

ANALYSE DES PERFORMANCES D'UNE POMPE A CHALEUR A ABSORPTION

S. GABSI*, R. BUGAREL**

* E.N.I.G., route de MEDENINE, 6029, GABES, TUNISIE

** I.G.C., chemin de la loge, 31078, TOULOUSE Cedex, FRANCE

RESUME

Après un rappel sur le principe de fonctionnement de la pompe à chaleur à absorption et une description de l'installation pilote (puissance 1KW), les auteurs présentent les performances de cette dernière.

Les résultats expérimentaux montrent que :

- L'aire d'échange est un facteur limitant de l'échange ;
- La capacité de la colonne d'absorption augmente avec le débit de solution à l'entrée de l'absorbeur et diminue légèrement quand la concentration augmente ;
- Le COP expérimental est toujours inférieur à celui théorique ;
- Un niveau de revalorisation de 140° à partir de l'énergie à bas niveau (60 - 80° C) est possible avec un COP de l'ordre de 1,4.

I - INTRODUCTION

Depuis quelques années, de nombreuses études sur les énergies renouvelables (solaires, éolienne etc...) et sur l'utilisation rationnelle de l'énergie, notamment dans le domaine industriel ont été effectuées.

La plupart des industries consommatrices d'énergie sont également génératrices de rejets dont le niveau de température est généralement insuffisant pour envisager la réutilisation.

Un des moyens efficaces pour la révalorisation de ces rejets (60 - 80°C) à un niveau plus élevé (120 - 150°C) est de mettre en œuvre une pompe à chaleur.

Une pompe à chaleur apparaît comme une machine à fonctionnement cyclique susceptible de prélever une certaine quantité d'énergie à bas niveau à une source disponible et d'en restituer tout ou partie à un niveau supérieur.

Parmi les divers types de pompe à chaleur, citons les pompes à chaleur à compression, qui sont les plus connues et permettent d'atteindre des températures de révalorisation de l'ordre de 100°C et les pompes à absorption ou résorption [1,6] qui sont très peu utilisées malgré certains avantages :

- Température de révalorisation plus élevée (> 100°C)
- Faible consommation d'énergie électrique
- Souplesse plus grande

La finalité de ce travail consiste en une étude des performances d'une installation pilote de pompe à chaleur fonctionnant avec le système eau-bromure de lithium.

2 - PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT [1 - 5]

Le fonctionnement en cycle d'une pompe à chaleur à absorption peut être schématisé par la figure 1. Rappelons brièvement le principe de fonctionnement.

Le fluide calorigène (1) issu du condenseur est détendu à travers une vanne. Cette détente isenthalpe a pour effet la vaporisation partielle du liquide et son refroidissement (2). Le liquide restant est vaporisé en absorbant une quantité Q_E à la source froide, le gaz (3) ainsi produit est absorbé par une solution pauvre (10) ; l'absorption est réalisée à une température T_A supérieure à celle de vaporation. La solution riche obtenue à l'absorbeur est transférée de la basse pression (4) à la haute pression (5). Elle est ensuite réchauffée par la solution pauvre (6) provenant du bouilleur (8) avant d'être introduite dans le séparateur qui fournit le fluide calorigène à l'état vapeur (7), celui-ci étant ensuite condensé (1). La solution pauvre est refroidie (9) et détendue avant d'être de nouveau utilisée pour l'absorption.

3 - COEFFICIENT DE PERFORMANCE

Dans une pompe à chaleur à absorption, la restitution de chaleur se fait à deux endroits :

- * Q_A à l'absorbeur à la température T_A
- * Q_C au condenseur à la température T_C

La quantité de chaleur Q_E prélevée à l'évaporateur était considérée comme gratuite, l'expression du coefficient de performance COP est :

$$\text{COP} = \frac{Q_A + Q_C}{Q_S + W_P}$$

$$\text{COP} = 1 + \frac{Q_E}{Q_S + W_P}$$

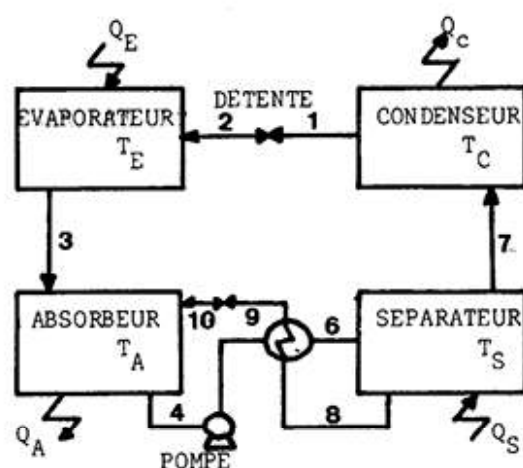


Fig.1 : Cycle de la pompe à chaleur

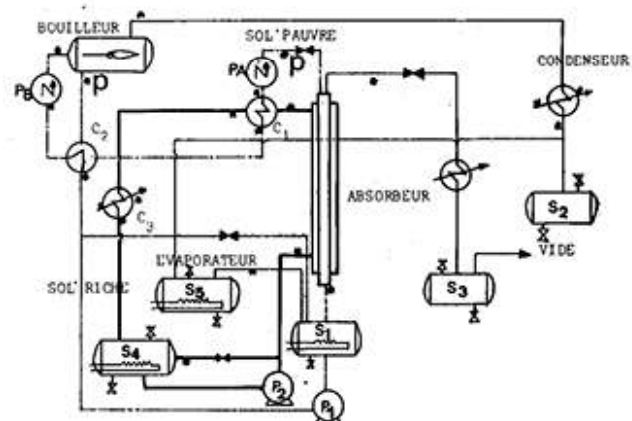


FIG. : 2 - SCHEMA DE L'INSTALLATION

- P = Mesure de pression
- * = Mesure de température
- C_1, C_2, C_3 = Echangeurs
- P_A, P_B = Préchauffeurs
- P_1, P_2 = Pompes
- S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 = Stockages

dans laquelle Q_S est la quantité d'énergie consommée au séparateur et W_P est le travail de la pompe de circulation de la solution absorbante.

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 :

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

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.

4 - INSTALLATION PILOTE

La figure 2 donne une vue d'ensemble de l'installation pilote de puissance 1 KW.

Le séparateur prend la chaleur nécessaire par combustion de gaz, tandis que l'évaporateur épuise la chaleur de vaporisation du calorigène de l'énergie électrique. L'énergie ainsi captée est revalorisée à l'absorbeur et au condenseur et permet de chauffer une solution d'éthylène glycol et de l'eau.

4.1 - Caractéristiques du cycle

Les caractéristiques du cycle sont présentées sur le tableau I.

Tableau : I CARACTERISTIQUES DE L'INSTALLATION

Type	Dimensions			Autres caractéristiques	Remarques
	Longueur (m)	Diamètre (mm)	Ø (mm)		
Absorbeur	1,90	40/49	61,5/70		Serpention placée à l'intérieur
Evaporateur	0,385	450			
Séparateur + Serpention	0,630	50/60			A l'intérieur
	3,50	12/17		Ø = 170 mm pas 30 mm	placé 5 chicanes
Condenseur	1	6/8	12/7	$A_e = 1,885 \cdot 10^{-2} m^2$	
Echangeur C ₃	1,80	6/8	12/4	$A_e = 3,393 \cdot 10^{-2} m^2$	
Echangeur C ₂	1,80	6/8	20/27	$A_e = 3,393 \cdot 10^{-2} m^2$	

4.2 - Description des éléments principaux :

* Absorbeur

L'absorbeur est la pièce maîtresse de l'installation. C'est une colonne d'absorption à paroi mouillée à alimentation tangentielle. Nous avons testé deux absorbeurs :

- Monotubulaire (longueur = 1,90 m ; diamètre : 4.10^{-2} m) (fig 3)
- Tributaire (longueur = 1,80 m ; diamètre : 1.310^{-2} m) (fig. 4)

Un guidage placé à l'intérieur de la colonne permet de conserver le film spiralé engendré par l'alimentation par 1 ou 2 orifices diamétralement opposés de 1 mm de diamètre.

Séparateur

Le séparateur a été conçu de manière à résoudre les problèmes dus aux dilatations thermiques. Il est constitué d'un serpentin et d'un séparateur de phase.

Condenseur

La vapeur d'eau issue du séparateur est condensée par film à l'intérieur des tubes. La chaleur récupérée servira à chauffer l'eau à l'extérieur des tubes.

Evaporateur

L'eau détendue entre le condenseur et l'évaporateur est vaporisée dans l'évaporateur.

La chaleur nécessaire est fournie par l'énergie électrique.

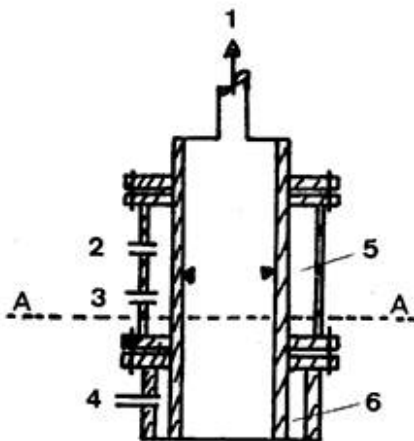


FIG. 3

TETE D'ALIMENTATION

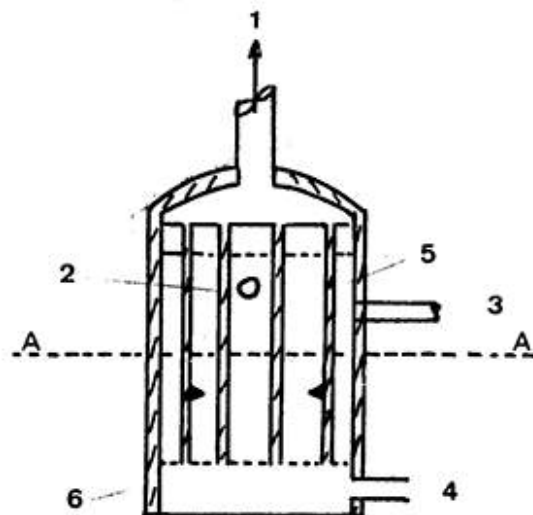


FIG. 4

TANGENTIELLE

- 1 : Sortie vapeur
- 2 : Prise de pression
- 3 : Entrée liquide

- 4 : Sortie réfrigérant
- 5 : Chambre de pression liquide
- 6 : Colonne acier inox

5 - PERFORMANCES DE L'ABSORBEUR

Comme nous l'avons signalé, la finalité de ce travail consiste en une étude des performances de notre installation pilote. Pour le faire nous avons déterminé les capacités de l'absorbeur en fonction des paramètres d'action.

Cette capacité étant définie comme le débit maximal de vapeur pouvant être absorbée pour des conditions expérimentales bien définies (T_E , débit et concentration de la solution pauvre). Le système étant autostabilisant, le changement du débit de vapeur conduit sans difficulté à un nouveau régime stable.

Les figures 5 et 6 montrent l'évolution de la température à l'évaporateur T_E (ou la basse pression) en fonction du débit de vapeur. Les courbes présentent la même allure aussi bien pour la colonne monotubulaire (fig. 5, 6) que multitubulaire (fig. 7). Il apparaît deux zones :

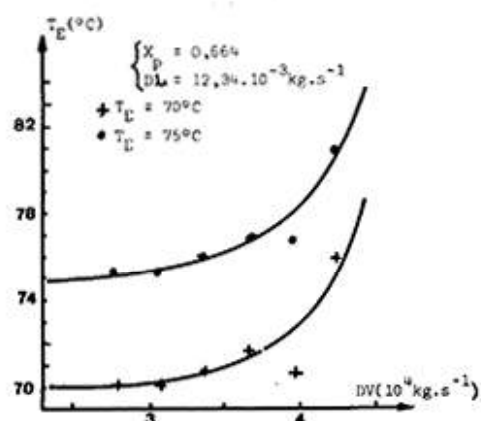
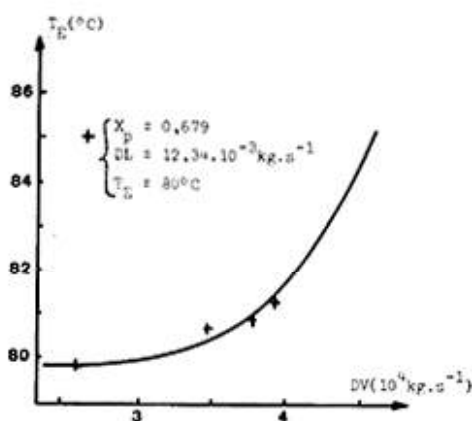


FIG. 5 CAPACITE DE LA COLONNE

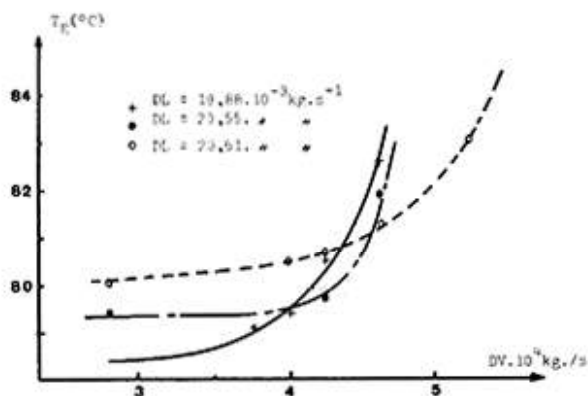


FIG. 6

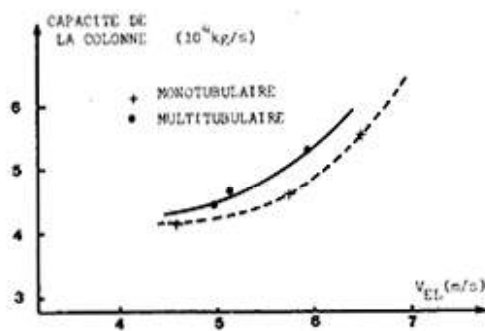


FIG. 7

- une faible variation de T_E pour des débits en général inférieurs à 4,17.10 kg/s (dépendent des conditions de fonctionnement)
- un brusque décrochement quand le débit de vapeur augmente.

L'ensemble des valeurs expérimentales pour :

- un absorbeur monotubulaire
- une température à l'évaporateur de 80°C.
- divers débits de solution et concentrations à l'entrée de l'absorbeur sont rapportées sur le tableau ci-dessous :

DL (10 ³ kg / s) X _p % en poids Li - br	DV maximum (10 ⁴ kg / s)		
	12,3	15,4	18,2
0,63	4,2	4,65	6,22
0,647	4,12	4,37	5,10
0,664	4,1	4,2	4,44

On constate que :

- La capacité de la colonne est d'autant plus importante que le débit de liquide à l'entrée de l'absorbeur est grand.
- La capacité diminue quand la concentration augmente, ce qui est normal puisque DL diminue mais cette diminution pourrait être imputable en partie à une variation des propriétés physiques, en particulier à la masse volumique et à la viscosité qui contribuent à une augmentation de l'épaisseur du film, une diminution de la hauteur siège d'un écoulement spirale et de l'aire d'échange de matière entraînant une absorption médiocre.

La comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par SALAZAR [2] pour des conditions analogues montre que l'aire d'échange est un facteur limitant de l'échange.

Ainsi nous avons réalisé un échangeur multibulaire. Les résultats expérimentaux (fig. 7) montrent une amélioration de la capacité de la colonne.

6 - PERFORMANCES DE L'INSTALLATION

Le rôle d'une pompe à chaleur est d'élever le plus haut possible le niveau de révalorisation avec un coefficient de performance acceptable.

Ce COP peut se mettre sous forme :

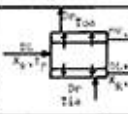
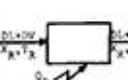
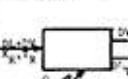
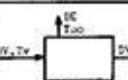
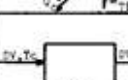
$$COP = \frac{Q_A + Q_C}{Q_S + Q_P + W_P}$$

où Q_P est l'énergie fournie au préchauffeur (cf. fig. 2). En général W_P est faible devant l'énergie au bouilleur Q_S et au préchauffeur Q_P . L'expression se réduit à :

$$COP = \frac{Q_A + Q_C}{Q_S + Q_P}$$

Un bilan thermique détaillé dans le tableau II permettra d'expliciter l'expression du COP.

TABLÉAU II-Bilan thermique

Appareil	Schématisme	Equations
Absorbeur		$Q_A = DL \cdot h(x_p, T_p) + DV \cdot h(T_p) - (DL + DV) \cdot h(x_p, T_p) = D_p \cdot C_p \cdot (T_{1a} - T_{1b})$
Préchauffeur		$Q_P = (DL + DV) [h(x_p, T_2) - h(x_p, T_1)]$
Séparateur		$Q_S = DL \cdot h(x_p, T_p) + DV \cdot h(T_p) - (DL + DV) \cdot h(x_p, T_p)$
Condenseur		$Q_C = DV [h(T_p) - h_p(T_c)] = D_c \cdot C_c \cdot (T_{1c} - T_{2c})$
Evaporateur		$Q_E = DV [h(T_e) - h_p(T_e)]$

6.1 - Conditions expérimentales et résultats obtenus

L'étude expérimentale a été menée pour des températures à l'évaporateur de 70 - 75 et 80°C, différentes concentrations et pour plusieurs débits de solutions.

Le tableau III résume les principales caractéristiques du cycle. Tandis que la figure 8 représente la variation du COP avec le débit de vapeur pour différents températures à l'évaporateur.

6.2 - Exploitation des résultats

L'ensemble des résultats obtenus sur l'installation pilote permet de dégager les remarques suivantes :

- Les quantités de chaleur dégagée peuvent être aisément récupérées.
- Des niveaux de révalorisation de 140°C peuvent être obtenus avec un COP de l'ordre de 1,5 avec une efficacité de 100% au séparateur.
- Les résultats théoriques et expérimentaux sont en bon accord.
- L'écart entre les valeurs expérimentales et théoriques du COP est dû aux pertes thermiques sur le circuit de la solution riche (principalement au niveau de la pompe).
- Le COP augmente avec le débit de vapeur et varie dans le même sens que la température T_E à l'évaporateur.
- Quand le débit de vapeur augmente, le COP expérimental tend vers le COP théorique, ce qui montre que pour des installations à l'échelle industrielle, le COP sera de l'ordre de celui donné par les calculs.

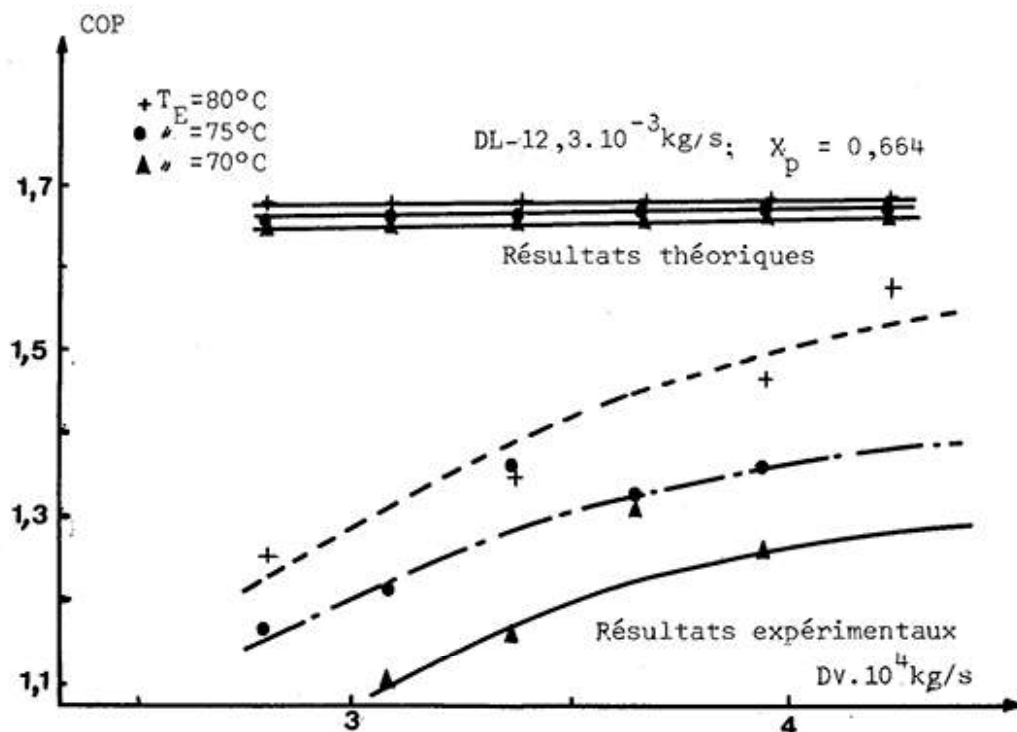


FIG. : 8

Tableau III : CARACTERISTIQUES DU CYCLE DE LA POMPE A CHALEUR

T_E ($^{\circ}$ C)	80,9	81,5	75,3	76,8	71,6	71,5
X_p (en % poids Li-Br)	0,664	0,664	0,664	0,664	0,664	0,664
T_{10} ($^{\circ}$ C)	149,5	149,9	144	143,5	137,8	137,3
T_u ($^{\circ}$ C)	145,7	144,4	139,2	138,9	132,5	132,8
$DL \times 10^3$ (kg.s $^{-1}$)	12,6	12,6	12,3	13,7	12,3	15,4
$DV \times 10^4$ (kg.s $^{-1}$)	2,8	3,9	3,1	3,9	3,7	3,9
T_8 ($^{\circ}$ C)	171,4	169,1	174,2	174,7	173,2	169,8
$Q_A + Q_C$ (KW)	1,53	2,15	1,69	2,12	1,97	2,16
Q_C	1,22	1,46	1,39	1,56	1,47	1,52
COP	1,26	1,47	1,22	1,36	1,33	1,42

CONCLUSION

L'installation ainsi en œuvre est de faible puissance et les températures sont élevées au niveau du séparateur, condenseur et absorbeur ce qui explique les pertes thermiques importantes.

Dans des conditions réalistes avec une efficacité de 85% au séparateur le COP est de 1,4 cette valeur est nettement supérieure à celle d'une chaudière classique.

Ce type de pompe peut avoir de nombreuses applications dans de domaine industriel notamment pour le séchage, la distillation, l'évaporation par concentration... Par ailleurs, nous pouvons signaler l'étude réalisée à GAZ DE FRANCE [7,8] en vue d'adopter une pompe à chaleur à absorption sur un séchoir de papeterie, une tour d'atomisation de lait, un séchoir rapide de tuiles et briques, en utilisant les données réellement existantes des usines. Une économie d'énergie de 30 à 40% est possible.

Enfin, nous pouvons signaler que deux machines à absorption sont commercialisées depuis peu au Japon et en République Fédérale d'Allemagne à des fins de chauffage domestique.

Soumis en Octobre 84

Accepté en Avril 85

BIBLIOGRAPHIE

- 1) R. BUGAREL, J.C. MORA, Pompes à chaleur à absorption, Information chimie, 158, Août-Sept, 163 - 167, 1967.
- 2) A. SALAZAR, Pompes à chaleur à absorption, couple H₂O - LiBr, thèse de docteur-Ingénieur, INP. Toulouse 1979.
- 3) M.H. HUOR, R. BUGAREL, Etude du comportement d'une pompe à chaleur à absorption en fonctionnement à charge partielle. Entropie, 1980, 91, 28 - 37.

- 4) S. GABSI, 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 de 3^{ème} cycle, INP Toulouse, 1981.
- 5) S. GABSI, R. BUGAREL, water absorption by a solution of lithium bromide in wetted wall columns with tangential feed, Int. Comn. Heat mass transfer, 1983, 10, 49 - 58.
- 6) S. GABSI, M. PREVOST, R. BUGAREL, Performances des transformateurs de chaleur et des pompes à chaleur à résorption, Rev. Gen. them. Fr, 1984, 266, Fev, 93 - 102.
- 7) THOMAS, fonctionnement d'une pompe à chaleur à absorption à haute température sur des séchoirs industriels. G.D.F - D.E.T.N, Ref. 81383, rapport interne.
- 8) D. THOMAS, C. TURBET, J. DREUILHE, J. TILLEQUIN, R. BUGAREL, présentation d'une boucle prototype de pompe à chaleur à absorption haute température industrielle de 100 KW, Rev. Institut Français du pétrole, 1984, 39, N° 3, 383 - 393.

NOMENCLATURE

COP = coefficient de performance
 C_{p_e} = chaleur spécifique de l'eau
 C_{p_r} = " " du réfrigérant
 C_1, C_2 = échangeur (cf. fig. 2)
 D_e = débit d'eau (kg/s)
 D_r = débit de réfrigérant (kg/s)
 D_v = débit de vapeur (kg/s)
 D_{v_e} = " " " limite (kg/s)
 H = enthalpie de la vapeur (KJ)
 h = enthalpie de solution (KJ)
 h_e = enthalpie du liquide (KJ)
 P_A = préchauffeur colonne (cf. fig 2)
 P_B = " " bouilleur (" " ")
 P_1, P_2 = Pompe (cf fig 2)
 Q_A = Quantité de chaleur dégagée à l'absorbeur (KJ/Kg)
 Q_C = " " " " récupérée au condenseur (KJ/Kg)
 Q_E = " " " " fournie à l'évaporateur (KJ/Kg)
 Q_F = " " " " au préchauffeur (KJ/Kg)
 Q_G = " " " " au séparateur (KJ/Kg)

S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 = stockages (cf. fig2)
 T_c = température de sortie du condenseur ($^{\circ}\text{C}$)
 T_E = " " à l'évaporateur ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ia} = température d'entrée du réfrigérant absorbeur ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ic} = " " " " " " condenseur ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{ca} = température de sortie du réfrigérant absorbeur ($^{\circ}\text{C}$)
 T_{cc} = " " " " " " condenseur ($^{\circ}\text{C}$)
 T_p = température de la solution pauvre ($^{\circ}\text{C}$)
 T_r = " " " " " " riche ($^{\circ}\text{C}$)
 T'_r = " " " " de sortie du préchauffeur ($^{\circ}\text{C}$)
 T_v = " " " " de la vapeur à la sortie du séparateur ($^{\circ}\text{C}$)
 T_s = T_c = température au séparateur ($^{\circ}\text{C}$)
 v_{ent} = vitesse d'entrée du liquide (m/s)
 x_p = concentration en poids Li-Br de la solution pauvre (%)
 x_r = " " " " " " " " " " riche (%)
 w = travail de la pompe.