



Etude des transferts de chaleur et de masse dans un capteur solaire à adsorption

Auteurs : Amal Bel Haj Jrad¹⁾, Abdelaziz Zagnani²⁾, Abdallah Mhimid¹⁾

¹⁾Laboratoire d'Etudes des Systèmes Thermiques et Energétiques (LESTE/LR99ES31), Université de Monastir, ENIM, Avenue Ibn Eljazzar, 5019 Monastir, Tunisie

²⁾ Institut Supérieure des Sciences et Technologie de l'Energie, Université de Gafsa, Tunisie
amalbhm2@yahoo.fr, aziz.zagnani@gmail.com, abdmhimid@yahoo.fr

Résumé :

Durant ce travail nous nous sommes intéressés à la production de froid solaire par adsorption. Le présent travail consiste à une étude numérique des transferts de chaleur et de masse dans un capteur solaire plan en utilisant les différents couples zéolithe/eau, charbon actif/méthanol et charbon actif/CO₂ durant les phases d'adsorption et de désorption. Un code de calcul en Fortran a été réalisé nous permettant de déterminer l'évolution spatio-temporelle des différentes variables (température et teneur en fluide frigorigène) et les coefficients de performance solaire etc... On s'intéresse dans ce travail à la comparaison de la désorption du couple zéolithe/eau et du couple charbon actif/méthanol au couple charbon actif/CO₂. Les résultats numériques obtenus sont présentés et analysés.

Mots clés :

Transferts de chaleur et de masse, capteur solaire plan, zéolithe/eau, charbon actif/méthanol, charbon actif/CO₂, Coefficient de performance solaire COPs.

1. Introduction

Les problèmes résultants de l'émission de gaz à effet de serre présentent l'un des plus importants défis mondiaux d'aujourd'hui. Il est clair que la réfrigération solaire peut être une solution efficace. Plusieurs études ont été faites pour étudier les transferts couplés de chaleur et de masse au sein d'une machine frigorifique à adsorption. Un code numérique a été développé par W. Chekirou et al. [1] pour optimiser les performances des transferts de chaleur et de masse dans un adsorbent tubulaire d'une machine frigorifique solaire à adsorption. Ils ont constaté que les performances thermodynamique et solaire maximales du système sont respectivement 42.4% et 14.3%, pour un rayon intérieur d'adsorbent de 54.55 mm et une surface du capteur solaire de 1 m². H.Z. Hassan et al. [2] ont montré numériquement que la pression d'adsorption et les procédures de désorption sont approximativement constants pour une très faible variation de la conductivité thermique effective du réacteur (comprise entre 0,5 et 0,528 W m⁻¹ K⁻¹), et ils ont trouvé que le meilleur coefficient de performance solaire est égale à 0,2. Récemment un prototype d'une machine frigorifique à adsorption avec des échelles semi pilotes a été élaboré, réalisé et testé [3] fonctionnant avec le couple charbon actif/méthanol. Ce dispositif réalisé possède un coefficient de performance thermodynamique de 49% et un coefficient de performance solaire de 8.1%. Wu Fan and al.[4] ont étudié théoriquement et expérimentalement le cycle frigorifique à adsorption pour le CO₂ avec plusieurs types de charbon actif. Les résultats ont montré que pour avoir une meilleure performance de la machine, il est nécessaire d'avoir un diamètre des pores compris entre 7 et 15 Å. V Kumar Singh et al.[5] ont mesuré et modélisé les isothermes d'adsorption de CO₂ sur le charbon actif pour étudier le processus d'adsorption et pour évaluer les propriétés thermodynamiques. Durant notre travail on s'intéresse à étudier numériquement les transferts de chaleur et de masse dans un capteur plan contenant un adsorbant solide (zéolithe ou charbon actif) destiné à la production de froid par adsorption. Nous avons développé un code de calcul numérique par la méthode des volumes finis, ce code de calcul nous permet de tracer l'évolution spatio-temporelle de la température moyenne et de teneur en fluide moyenne et de déterminer le coefficient de performance solaire.

Dans ce papier on présente l'étude numérique des transferts bidimensionnels de chaleur et de masse pour simuler les processus de désorption et d'adsorption d'un capteur solaire plan en utilisant les trois couples zéolithe/eau, charbon actif/méthanol et charbon actif/CO₂ et de comparer les résultats obtenus.

2. Formulation mathématique

2.1. Position du problème

Durant notre étude numérique, le capteur plan possède une surface unitaire ($S= 1 \text{ m}^2$) de longueur 1m ($L = 1 \text{ m}$) et de largeur 1m ($l = 1 \text{ m}$) avec une épaisseur de 4cm ($H = 4 \text{ cm}$), remplie de grains de zéolithe ou de charbon actif (voir figure 1).

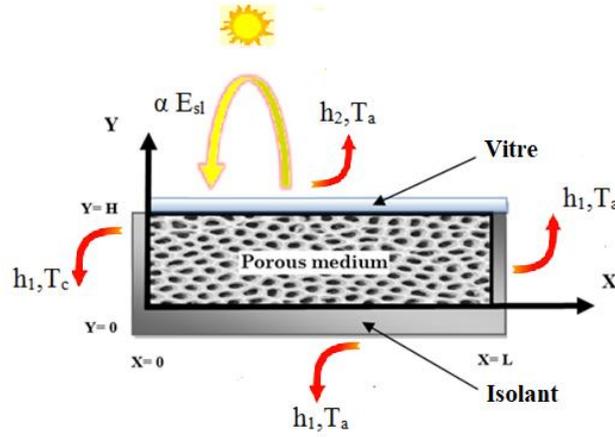


Figure 1 : Schématisation d'un capteur solaire plan.

2.2. Equations de conservation

Les équations de conservation d'énergie et de masse sont [6] :

a) Equations macroscopiques de conservation de la masse:

Pour le solide :

$$\rho_s = cte \quad (1)$$

Pour le liquide :

$$\frac{\partial(\varepsilon_L \rho_L)}{\partial t} = -\dot{m} \quad (2)$$

Pour le gaz :

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \text{div}(\rho_g \vec{V}_g) = \dot{m} \quad (3)$$

b) Equation de conservation de l'énergie (lorsque l'équilibre thermique locale est valable) :

$$\begin{aligned} & \left[(1 - \varepsilon_b)(1 - \varepsilon_m)\rho_s (Cp_s + X Cp_L) + \rho_g Cp_g \varepsilon_b \right] \frac{\partial T}{\partial t} + Cp_g \rho_g \vec{V}_g \cdot \text{grad} T = \\ & \left[(1 - \varepsilon_b)(1 - \varepsilon_m)\lambda_{se} + (1 - \varepsilon_b)\varepsilon_m \lambda_{Le} + \varepsilon_b \lambda_{ge} \right] \text{div}(\text{grad} T) + \dot{m} \Delta H_{vap} \end{aligned} \quad (4)$$

Le taux massique du fluide désorbée ou adsorbée est exprimé comme suit :

$$\dot{m} = (1 - \varepsilon_b)(1 - \varepsilon_m)\rho_s \frac{\partial X}{\partial t} \quad (5)$$

où X est la teneur en liquide déterminée par l'équation de **Dubinin** :

$$X = X_0 \exp \left\{ -D \left[T \text{Log} \left(\frac{P_s(T)}{P_s(T_c)} \right) \right]^2 \right\} \quad (6)$$

Si on prend l'expression suivante [7] :

$$\text{Log}[P_s(T)] = A - \frac{B}{T} \quad (7)$$

L'équation de la teneur en liquide massique X devient :

$$X = X_0 \exp \left[-DB^2 \left(\frac{T}{T_c} - 1 \right)^2 \right] \quad (8)$$

3.2. Conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales et aux limites sont présentés sur la figure 1.

-Initialement, la température et la teneur en liquide sont supposées constants.

$$T(x, y, 0) = T_i \quad \text{et} \quad X(x, y, 0) = X_i$$

- À l'entrée ($x = 0$), le capteur est relié au condenseur lors de désorption. La modélisation des transferts thermiques est mal connue. En supposant que le transfert est convectif, la condition au limite peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y}(0, y, t) = h_1(T - T_c) \quad (9)$$

- Les surfaces ($y = 0$) et ($x = L$) sont isolés thermiquement. En tenant compte d'une conductance globale très faible on écrit par conséquent :

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x}(x, 0, t) = h_1(T_a - T) \quad (10)$$

$$-\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial y}(L, y, t) = h_1(T_a - T) \quad (11)$$

- La surface supérieure du capteur ($y=H$) est exposé au soleil donc la surface est chauffée par une énergie solaire dont une partie est perdue à l'environnement. En introduisant une conductance globale h_2 , on écrit par conséquent :

$$\lambda_{eff} \frac{\partial T}{\partial x}(x, H, t) = \alpha E_{sl} - h_2(T - T_a) \quad (12)$$

3. Coefficient de performance solaire

Le coefficient de performance solaire d'une machine frigorifique à adsorption noté COPs est défini par le rapport entre la quantité de froid produite et la quantité d'énergie solaire incidente qui est obtenue par intégration de la puissance instantanée défini par :

$$E_{sl} = \frac{2I_{max} \Delta t}{\pi} \quad (13)$$

Le coefficient de performance solaire prend la forme

$$\text{COPs} = \frac{Q_e}{E_{sl}} = \frac{(1 - \varepsilon_m)(1 - \varepsilon_b) \rho_s SH \Delta X [L_v - C_p(T_c - T_e)]}{\frac{2I_{max} \Delta t}{\pi}} \quad (14)$$

4. Résultats et discussion

Le code numérique en Fortran a été déjà validé par A. Zegnani et al.[8]. La simulation numérique nous permet de tracer l'évolution temporelle de la température du capteur ainsi que la teneur moyenne en fonction du temps représentées respectivement sur les figures 2 et 6 pour le couple zéolithe /eau, sur les figures 3 et 7 pour le couple charbon actif /méthanol et sur les figures 4 et 8 pour le couple charbon actif/CO₂ . La figure 6 montre que la teneur en fluide moyenne reste constante pendant une période de temps qui correspond à la période de chauffage. La même remarque est observée pour la teneur en méthanol moyenne et la teneur en CO₂ moyenne comme représenté sur la figure 7et 8, respectivement.

Ensuite, ces courbes commencent à diminuer. Cet instant correspond au début de la phase de désorption où les molécules adsorbées sur la surface de l'adsorbant s'en détachent, sous l'action de l'élévation de la température, d'où la diminution de la concentration des molécules de gaz à la surface. Ce qui affirme que la teneur moyenne est fortement liée à la température, elle diminue avec l'augmentation de cette dernière comme le montrent les figures 5 et 9.

Les courbes obtenues montrent que la teneur moyenne (de l'eau, de méthanol ou de CO₂) diminue progressivement jusqu'à une valeur constante qui correspond à la teneur en fluide d'équilibre. On retient pour le couple zéolithe /eau, l'instant $t = 37962$ s qui correspond à la fin de désorption pour une teneur en eau $X_f = 0,224$ kg/kg.

Pour le couple charbon actif/méthanol, on retient l'instant $t = 33898$ s une teneur $X_f = 0,205$ kg/kg.

Et pour le couple charbon actif/ CO₂, on retient l'instant $t = 37962$ s une teneur $X_f = 0,357$ kg/kg. À ce moment, le refroidissement de l'adsorbant commence et continue jusqu'à ce qu'il atteigne sa température minimale, où l'adsorbant est saturé en adsorbât. Après les courbes commencent à augmenter, ce qui correspond au début de la phase d'adsorption.

Ces résultats nous permettent de remarquer que la teneur en méthanol moyenne décroît plus rapidement que celle en eau et en CO₂. En effet, le charbon-actif désorbe plus rapidement que les zéolithes et le méthanol possède une cinétique d'adsorption plus grande que l'eau et le CO₂ .

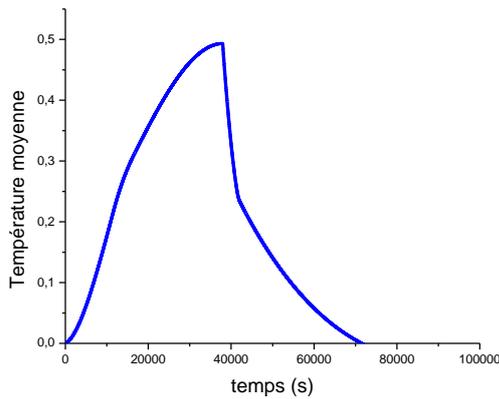


Figure 2 : Evolution temporelle de la température moyenne pour le couple zéolithe/eau

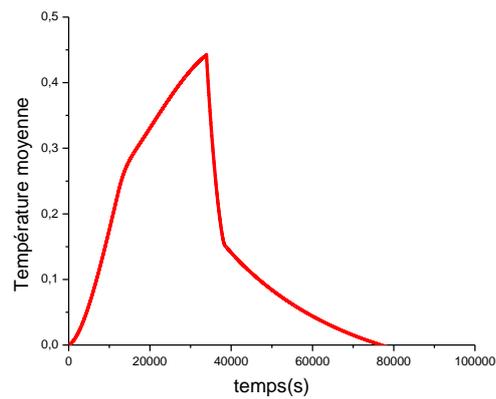


Figure 3 : Evolution temporelle de la température moyenne pour le couple charbon actif/méthanol

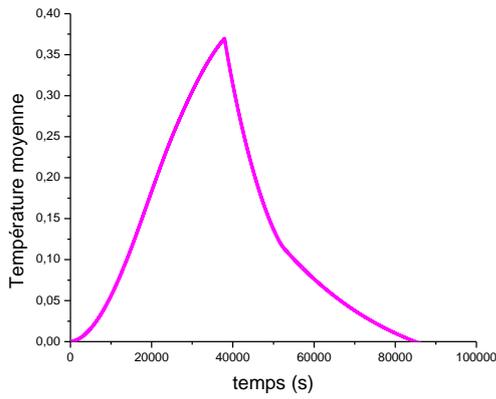


Figure 4 : Evolution temporelle de la température moyenne pour le couple charbon actif/ CO_2 .

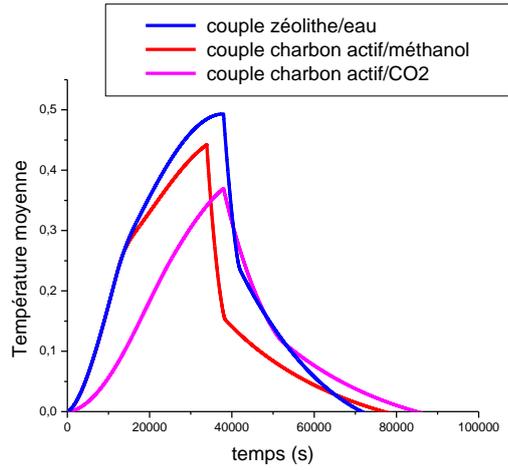


Figure 5 : Evolution temporelle des températures moyennes pour les trois couples étudiés.

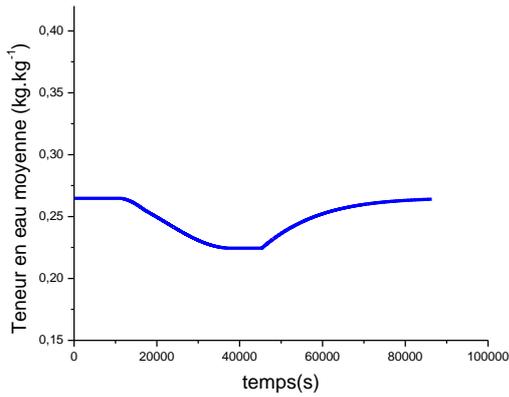


Figure 6 : Evolution temporelle de teneur en eau moyenne.

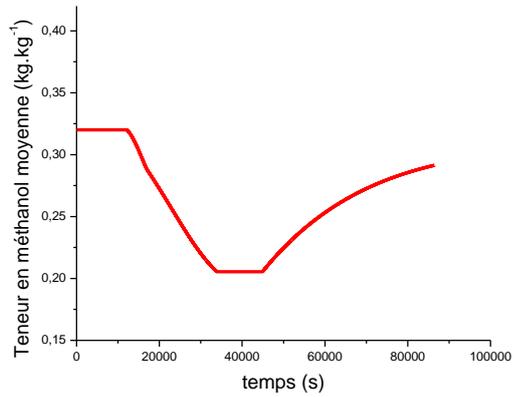


Figure 7 : Evolution temporelle de teneur en méthanol moyenne.

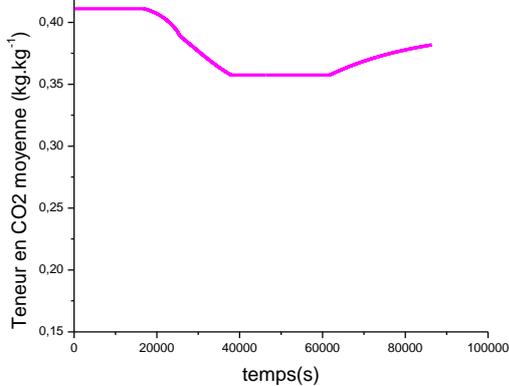


Figure 8 : Evolution temporelle de teneur en CO_2 moyenne.

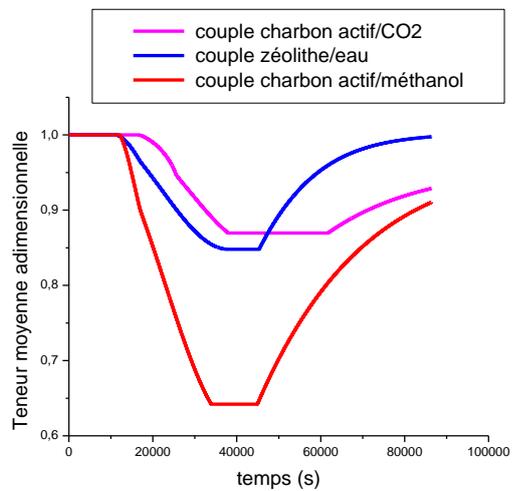


Figure 9 : Evolution temporelle de teneur en fluide moyenne adimensionnel.

6. Détermination du coefficient de performance solaire

Nous avons dressé dans le tableau 1, les différentes valeurs du COPs pour les trois couples Zéolithe/eau, Charbon actif/méthanol et Charbon actif/CO₂.

Il ressort de cette étude qu'une désorption plus rapide du charbon actif que la zéolithe et une cinétique d'adsorption plus élevée entraîne un coefficient de performance solaire COPs du couple charbon actif/méthanol est supérieur que celui des couples zéolithe/eau et charbon actif/CO₂.

Tableau 1 : Variation du COPs du couple zéolithe/eau, charbon actif/méthanol et charbon actif/CO₂

	$X_i - X_f$ (kg)	Esl (kJ)	Q _e (kJ)	COPs
Zéolithe/eau	0,041	30939.720	2356.917	0,076
Charbon actif/méthanol	0,0536	30939.720	3094.066	0,1
Charbon actif/CO ₂	0,115	30939.720	643.995	0,021

Conclusion

Un code de calcul en Fortran a été développé pour simuler les transferts de chaleur et de masse dans un capteur solaire plan à adsorption. L'étude numérique bidimensionnelle des transferts de chaleur et de masse a permis de prévoir les évolutions de la température et la teneur en fluide lors de la désorption et de l'adsorption. il ressort de cette étude:

- la teneur en fluide est fortement liée à la température, elle diminue avec l'augmentation de la température
- le charbon-actif désorbe plus rapidement que la zéolithe et le méthanol possède une cinétique d'adsorption plus grande que les autres fluides frigorigènes étudiés.
- le couple charbon actif/méthanol possède un coefficient de performance solaire maximale de 10%.

Nomenclature

Cp	chaleur spécifique, $J/kg.K$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
E	énergie, kJ	ε	porosité
H	hauteur du capteur, m		
h1 et h2	coefficient d'échange convectif, $W/m^2.K$	Exposant, Indices	
I	intensité, W/m^2	a	ambiante
E	énergie, kJ	b	lit
Q	chaleur, kJ	Chauff	chauffage
Lv	chaleur latente de changement de phase, kJ/kg	c	condenseur
L	longueur du capteur, m	e	évaporateur
l	largeur du capteur, m	eff	effective
m	débit massique, kg/s	f	finale
T	température, K	g	gaz
t	temps, s	l	liquide
X	teneur en fluide, $kg d'adsorbât/kg d'adsorbant$	m	micropore
		max	maximale
		vap	vapeur
Symboles grecs		s	solide
ΔH	enthalpie massique, $J.K$	sl	solaire
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	x, y	coordonnées spatiales

Références

- [1] W. Chekirou, A. Chikouche, N. Boukheit, A. Karaali, S. Phalippou. Dynamic modelling and simulation of the tubular adsorber of a solid adsorption machine powered by solar energy, *International Journal of Refrigeration*, Pages 1 – 15, 2013.
- [2] H.Z. Hassan, A.A. Mohamad, R. Bennacer, Simulation of an adsorption solar cooling system, *Energy*, Volume 36, Pages 530 – 537, 2011.

- [3] M. Berdja, B. Abbad, F. Yah, F. Bouzefour, M. Ouali, Design and realization of a solar adsorption refrigeration machine powered by solar energy, *Energy Procedia*, Volume 48, Pages 1226 – 1235, 2014.
- [4] Wu Fan, Anutosh Chakraborty, Sibnath Kayal, Adsorption cooling cycles: Insights into carbon dioxide adsorption on activated carbons, *Energy*, Volume 102, Pages 491-501, 2016.
- [5] Vinod Kumar Singh, E. Anil Kumar, Measurement and analysis of adsorption isotherms of CO₂ on activated carbon, *Applied Thermal Engineering*, Volume 97, Pages 77-86, 2016.
- [6] A. Zegnani, A. Mhimid, K. Slimi, Study of heat and mass transfer during desorption in a plane adsorber : Anisotropy effects, *Journal of Porous Media*, Volume 12, Pages 169-182, 2009.
- [7] A Khodr, Contribution expérimentale à l'étude de la cinétique d'adsorption de gaz, Thèse de doctorat ENSAM France, 1989.
- [8] A. Zegnani, A. Mhimid, H. Dhahri, K. Slimi, New modeling approach for heat and mass transfers during sorption phenomena in a plane adsorber, *Journal of Porous Media*, Volume 13, Pages 1087-1100, 2010.