

POMPE A CHALEUR A ABSORPTION
ETUDE EXPERIMENTALE DU COEFFECIENT DE PERFORMANCE

S.GABSI¹, M.BEN ZINA²

¹Département du Génie des Procédés, E.N.I.G, Route de MEDENINE 6029 GABES
TUNISIE

²Département de chimie,E.N.I.S, SFAX

RESUME

Dans ce travail nous présentons une application d'une pompe à chaleur à absorption pour la revalorisation d'énergie à bas niveau (60-80°C) à niveau supérieur (120-150°C).

Après une description détaillée de l'installation pilote de puissance 1 KW, les auteurs présentent les niveaux de revalorisation et le coefficient de performance mesuré.

Les résultats expérimentaux montrent que :

- un niveau de revalorisation de 140°C est possible avec un COP de l'ordre de 1,4 ;
- les quantités de chaleur théoriques peuvent être réellement récupérées ;
- plus la taille de l'installation est importante (puissance élevée) plus on tend vers les valeurs théoriques.

ABSTRACT

The purpose of the research reported here is to develop one of the applications of an absorption heat pump for the applications of an absorption heat pump for energy upgrading from (60-40°C) to (120-150°C). After a description of the pilote plant (power 1 Kw) the authors present the experimental level of upgrading and efficiency. The experiment results show that :

- it is possible to reach 140°C with efficiency 1,4
- the theoretical energy can be recovered
- the experimental results approach the theoretical ones with graving size of plant.

INTRODUCTION

La crise d'énergie a suscité depuis quelques années de nombreuses études sur les énergies renouvelables et l'utilisation rationnelle de cette énergie, notamment dans le domaine industriel. De nombreuses industries en effet, en même temps qu'elles rejettent dans le milieu naturel de l'énergie à bas niveau de températures (eaux de refroidissement, fumées, vapeur basse pression, etc...) utilisent une partie importante des combustibles nobles pour réaliser des opérations à températures relativement

faibles (très souvent < 200°C) telles que : séchage, distillation, concentration par évaporation, chauffage des locaux,... Les pompes à chaleur apparaissent comme un moyen efficace pour la revalorisation de cette énergie à bas niveau (60-80°C) à températures plus élevées (120-150°C).

Cette revalorisation peut être effectuée, soit au moyen des pompes à chaleur à compression mues par un moteur électrique ou à gaz qui sont les plus connues, soit par les pompes à absorption ou à résorption qui ne sont pas utilisées malgré certains avantages que présentent ces machines :

- température de revalorisation élevée (>130°C),
- faible consommation d'énergie électrique,
- souplesse plus grande.

La plupart des travaux ont porté sur l'étude des couples utilisables dans le circuit des machines à absorption pour la production du froid /1,2/ et la climatisation.

Les travaux portant sur la production de chaleur utilisant le cycle des pompes à chaleur à absorption sont peu nombreux et se limitent à des études théoriques du coefficient de performance /3-8/ malgré que ces types de machines sont commercialisés au JAPON, en ALLEMAGNE... /9/.

La rareté des travaux expérimentaux /10-15/ réside dans les difficultés rencontrées telles que la stabilité du système, la maîtrise de l'installation complète...et la corrosion du système à haute température.

La finalité de ce travail consiste en une présentation des niveaux de revalorisation obtenus sur une installation pilote de puissance 1KW fonctionnant avec le système eau-bromure de lithium, les variations du coefficient de performance avec les débits des fluides utilisés et la comparaison du COP expérimental et théorique.

COEFFICIENT DE PERFORMANCE : COP

Il est courant pour caractériser les performances de pompes à chaleur de définir un coefficient de performance (COP) ou d'amplification (COA) comme étant le rapport de la quantité d'énergie revalorisée à celle fournie pour obtenir cette revalorisation. L'énergie fournie à l'évaporateur est supposée gratuite. Le COP se mettra sous la forme :

$$\text{COP} = \frac{Q_A + Q_C}{Q_B + W_p} \quad (1)$$

où:

Q_A et Q_C sont les quantités d'énergie récupérées au niveau de l'absorbeur et du condenseur.

Le travail de la pompe W_p est le plus souvent très faible devant la quantité d'énergie fournie au bouilleur Q_B . L'expression du COP devient alors :

$$\text{COP} = \frac{Q_A + Q_C}{Q_B} \quad (2)$$

Calcul du COP théorique :

Le calcul du COP théorique est effectué en admettant les hypothèses suivantes :

- le fluide calorigène quitte le condenseur à l'état liquide saturé;
- la vapeur issue du séparateur est à la même température que la solution. Cette hypothèse n'a pas été vérifiée; nous avons noté une légère surchauffe de la vapeur dû à des fumées de gaz de chauffe à température trop élevée.

L'analyse de la variance de l'installation (fig.1) conduit à un nombre de degrés de liberté de 6 qui sont attribués aux paramètres suivants :

- le débit de liquide (L),
- le débit de vapeur (V),
- la température d'évaporation (TE ou T3),
- la température à la sortie du condenseur (TC ou T1),
- le pincement à l'échangeur ($T_5 - T_9$),
- le titre de la solution à l'entrée de l'absorbeur (x_{10}).

Les paramètres indépendants étant fixés, il est alors possible d'établir le schéma de simulation représentée sur la figure 2.

Quelques résultats seront présentés et comparés aux valeurs expérimentales (figures 6 et 7).

Calcul du COP expérimental

On admet les mêmes hypothèses que pour le calcul du COP théorique. Dans l'expression du COP expérimental apparaît en plus, des quantités d'énergie, Q_A , Q_B et Q_C déjà définies, la quantité d'énergie fournie au préchauffeur, Q_p :

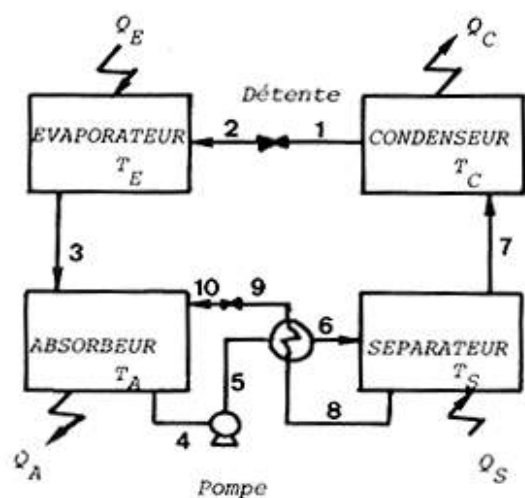


Fig. :1 Cycle de la pompe à chaleur

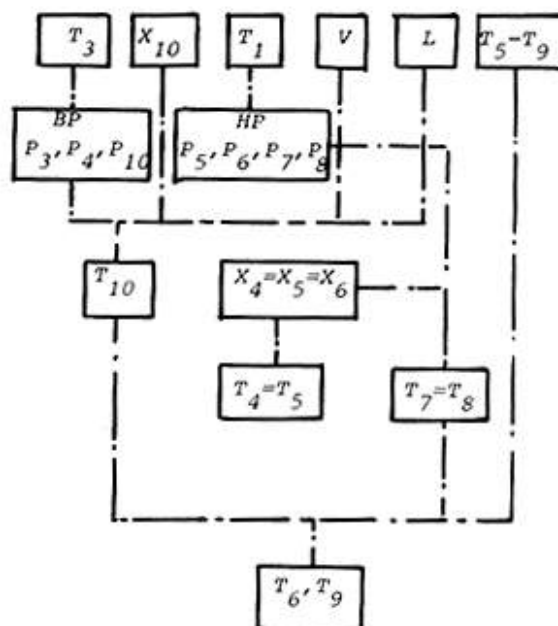


FIG.:2 Schéma de calcul pompe à chaleur à absorption

$$\text{COP} = \frac{Q_A + Q_C}{Q_B + Q_p} \quad (3)$$

DESCRIPTION DE L'INSTALLATION PILOTE /14-15/

Pour éviter la corrosion pouvant être provoquée par la solution de bromure de lithium, l'installation pilote, représentée sur la figure 3, est construite en acier inoxydable. Nous avons ajouté à la solution un inhibiteur de corrosion, le chromate de lithium dans une proportion de 1/10000.

Cette installation pilote comprend :

- un absorbeur constitué par une colonne à paroi mouillée à alimentation tangentielle /16/ refroidi par une solution eau-glycol;
- un séparateur constitué par un serpentin et un séparateur de phase chauffé avec du gaz;
- un condenseur de vapeur entre la solution et le réfrigérant (C1);
- un évaporateur;

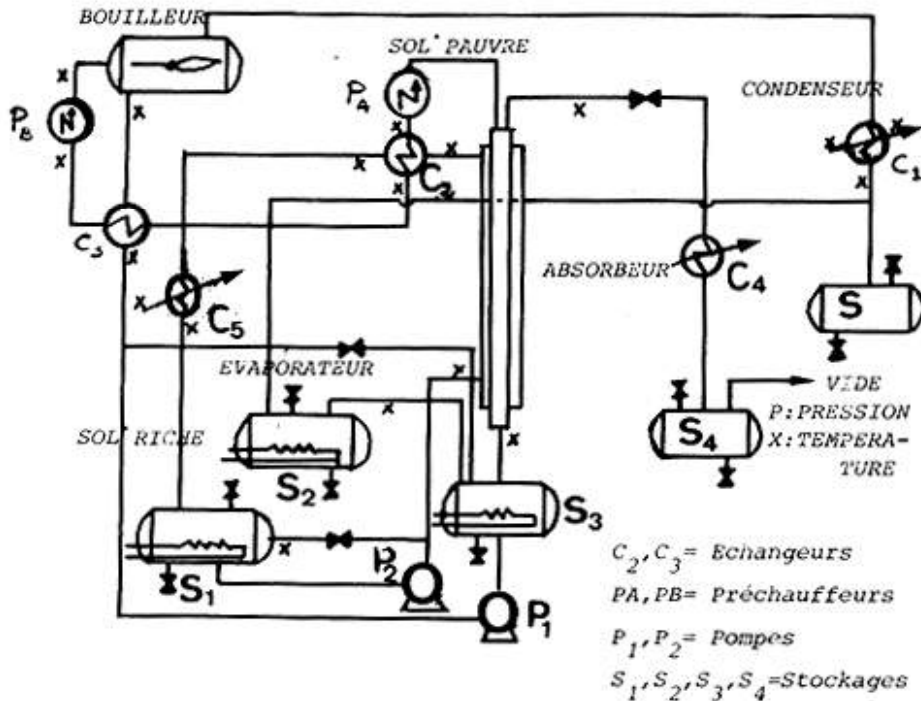


FIG. 3 : SCHEMA DE L'INSTALLATION

- un échangeur de chaleur entre la solution et le réfrigérant (C2);
- un échangeur de chaleur entre la solution provenant du stockage (S3) et la solution issue du bouilleur (C3);
- un condenseur de la vapeur non absorbée (C4);
- un échangeur glycol-eau (C5);
- un préchauffeur de la solution à l'entrée de l'absorbeur (PA);
- un préchauffeur bouilleur (PB);
- une pompe de solution (P1);
- une pompe de réfrigérant (P2);
- des bacs de stockages (S1,S2,S3,S4);

CONDITIONS EXPERIMENTALES

Le but de cette manipulation est :

- d'étudier l'influence du débit de vapeur, du débit du liquide et de la composition de la solution à l'entrée de l'absorbeur pour une même température d'évaporation (à basse

pression) sur le coefficient de performance,

•de comparer les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques.

Choix des paramètres

Le domaine de variation des divers paramètres est choisi de façon à déterminer les performances et les capacités de l'installation pilote c'est à dire maximiser le COP.

La composition de la solution est comprise entre 0,63 et 0,679 en poids en bromure de lithium.

Le débit de liquide doit assurer un régime turbulent :

$$12.10^{-3} < L(\text{ kg/s}) < 17.10^{-3} .$$

Procédure expérimentale

Nous commençons par chauffer le réfrigérant jusqu'à la température désirée. En même temps le chauffage du bouilleur est mis en marche ainsi que la pompe solution pour homogénéiser la solution (by-pass ouvert).

Après avoir fixé à l'aide de la pompe à vide la basse pression désirée, l'évaporateur est mis en marche.

La fermeture de la vanne entre le haut de la colonne et le stockage (pour la fermeture du cycle) ne s'effectue que lorsqu'on est assuré que tout l'air est chassé de l'installation. En effet la présence d'air dans la partie basse pression va créer une résistance dans la phase gazeuse entraînant ainsi une diminution de l'efficacité de la colonne.

Une fois que la vanne est fermée, la solution pauvre (de titre connu) est admise dans la colonne.

Des réglages sur la vanne située entre le séparateur et l'absorbeur et celle entre le séparateur et le condenseur C1 permettent de maintenir le débit du liquide et la pression dans le séparateur.

On considère que l'appareil est en régime lorsque : le vide, les températures de sortie du liquide de l'absorbeur et du réfrigérant ainsi que les débits sont stables.

Cette mise en régime demande environ 3 heures.

Le tableau I donne un exemple de résultats relevé sur l'installation pilote.

TABLEAU I

Xp(Poids LiBr)	0,64	0,647	0,647	0,647	0,647
XR(Poids LiBr)	0,634	0,630	0,630	0,62	0,628
TE (°C)	78,4	79,2	79,8	80,6	82,6
V (Kg/h)	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
L (Kg/h)	44	44	45	48	50
TES (°C)	145	145	144	144	144
TSS (°C)	141	140	140	139	139
Dr (Kg/h)	716	716	716	716	715
TER (°C)	130	130	129	129	129
TSR (°C)	132	131	131	130	131
Tsep(°C)	173	172	171	171	173
QA(Kcal/h)	779	840	907	1037	1105
QC(Kcal/h)	681	742	806	931	929
QB(Kcal/h)	1045	1084	1195	1378	1438
COP	1,398	1,460	1,434	1,429	1,414

Tsep est la température au séparateur

TER et TSR sont les températures d'entrée et de sortie du réfrigérant

RESULTATS EXPERIMENTAUX

Niveau de revalorisation

Les niveaux de revalorisation mesurés sont compris entre 123°C et 142°C. Le tableau II regroupe les températures maximales de sortie du réfrigérant TSR pour différentes concentrations et différentes températures d'évaporation TE.

On constate que le niveau de revalorisation est d'autant plus important que :

- la température à l'évaporateur (température du rejet thermique) est élevée (fig.4),
- la solution pauvre à l'entrée de l'absorbeur est plus concentrée (fig. 5).

Nous nous sommes limités à la température de 142°C en récupération (155°C à l'entrée de la solution dans l'absorbeur) car des températures supérieures exigeraient

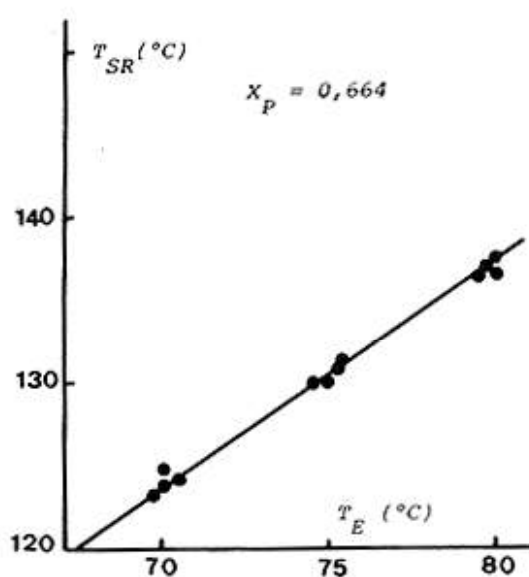


FIG. : 4

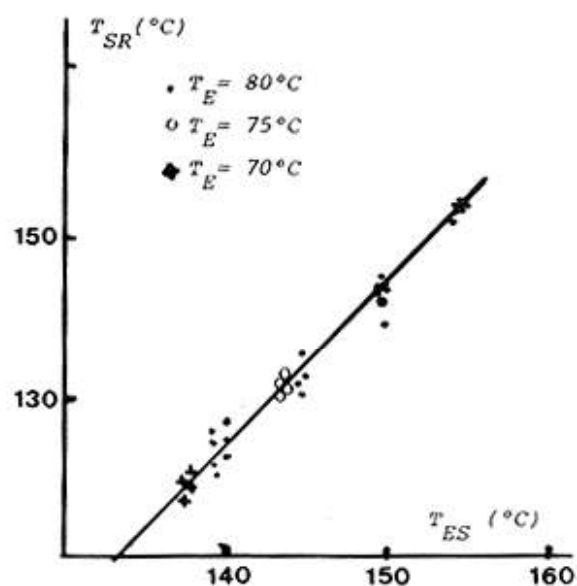


FIG. : 5

des concentrations plus élevées et les risques de cristallisation seraient trop importants. Cela est dû principalement à l'existence des points froids surtout au niveau des coudes et des tubes de faibles diamètres.

TABLEAU II

X_p (%poidsLiBr)	0,63	0,647	0,664	0,679
TE(°C)				
80	127,4	132,7	137,5	142
75		131,6		
70		125		

Un calorifugeage plus soigné facilite sûrement l'emploi des solutions plus concentrées, d'où un niveau de revalorisation plus élevé.

Coefficient de performance

Pour l'ensemble des expériences réalisées sur l'installation pilote le COP varie entre 1,2 et 1,6. Ce COP est calculé à partir des mesures des températures et des débits sur les différents éléments de l'installation. A partir des bilans thermiques, on en déduit le COP réel.

Un exemple de calcul du COP figure sur le tableau I.

Les figures 6 et 7 représentent respectivement la variation du coefficient de performance

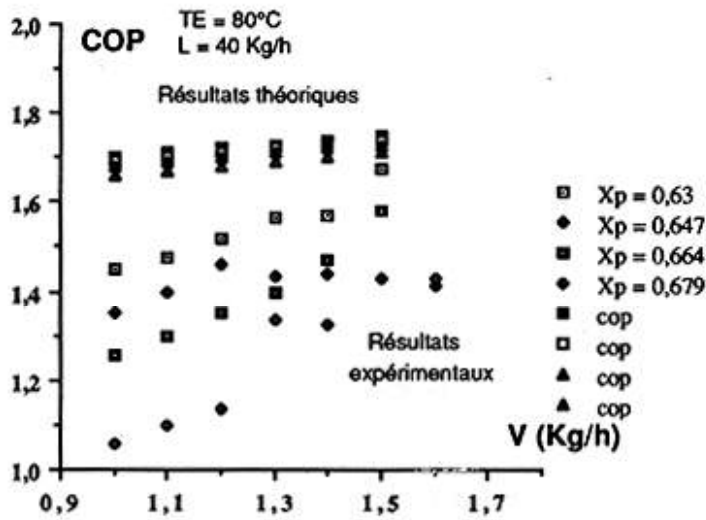


FIG.6 : Variation du COP avec le débit vapeur

en fonction du débit de vapeur et du liquide pour quatre concentrations différentes.

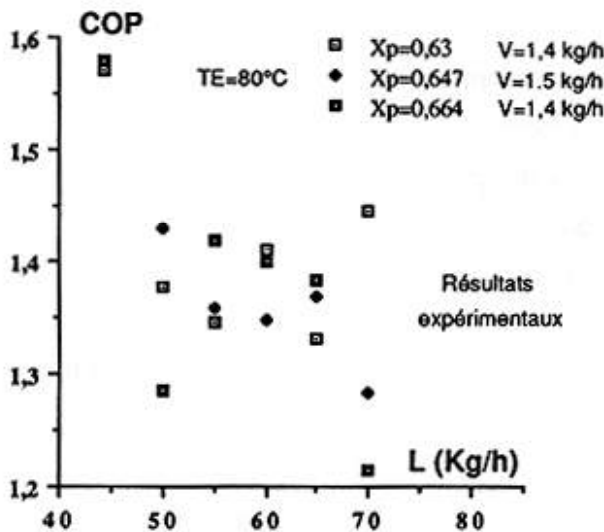


FIG.7 : Variation du COP avec le débit de liquide

Sur ces deux figures on remarque que :

- les valeurs expérimentales sont toujours inférieures aux résultats théoriques. Cet écart est d'autant plus faible que le débit de vapeur est important;
- la dispersion des résultats est plus ou moins grande;
- le COP augmente quand la concentration en bromure de lithium est faible;
- les résultats expérimentaux et théoriques relatifs au COP varient dans le même sens, la seule différence est que la variation des valeurs théoriques est faible;
- une augmentation sensible du COP avec le débit de vapeur;

-une légère diminution du COP à débit de vapeur constant.

INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Pour rendre compte des résultats expérimentaux, il suffit d'écrire l'expression du COP sous la forme :

$$\text{COP} = 1 + \frac{Q_E}{Q_B} \quad (4)$$

Un bilan thermique et matière sur le cycle d'absorption permettant d'aboutir à :

$$\text{COP} = 1 + \frac{H(\text{TE}) - h_e(\text{TSC})}{L \frac{(h(\text{Xp}, \text{TSB}) - h(\text{XR}, \text{TEB})) + H(\text{TSV}) - h(\text{XR}, \text{TEB})}{V}} \quad (5)$$

Cette relation explique la variation du COP avec les débits de liquide (L) et de vapeur (V).

Pour expliquer l'influence de la concentration il suffit de rappeler l'expression de l'enthalpie des solutions qui est de la forme :

$$h = a + a_1.X + a_2.X^2 + (b_0 + b_1.X).T + (b_2 + b_3.X).T^2$$

X étant le titre de la solution en bromure de lithium.

a, a₁, a₂, b₀, b₁, b₂ et b₃ sont des constantes.

Nous avons noté également une légère augmentation du COP avec la température à l'évaporateur à débit de liquide et à concentration constantes.

Ces constatations peuvent aussi s'expliquer à partir de l'expression (5) du COP. L'augmentation de la température à l'évaporateur TE entraîne un accroissement de l'enthalpie de la vapeur H(TE) issue de l'évaporateur.

REMARQUE

Nous avons évalué la précision de nos résultats, l'incertitude relative sur le COP est de l'ordre de 25 à 30%.

La détermination du COP a été effectuée en supposant une efficacité de 100% au niveau du séparateur.

Une étude plus réaliste en prenant une efficacité du séparateur de 85% conduit à un COP réel compris entre 1 et 1,36.

Comparaison du COP expérimental avec le COP théorique

En effectuant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, il est possible de calculer le COP théorique à partir des caractéristiques physiques des fluides calorigène et absorbant.

L'expression obtenue demeure assez complexe. Dans le cas où le système est l'eau-bromure de lithium et où la pompe à chaleur à absorption fonctionne à haute température, elle peut être simplifiée et le COP théorique est calculé avec une précision de 2% avec l'expression :

$$\text{COP} = 1 + \frac{T_E}{T_S}$$

où T_E et T_S sont des températures absolues. Cette expression fait apparaître que le COP d'une pompe à chaleur à absorption a une limite supérieure de 2.

CONCLUSION

Les résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude sur pilote montrent l'intérêt des pompes à chaleur à absorption pour la revalorisation d'énergie à bas niveau à un niveau plus élevé, en effet on peut obtenir des niveaux appréciables avec un COP nettement supérieur à ceux d'une chaudière classique.

Pour notre installation, avec des pertes thermiques qui ne sont pas négligeables et avec des solutions relativement concentrées, nous avons atteint des températures de révalorisation comprises entre 128°C et 142°C avec un COP réel sur notre installation compris entre 1 et 1,36 compte tenu du rendement de 85 % au séparateur et des pertes thermiques qui dans une installation de cette taille grevent sérieusement le coefficient de performance.

NOMENCLATURE

- Ae Aire d'échange (m²)
- Cpe Chaleur spécifique de l'eau (KJ/Kg°C)
- Cpr Chaleur spécifique du réfrigérant (KJ/Kg°C)
- COP Coefficient de performance (adim.)
- De Débit d'eau (Kg/s)
- Dr Débit de réfrigérant (Kg/s)
- H Enthalpie de la vapeur (KJ/Kg)

- h Enthalpie de solution (KJ/Kg)
- he Enthalpie de l'eau liquide (KJ/Kg)
- QA Quantité de chaleur échangée à l'absorbeur (KJ/Kg)
- QB Quantité de chaleur fournie au bouilleur (KJ/Kg)
- QP Quantité de chaleur fournie au préchauffeur (KJ/Kg)
- L Débit de solution (Kg/s)
- TE Température à l'évaporateur (°C)
- TEA Température d'entrée absorbeur (°C)
- TEB Température d'entrée bouilleur (°C)
- TSB Température de sortie bouilleur (°C)
- TSC Température de sortie condenseur (°C)
- TSP Température de sortie préchauffeur (°C)
- TSS Température de sortie de la solution (°C)
- TSV Température de sortie vapeur (°C)
- V Débit vapeur (Kg/s)
- Xp Concentration en poids LiBr (%) de la solution pauvre (adim.)
- XP Concentration en poids LiBr (%) de la solution riche (adim.)
- Wp Travail de la pompe (KJ/Kg)

Soumis en juillet 1986
Accepté en février 1990

REFERENCES

- 1 PONSARD.M.J., Etat actuel de la technique des machines frigorifiques à absorption à bromure de lithium, Rev. Générale du froid, 1973, 10, pp:1065-1081.
- 2 PERRY, CHILTON, Chemical Engineer's Handbook, 5eme Edition, Chapitre 12, pp : 42-49.
- 3 SALAZAR. A, Pompe à chaleur à absorption, etude du système H₂O-LiBr, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP TOULOUSE, 1979 .
- 4 HUOR. M.H, Contribution à l'étude des pompes à chaleur à absorption, Analyse du fonctionnement à charge partielle et à double effect, Etude de l'absorbeur, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP TOULOUSE, 1982.
- 5 HUOR . M.H, BUGAREL .R, Study of the behaviour of an absorption heat pump operating under partial loading, INTER. CHEM. ENG.,1981 ,21,(4), pp : 659-667.
- 6 MAYORGA VERA L.M, Contribution à l'étude des pompes à chaleur à absorption utilisant le couple eau-glycol : performance de l'absorbeur, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP TOULOUSE, 1984.
- 7 THOMAS.A, Fonctionnement d'une pompe à chaleur à absorption haute température sur des sechoirs industriels, G.D.F-D.E.T.N, Ref. 81383, Rapport interne.
- 8 THOMAS.A, TURBET.C, DREUILHE.J, TILLEQUIN.J, BUGAREL.R, Présentation d'une boucle prototype de pompe à chaleur à absorption haute température industrielle de 100kW, Rev. Institut Français du pétrole,1984,39(3), pp:383-393 .

- 9 LE GOFF.P, le développement des machines à absorption au Japon, Rapport INPL Nancy, Dec. 1986 .
- 10 BEN ZINA.M, Rapport de DEA, ENSIGC Juin 1979.
- 11 CHAUDHARZ. S.K, PARANJAPE. V, EISA M.A.R, HOLLAND F.A, A comparative study of the operating characteristics of water-calcium chloride absorption heat pumps; Heat recovery systems,1986,2(1),pp: 39-46.
- 12 MOHANTY B., Contribution à l'étude de la gestion optimale d'énergie solaire en vue de la production de froid par cycle à absorption, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP TOULOUSE, 1985.
- 13 MIN B.H, Contribution à l'étude des pompes à chaleur à sorption utilisant le méthanol comme calorigène, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP TOULOUSE, 1986.
- 14 GABSI.S , Contribution à l'étude des pompes à chaleur à absorption . Analyse des performances d'une installation fonctionnant avec le système eau-LiBr, Thèse de Docteur 3eme cycle, INP TOULOUSE, 1981.
- 15 GABSI.S, BUGAREL.R, Analyse des performances d'une pompe à chaleur à absorption, Journal de la Société Chimique de TUNISIE,1985, 1(2), pp : 41-49.
- 16 LARRANAGA .F.J, Contribution à l'étude des colonnes à alimentation tangentielle, Thèse de Docteur-Ingénieur, INP TOULOUSE, 1975.