

## MODÉLISATION ET COMMANDE D'UN ÉVAPORATEUR EXPLOITÉ AU FIL DU SOLEIL

R. BEN ABDENNOUR\*, S. GABSI\*, M. KSOURI\*\*

\* *École nationale d'ingénieurs de Gabès, Route de Médenine, 6029 Gabès, Tunisie*

\*\* *École nationale d'ingénieurs de Tunis, BP 37, 1002 Tunis-Belvédère, Tunisie.*

(Soumis en février 1993, accepté en juin 1995)

### RÉSUMÉ

Nous présentons dans ce travail un modèle dynamique, une simulation et une commande d'une installation solaire utilisée pour la production de solvants tout en se basant sur des données expérimentales.

La simulation a permis d'observer l'évolution des différents paramètres et de mettre en évidence l'importance de débit de fluide caloporteur pour la commande de l'installation.

Un algorithme de commande optimale, ayant montré son intérêt par simulation, a été implanté sur l'unité pilote. Cet algorithme a permis d'améliorer la quantité du solvant récupéré et la durée de production.

### ABSTRACT

We propose an optimal control of a solar energy plant designed for the solvent recovery. The algorithm is based on a dynamic linear model. The application of this algorithm gives good results, tacking account the numerical simulation and experimental values.

### INTRODUCTION

L'exploitation d'une unité de génie chimique met en œuvre un grand nombre des paramètres surtout si l'installation est exploitée au fil du soleil /1,2/.

Afin de maximiser la production journalière, il est indispensable de commander l'installation en agissant sur les différents paramètres.

Il est évident que la synthèse d'une commande nécessite l'étude du comportement des systèmes vis-à-vis les variations des paramètres.

Dans notre travail nous proposons un modèle dynamique, une simulation et une commande d'une installation solaire existante à l'École Nationale d'Ingénieurs de Gabès. Cette installation est constituée principalement de 8 modules de capteur plan à absorbeur monotube spiralé présentant une superficie totale de captation de  $16\text{m}^2$ , d'un évaporateur ayant une aire d'échange égale  $3,9\text{m}^2$  et d'un condenseur. Elle est utilisée pour la récupération de solvants légers. Le fluide caloporteur, dans ce cas est de l'eau, chauffée par l'énergie solaire, cède de l'énergie au solvant chargé, ce dernier s'échauffe et l'évaporation du solvant pur se produit quand la température d'ébullition est atteinte. On récupère ainsi le solvant pur, la solution restante s'appauvrit de plus en plus.

### MODÉLISATION

#### Modèle de l'évaporateur

L'évaporateur schématisé sur la figure 1 est alimenté en solvant avec un débit  $D_c(t)$  et à la température  $T_c(t)$ . Il produit un débit de vapeur  $V(t)$  à la température d'ébullition  $T_c$ . La puissance

fournie à l'évaporateur par le fluide caloporteur,  $Q_u$ , permet d'une part, de porter le solvant chargé de la température  $T_c(t)$  à la température moyenne  $T_{me}(t)$  et d'autre part d'évaporer une partie du solvant produisant ainsi le débit de vapeur  $V(t)$ .

Pour simplifier l'étude on admettra les hypothèses suivantes :

- la température dans l'évaporateur est uniforme,
- la masse volumique du solvant ne varie pas avec la température (corps pur),
- les pertes de chaleur vers l'extérieur sont négligeables (évaporateur calorifugé),
- le niveau de liquide  $h(t)$  dans l'évaporateur est tel que l'échangeur plonge entièrement dans le liquide,
- La température  $T_3(t)$  est la moyenne arithmétique des températures d'entrée  $T_c(t)$  du capteur et  $T_s(t)$  de l'échangeur.

L'ensemble des grandeurs définissant les contraintes imposées au système par le milieu extérieur sont fonctions du temps  $D_c(t)$ ,  $T_c(t)$ ,  $Q_u(t)$  et  $T_3(t)$ .

Certaines de ces entrées peuvent être manipulées directement ou indirectement, et constituent les commandes du système. Dans le cas de l'évaporateur, le débit du solvant chargé, la température moyenne du fluide et la puissance sont des entrées de commande. Par contre, l'entrée  $T_c(t)$  est imposée par l'environnement du procédé et ne peut être mesurée, sa fluctuation au cours du temps intervient dans le procédé comme une perturbation.

Le débit de vapeur caractérise la production de l'installation et peut être considéré comme une sortie principale, cependant les sorties  $T_{me}(t)$  et  $h(t)$  sont utiles pour suivre le fonctionnement du système et caractérisent son état.

Le modèle physique de l'évaporateur est établi par les bilans suivants:

a - Bilan de matière :

Un bilan de matière sur l'évaporateur en régime transitoire conduit à :

$$\frac{d}{dt} [A_d h] = D_c - V \quad (m^3/s) \quad (1)$$

b - Bilan thermique :

Un bilan thermique sur l'évaporateur en régime transitoire aboutit à l'expression suivante :

$$\frac{d}{dt} (A_d h C_p \rho T_{me}) = D_c \rho C_p (T_c - T_{me}) - \rho \lambda V + Q_u \quad (2)$$

c - Transfert d'énergie /6,7/

Un bilan de transfert d'énergie en régime permanent permet d'écrire :

$$Q_u = U A_e \Delta T^r$$

Dans le cas du transfert thermique avec changement de phase, le coefficient global d'échange  $U$  est proportionnel au gradient de température  $\Delta T$ , l'équation précédente se transforme en :

$$Q_u = C_1 A_e (T_3 - T_{me})^{r+1}$$

En régime permanent et en tenant compte de l'équation du transfert d'énergie, l'équation (2) se

transforme en :

$$C_1 A_e (T_3 - T_{me})^{r+1} = -D_c \rho C_p (T_c - T_{me}) + \rho \lambda V \quad (3)$$

$C_1$  et  $r$  sont deux constantes à identifier à partir des essais expérimentaux réalisés sur l'installation pilote /3/ :

$$C_1 = 20 \text{ (W/m}^2\text{C}^{r+1}\text{)} \quad \text{et} \quad r = 1,1.$$

### Modèle du capteur

Le modèle dynamique retenu donne la température du fluide caloporteur en un point quelconque du capteur. La solution du système d'équations proposée /3,4,5/ est exprimée directement en fonction des températures à l'entrée et à la sortie du capteur.

$$V_f = \int_{t_0}^t D(t) dt \quad (4)$$

$$T_s(t) = T_c(t_0) \exp\left(\frac{t_0 - t}{\tau}\right) + \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \int_{t_0}^t f(x) \exp\left(\frac{x}{\tau}\right) dx \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{\eta_0 \phi_0(x)}{K} + T_a(x) \quad ; \quad \tau = \frac{\rho c V_f^0}{K A_c}$$

La simulation en régime statique a montré que le débit du fluide caloporteur et la température à l'entrée du capteur peuvent servir comme des grandeurs d'entrée pour le modèle du capteur. Toutefois la température  $T_s$  est considérée comme grandeur de sortie. Par ailleurs, le flux solaire et la température ambiante sont considérés comme perturbations /6,7/.

Le flux solaire est calculé à partir d'un modèle de reconstitution /8/ à partir des données météorologiques de la région de Gabès. Les paramètres du modèle d'ensoleillement sont identifiés à partir des relevés de la station météorologique.

### **LINÉARISATION ET DISCRÉTISATION**

Dans le cas présent, et étant donné la dynamique relativement lente du système, il est possible d'envisager son évolution comme une suite de points de fonctionnement quasi stationnaire. Les variations des différentes grandeurs sont, en effet, de faibles amplitudes si la période d'échantillonnage est convenablement choisie (1 mn). Le système peut être alors décrit par un modèle linéaire à paramètres variant au cours du temps, et pouvant être ajustés à chaque période d'échantillonnage grâce aux mesures effectuées sur le système /9/.

### Linéarisation et discrétisation du modèle de l'évaporateur

Le modèle linéarisé exprimé en variable d'écart est le suivant :

$$\frac{dh^*}{dt} = \frac{1}{A_d} D_c^* - \frac{1}{A_d} V^* \quad (6)$$

$$\frac{dT_{me}^*}{dt} = -x_1 T_{me}^* + x_2 D_c^* + x_3 T_c^* + x_4 Q_u^* + x_5 V^* \quad (7)$$

$$V^* = -(y_1 + y_2) T_{me}^* + y_1 T_3^* + y_2 T_c^* - y_3 D_3^* \quad (8)$$

$$\text{avec } x_1 = \frac{D_c^0}{A_d h^0}; x_2 = \frac{-2 T_{me}^0 + T_c^0}{A_d h^0}; x_3 = \frac{1}{\rho C_p A_d h^0}; x_4 = \frac{T_{me}^0}{A_d h^0} - \frac{\lambda \rho}{\rho C_p A_d h^0}$$

$$y_1 = \frac{C_1 A_e (r+1)}{\lambda \rho} (T_3^0 - T_{me}^0)^r; y_2 = \frac{C_p D_c^0 \rho}{\lambda \rho}; y_3 = \frac{C_p \rho}{\lambda \rho} (T_{me}^0 - T_c^0)$$

Dans un but de simplification, et tenant compte de la faible sensibilité de l'évaporateur à une commande en débit de charge, on s'est proposé de réaliser une boucle de régulation locale réalisant la condition  $D_c^* = V^*$ . Ceci peut être obtenu grâce à une régulation du niveau  $h(t)$  du liquide dans l'évaporateur.

La représentation discrète du modèle simplifié est obtenue par la méthode des différences finies en utilisant un développement limité du premier ordre.

Si  $T$  est la période d'échantillonnage, les signaux continus conservent leurs valeurs de l'instant  $kT$  tout le long de l'intervalle  $(kT, (k+1)T)$ .

Les équations continues sont alors remplacées par les équations discrètes suivantes :

$$T_{me}^*(k+1) = (T \frac{x_1}{A_d h} + 1) T_{me}^*(k) - T \frac{x_1}{A_d h} T_c^*(k) + x_3 T Q_u^*(k) \quad (9)$$

$$V^*(k) = -\frac{1}{x_2} (V^0 + x_1) T_{me}^*(k) + \frac{x_1}{x_2} T_3^*(k) + \frac{V^0}{x_2} T_c^*(k) \quad (10)$$

$$x_1' = \frac{C_1 A_e (r+1)}{\rho C_p} (T_3^0 - T_{me}^0)^r; x_2' = \frac{\lambda \rho}{C_p \rho} + T_{me}^0 - T_c^0; x_3' = \frac{1}{A_d h C_p \rho}$$

### Discretisation du modèle du capteur solaire

Dans l'intervalle  $(kT, (k+1)T)$ , les paramètres  $D(x)$ ,  $\Phi_0(x)$  et  $T_a(x)$  des équations (4) et (5) sont constants. Le modèle du capteur linéarisé et discrétisé se réduit donc à :

$$T_s^*(k) = z_1 T_c^*(k-L) + z_2 \Phi_0(k) + z_3 T_a^*(k) + z_4 D^*(k) \quad (11)$$

avec  $L$  est la partie entière de  $T^0 e / (k-L-1)$  et  $V_f / (TD) + 1$  est la représentation discrète du point d'équilibre  $T^0 e (t - V_f/D)$  et avec :

$$z_1 = e^{-\frac{V_f}{\tau D}}; z_2 = \frac{\eta_0}{K} (1 - z_1); z_3 = (1 - z_1); z_4 = \frac{V_f}{\tau D} (T_e^0 (t - \frac{V_f}{D}) - T_a^0 - \frac{\eta_0}{K}) e^{-\frac{V_f}{\tau D}}$$

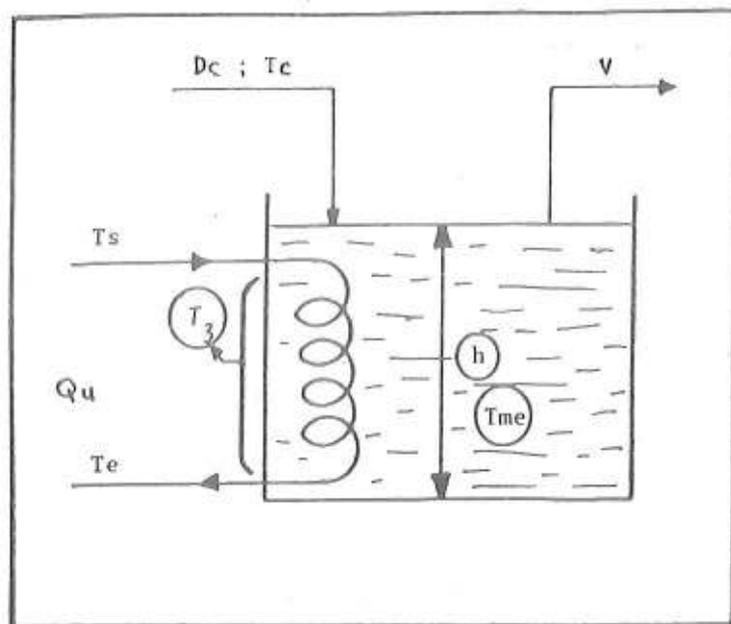


Fig : 1 Evaporateur

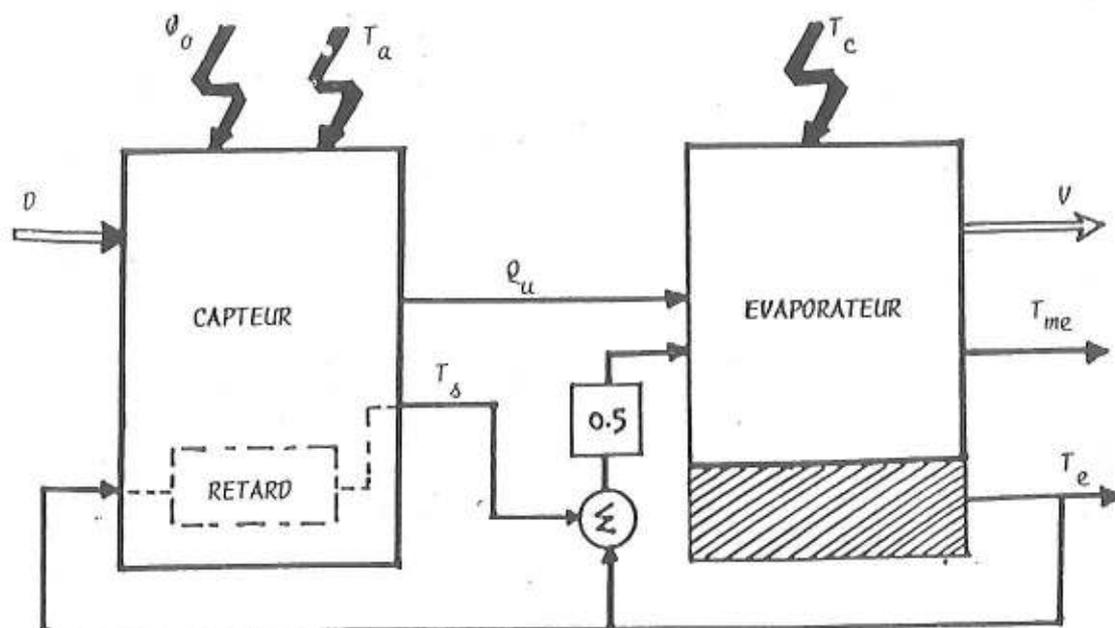


Fig : 2 Diagramme entrée - sortie de l'installation

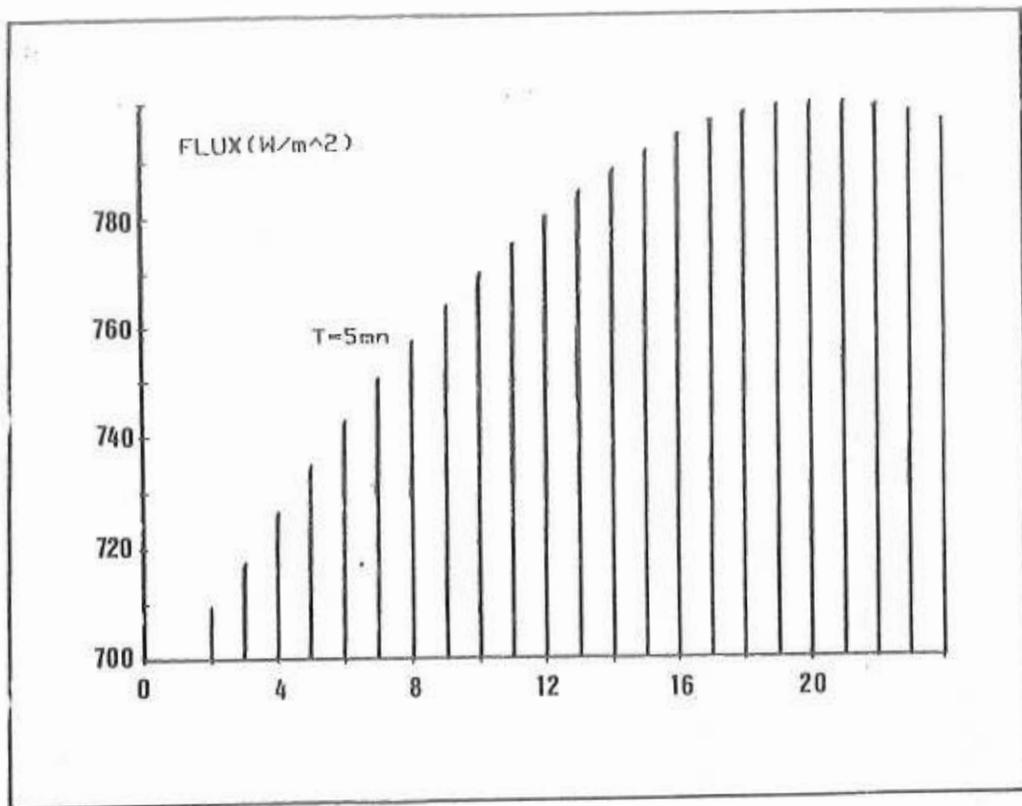


Fig : 3 Flux solaire ( échantillonnée ) ( 18 juillet )

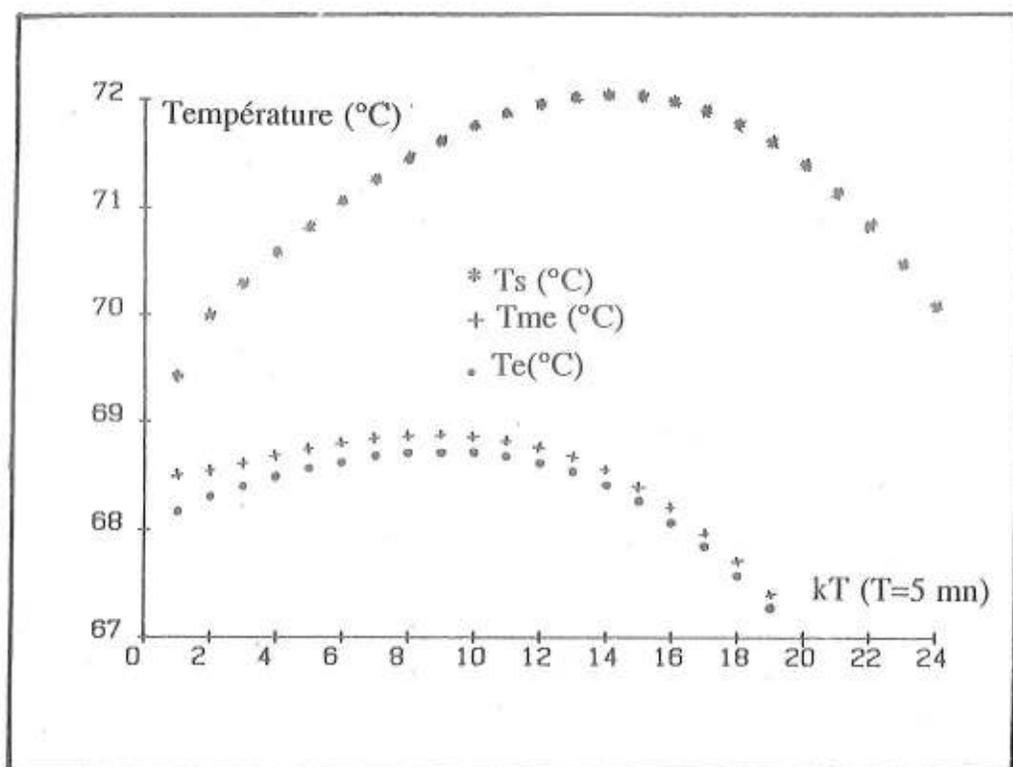


Fig : 4 Evolution des températures (échantillonnées) à débit de fluide constant

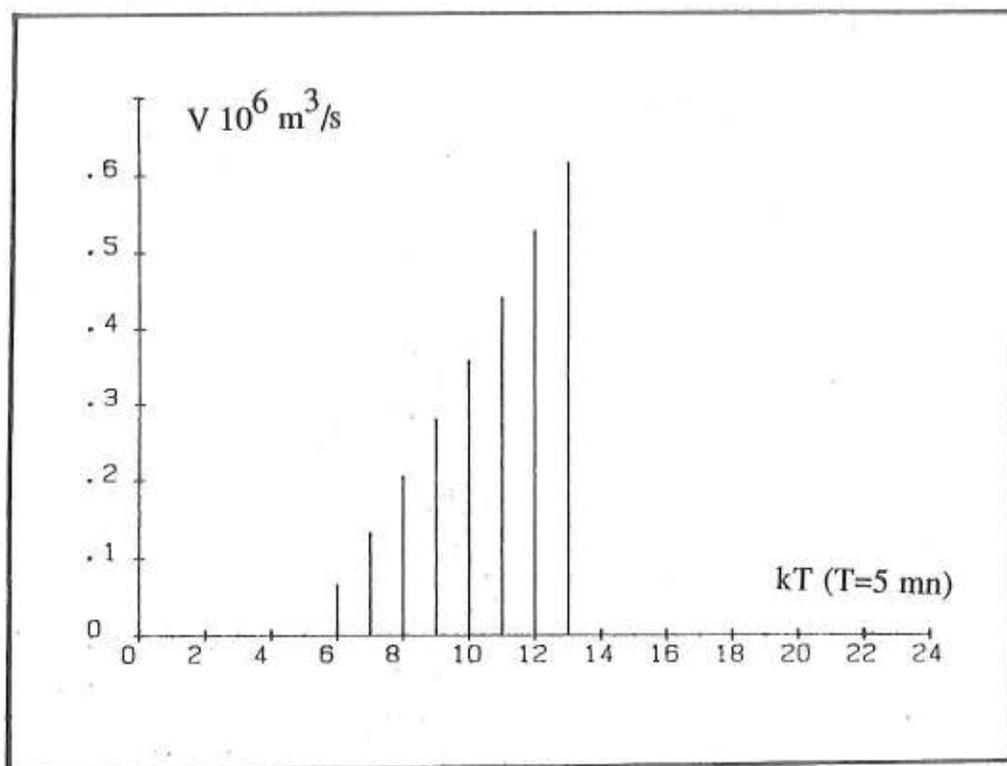


Fig : 5 Evolution du débit de vapeur récupérée (échantillonnée) à débit de fluide constant

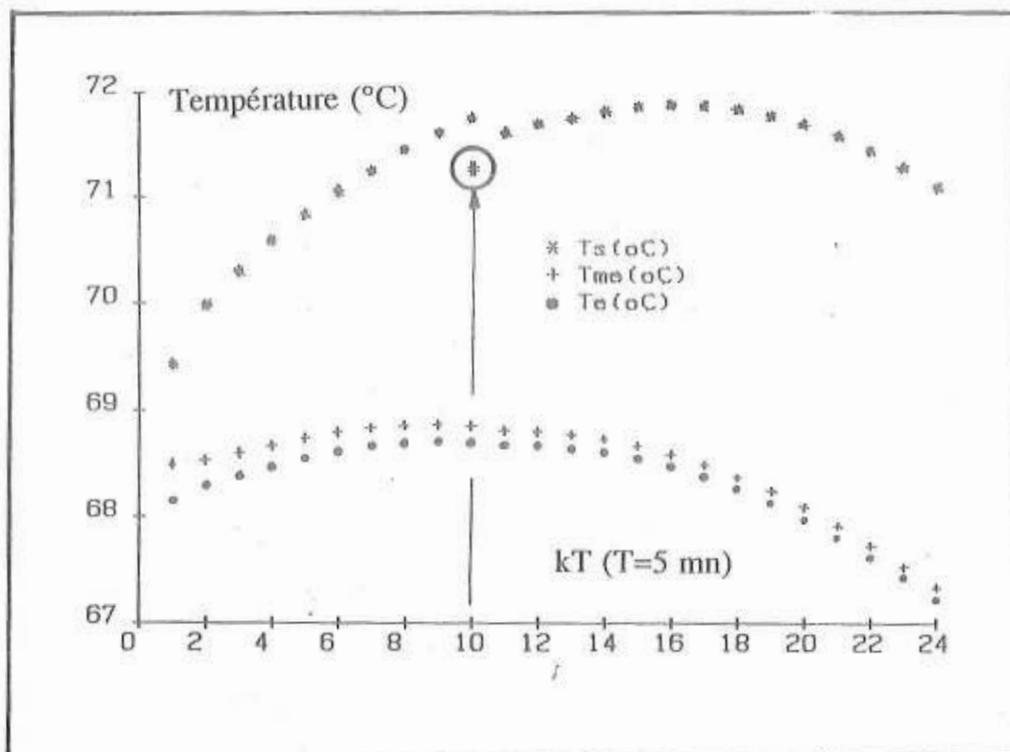


Fig : 6 Evolution des températures (échantillonnées) en fonction du temps avec une impulsion de débit de fluide

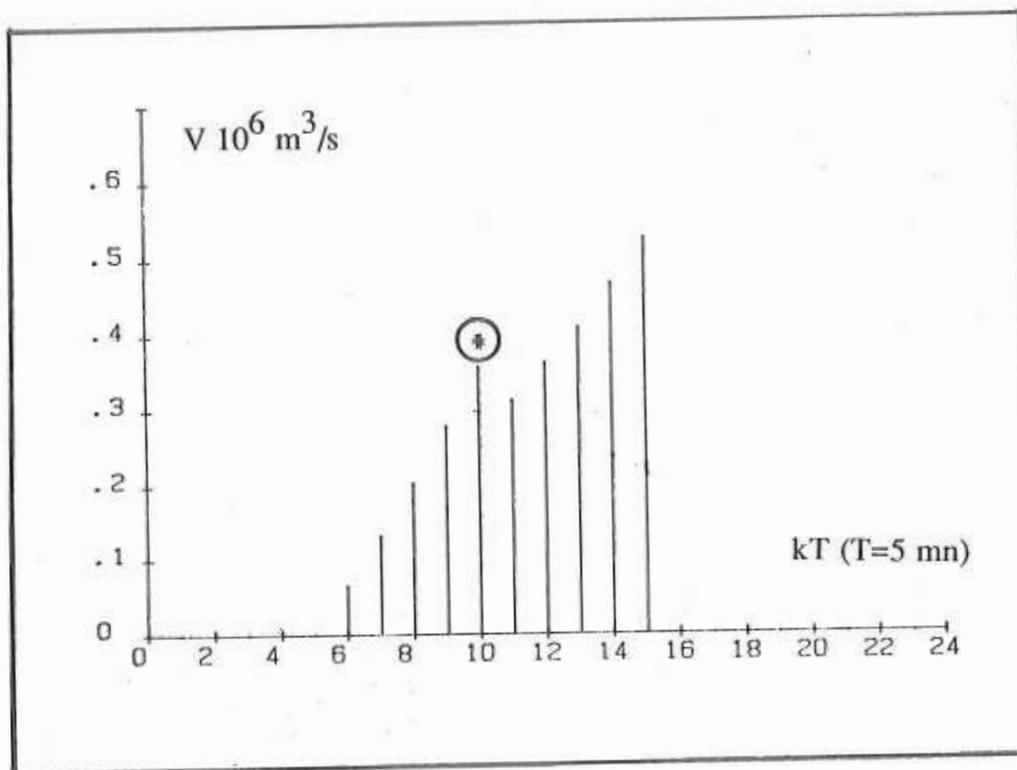


Fig : 7 Evolution du débit de vapeur récupérée (échantillonnée) en fonction du temps avec une impulsion de débit de fluide

### SIMULATION DU MODÈLE DE L'INSTALLATION /3/

Le modèle du système couplé capteur-évaporateur est formé par les deux équations suivantes :

$$T_{me}^*(k+1) = f_1 T_{me}^*(k) + f_2 D^*(k) + f_3 T_c^*(k-L) + f_4 \Phi_o^*(k) + f_5 T_a^*(k) \quad (12)$$

$$V^*(k) = g_1 T_{me}^*(k) + g_2 D^*(k) + g_3 T_c^*(k) + g_4 \Phi_o^*(k) + g_5 T_a^*(k) + g_6 T_c^*(k-L) \quad (13)$$

Les coefficients du modèle ( $f_i$  et  $g_i$ ) dépendent des constantes physiques et mécaniques du système ainsi que des conditions initiales (fonctionnement en régime permanent) à l'instant  $k$ . Le diagramme entrée-sortie est schématisé sur la figure 2 avec :

- l'entrée commandable est le débit du fluide caloporteur,
- les sorties renseignant sur l'état du système sont les températures à l'entrée et à la sortie du capteur et la température moyenne dans l'évaporateur.
- Les perturbations sont la température du solvant chargé, la température ambiante et le flux solaire global reçu sur un plan incliné par rapport à l'horizontal de  $34^\circ$  orienté sud.

Une simulation sur ordinateur a permis de prévoir l'influence des différents paramètres et plus particulièrement le débit du fluide caloporteur sur la production de l'installation.

Le flux solaire considéré dans ce cas est obtenu par application du modèle sinusoidal établi à partir des relevés météorologiques relatifs à la région de Gabès.

La figure 3 illustre les échantillons de ce flux calculés toutes les 5 minutes pour la journée du 18 juillet 1989. A débit de fluide caloporteur constant égal à  $50/3,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  les conditions initiales sont :

$$T^0_s = 69^\circ\text{C} ; T^0_e = 68^\circ\text{C} ; D^0 = 13,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} ; V^0 = 0 \text{ m}^3/\text{s} ; \Phi^0 = 700 \text{ W/m}^2 ;$$

$$T^0_a = 25^\circ\text{C} ; T^0_c = 68^\circ\text{C}.$$

La figure 4 schématise les températures à l'entrée et à la sortie du capteur et la température du solvant dans l'évaporateur. L'évolution du débit de vapeur d'hexane récupérée, dans ces conditions, est représenté sur la figure 5.

Dans les mêmes conditions, une application d'une impulsion de débit du fluide caloporteur d'amplitude  $10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$  au dixième échantillon a permis de prolonger le temps de production.

La figure 6 permet de voir l'influence d'une faible variation de débit du fluide caloporteur sur les températures  $T_e$ ,  $T_s$  et  $T_{me}$ . On remarque que l'augmentation du débit  $D$ , conduit à une diminution de la température  $T_s$ , et une augmentation de la quantité de vapeur (fig.7).

### COMMANDE DE L'INSTALLATION

Nous avons envisagé deux types de commande de l'unité d'évaporation solaire. Le premier du type proportionnel tient compte de l'écart entre les températures du liquide dans l'évaporateur et d'ébullition du solvant pur. Le deuxième algorithme est du type optimal, le critère étant de maximiser le débit de vapeur instantané.

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de ces algorithmes et on note /6/, en particulier une amélioration de la production de l'installation estimée à 77% dans le cas de la commande proportionnelle et de 300% dans le cas de la commande optimale.

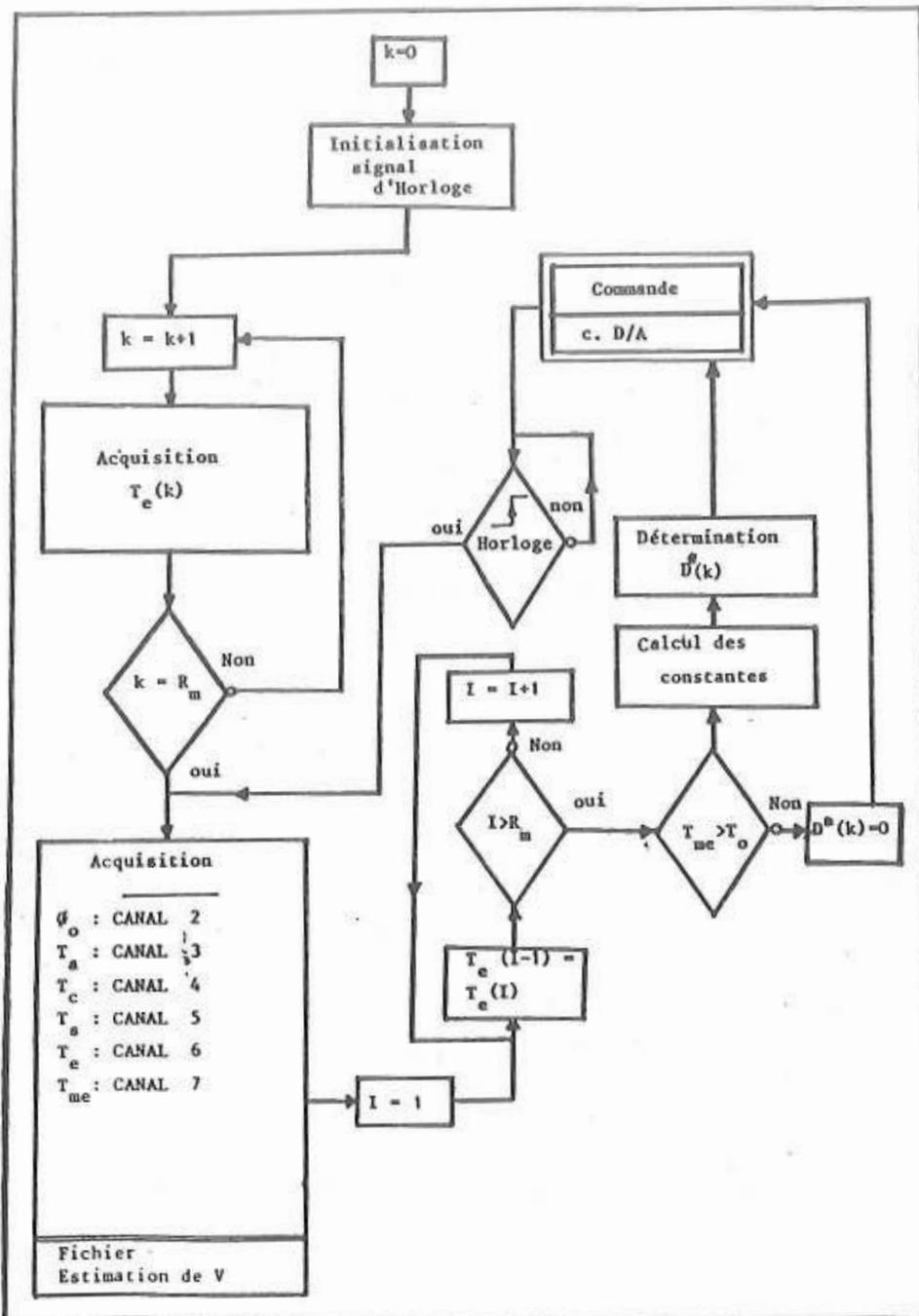


Fig : 8 Organigramme d'acquisition et de commande en temps réel

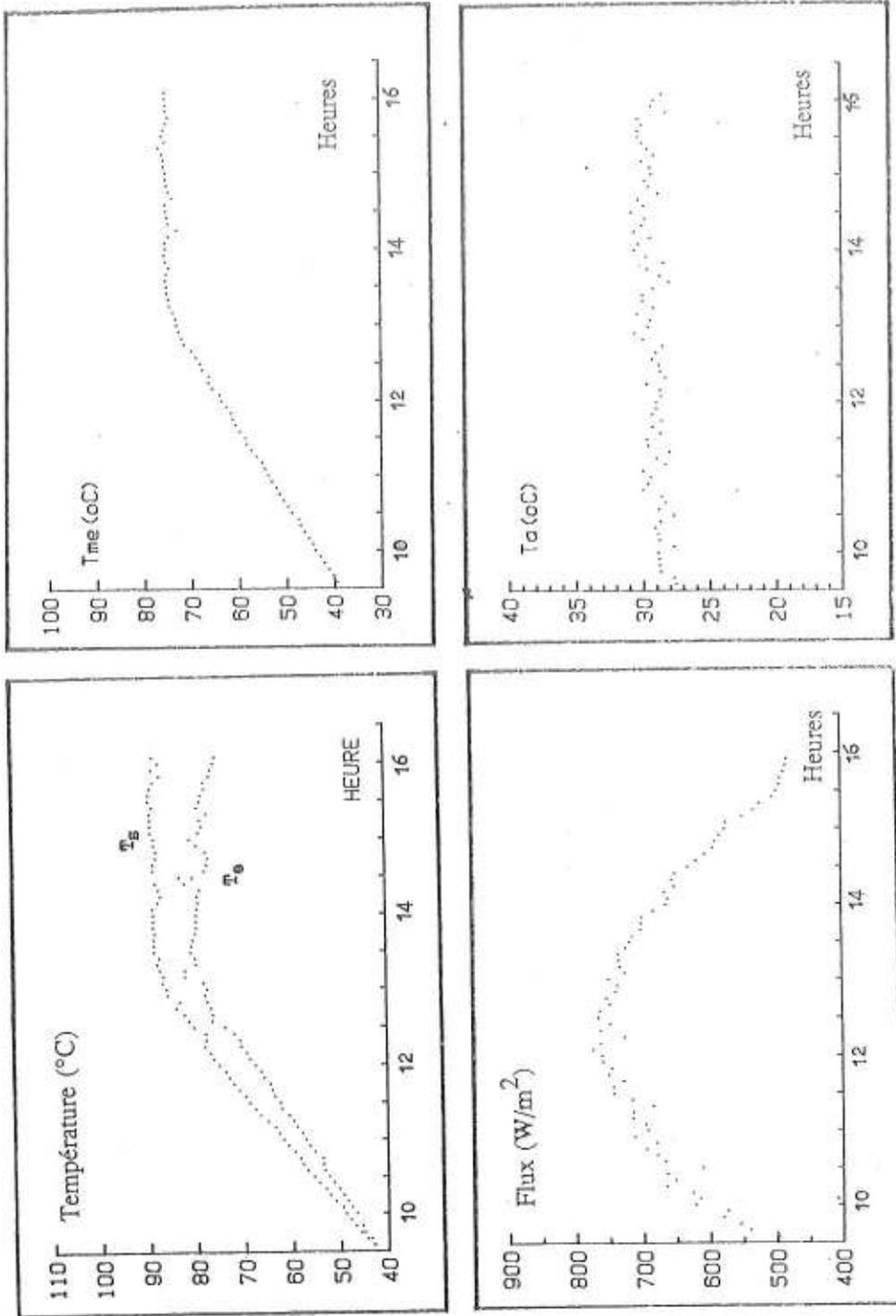


Fig 9: Evolution des différentes grandeurs pendant la journée du 19/9 (sans commande).

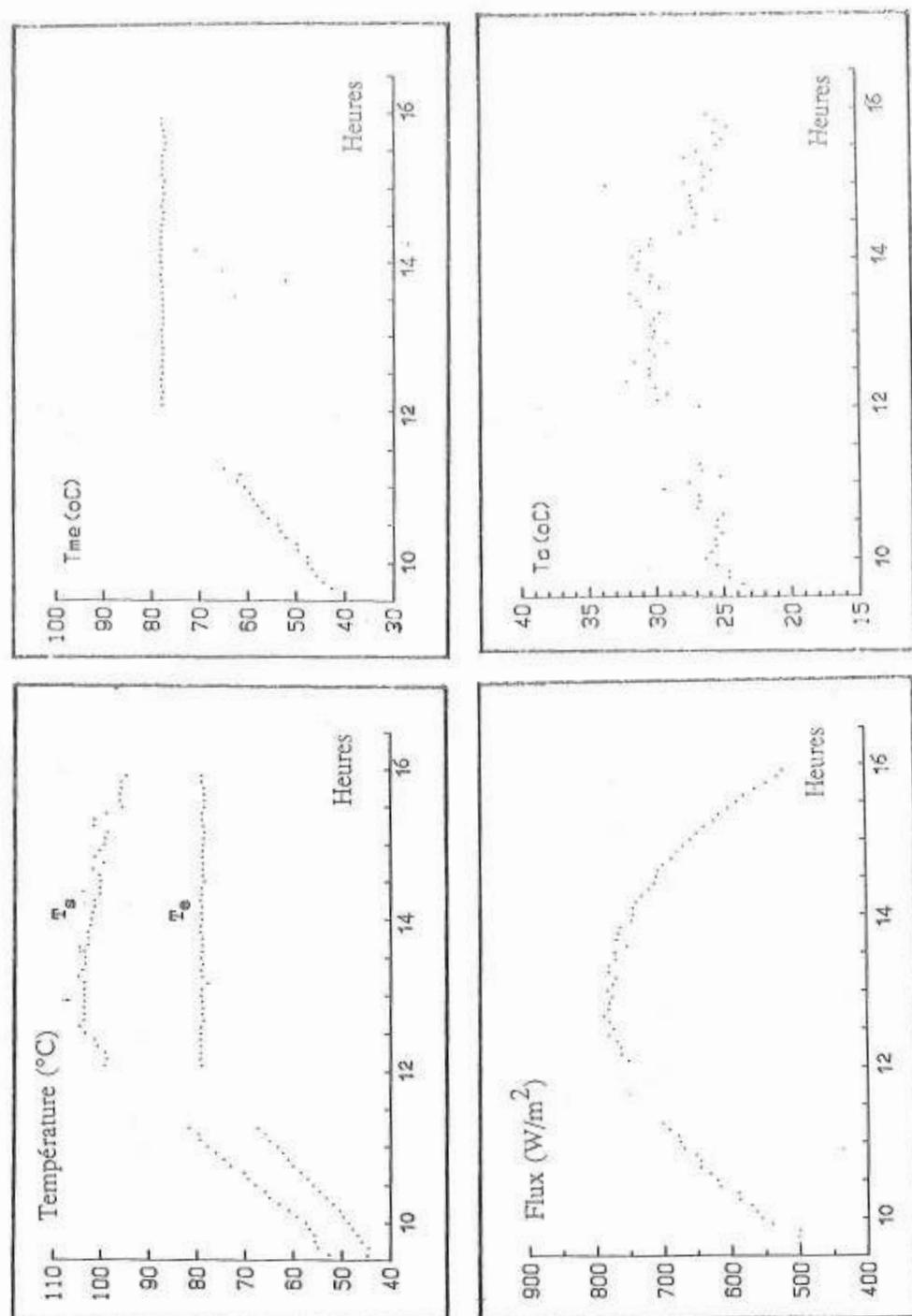


Fig. 10 : Evolution des différentes grandeurs pendant la journée du 23/9 (avec commande)

### Résultats expérimentaux

L'algorithme de commande a été implanté sur le processus réel. La période d'échantillonnage prise est égale à 1 mn. L'organigramme général de conduite de l'unité d'évaporation solaire est schématisé sur la figure 8.

Les figures 9 et 10 représentent les températures à l'entrée et la sortie de l'évaporateur ainsi que le flux solaire pour deux journées de conditions météorologiques comparables (19/9/1989 et 23/9/1989).

Le tableau 1 résume les résultats pour les deux journées précitées. Ce tableau laisse apparaître une amélioration de la production estimée à 380% et un gain en temps de production de 1h18mn.

Journée	Remarques	Début de production	Durée de Production	Quantité d'hexane Recupérée (L)
19/9	*Journée ensoleillée *Vent assez faible *Ta moyenne :29°C *Sans commande	12H51mn	03H04mn	25,50
23/9	*Journée ensoleillée *Vent assez faible *Ta moyenne :27°C *Avec commande	11H43mn	04H22mn	96,00

**TABEAU 1: Récapitulation des résultats**

### CONCLUSION

Le modèle physique proposé tient compte des bilans thermiques et de matière ainsi que des transferts thermiques se produisant aux niveaux des capteurs et de l'évaporateur.

Une linéarisation du modèle autour du point d'équilibre évoluant au cours du temps a été adoptée. La réalisation d'une boucle de régulation locale a permis, tout en assurant un niveau de liquide constant dans l'évaporateur, de réduire l'ordre du modèle.

La simulation de l'installation, y compris la boucle de régulation du niveau de solvant dans l'évaporateur, après discrétisation, a permis :

- \* d'observer l'évolution des différents paramètres tels que les températures à l'entrée et à la sortie du capteur, la température du liquide dans l'évaporateur ainsi que le débit de vapeur récupérée,
- \* de mettre en évidence l'importance du débit de fluide coloporteur sur le comportement du système.

Un algorithme du type optimal basé sur le modèle dynamique a donné de bons résultats compte tenu de la simulation numérique. Le critère choisi est du type intégral et représente la production journalière de l'unité d'évaporation solaire.

L'application de cet algorithme au processus réel a montré son efficacité et un gain important de la production de solvant.

## NOMENCLATURE

$A_c$ : aire de captation	(m <sup>2</sup> )
$A_d$ : section droite de l'évaporateur	(m <sup>2</sup> )
$A_e$ : aire d'échange	(m <sup>2</sup> )
$C_p$ : chaleur massique du fluide caloporteur	(W / kg°C)
$D$ : débit du fluide caloporteur	(m <sup>3</sup> / s)
$D_c$ : débit du solvant chargé	(m <sup>3</sup> / s)
$h$ : niveau du solvant dans l'évaporateur	(m)
$K$ : constante caractéristique du capteur	(W / m <sup>2</sup> °C)
$k$ : multiple de la période d'échantillonnage	
$Q_u$ : énergie utile	(W)
$T$ : période d'échantillonnage	(s)
$T_a$ : température ambiante	(°C)
$T_c$ : température du solvant chargé	(°C)
$T_e$ : température à l'entrée du capteur	(°C)
$T_{me}$ : température du liquide dans l'évaporateur	(°C)
$T_s$ : température à la sortie du capteur	(°C)
$T_o$ : température d'ébullition du solvant	(°C)
$T_3$ : température moyenne du fluide caloporteur	(°C)
$\Delta T_e$ : écart de température $\Delta T_e = T_{me} - T_o$	(°C)
$U$ : coefficient global d'échange	(W/m <sup>2</sup> °C)
$V$ : débit de vapeur récupéré	(m <sup>3</sup> /s)
$V_f$ : volume en fluide équivalent à l'insolateur	(m <sup>3</sup> )
$\Phi_o$ : flux solaire	(W/m <sup>2</sup> )
$\eta$ : rendement du capteur	(adim)
$\eta_o$ : rendement du capteur à $T = T_o$	(adim)
$\rho$ : masse volumique du solvant	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_c$ : masse volumique du fluide caloporteur	(kg/m <sup>3</sup> )
$\lambda$ : chaleur latente de vaporisation	(kJ/kg)

Indices

o : Régime permanent

\* : Fluctuations par rapport au régime permanent

**RÉFÉRENCES**

- 1 R.S BES, S. GABSI, J.C.MORA, M.BOUABDALLAH, Journal de la Société Chimique de Tunisie, 7, 25-36 (1982).
- 2 S.GABSI, A. EL MOUEFFAK, R.S. BES, J.C. MORA, Modelling Simulation and Control, ASME, 1 (13) pp : 1-15 (1988).
- 3 R. BEN ABDENNOUR, Modélisation, simulation et commande d'une unité d'évaporation solaire, Thèse 3<sup>ème</sup> Cycle, ENSET Tunis (12 Janvier 1987).
- 4 R.BEN ABDENNOUR, S. GABSI, M. KSOURI, 1<sup>er</sup> Colloque Inter-Arabe sur les systèmes électriques. Constantine- Algérie 19-21 Octobre 1986.
- 5 R.BEN ABDENNOUR, S. GABSI, M.BOUABDALLAH, M. KSOURI, Journées Tunisienne d'Electrotechnique et d'Automatique 86, Sfax, 9-11 Septembre 1986,47.1
- 6 S. GABSI, R. BEN ABDENNOUR, M. KSOURI, Workshop on Automatic Control, RABAT, 19-23 Janvier 1987.
- 7 R. BEN ABDENNOUR, S.GABSI, M.BOUABDALLAH, M.KSOURI, Journées Internationales de Thermique 87, LYON, 13-16 Novembre 1987.
- 8 C.DELORME, Ch. DELORME, Entropie, 26, 14 (1980).
- 9 J. LIFERMAN, Les système discrets, Masson, Paris, (1975).