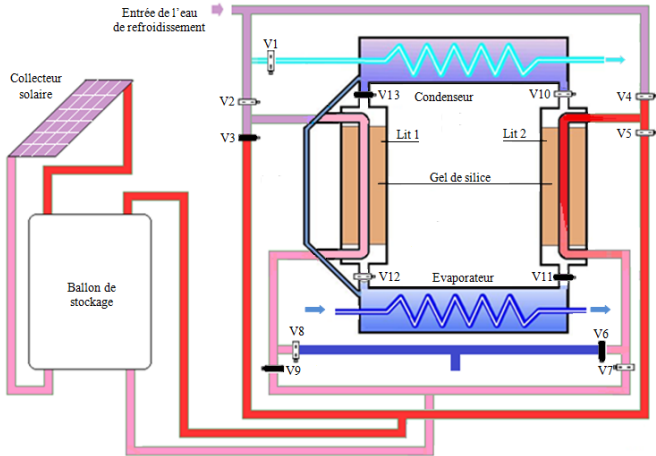


Fig. 1 Schéma de système de réfrigération solaire à adsorption

A. Principe de fonctionnement du cycle idéal

Le principe de fonctionnement du système de réfrigération par adsorption est basé sur un cycle thermique à adsorption-désorption. Ce cycle peut être représenté sur un diagramme de Clapeyron ($\ln P, -1/T$), comme indiqué dans la fig.2, est découpé en quatre phases : chauffage isostérique (1), désorption (2), refroidissement isostérique (3) et adsorption (4) [10].

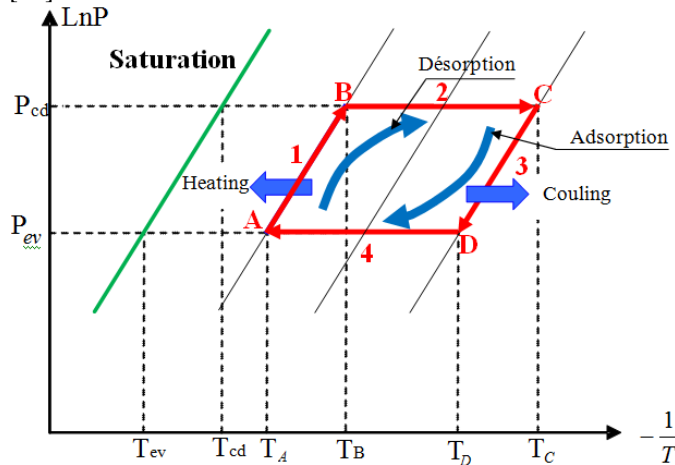


Fig. 1 Schéma de système de réfrigération solaire à adsorption

- 1 : Au début le lit d'adsorption est isolé du condenseur et de l'évaporateur et saturé en vapeur d'eau. Il est chauffé jusqu'à ce que la pression de vapeur dans le lit d'adsorption atteigne la pression de condensation (P_{cd}).
- 2 : En ce moment, le lit d'adsorption est connecté au condenseur et le liquide désorbé est refroidi à une température (T_{cd}) jusqu'à ce qu'il se condense dans le condenseur.
- 3 : Pendant ce temps, le lit d'adsorbant est fermé et l'adsorbant libère la chaleur à l'aide d'une source de fluide froid. Durant cette phase de refroidissement, la température et la pression à l'intérieur du lit d'adsorbant diminuent.
- 4 : Le lit est connecté à l'évaporateur dès que la pression du lit devient légèrement inférieure à la pression

d'évaporation (P_{ev}). En continuant à refroidir l'adsorbant, l'eau liquide vaporisée dans l'évaporateur est adsorbée par l'adsorbant. Cette vapeur est produite par évaporation du liquide se trouvant dans l'évaporateur provoque la production du froid.

III. MODÉLISATION

A. Hypothèses

Le modèle mathématique du problème physique énoncé ci-dessous est basé sur les hypothèses suivantes:

- 1- On considère que la phase adsorbée est du liquide,
- 2- Le lit adsorbant est composé des grains de gel de silice identiques et distribués uniformément [11],
- 3- Les propriétés physiques du liquide, de tube en métal et de l'adsorbant sont constantes et homogènes [12],
- 4- La résistance thermique entre le tube en métal et le lit adsorbant est négligée,
- 5- Le lit adsorbant est homogène et isotropique,
- 6- Les particules poreuses de gel de silice sont incompressibles,
- 7- L'écoulement d'air est considéré unidimensionnel,
- 8- Les parois externes de l'adsorbent sont supposées adiabatiques.

B. Lit d'adsorption

Les équations dans la direction (z) régissant, à l'échelle microscopique, les transferts de masse et de chaleur dans le lit d'adsorption, en considérant ces hypothèses sont:

Equation de conservation d'énergie dans le lit d'adsorbant

$$(\rho_s C_{ps} + \rho_g q C_{pa}) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \rho_s \Delta H_{ads} \frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_e \frac{\partial T_s}{\partial z} \right) - \frac{4h_{s-m}}{d_1} (T_s - T_m)$$

Equation de conservation d'énergie pour le fluide

$$\rho_f C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} = -\rho_f C_{pf} U_f^b \frac{\partial T_f}{\partial z} - \lambda_f \frac{\partial^2 T_f}{\partial z^2} - \frac{4h_{f-m}}{d_0} (T_f - T_m)$$

C. Condenseur

Equation du bilan d'énergie pour le de fluide du condenseur

$$(\rho_{co} C_{pco}) \frac{dT_{co}}{dt} = -u_{co} \rho_{co} C_{pco} \frac{\partial T_{co}}{\partial z} + \lambda_{co} \frac{\partial^2 T_{co}}{\partial z^2} - \frac{4.h_{co}}{d_c} (T_{co} - T_C)$$

Équation de conservation d'énergie du condenseur

$$M_m C_{pm} \frac{dT_m^c}{dt} = -h_m A_{m_ex} (T_m^c - T_c)$$

$$- h_m A_{m_in} (T_m^c - T_{co}) + \frac{\lambda_m}{V_m} \frac{\partial^2 T_m^c}{\partial z^2}$$

D. Evaporateur

Équation du bilan d'énergie pour le fluide de l'évaporateur:

$$(\rho_{ch} C_{pch}) \frac{\partial T_{ch}}{\partial t} = -u_{ch} \rho_{ch} C_{pch} \frac{\partial T_{ch}}{\partial z}$$

$$+ \lambda_f \frac{\partial^2 T_{ch}}{\partial z^2} - \frac{4h_{ch}}{d_e} (T_{ch} - T_E)$$

Équation de conservation d'énergie pour l'évaporateur

$$M_E C_{pE} \frac{dT_E}{dt} = -L_E M_s \frac{dq_{ads}^b}{dt} + h_f M_s \frac{dq_{des}^b}{dt}$$

$$- (UA)_{ch} (T_E - T_{ch})$$

IV. RESOLUTION ET RESULTATS NUMERIQUES

L'évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour les différentes valeurs du rayon de grain de gel de silice de 0,4 à 0,9 mm est présentée par la fig.3. La désorption atteint la valeur d'équilibre de 0,05 kg / kg pour les grains de rayon 0,4 et 0,6 mm à partir de 700 s. On remarque que lorsque le rayon du grain diminue, la teneur en eau diminue d'une façon plus rapide et par conséquent la diminution du rayon des grains de gel de silice accélère le processus de désorption.

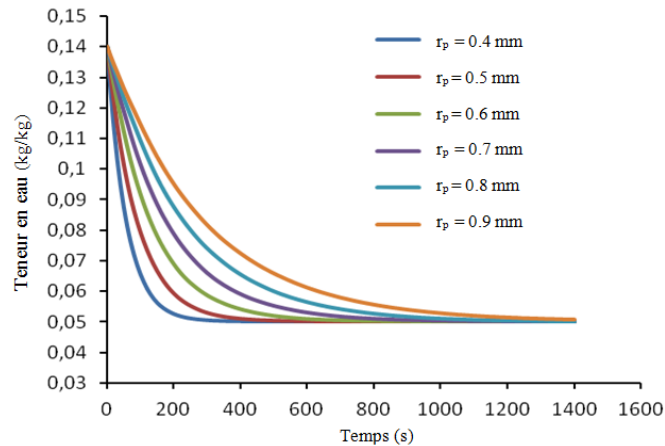


Fig. 3 Effet du rayon moyen des grains de gel de silice sur la teneur en eau pendant la phase de désorption.

La fig.4 montre la variation temporelle de la teneur en eau pendant la phase de désorption en fonction de la température de l'eau de régénération (70 -100 °C). Il est clair que le processus de désorption est beaucoup plus rapide pour les températures les plus élevées. Cela signifie que l'augmentation

de la température permet un transfert de chaleur plus rapide et favorise la désorption.

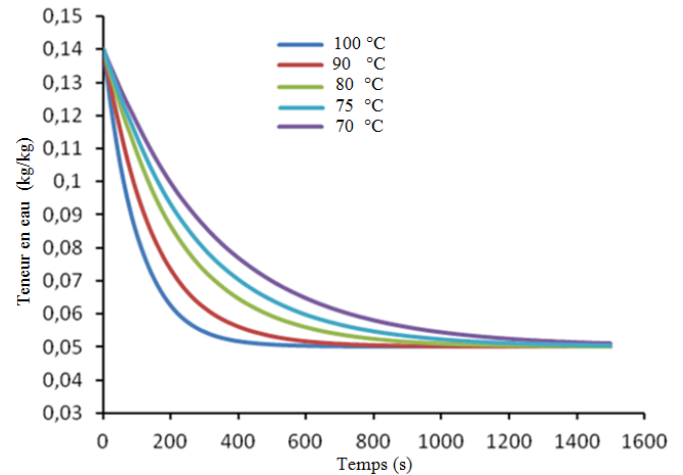


Fig. 4 Effet de la température régénération sur la teneur en eau.

La fig. 5 présente la simulation de la température de l'eau froide et chaude à la sortie du lit pendant les deux phases d'adsorption et de désorption. La température de l'eau chaude de régénération diminue très rapidement pendant les 20 premières secondes car le processus de désorption est endothermique puis elle augmente rapidement, ensuite elle augmente très lentement et enfin elle reste constante dès que le gel de silice est entièrement désorbé. Au début du processus d'adsorption exothermique, la température de l'eau froide augmente rapidement pendant les 20 premières secondes, puis elle diminue et enfin elle est maintenue constante lorsque le gel de silice est saturé en eau.

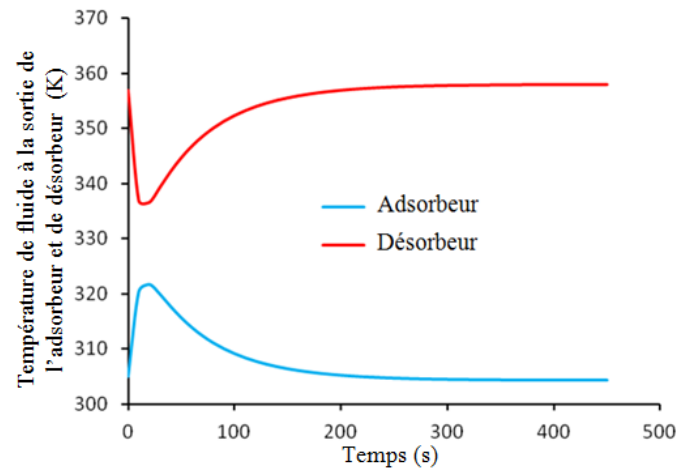


Fig. 5 les températures d'eau chaude et d'eau froide à la sortie des lits.

La fig.6 illustre la simulation de la température de l'eau à la sortie de l'évaporateur et du condenseur. La température de l'eau de refroidissement à la sortie de l'évaporateur pendant la phase d'adsorption-évaporation augmente rapidement pour les 20 premières secondes et cela est due à la variation de la température et la pression entre le réfrigérant, sous forme de vapeur, à la sortie de lit d'adsorption et l'évaporateur. Ensuite la température de l'eau diminue sous l'effet de la saturation de l'adsorption de réfrigérant par le gel de silice.

REFERENCES

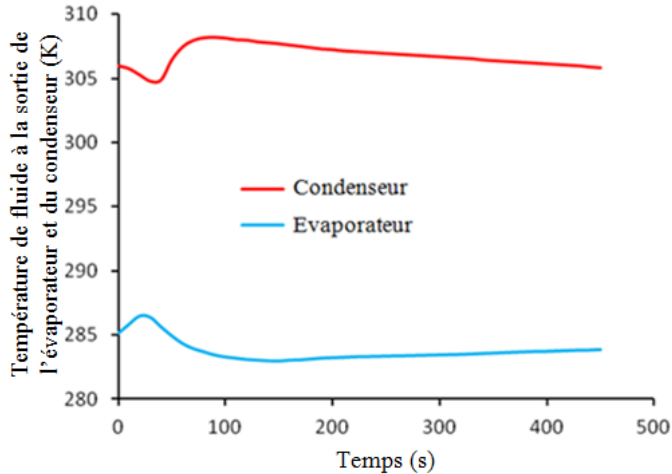


Fig.6 Température de fluide à la sortie de l'évaporateur et du condenseur

V. CONCLUSIONS

Ce travail présente la conception d'un système de réfrigération solaire par adsorption qui emploie comme couple le gel de silice et l'eau. Il présente plusieurs avantages par rapport au système conventionnel puisqu'il offre la possibilité d'utiliser de l'énergie renouvelable gratuite et ne cause aucun effet sur l'environnement. Nous avons bien réussi à développer un modèle numérique pour simuler le transfert de chaleur et de masse des procédés d'adsorption et de régénération dans les deux lits ainsi le condenseur et l'évaporateur pour prévoir le comportement du système et d'optimiser ses performances. On peut conclure que la diminution de grosseur de grain de gel de silice et l'augmentation de la température de régénération accélère le processus de désorption et par conséquent améliore les performances du système de réfrigération par adsorption.

- [1] Clito F.A. Afonso, Recent advances in building air conditioning systems, *Applied Thermal Engineering* 26 (2006) 1961–1971.
- [2] Bidyut Baran Saha, Anutosh Chakraborty, Shigeru Koyama, Yu I. Aristov; A new generation cooling device employing CaCl₂-in-silica gel-water system; *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52 (2009) 516–524.
- [3] K.C. Leong, Y. Liu; System performance of a combined heat and mass recovery adsorption cooling cycle: A parametric study; *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (2006) 2703–2711.
- [4] Y. Hamamoto, K.C.A. Alam, B.B. Saha, S. Koyama, A. Akisawa, T. Kashiwagi; Study on adsorption refrigeration cycle utilizing activated carbon fibers. Part 2. Cycle performance evaluation; *International Journal of Refrigeration* 29 (2006) 315–327.
- [5] K.C.A. Alam, A. Akahira, Y. Hamamoto, A. Akisawa, T. Kashiwagi ; A four-bed mass recovery adsorption refrigeration cycle driven by low temperature waste/renewable heat source; *Renewable Energy* 29 (2004) 1461–1475.
- [6] Nidal H. Abu Hamdeh, Mu'taz A. Al-Muhtaseb, Optimization of solar adsorption refrigeration system using experimental and statistical techniques, *Energy Conversion and Management* 51 (2010) 1610–1615.
- [7] Ruud J.H. Grisel, Simon F. Smeding, Robert de Boer; Waste heat driven silica gel/water adsorption cooling in trigeneration; *Applied Thermal Engineering* 30 (2010) 1039–1046.
- [8] Chaouki Ali, Kamel Rabhi, Rached Nciri, Faouzi Nasri, Habib Ben Bacha; New Adsorption Air Conditioning System Powered by Solar Energy; Operation Principles and Winter Mode Modelling and Simulation; *International Review of Mechanical Engineering*; Jan2013, Vol. 7 Issue 1, p96.
- [9] Kamel Rabhi, Chaouki Ali, Habib Ben Bacha, Numerical study of combined heat and mass transfer in the silica gel-water adsorption chiller, *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, Vol. 6, N. 6 (2012), Z.
- [10] Tamainot-Telto, S.J. Metcalf, R.E. Critoph, R. Thorpe, *Carbon-ammonia pairs for adsorption refrigeration applications : ice making, air conditioning and heat pumping*, *International Journal of Refrigeration* 32 (2009) 1212–1229.
- [11] L.M. Sun, Ben Amar, N., Meunier, F., Numerical study on coupled heat and mass transfers in an absorber with external fluid heating, *Heat Recovery Systems and CHP*, 15(1), 19–29, 1995.
- [12] Sun, L.M., Ben Amar, N., Meunier, F., Numerical study on coupled heat and mass transfers in an absorber with external fluid heating, *Heat Recovery Systems and CHP*, 15(1), 19–29, 1995.