

MODELISATION THERMODYNAMIQUE D'UNE MACHINE FRIGORIFIQUE FONCTIONNANT AU MELANGE METHYLAMINE-EAU

S. Mazouz, H. Dardour, A. Bellagi*

*U.R. Thermique et Thermodynamique des Procédés Industriels, Ecole Nationale d'Ingénieurs de
Monastir, Av. Ibn Jazzar, 5060 Monastir, Tunisia*

* a.bellagi@enim.rnu.tn

RESUME

Dans cette étude, un modèle thermodynamique d'une machine frigorifique à diffusion fonctionnant avec le mélange méthylamine-eau a été élaboré afin de déterminer ses performances. Ce modèle est basé sur les lois de conservation de la masse et de l'énergie appliquées au niveau de chaque élément de la machine et est constitué d'un très grand système d'équations non linéaires.

Quelques unes de ces équations sont destinées à la prédiction des propriétés thermodynamique et thermophysiques du mélange ternaire méthylamine-eau-hélium. Dans ce travail, on a montré par une comparaison faite entre les données expérimentales du couple méthylamine-eau et celles fournies par le modèle d'activité de Wilson que ce dernier est le plus approprié pour décrire les propriétés thermodynamiques de ce mélange. Et c'est ce modèle qui a été injecté dans le système d'équations déjà établi.

La résolution numérique effectuée par le logiciel EES (*Equation Engineering Solver*) nous a permis de montrer la faisabilité thermodynamique de cette machine.

NOMENCLATURE

COP	Coefficient de performance		Indices	
H	Enthalpie massique	(kJ/kg)	i	composant i
m	Débit massique	(kg/s)	e	entrant
Pinch	Pincement de température	(K)	s	sortant
Q	Puissance thermique	(kW)	v.c	volume de contrôle
T	La température	(K)		
z	Composition massique			

1. INTRODUCTION

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'exploitation du gisement solaire dans le domaine de production du froid en mettant en oeuvre le cycle frigorifique à diffusion-absorption. Tandis que les machines à diffusion conventionnelles utilisant le couple eau-ammoniac [1-4] fonctionnent avec une température motrice de l'ordre de 180 °C, le mélange méthylamine-eau permet de réduire cette température à 100°C et devient ainsi candidat à un actionnement solaire thermique. La substitution du couple eau-ammoniac par le mélange méthylamine-eau a été traitée par divers auteurs [5-8] dans le cas de machines frigorifiques conventionnelles. Nous étudions dans le présent travail la faisabilité thermodynamique de cette substitution pour les machines à diffusion-absorption.

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La caractéristique essentielle des machines à diffusion est le fait qu'elles fonctionnent avec un seul niveau de pression. Ainsi l'évaporation et la condensation s'effectuent par variation de la pression partielle du réfrigérant. La mise en circulation des fluides est réalisée à l'aide d'une pompe à bulles. La machine étudiée fonctionne selon le cycle de Platen et Munters. Elle emploie le méthylamine comme fluide réfrigérant, l'eau comme absorbant et l'hélium en tant que gaz inerte.

Une vue schématique de cette machine est représentée sur la figure 1. Elle comporte un absorbeur, un condenseur, un évaporateur, un générateur et une pompe thermique.

Pour l'amélioration du rendement du cycle, deux échangeurs de chaleur sont incorporés, le premier permet le préchauffage de la solution riche avant son entrée dans le générateur et le deuxième, le refroidissement des vapeurs de méthylamine s'acheminant du condenseur vers l'évaporateur.

En quittant le réservoir, la solution riche liquide passe à travers l'échangeur de solution avant d'arriver à la pompe à bulles. Grâce à un apport de chaleur des bulles de méthylamine sont formées et entraînent dans leur mouvement ascendant la solution liquide jusqu'à l'extrémité supérieure de l'émulseur. Sous l'effet de la pesanteur, cette solution retombe dans l'espace annulaire entre le tube intérieur et le tube extérieur du générateur pour passer dans le bouilleur où se forme la majorité de la vapeur de méthylamine. La solution liquide pauvre quitte alors le bouilleur en passant par le tube extérieur de l'échangeur de solution. La vapeur monte du générateur vers le condenseur où elle est refroidie par l'air ambiant par convection naturelle. Le condensât ainsi formé traverse un échangeur pour atteindre l'entrée de l'évaporateur où il sera évaporé par un apport de chaleur.

Le gaz auxiliaire, l'hélium, circule en boucle fermée entre l'évaporateur et l'absorbeur. Il transporte par circulation naturelle, causée essentiellement par la grande différence de densité associée à la présence de la vapeur de frigorigène dans la branche ascendante de la boucle, la vapeur de méthylamine de l'évaporateur vers l'absorbeur. En effet, la vaporisation de méthylamine dans l'évaporateur augmente la masse volumique du mélange gazeux. A l'absorbeur, et par suite du phénomène d'absorption, les conditions sont inversées. Comme l'évaporateur est disposé à un niveau supérieur à celui de l'absorbeur, c'est la différence des masses volumiques qui met en circulation l'hélium arrivant.

Dans l'absorbeur la vapeur issue de l'évaporateur y rencontre, s'écoulant à contre courant, la solution pauvre provenant du générateur. Elle s'y dissout en provoquant son enrichissement. La chaleur dégagée par ce processus exothermique est évacuée vers l'ambiance. A la sortie de l'absorbeur on obtient une solution enrichie en frigorigène qui retournera vers le générateur.

3. PROPRIETES THERMODYNAMIQUES DES FLUIDES DE FONCTIONNEMENT

Les propriétés du mélange ternaire eau-méthylamine-hélium sont déterminées en utilisant le modèle d'activité de Wilson pour la phase liquide et l'équation d'état de Soave-Redlich-Kwong pour la phase vapeur.

La figure 2 montre les diagrammes d'Oldham calculés à partir du modèle d'activité de Wilson et ceux à partir des données expérimentales données dans la référence [6]. Une bonne concordance entre les deux diagrammes est notée pour des températures de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $160\text{ }^{\circ}\text{C}$, des pressions de 1 à 10 bars et des teneurs en réfrigérant des solutions liquides entre 0 et 1.

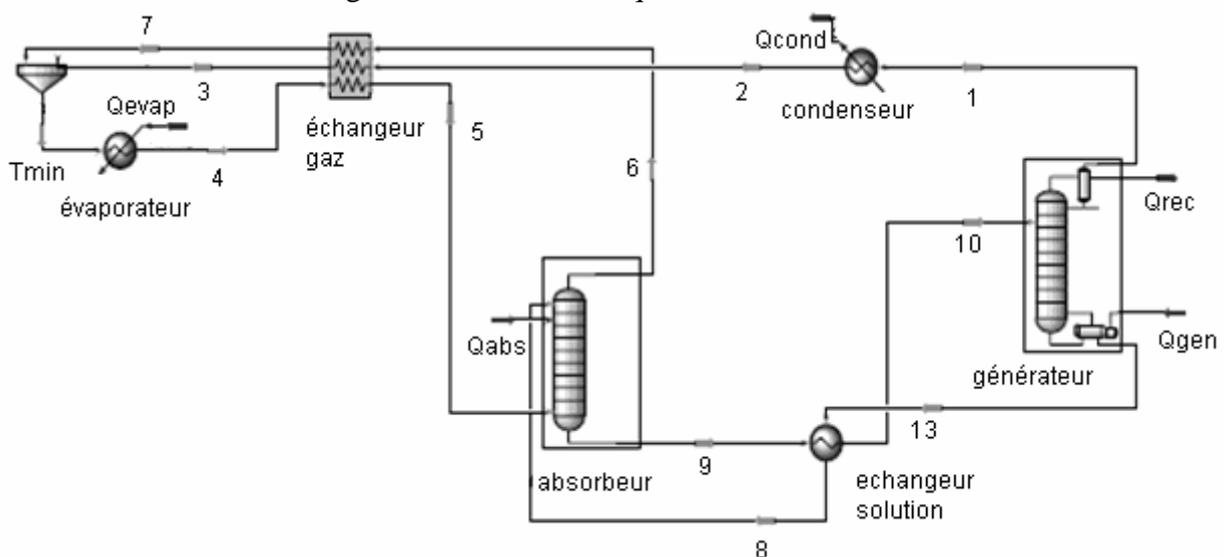


Figure 1. Schéma d'une machine frigorifique à diffusion

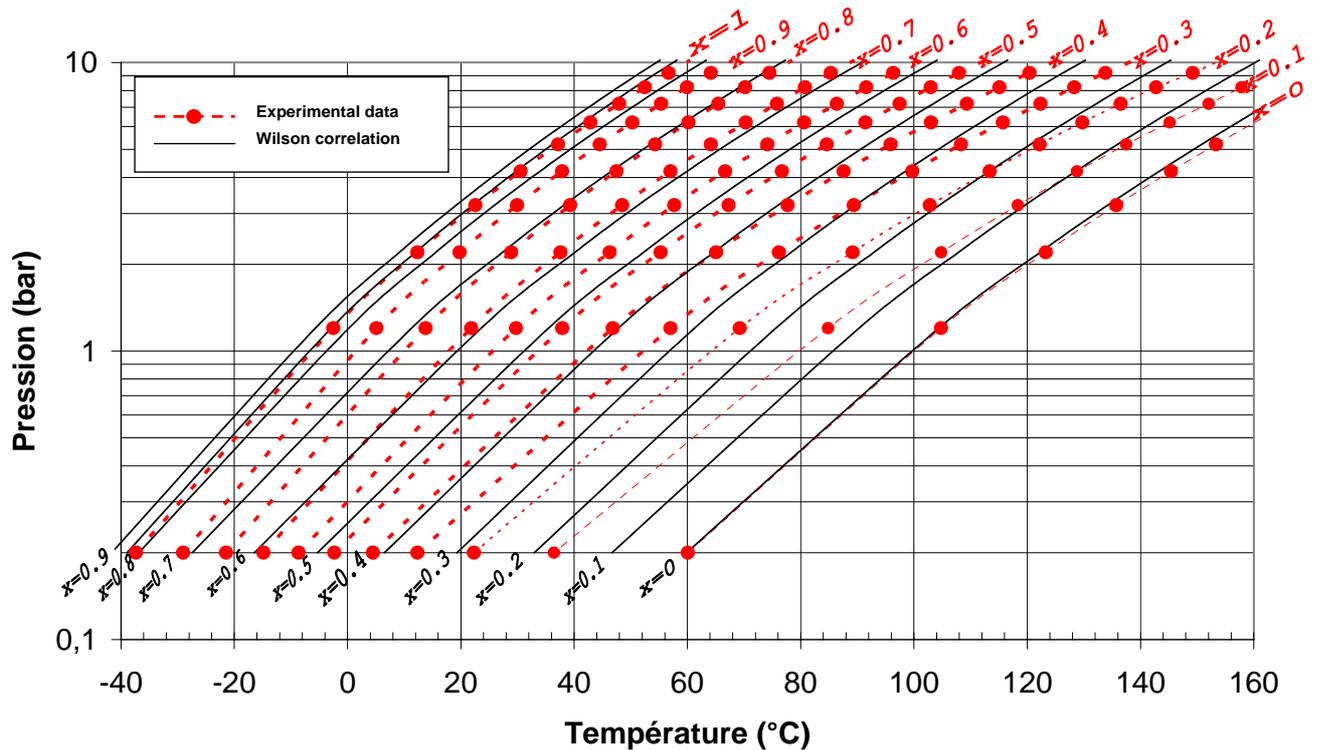


Figure 2. Diagrammes d'Oldham, comparaison des données expérimentales et calculées

4. ANALYSE THERMODYNAMIQUE

4.1 Modèle

Le modèle est basé sur les lois de conservation de la masse et de l'énergie appliquées au niveau de chaque élément de la machine. Les équations principales du modèle sont données ci-dessous :

$$\sum m_s = \sum m_e \quad (1)$$

$$\sum m_s z_{is} = \sum m_e z_{ie} \quad (2)$$

$$Q_{v,c} = \sum m_s H_s - \sum m_e H_e \quad (3)$$

Le coefficient de performance (COP) du cycle est défini comme étant le rapport entre la puissance frigorifique produite et la puissance thermique « motrice » fournie à la machine au niveau du générateur :

$$COP = \frac{Q_{evap}}{Q_{gen}} \quad (4)$$

4.2 Hypothèses

Afin de pouvoir évaluer la performance de la machine, les hypothèses suivantes ont été faites :

- Dans le condenseur le méthylamine condense à environ 35 °C, ce qui correspond à une pression de 6 bars

- Cette pression règne également dans l'évaporateur où l'hélium va réduire la pression partielle du réfrigérant à 1,5 bar causant ainsi son évaporation à environ 5 °C
- la solution pauvre à la sortie du générateur est saturée et à 105 °C
- la puissance de chauffe du générateur est fixée à 180 W
- la vapeur de frigorigène à la sortie du rectifieur est saturée à 75 °C
- le liquide sortant du condenseur est sous refroidi
- L'échangeur de chaleur à gaz et l'échangeur de solution sont isolés
- les pincements pour l'échangeur à gaz et l'échangeur de solution sont placés à :
 - Pinch_{8,9} = 5 K
 - Pinch_{7,4} = 5 K
 - Pinch_{3,4} = 15 K
- les chutes de pression le long des tuyauteries sont négligeables ;

4.3 Résolution numérique

Pour résoudre simultanément le grand nombre d'équations non linéaires du modèle, le logiciel EES (*Equation Engineering Solver*) a été employé.

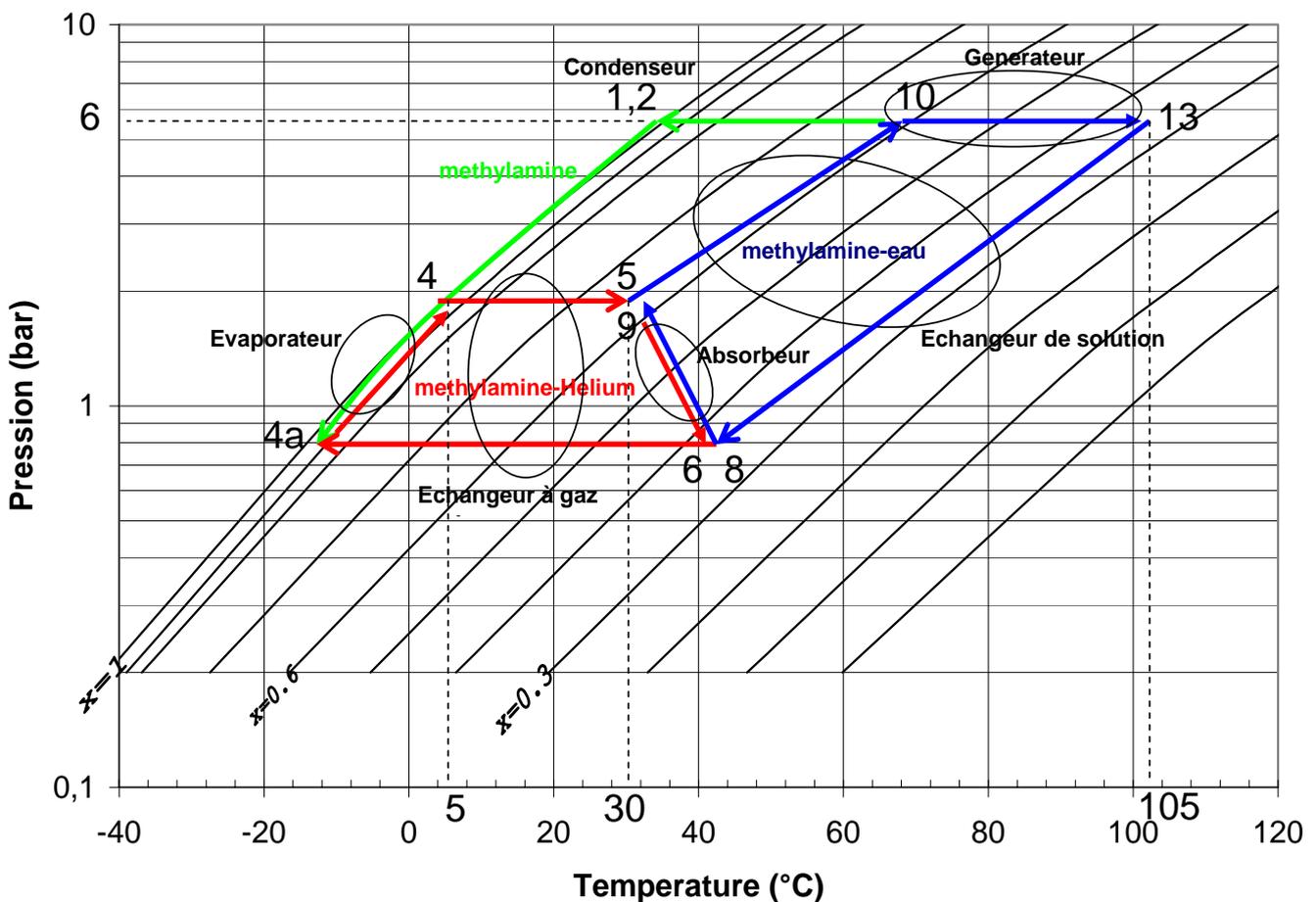


Figure 3. Cycle de la machine à diffusion sur le diagramme d'Oldham

5. RESULTATS ET DISCUSSION

La figure 3 représente le tracé dans le diagramme d'Oldham du cycle de cette machine. La température de condensation est d'environ 35 °C ce qui correspond à une pression totale du système de 6 bars (point 2). La température maximum du générateur est de 105 °C. Le processus (4a-4) correspond à l'évaporation du méthylamine dans l'hélium. La plus basse température est atteinte au point 4a, au fur et à mesure de son évaporation la pression partielle du méthylamine augmente et ainsi sa température qui atteint 5 °C à la sortie de l'évaporateur (point 4). De 4 à 5, le mélange de gaz de méthylamine et d'hélium est réchauffé dans l'échangeur de chaleur à gaz. Dans l'absorbeur la solution pauvre absorbe le réfrigérant contenu dans le mélange gazeux (5-6). L'hélium ainsi purifié (avec un petit reste de méthylamine) est refroidi dans l'échangeur de chaleur à gaz et retourne à l'évaporateur (6-4a).

La solution enrichie en réfrigérant (8-9) est préchauffée par la suite dans l'échangeur de solution (5-10). Dans le générateur, du fait de l'énergie thermique apportée à la solution (10-13), le frigorigène se dégage, se désorbe et est transféré dans le condenseur (10-2). Les points confondus 2,3 représentent les états du méthylamine entrant et sortant du condenseur.

D'après la fig. 4, on remarque que la puissance frigorifique (Q_{evap}) présente une valeur maximum de 50 W et que la température minimale atteint un minimum d'environ -2 °C pour une pression de 6 bars. Ces conditions correspondent à une température de condensation de 35 °C. Une augmentation de la pression et donc une augmentation de la température de condensation diminue graduellement la puissance frigorifique. En fait, pour une température de chauffe fixée (105 °C dans ce cas-ci), plus la pression augmente, moins la vapeur réfrigérante est produite et la solution quittant le générateur demeure riche en méthylamine. Par conséquent, les concentrations des solutions riches et pauvres deviendront très voisines, la température minimum augmente et la capacité frigorifique diminue.

Ceci est également illustré sur la figure 5 où on a représenté la variation du COP en fonction de la pression totale du système. Celui-ci, après avoir atteint un maximum de 0,27 chute considérablement quand la pression augmente.

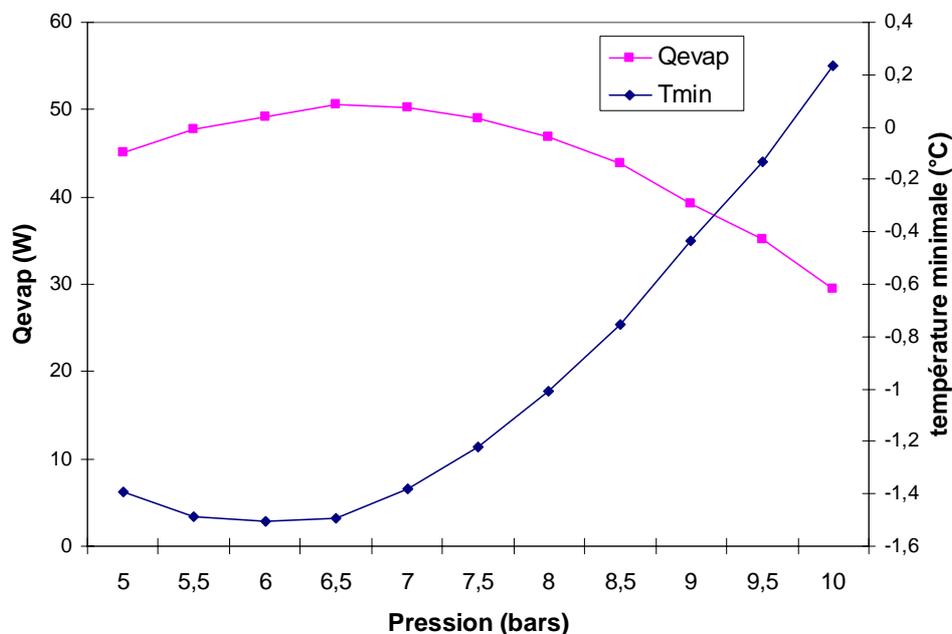


Figure 4. Variation de la puissance frigorifique et de la température minimale en fonction de la pression totale du système

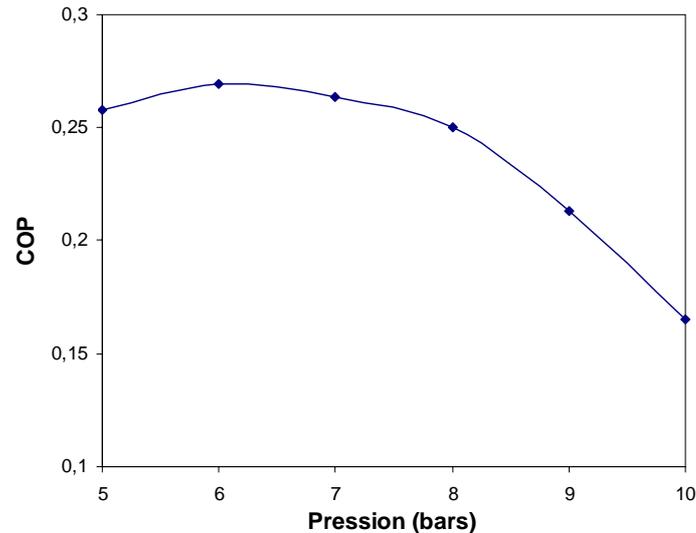


Figure 5. Variation du COP en fonction de la pression

CONCLUSION

Une machine à diffusion fonctionnant avec le ternaire méthylamine-eau-hélium a été simulé. Le modèle d'activité de Wilson s'est avéré être le plus approprié pour décrire les propriétés thermodynamiques de ce mélange. Les résultats de la simulation ont montré la faisabilité thermodynamique de ce cycle. Une température motrice de l'ordre de 100 °C suffit pour faire fonctionner la machine et produire du froid à environ -2 °C avec un coefficient de performance qui peut atteindre 0,27.

En raison de la basse pression de la machine et du coefficient de performance assez élevé avec ce type d'appareil, le couple méthylamine-eau est un bon mélange de substitution pour les machines frigorifiques à absorption qui peuvent être actionnées à l'énergie solaire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. J. Chen, J. Kim and K. E. Herold, Performance enhancement of a diffusion-absorption refrigerator, *Int. J. Refrigeration* 19, 208-218 (1996).
2. P. Srihirin, S. Aphornratana, Investigation of a diffusion absorption refrigerator, *Applied thermal engineering* 22, 1181-1193 (2002).
3. G. Tamm, D. Y. Goswami, S. Lu, A. A. Hasan, Theoretical and experimental investigation of an ammonia-water power and refrigeration thermodynamic cycle, *Solar energy*, 76, 217-228 (2004).
4. A. Zohar, M. Jelinek, A. Levy, I. Borde, Numerical investigation of a diffusion absorption refrigeration cycle, *Int. J. Refrigeration* 28, 515-525 (2005).
5. I. Pilatowsky, W. Rivera, R. J. Romero, Thermodynamic analysis of monomethylamine-water solutions in a single-stage solar absorption refrigeration cycle at low generator temperatures, *Solar Energy Materials & Solar Cells* 70, 287-300 (2001).
6. R. J. Romero, L. Guillen, I. Pilatowsky, Monomethylamine-water vapour absorption refrigeration system, *Applied thermal engineering* 25, 867-876 (2005).
7. A. Stegou-Sagia, A computational method for the methylamine/H₂ gas mixture concentrations in methylamine/H₂O/H₂ absorption refrigeration units, *Applied thermal engineering* 16, 707-718 (1996).
8. S. Mazouz, N. Ben Ezzine, R. Garma, M. Bourouis, A. Bellagi, Experimental investigation and theoretical model of a diffusion solar absorption machine, *International Sorption Heat Pump Conference 2008*, 23-26 September, 2008, Seoul, KOREA