



Étude théorique d'un transformateur de chaleur à adsorption zeolite-eau alimenté par un capteur solaire

Djallel Zebbar ^{*1}, Asmaa Guelib¹, Nadia Kaddouri¹, Sahraoui Kherris¹, Souhila Zebbar¹, Kouider Mostefa¹

¹ Centre universitaire El-Wancharissi de Tissemsilt
Benhamouda BP180, Tissemsilt, Algérie

* djallel.zebbar@gmail.com

Résumé — Le présent travail est consacré à l'analyse thermodynamique d'un cycle de transformateur de chaleur à adsorption solide-gaz alimenté par un panneau solaire plan. Le couple de travail choisi est le zéolite 13X-eau. Dans une première phase le fonctionnement cycle est exposé. Suivi par l'établissement du bilan d'énergie et la déduction des coefficients de performance et du rendement selon la deuxième loi du cycle. Ce cycle s'est avéré très prometteur en termes d'efficacité énergétique et affiche un COP égal à 0,11 avec une température de mise en valeur pouvant atteindre les 125°C.

Mots clés — transformateur de chaleur, température, cycle, adsorption, zéolite

I. INTRODUCTION

La revalorisation des différentes sources d'énergie de bas potentiel reste un moyen coûteux et non attractif pour les énergéticiens du moins pour le moment. Cette situation risque de s'empirer de plus en plus avec la chute du prix du baril de pétrole. Néanmoins, la mise en œuvre de nouveaux cycles pour la revalorisation de la chaleur reste d'actualité. Dans ce contexte, les nouveaux cycles hypothétiques élaborés doivent être analysés et discutés. Tout d'abord, pourquoi le cycle est "hypothétique"? Hypothétique est lié au fait que le cycle proposé n'est pas encore expérimenté et relève toujours de la phase des études théoriques. Cette dernière est très importante du moment où elle permet de mettre en évidence tout l'aspect théorique du nouveau cycle du moins l'aspect thermodynamique et d'une façon globale le fonctionnement du cycle théorique.

La mise en valeur des flux de chaleur secondaire dans le domaine de l'industrie agroalimentaire, textile, de l'industrie du papier et d'autres industries chimiques est très en avance. Les températures des flux de chaleur disponibles dans les domaines suscités varient de 100 à 300°C. Les technologies mises en œuvre pour la mise en valeur de ces flux sont celles des transformateurs de chaleur à sorption. Un nombre important de travaux de recherche a été consacré au transformateur de chaleur et au stockage par sorption parmi les plus récents on ne peut pas citer les travaux de Cabeza et al. [1] Brucner et al. [2], Frazzica et al. [3 et 4], Glaznev et al. [5],

Schaefer et al. [6], Yan et al. [7], Ramji et al. [8], Yuriy I. Aristov [9], Zebbar et al. [10, 11 et 12], Kherris et al. [13] et Critoph [14 et 15].

Il y a lieu de préciser que Cabeza et al. [1] ont passé en revue plus de 375 références bibliographiques toutes dédiées aux technologies et matériaux d'adsorption. De même, Frazzica et al. [3] ont présenté un nouveau protocole expérimental pour l'évaluation et la comparaison des performances thermodynamiques des couples de travail déjà commercialisés ou encore en cours d'étude utilisés dans les pompes à chaleur à adsorption. Plus encore, dans un autre travail Frazzica et al. [4] ont mis en évidence les critères de sélection des couples de travail convenables pour les applications domestiques de stockage de chaleur compte tenu de la température de désorption située dans la plage de 80-120°C. Aristov et al. [9] ont exposé les principes de création de base de données d'adsorbants pouvant être utilisés dans la thermo transformation. Enfin, l'aspect théorique de l'adsorption, des cycles d'adsorption pour la réfrigération comme pour le chauffage et le choix des couples de travail sont très bien exposés par Critoph R.E. dans la référence [14].

Dans les applications solaires de transformation de chaleur zéolite-eau, la mise en contact de la vapeur d'eau chauffée à partir d'une source de bas et moyen potentiels (collecteur) génère une chaleur dite d'adsorption qui fait croître la température du lit de zéolite jusqu'à une température plus élevée appelée température d'adsorption T_a . La chaleur d'adsorption récupérée du lit peut être utilisée dans des applications nécessitant un plus haut potentiel.

II. DESCRIPTION DU CYCLE THERMODYNAMIQUE DU THERMO TRANSFORMATEUR A ADSORPTION SOLIDE-GAZ

Le cycle étudié est représenté sur le diagramme ($\ln P$, $-1/T$) de la fig.1. Au point 4 le lit de l'absorbant (zéolite) est mis en communication avec le condenseur. Ce dernier est maintenu à la pression $P_L=P_C$ et à la température T_C égale à la température T_0 étant refroidi par un flux d'eau de refroidissement. Du moment où la pression de la vapeur absorbée par le lit est supérieure à la pression $P_L=P_C$ régnant dans le condenseur, la



désorption de la vapeur d'eau du lit prend lieu tout au long de la ligne 4-1 ramenant la température du lit à $T_1=T_C$.

Au cours de cette phase la désorption est alimentée par la chaleur latente du lit. Il est évident que la mise en communication du lit avec le condenseur a pour conséquence la diminution de la concentration de la vapeur dans le lit de X_4 à $X_1 + \Delta X$.

Ainsi, la phase de désorption commence en 4 et se poursuit durant la phase 1-2, où la pression de vapeur dans le lit soit égale à la pression de condensation $P_C=PL$. Le chauffage du lit durant cette phase continu moyennant la source de moyen potentiel à la pression constante $P_L=P_C$ la désorption continue jusqu'au point 2. La vapeur désorbée est condensée dans le condenseur. Le condensat est envoyé par une pompe du réservoir intermédiaire vers l'évaporateur. La désorption est suivie par la phase d'adsorption à partir du point 2.

Dans ce cas le lit de zéolite est communiqué avec l'évaporateur maintenu à la température T_m moyennant un flux de chaleur de moyen potentiel.

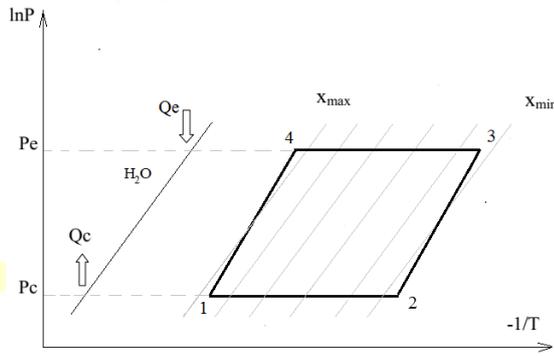


Fig. 1 Représentation du cycle thermodynamique du transformateur de chaleur à adsorption

Au point 2 la pression de vapeur de l'eau dans le lit est inférieure à la pression d'évaporation $P_H = P_e$ (qui correspond à la température $T_e=T_m$ de l'évaporateur) l'adsorption de la vapeur d'eau prend lieu dans le lit suivant la ligne 2-3 ce qui induit une augmentation de la température jusqu'à $T_3=T_a$. Au même terme, la concentration de l'eau dans le lit de zéolite se voit croître quelque peu de X_2 à $X_3-\Delta X$. À partir du point 3 le lit est maintenu à la température T_a par reconduction de chaleur. L'adsorption isotherme de la vapeur émanant de l'évaporateur continue jusqu'au point 4. D'avantage de vapeur d'eau est adsorbée à pression constante $P_H=P_e$ tout en reconduisant du lit de zéolite la chaleur d'adsorption. La phase d'adsorption se termine au point 4. La concentration de l'adsorbat augmente de $X_3 = X_{min}$ jusqu'à $X_4= X_{max}$. Arrivé au point 4 le cycle recommence à nouveau.

III. ÉVALUATION DES PERFORMANCES DU CYCLE

Le coefficient de performance du cycle est calculé comme étant le rapport entre la chaleur utile et la chaleur dépensée, soit :

$$COP = \frac{|q_{3-4}|}{q_{1-2} + q_{ev} + w_p} \quad (1)$$

Où :

q_{1-2} est la chaleur de désorption isobare calculées conformément à Critoph [15] par les expressions suivantes, en, kJ/(kg zéolite) :

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} (c_z + x \cdot c_w) dT + \int_{X_1}^{X_2} q_{st} dx \quad (2)$$

C_z est la capacité thermique du lit de zéolite en kJ/(kg K) ;

C_w est la capacité thermique de la vapeur d'eau en kJ/(kg K), calculée à partir de l'expression suivante rapporté dans [16] :

$$C_w = (a + b T + c T^2 + d T^3) / M_{H_2O} \quad (4)$$

avec :

$a=32,24$; $b=0,1923 \cdot 10^{-2}$; $c=1,055 \cdot 10^{-5}$; $d = -3,595 \cdot 10^{-9}$ et la masse molaire de l'eau $M_{H_2O} = 18$ kg/kmole ;

X_1 et X_2 sont les teneurs en eau adoptées égales à $X_1=X_4=0,26$ et $X_2=X_3=0,23$ et $\Delta X \approx 0$;

q_e est la chaleur dispensée dans l'évaporateur. Elle est égale à l'enthalpie d'évaporation de l'eau h_{fg} à la pression P_e en kJ / (kg H_2O), bien évidemment rapportée à la quantité de zéolite dans le cycle ($X_2 - X_1$) kg H_2O /(kg zéolite), soit :

$$q_{ev} = h_{fg}(X_2 - X_1) \quad (5)$$

Le travail de la pompe pour la pressurisation de la machine est calculé en kJ/(kg H_2O) à partir de l'expression suivante:

$$w_p = v_f (P_e - P_c) \quad (6)$$

Cette dernière doit être rapportée au kg de zéolite soit :

$$w_p = v_f (P_e - P_c) (X_2 - X_1), \text{ kJ/(kg zéolite)} \quad (7)$$

$$w_p = v_f (P_e - P_c) (X_2 - X_1)$$

Les positions des points 1 et 3 du cycle, d'ailleurs comme celles des points 2 et 3 sur le diagramme ($\ln P, -1/T$) sont fonction des capacités calorifiques du lit et de la vapeur.

En plus du COP, une analyse relativement poussée de la machine est subordonnée au calcul du coefficient de performance réversible et du rendement selon la deuxième loi η_{II} .

$$COP_{rév} = \frac{T_3 \times (T_c - T_e)}{T_e \times (T_c - T_3)} \quad (8)$$

$$\eta_{II} = \frac{COP}{COP_{rév}} \quad (9)$$

La chaleur isostérique dans l'expression (2) peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$q_{st} = \left[\frac{\ln P_e - \ln P_c}{-\frac{1}{T_e} + \frac{1}{T_c}} \right]_X R \quad (10)$$

Les valeurs des pressions et des températures dans (10) peuvent être relevées directement sur le diagramme de Clapeyron pour le couple zéolithe 13X-eau rapportée dans [18].



TABLEAU I- RÉSULTATS DU CALCUL

T _c °C	T ₁ °C	T ₂ °C	T ₃ °C	P _c kPa	P _e kPa	T _e °C	q _{ev} kJ/kg	q ₁₋₂ kJ/kg	q ₃₋₄ kJ/kg	W _p (*10 ⁻⁴) kJ	COP %	COP _{rev} %	X	q _{st} kJ/kg	η _{II} %
20	47	75	100	2,34	9	42,5	2397,4	294,5	290,3	2,0	10,8	33,3	0,22	7180	32,4
25	55	80	108	3,17	13	49	2380,2	290,2	294,7	1,8	11,0	34,2	0,23	7718	32,3
30	62	85	115	4,25	17	57,6	2366,4	287,3	297,8	3,9	11,2	38,1	0,24	8302	29,5
35	65	90	120	5,63	22	63	2352,7	290,3	297,9	4,9	11,3	38,5	0,25	8665	29,3
40	69	95	125	7,39	28	66,6	2341,4	293,3	297,8	6,2	11,3	36,7	0,26	9225	30,8

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La chronologie du calcul exige l'adoption dans une première phase de la température T_c. Cette dernière est portée sur le diagramme de Clapeyron (ln P, -1/T) du couple zéolithe 13X-eau. Une fois les projections sur le diagramme effectuées, on dessine le cycle entre les deux concentrations X_{min} et X_{max} et les deux pressions (P_c qui correspond à T_c et P_e). Dans la présente étude, les concentrations choisies correspondent à 0.23 et 0.26. Les températures des points 1, 2 et 3 du cycle sont déterminées à partir du diagramme. L'opération est répétée plusieurs fois. Il en faudra aussi déterminer la chaleur isostérique d'adsorption q_{st}. Cette dernière est déterminée à partir de l'expression (10).

Ainsi pour chaque température de condensation adoptée T_c on en renseigne le Tableau 1.

La variation de la température d'adsorption T₃ en fonction de la température de condensation T_c est représentée sur la Fig.2.

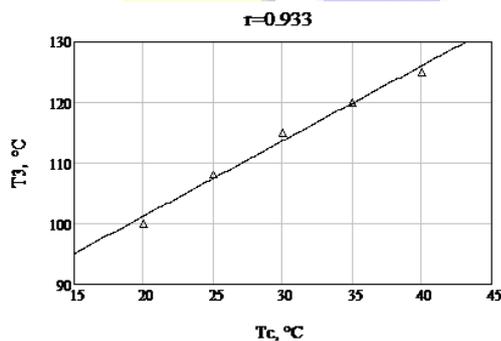


Fig. 2 Variation de la température d'adsorption T₃ en fonction de température de condensation T_c

On en déduit que la température maximale pouvant être atteinte au niveau de l'adsorbeur est égale à T₃=125 °C. Elle correspond à une température au niveau du condenseur égale à 40°C qui également la température du milieu environnement

(m.e.). Cette température est atteinte à condition que la température du panneau solaire ne soit pas inférieure à 95 ° (ou T₂).

Au cas où la température du m.e. ne dépasse pas les 20°C, la température mise en valeur au niveau de l'adsorbeur est égale à 100 °C à condition que la température du panneau solaire ne soit pas inférieure à 75 °C. La variation de COP en fonction de la température de condensation T_c

La variation du COP en fonction de T_c est représentée sur la fig.3. On en constate que le COP croît de 4.8% lorsque la température T_c croît de 293 à 313 soit de 6.8%. Il faut noter que T_c correspond à la température du condenseur très proche de celle du milieu environnement, à partir duquel le transformateur épuise de la chaleur de bas potentiel. Le COP_{rev} croît plus de 10 %, raison pour laquelle le rendement selon la deuxième loi η_{II} chute près de 5%. La température de la source mise en valeur croît dans ce cas de 373 à 398 soit près de 6.7%. Il faut souligner que chaque fois que la température T_c prend une valeur, celle de moyenne potentiel qui est celle du panneau solaire ne soit pas inférieure à un seuil bien déterminé. Ceci dit que chaque fois ou il serait demandé d'atteindre une température bien déterminé d'adsorption, les températures du milieu environnement et du panneau solaire sont décisives.

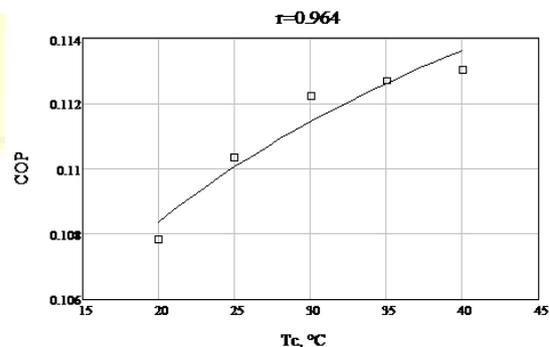




Fig.3 Variation du COP en fonction de T_c

V. CONCLUSIONS

Le cycle étudié est très prometteur en termes d'efficacité énergétique. Il pourra servir de maillon intermédiaire dans une cascade de transformateurs de chaleur [11] pour la revalorisation de chaleur et la production de micro puissance dans les zones rurales et les agglomérations de moins de 200 habitations pour la mise en valeur des puits de chaleur y compris solaires de température allant de 80 à 120 °C.

En perspective, il faudra penser à faire une étude comparative avec d'autres couples.

REFERENCES

- [1] L.F. Cabeza, A. Sole, C. Barreneche, "Review on sorption materials and technologies for heat pumps and thermal energy storage", *Renewable Energy* xxx pp.1-37, 2016.
- [2] S. Brückner, S. Liu, L. Miro, M. Radspieler, L.F. Cabeza, E. Lävemann, "Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies", *Applied Energy*, No 151, pp.157-167, 2015.
- [3] A. Frazzica, A. Sapienza, A. Freni, "Novel experimental methodology for the characterization of thermodynamic performance of advanced working pairs for adsorptive heat transformers", *Applied Thermal Engineering* vol. 72, No 2 pp. 229-236, 2014.
- [4] A. Frazzica, A. Freni, "Adsorbent working pairs for solar thermal energy storage in buildings", *Renewable Energy*, Vol.110, pp.87-94, 2017.
- [5] I.S. Glaznev, D.S. Ovoshchnikov, Y. I. Aristov, "Kinetics of water adsorption/ desorption under isobaric stages of adsorption heat transformers: The effect of isobar shape", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52, No 7-8 pp.1774-1777, 2009.
- [6] M. Schaefer, A. Thess, "One-dimensional model of a closed low-pressure adsorber for thermal energy storage", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 117, pp.571-583, 2018.
- [7] T. Yan , R.Z. Wang, T.X. Li, L.W. Wang, I. T. Fred, "A review of promising candidate reactions for chemical heat storage", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43, pp.13-31, 2015.
- [8] H. R. Ramji, S. L. Leo, I. A. W. Tan, M. O. Abdullah, "Comparative study of three different adsorbent adsorbate working pairs for a waste heat driven adsorption air conditioning system based on simulation", *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences* vol.18, No 2, pp.109-121, 2014.
- [9] Y. I. Aristov, "Adsorptive transformation of heat: Principles of construction of adsorbents database", *Applied Thermal Engineering*, vol.42, pp.18-24, 2012.
- [10] Dj. Zebbar, S. Kherris, K. Mostefa, T. Trari, "Insight into heat upgrading process. Mathematical modeling of an absorption heat transformer", 8th International Seminar On Systems Mathematical And Physical Modeling, Book of Proceeding, Voronezh, T.3, pp.117-124, 2012.
- [11] Dj. Zebbar, S. Kherris, S. Zebbar, "Mathematical simulation of two-stage heat transformer", 11th International Seminar On Systems Mathematical And Physical Modeling, Book of Proceeding, Voronezh, T.1, pp.96-106, 2014.
- [12] Dj. Zebbar, S. Kherris, S.Cheikh, "Étude et analyse d'une installation énergétique renfermant un transformateur de chaleur pour la production de micro puissance". Colloque International « Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures » CMMS14, 12 - 13 novembre, Tizi Ouzou, Recueil des résumés, p. 53, 2014.
- [13] S. Kherris, D. Zebbar, K. Mostefa, "Exergetic analysis of a solar absorption heat transformer", 1^{er} Colloque International sur les Hydrocarbures, Energies et Environnement (HCEE), 23 et 24 Novembre, Ouargla, 2014 .
- [14] R. E. Critoph, "Performance limitations of adsorption cycles for solar cooling", *Solar Energy*, Vol. 41, No. 1, pp. 21-31. 1988.
- [15] R.E. Critoph, *Adsorption Refrigerators and Heat Pumps*" (Chapter 10), in *Carbon Materials for Advanced Technologies*, Pergamon, 1999.
- [16] Y. A.Cengel, M. A. Boles, *Thermodynamics : an Engineering Approach*, 3rd ed. Mc Graw Hill International Edition, N.Y. , 1998.
- [17] G. Restuccia, G. Cacciola, R. Quagliata, "Identification of zeolites for heat transformer, chemical heat pump and cooling systems", *International Journal Of Energy Research*, Vol. 12, pp.101-111, 1988.
- [18] D. Schawe, "Theoretical and Experimental Investigations of an Adsorption Heat Pump with Heat Transfer between two Adsorbents", Ph.D. thesis, Institute of Nuclear Energy and Energy Systems, Stuttgart University, 2001;