

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

Kamel Rabhi ^{*1,2}, Ali Chaouki ^{1,3} et Habib Ben Bacha ^{†1,4}

¹ Laboratoire des Systèmes Electro-Mécaniques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax
B.P. W3038, Sfax, Tunisia

² Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa, Département de Mécanique
Campus Universitaire Sidi Ahmed Zarrouk, 2112, Gafsa, Tunisia

³ Faculté des Sciences de Gafsa
Campus Universitaire Sidi Ahmed Zarrouk, 2112, Gafsa, Tunisia

⁴ Université Salman Bin Abdel-Aziz, Collège d'Engineering at Alkharj,
Département de Génie Mécanique, B.P. 655, 11942 Alkharj, Royaume d'Arabie Saoudite

(reçu le 14 Février 2014 – accepté le 29 Décembre 2014)

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.

Abstract - In this proposed work, we look to conception, dynamic design, and numerical simulation of an adsorption refrigeration system operating by solar energy using a pair of silica gel and water. This technique operates with solar energy and uses natural refrigerants environmentally neutral. The system is numerically studied and solved using the finite volume method. We studied the effect of grain size of silica gel and the regeneration temperature of moisture during the desorption phase.

Mots-clés: Réfrigération par adsorption - Gel de silice – Modélisation - Simulation numérique - Energie solaire.

1. INTRODUCTION

A 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 gaz carbonique 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 renouvelables. Par conséquent, des recherches intenses au cours des 15 dernières années s'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 adsorbant.

* Kamel_rabhi1@yahoo.fr ; chaouki_ali@yahoo.fr

† habib.benbacha@enis.rnu.tn

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 étudié les effets des dimensions du lit, de la conductivité thermique de lit et la vitesse du fluide d'échange de chaleur, la température entraînée et le degré de la récupération de chaleur sur les performances du système.

Hamamoto *et al.*, [4] ont étudié 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. 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.

Nidal *et al.*, [6] ont présenté 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 *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.

2. DESCRIPTION DE SYSTEME DE REFROIDISSEMENT SOLAIRE A ADSORPTION

Le système de réfrigération par adsorption conçu et objet de cette étude est illustré par la figure 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 de l'adsorbant est l'élément le plus essentiel du système, jouant 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.

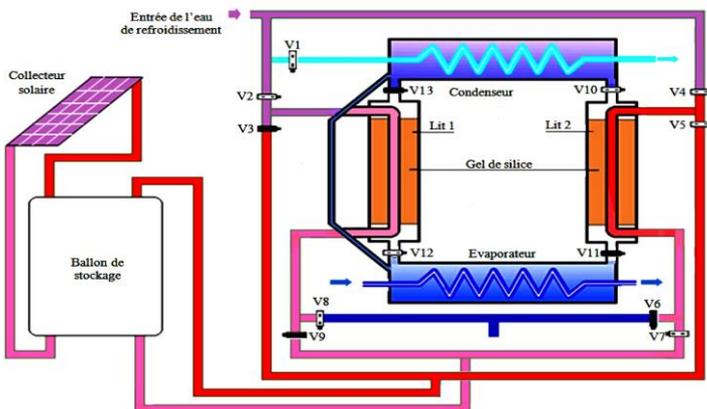


Fig. 1: Schéma de système de réfrigération solaire à adsorption

2.1 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 figure 2, est découpé en quatre phases: chauffage isostérique **1**, désorption **2**, refroidissement isostérique **3** et adsorption **4** [10].

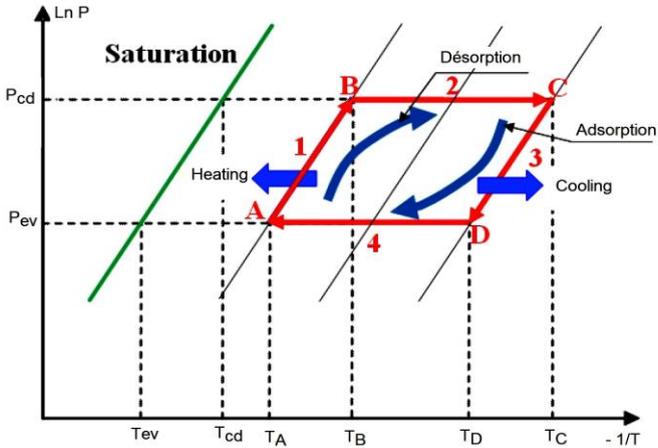


Fig. 2: Schéma du cycle thermique à adsorption - désorption

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 refroidit 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.

3. MODELISATION

3.1 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 de l'air est considéré unidimensionnel.

8- Les parois externes de l'adsorbent sont supposées adiabatiques.

3.2 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 par le fluide

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

3.3 Condenseur

Equation du bilan d'énergie pour le fluide du condenseur

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

Equation de conservation d'énergie du condenseur

$$M_m C_{pm} \frac{dT_m^c}{dt} = -h_m A_{m_ex} (T_m^c - T_c) - h_m A_{m_in} (T_m^c - T_{co}) + \frac{\lambda_m}{V_m} \frac{\partial^2 T_m^c}{\partial z^2}$$

3.4 Évaporateur

Equation du bilan d'énergie pour le fluide de l'évaporateur

$$(\rho_{ch} C_{pch}) \frac{\partial T_{ch}}{\partial t} = -u_{ch} \rho_{ch} C_{pch} \frac{\partial T_{ch}}{\partial z} + \lambda_f \frac{\partial^2 T_{ch}}{\partial z^2} - \frac{4h_{ch}}{d_e} (T_{ch} - T_E)$$

Equation de conservation d'énergie pour l'évaporateur

$$M_E C_{pE} \frac{dT_E}{dt} = -L_E M_s \frac{dq_{ads}^b}{dt} + h_f M_s \frac{dq_{des}^b}{dt} - (UA)_{ch} (T_E - T_{ch})$$

4. RESOLUTION ET RESULTATS NUMERIQUES

L'évolution de la teneur en eau en fonction du temps pour les différentes valeurs du rayon du grain de gel de silice de 0.4 à 0.9 mm est présentée par la figure 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.

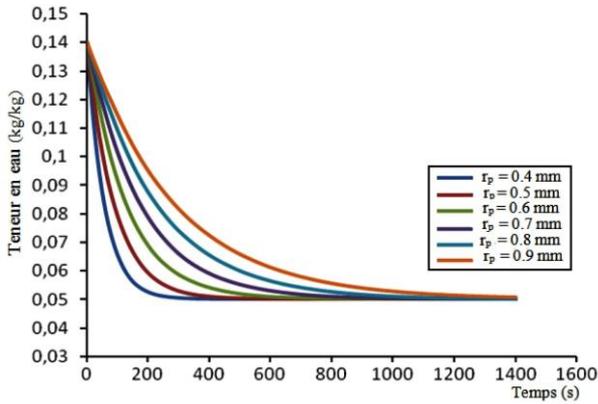


Fig. 3: Effet du rayon moyen des grains de gel de silice sur la teneur en eau pendant la phase de désorption

La figure 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.

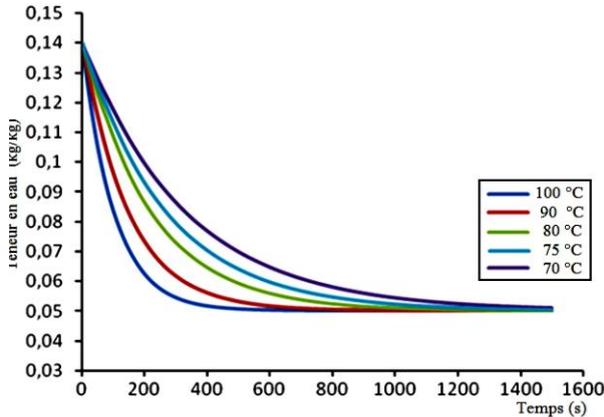


Fig. 4: Effet de la température régénération sur la teneur en eau

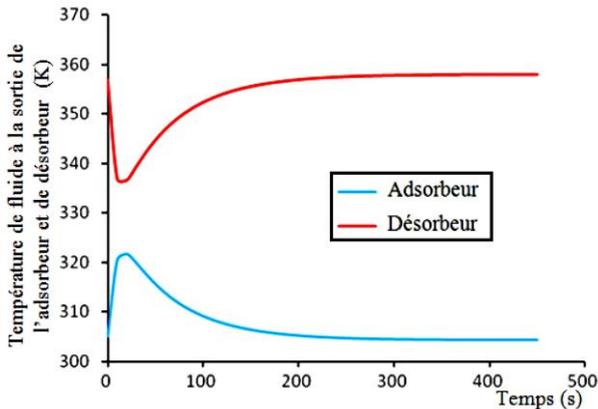


Fig. 5: Effet de la température de régénération sur la teneur en eau

La figure 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, ce qui augmente rapidement la température, 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 très rapidement pendant les 20 premières secondes, puis elle diminue, et enfin elle est maintenue constante, lorsque le gel de silice est saturé en eau.

La figure 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 durant les 20 premières secondes et cela est dû à la variation de la température et de la pression entre le réfrigérant, sous forme de vapeur, à la sortie du 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.

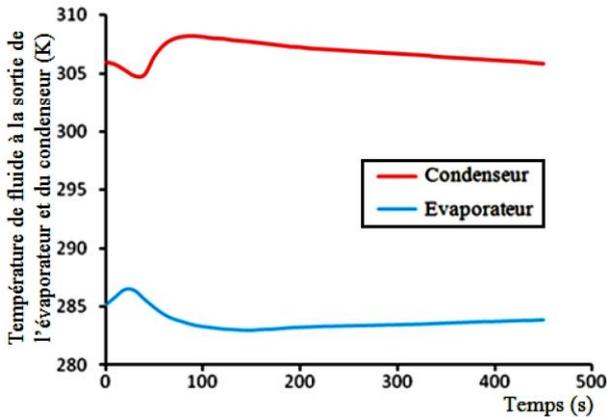


Fig. 6: Température de fluide à la sortie de l'évaporateur et du condenseur

5. CONCLUSION

Ce travail présente la conception d'un système de réfrigération solaire par adsorption qui utilise 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 pour le condenseur et l'évaporateur pour prévoir le comportement du système et d'optimiser ses performances.

On peut conclure que la diminution de la grosseur du 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.

REFERENCES

- [1] Clito F.A. Afonso, 'Recent Advances in Building Air Conditioning Systems', Applied Thermal Engineering, Vol. 26, N°16, pp. 1961 – 1971, 2006.

- [2] Bidyut Baran Saha, Anutosh Chakraborty, Shigeru Koyama and Yu I. Aristov, 'A New Generation Cooling Device Employing CaCl_2 -In-Silica Gel-Water System' International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, N°1-2, pp. 516 – 524, 2009.
- [3] K.C. Leong and Y. Liu, 'System Performance of a Combined Heat and Mass Recovery Adsorption Cooling Cycle: A Parametric Study', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, N°15-16, pp. 2703 – 2711, 2006.
- [4] Y. Hamamoto, K.C.A. Alam, B.B. Saha, S. Koyama, A. Akisawa and T. Kashiwagi, 'Study on Adsorption Refrigeration Cycle Utilizing Activated Carbon Fibers. Part 2. Cycle Performance Evaluation', International Journal of Refrigeration, Vol. 29, N°2, pp. 315 – 327, 2006.
- [5] K.C.A. Alam, A. Akahira, Y. Hamamoto, A. Akisawa and T. Kashiwagi, 'A four-Bed Mass Recovery Adsorption Refrigeration Cycle Driven by Low Temperature Waste/Renewable Heat Source', Renewable Energy, Vol. 29, N°9, pp. 1461 – 1475, 2004.
- [6] H. Nidal, A. Hamdeh and A. Al-Muhtaseb, 'Optimization of Solar Adsorption Refrigeration System Using Experimental and Statistical Techniques', Energy Conversion and Management, Vol. 51, N°8, pp. 1610 – 1615, 2010.
- [7] Ruud J.H. Grisel, S.F. Smeding and R. de Boer, 'Waste Heat Driven Silica Gel/Water Adsorption Cooling in Trigeneration', Applied Thermal Engineering, Vol. 30, N°8-9, pp. 1039 – 1046, 2010.
- [8] A. Chaouki, K. Rabhi, R. Nciri, F. Nasri and H. Ben Bacha, 'New Adsorption Air Conditioning System Powered by Solar Energy; Operation Principles and Winter Mode Modelling and Simulation', International Review of Mechanical Engineering, Vol. 7, N°1, pp. 96 - 104, 2013.
- [9] K. Rabhi, A. Chaouki and H. Ben Bacha, 'Numerical Study Of Combined Heat and Mass Transfer in the Silica Gel-Water Adsorption Chiller', International Review of Mechanical Engineering, Vol. 6, N°6 pp. 1157 – 1163, 2012.
- [10] Z. Tamainot-Telto, S.J. Metcalf, R.E. Critoph and R. Thorpe, 'Carbon-Ammonia Pairs for Adsorption Refrigeration Applications: Ice Making, Air Conditioning and Heat Pumping', International Journal of Refrigeration, Vol. 32, N°6, pp. 1212 - 1229. 2009.
- [11] L.M. Sun, N. Ben Amar and F. Meunier, 'Numerical Study on Coupled Heat and Mass Transfers in an Absorber with External Fluid Heating', Heat Recovery Systems and CHP, Vol. 15, N°1, pp. 19 - 29, 1995.