

GENIE CHIMIQUE ET ENERGIE SOLAIRE :
DIMENSIONNEMENT ET ESTIMATION DES PERFORMANCES
D'UN EVAPORATEUR EXPLOITE AU FIL DU SOLEIL

R. BES*, S. GABSI*, J.C. MORA* et M. BOUABDALLAH**

* L.A. CNRS. 192. Institut de Génie Chimique - 31078 - TOULOUSE (France)

** Ecole Nationale d'Ingénieurs GABES (Tunisie)

RESUME : On étudie le couplage de capteurs solaires plans et d'évaporateurs afin de rendre compte du fonctionnement d'installations exploitées au fil du soleil.

Le développement actuel de la technologie des capteurs solaires plans permet d'envisager l'utilisation d'énergie solaire dans certaines opérations de l'industrie chimique. Ainsi les récupérations de solvants, lorsqu'elles peuvent être dissociées de la chaîne principale de production (1), sont susceptibles de se prêter à une telle adaptation. Ce faisant, l'exploitation au fil du soleil entraîne, dans certains cas, de meilleures efficacités thermiques. En contre partie, il s'agit de conduire une installation qui n'est jamais en régime de fonctionnement établi. Ces installations sont des systèmes aptes à capter et transformer l'énergie solaire, dans lesquels le flux solaire est la contrainte extérieure à l'origine du fonctionnement. Il est donc indispensable de connaître les variations de cette contrainte au cours du temps et les réactions du système à ces fluctuations thermiques.

La simple juxtaposition des modèles de fonctionnement des capteurs solaires et des évaporateurs conduit à des systèmes d'équations difficiles à exploiter du fait même du nombre élevé de paramètres. De plus, une optimisation purement mathématique ne fournit pas un moyen de décision suffisant. Dès lors, il est nécessaire de définir une méthodologie adaptée en s'appuyant sur les modèles classiques de génie chimique et sur les modèles d'utilisation des données météorologiques.

Des études théoriques et de faisabilité de récupération de solvants sont actuellement développées dans le cadre d'une collaboration entre l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabès et l'Institut du Génie Chimique de Toulouse. C'est dans ce contexte que se situe le présent travail.

I. POSITION DU PROBLEME

Un cas concret servira à fixer les idées. La récupération de produits lourds d'origine agricole est souvent réalisée par extraction à l'aide d'un solvant : par exemple, les résidus d'huile dans les grignons d'olive à l'aide d'hexane. Le solvant est récupéré par vaporisation et recyclé. Dans cette opération, la mise en œuvre de capteurs solaires plans doit être réalisée en plusieurs étapes (2) pour des raisons de niveau thermique et donc, d'investissement en surface de captation (figure 1).

Le problème qui se pose est le solvant : pour un débit donné de solvant, quelles sont les caractéristiques de l'installation et son mode de fonctionnement ?

Il s'agit en particulier de :

- définir les stockages ;
- déterminer les caractéristiques des capteurs solaires ;
- de choisir le type et le nombre d'évaporateurs ;
- de choisir le mode d'exploitation.

Ce type d'installation, de taille moyenne, est susceptible d'être utilisé dans divers pays ; il faut envisager son exploitation dans des sites solaires différents et donc, estimer ses performances pour des conditions climatiques différentes des conditions nominales qui ont été utilisées pour son dimensionnement.

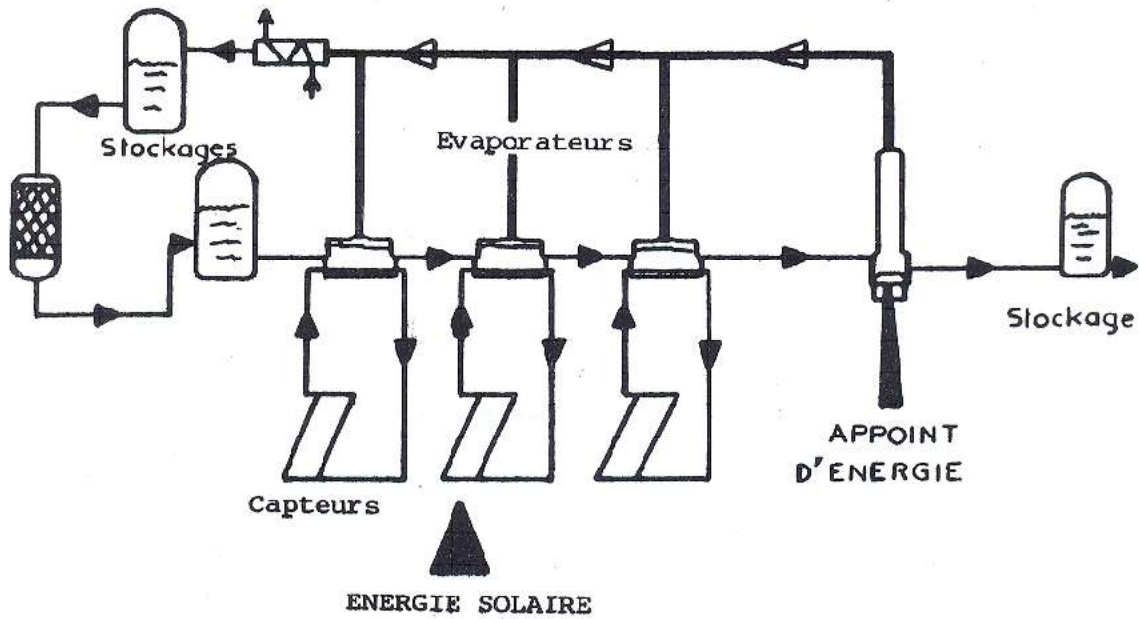


Figure 1: schéma de principe

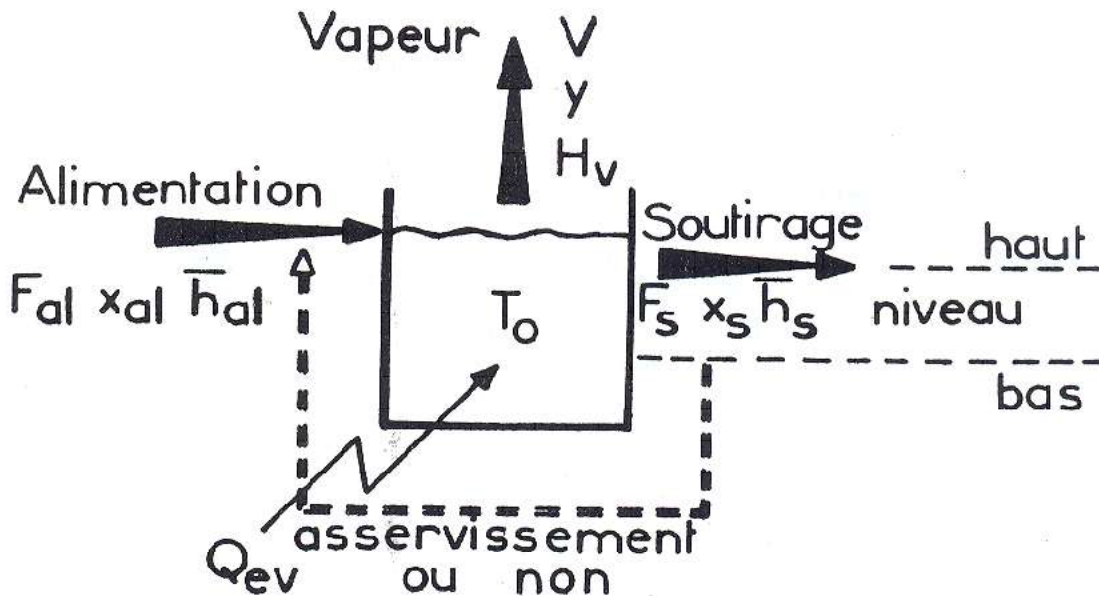


Figure 2: caractérisation de l'évaporateur

Pour simplifier, le cas d'un seul évaporateur sera envisagé dans ce qui suit. Il faut noter que la vaporisation directe dans le capteur solaire est écartée pour des raisons de risque d'encrassement ; de ce fait, l'évaporateur constitue un dispositif physique distinct dont le fonctionnement est caractérisé selon la figure 2. L'alimentation peut être asservie - ou non - au niveau de liquide dans l'appareil, sachant que plusieurs types de fonctionnement sont possibles selon les importances relatives du flux énergétique et du débit d'alimentation :

- a/ à volume constant : par déversement ;
- b/ à volume variable : entre les niveaux haut et bas ;
- c/ en régime de préchauffage : sans vaporisation ;
- d/ en régime de vaporisation.

Il faut rendre compte de ces modes de fonctionnement en relation directe avec le flux solaire incident.

2. MISE EN EQUATIONS

2.1 Capteurs solaires

Le flux utile issu d'un capteur solaire est traduit par la relation linéaire classique (équation 1) :

$$\text{flux utile} = \text{flux incident} - \text{pertes} = \varnothing_{\text{u}}$$

Il est à noter que le rendement d'un capteur plan est fortement dépendant du niveau de température (figure 3) (3).

2.2 Niveau énergétique :

Le niveau énergétique est déterminé par la température d'ébullition du solvant dans l'évaporateur. A pression donnée, cette température dépend de la nature du solvant et du soluté et des compositions relatives. Pour un solvant plus léger que le soluté, la température d'ébullition augmente en général avec la concentration en soluté (équations 2-3 et figure 4). Il apparaît ainsi des seuils de fonctionnement qui correspondent aux valeurs nulles du rendement des capteurs.

2.3 Température de fonctionnement

L'énergie utile pour l'évaporation est de la forme suivante (équation 4) :

$$Q_{\text{EV}} = \text{énergie fournie par le capteur} - \text{pertes (canalisations, évaporateur)}.$$

Les pertes thermiques sont reliées à l'aire de transfert avec l'extérieur, et à la différence de température moyenne entre le fluide et le milieu extérieur par l'équation 5 :

$$Q_{\text{P}} \propto (\text{aire d'échange}) \cdot (\text{différence de température})$$

Une estimation par valeur inférieure consiste à prendre pour température externe la température ambiante : $T_{\text{EX}} = T_{\text{A}}$.

L'équation 6 donne en conséquence l'expression du flux d'évaporation en fonction du flux solaire et des températures du capteur, de l'évaporateur et du milieu extérieur. La relation peut être réécrite sous une forme plus globale (équation 7).

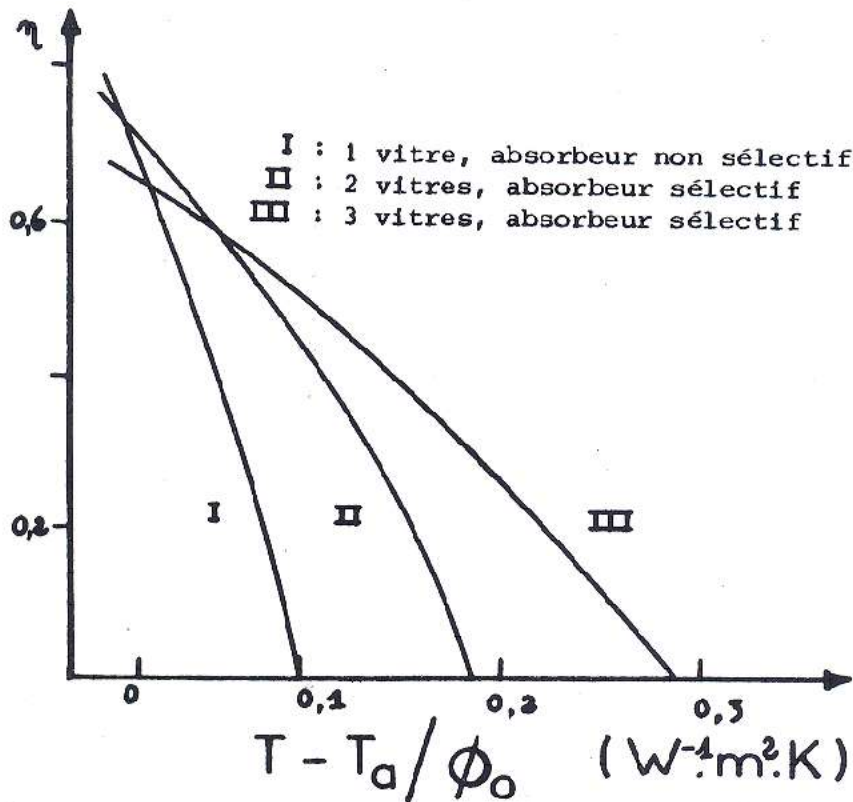


Figure 3 : Exemples de courbes de rendement de capteurs solaires plans

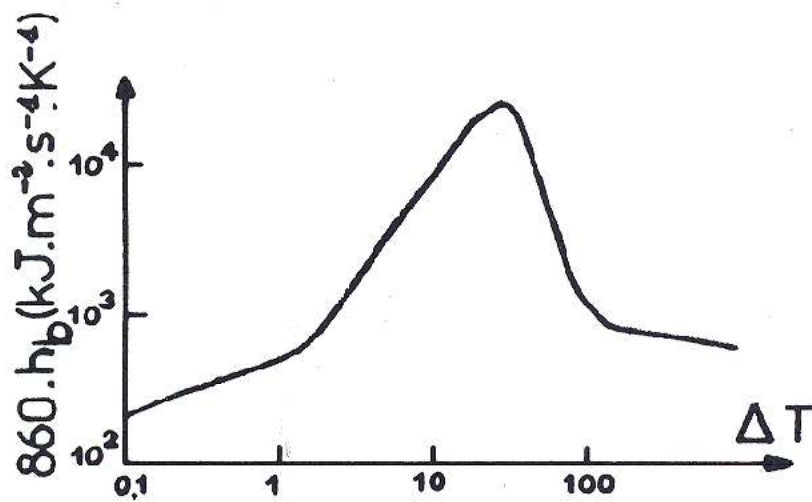


Figure 5 : Coefficient de transfert de chaleur pendant la vaporisation (cas de l'eau)

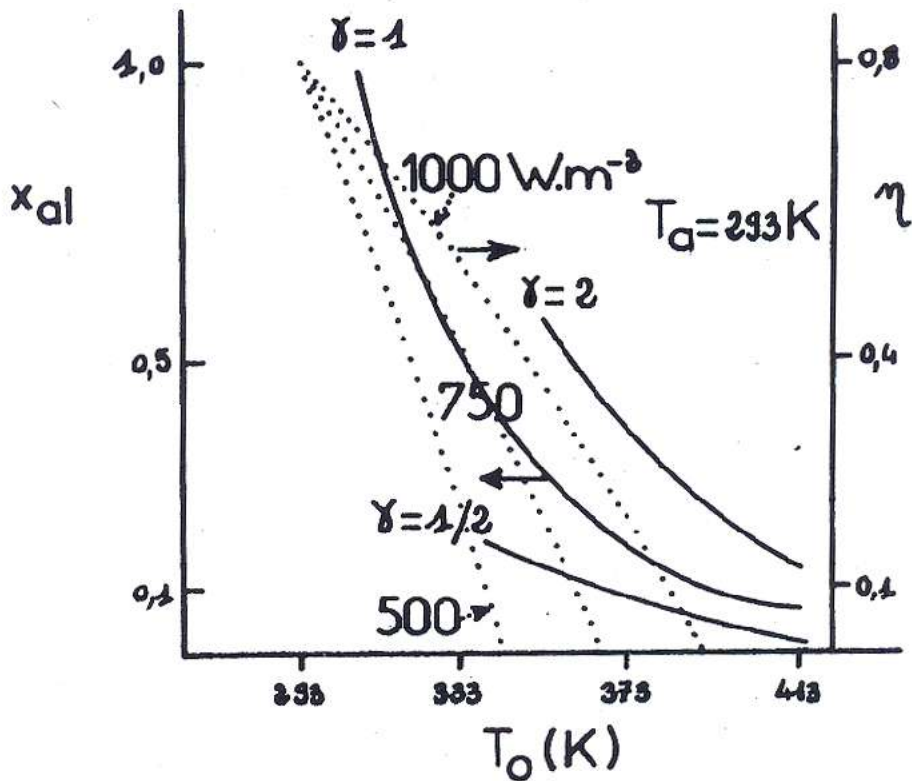


Figure 4: détermination du niveau énergétique
(mélange n-pentane-huile d'olive)

2.4 Bilans énergétiques sur l'évaporateur :

Les bilans sont déduits de la relation générale suivante :

$$\text{entrée} - \text{sortie} = \text{accumulation}$$

Ils sont établis conformément à la figure 2 et pour les trois phases de fonctionnement (équations 8 à 11) :

- préchauffage ;
- régime d'accumulation volumique ;
- régime à volume constant.

Les bilans énergétiques traduisent le fait que l'énergie d'origine solaire est utilisée pour :

- préchauffer l'alimentation, de la température d'entrée à la température d'ébullition ;
- vaporiser le solvant ;
- assurer la mise en température de la masse de liquide contenu dans l'évaporateur et de la masse de l'appareillage.

2.5 Transfert thermique :

La quantité de chaleur Q_{ev} est transmise au fluide sous l'effet d'une différence de température conformément aux relations 5 :

$$Q_{ev} = U A_0 (T - T_0)$$

Le coefficient d'échange global U résulte de quatre résistances de transfert (équation 12) :

- résistance côté fluide caloporteur ;
- résistance due à l'épaisseur de la paroi ;
- résistance d'encrassement ;
- résistance paroi-fluide en ébullition.

Cette dernière résistance varie en fonction de la différence de température, donc du flux de chaleur, conformément à la figure 5 (4).

2.6 Encrassement, vieillissement :

Le matériel solaire doit présenter une durée de vie importante car la rentabilité de l'installation en dépend directement. Ce matériel est en contre-partie soumis à un régime fluctuant et donc susceptible, en particulier les capteurs, de recevoir des chocs thermiques. Au cours du temps, il est donc souhaitable de prévoir une diminution des performances par suite d'encrassement des surfaces, de tassement des calorifuges, de rayure du vitrage... Pour ce faire, nous développons par ailleurs un modèle de vieillissement fondé sur une cinétique entropique en fonction du temps thermodynamique (5). La durée de vie du capteur est liée à la contrainte externe par une relation de la forme :

$$\tau - \tau_0 = \alpha \int_0^{\tau - \tau_0} \varphi_0^2(t) dt$$

qui permet de faire apparaître un accroissement de l'usure par suite du régime fluctuant :

$$\tau - \tau_0 = \alpha (\overline{\varphi_0^2} \Delta t + \overline{\varphi_0'^2} \Delta t)$$

$\overline{\varphi_0}$ est le flux solaire moyen ; $\overline{\varphi_0'^2}$ est la moyenne du carré des fluctuations par rapport à la valeur moyenne du flux et Δt la durée de vie du capteur dans l'échelle de temps astronomique.

3. MISE EN ŒUVRE DES EQUATIONS

Pour l'évaporation d'une quantité de solvant donnée durant une période fixée, il s'agit de déterminer la surface de captation nécessaire. Pour cela, il est indispensable de connaître le comportement de l'installation au cours de la journée. L'organigramme général du processus de détermination est schématisé par la figure 6. Pour l'instant, seules les estimations correspondant à l'ordre de grandeur et au dimensionnement aux conditions nominales ont été réalisées (2). L'estimation au pas de la journée à l'aide d'un modèle simplifié a été effectuée en supposant que l'ensoleillement est constitué par une succession de journées types, avec variation selon la fonction sinus du flux incident au cours de la journée (6-7).

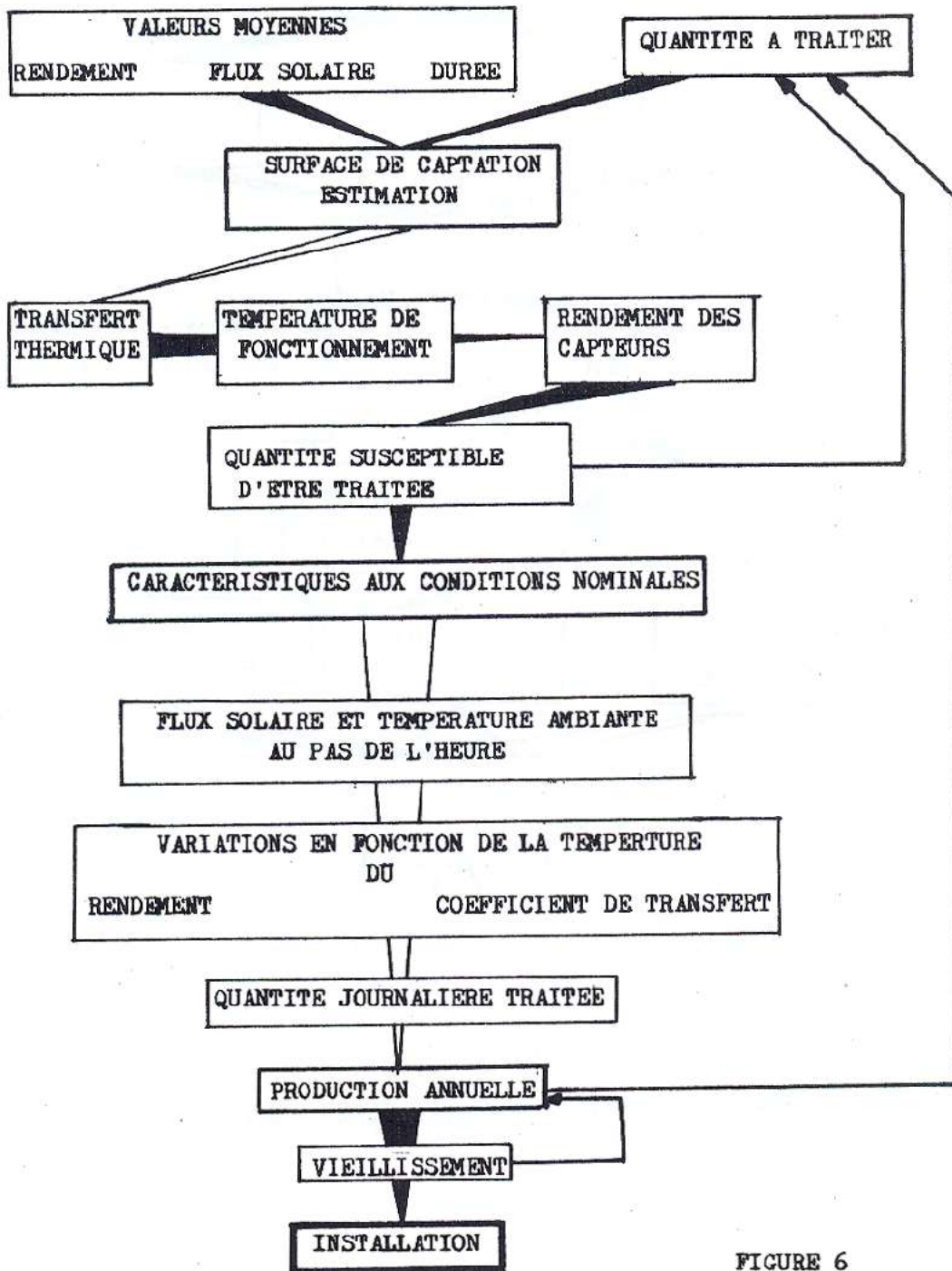


FIGURE 6

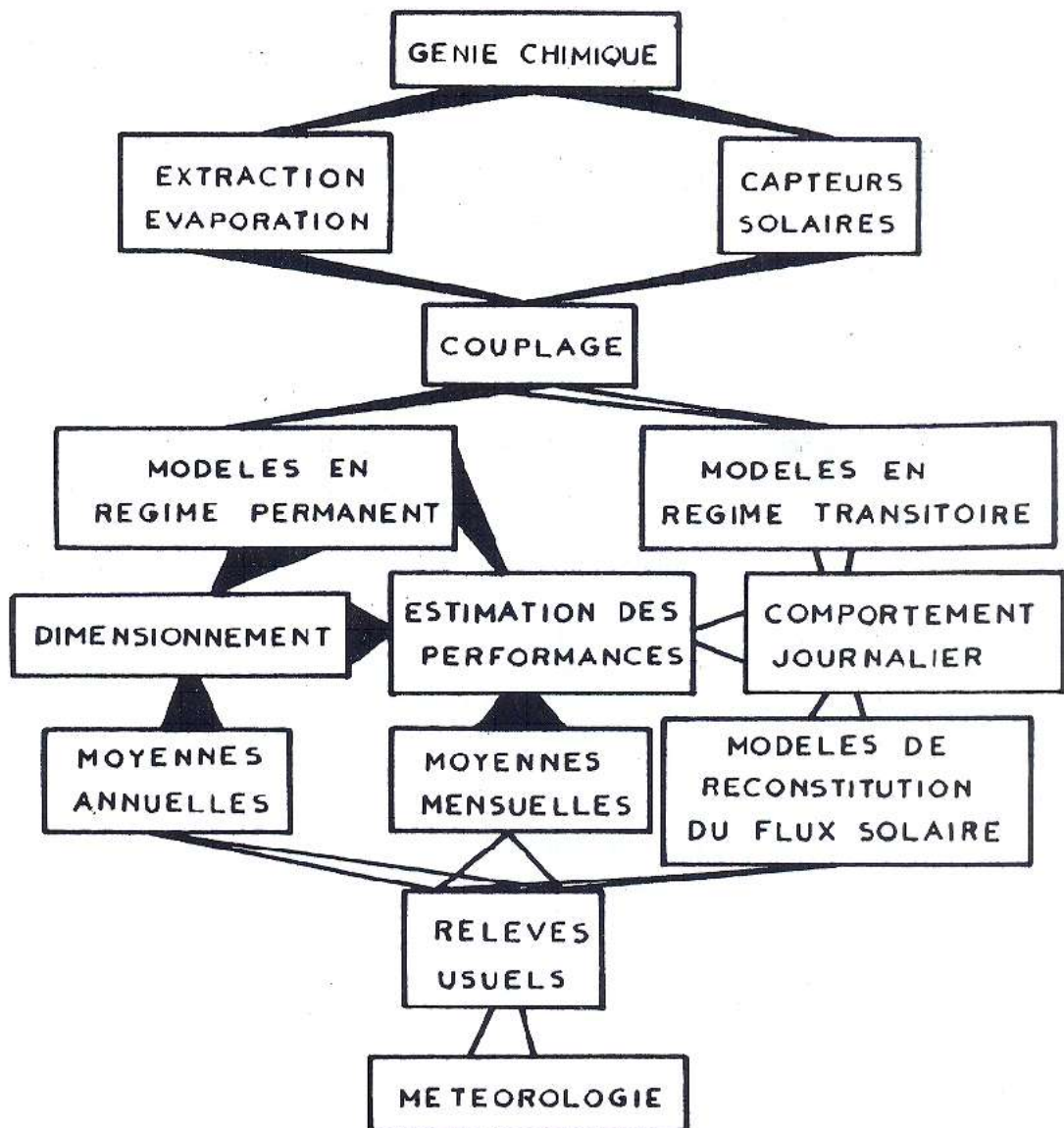


Figure 7: méthodologie générale

4. CONCLUSION

La forte dépendance du rendement des capteurs solaires plans en fonction de la température de fonctionnement rend nécessaire, pour une exploitation au fil du soleil, l'estimation des performances de l'installation au cours de la journée.

Le nombre de paramètres qui conditionnent le fonctionnement est tel qu'une optimisation globale conduit à des méthodes de calcul prohibitives et ne permet pas de conclure avec précision. Il est nécessaire de définir une méthodologie particulière conciliant l'analyse physique des processus et le traitement purement informatique des équations. Cette méthodologie nécessite une étude de type génie chimique liée à l'utilisation de données météorologiques (flux solaire, température ambiante... sur un site donné). La figure 7 résume l'essentiel du travail qui a été réalisé jusqu'à présent et le situe dans un contexte plus général. A l'examen de cette figure, il apparaît que les études à entreprendre ne peuvent être menées à bien que par une mise en commun des connaissances spécifiques de spécialistes du génie chimique et de spécialistes de la météorologie.

EQUATIONS

EQUATIONS

Capteurs plans

$$(1) \quad \phi_u = \phi_o - h (T - T_{ex})$$

Evaporateurs

$$(2) \quad \text{corps pur : } \text{Log } P = - \frac{\Lambda_v}{R \cdot T_o} + B$$

$$(3) \quad \text{mélange : } \text{Log } \frac{P}{xy} = - \frac{\Lambda_v}{R \cdot T_o} + B$$

Température de fonctionnement

$$(4) \quad Q_{ev} = \phi_u \cdot A_c - Q_{pt} - Q_{pe}$$

$$(5) \quad \left(\begin{array}{l} Q_{pt} = h_t \cdot A_t \cdot (T - T_{ex}^t) \\ Q_{pe} = h_e \cdot A_e \cdot (T - T_{ex}^e) \end{array} \right.$$

$$(6) \quad Q_{ev} = \left[\eta_o \cdot \phi_o - h (T - T_a) \right] A_c - h_t \cdot A_t \cdot (T - T_a) - h_e \cdot A_e \cdot (T_o - T_a)$$

$$(7) \quad Q_{ev} = \eta_o \cdot \phi_o \cdot A_c - h_g (T - T_a) - h_e \cdot A_e (T_o - T_a)$$

Bilans

Matière global

$$(8) \quad F_{al} - V - F_s = \frac{dN}{dt}$$

Matière par constituant

$$(9) \quad F_{al} \cdot x_{al} - V \cdot y - F_s \cdot x_s = \frac{d x_s N}{dt}$$

soluté : $y \neq 0$; solvant : $y \neq 1$

Energie

$$(10) \quad Q_{ev} + F_{al} \cdot \bar{h}_{al} - V \cdot H_v - F_s \cdot \bar{h}_s = \bar{h}_s \cdot \frac{dN}{dt} + M \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt}$$

Régimes de fonctionnement

$$(11) \quad \begin{cases} \text{(préchauffage et remplissage)} \\ \text{(} V = 0 \quad F_s = 0 \text{)} \\ \text{(à volume variable)} \\ \text{(} F_s = 0 \text{)} \\ \text{(à volume constant)} \\ \text{(} \frac{d.Nv}{dt} = 0 \text{)} \end{cases}$$

Transfert thermique

$$Q_{ev} = U \cdot A_o (T - T_o)$$

$$(12) \quad \frac{1}{U} = \frac{1}{h_f} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{\epsilon \cdot h_b}$$

NOTATIONS

- A_o surface d'évaporation (m^2)
- A_c surface de captation (m^2)
- A_e surface externe de l'évaporateur (m^2)
- A_t surface externe des canalisations de jonction (m^2)
- B constante (adim.)
- C_p chaleur spécifique de l'appareillage d'évaporation ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
- e épaisseur de la paroi de l'évaporateur (m)
- $F_a (F_s)$ débit d'alimentation (de soutirage) ($mole \cdot s^{-1}$)
- h coefficient ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
- h_b coefficient de transfert de chaleur, côté liquide en ébullition ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)
- h_e coefficient de transfert de chaleur de l'appareillage d'évaporation ($J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$)

- h_f coefficient de transfert de chaleur, côté fluide caloporteur ($J.m^{-2}.s^{-1}.K^{-1}$)
 h_g coefficient thermique global ($J.s^{-1}.K^{-1}$)
 h_t coefficient de transfert de chaleur des canalisations de jonction ($J.m^{-2}.s^{-1}.K^{-1}$)
 $\bar{h}_{al}(\bar{h}_s)$ enthalpie unitaire en phase liquide, de la solution d'alimentation (de soutirage) ($J.mole^{-1}$)
 H_v enthalpie unitaire en phase gazeuse ($J.mole^{-1}$)
 M masse de l'appareillage d'évaporation (kg)
 N nombre de moles (mole)
 P pression de fonctionnement (bar)
 Q_{ev} flux énergétique transmis à l'évaporateur ($J.s^{-1}$)
 $Q_{pe}(Q_{pt})$ flux de pertes énergétiques à l'évaporateur (dans les canalisations de jonction) ($J.s^{-1}$)
 R constante des gaz parfaits ($J.mole^{-1}.K^{-1}$)
 $t(t_0)$ temps astronomique (origine) (s)
 T température (K)
 T_a température ambiante (K)
 T_{ex} température extérieure (K)
 T_o^o température d'ébullition du solvant pur (K)
 T_o température d'ébullition du mélange (K)
 U coefficient global de transfert de chaleur ($J.m^{-2}.s^{-1}.K^{-1}$)
 v volume molaire de la solution ($m^3.mole^{-1}$)
 V débit de vapeur ($mole.s^{-1}$)
 x fraction molaire du solvant en phase liquide (adim.)
 $x_{al}(x_s)$ fraction molaire en phase liquide, de la solution d'alimentation (de soutirage) (adim.)
 y fraction molaire en phase gazeuse (adim.)
 α constante ($J^{-2}.m^4.s^2$)
 γ coefficient d'activité du solvant (état standard : corps pur) (adim.)
 ϵ coefficient d'encrassement (< 1) (adim.)
 η_o rendement du capteur pour $T = T_a$ (adim.)
 λ conductibilité thermique ($J.m^{-1}.s^{-1}.K^{-1}$)
 Λ_v chaleur latente de vaporisation du solvant ($J.mole^{-1}$)

- τ temps thermodynamique (s) ($\tau_0 = t_0$)
- $\phi_0 (\phi_u)$ densité de flux solaire incident (utile) ($W.m^{-2}$)
- $\phi_0 (t)$ densité de flux solaire en fonction du temps ($J.m^{-2}.s^{-1}$)
- $\phi'_0 (t)$ fluctuation du flux solaire par rapport à la moyenne $\bar{\phi}_0$
($J.m^{-2}.s^{-1}$)

BIBLIOGRAPHIE

- /1/ J.C. MORA, Symp. nat. sur l'Energie ; Gabès, Tunisie, Octobre 1981

BIBLIOGRAPHIE

1. J.C. MORA, Symp. nat. sur l'Energie ; Gabès, Tunisie, Octobre 1981.
2. M. BOUABDALLAH et J.C. MORA, 2nd World Cong. of Chem. Eng. ; Montréal, Canada, Octobre 1981.
3. J.A. DUFFIE et W.A. BECKMAN, Solar Energy Thermal Processes ; New York, J. Wiley, 1974.
4. R. GRIGORIG, Echangeurs de chaleur ; Paris-Liège, Beranger, 1965.
5. I. PRIGOGINE, Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles Paris-Liège, Dunod-Desoer, 1947.
6. C. CRAMPE, O. DESLANGLE, M. FAUGERON, H. KINNEL et D. SPIESSER, Projet de Fin d'Etudes ; I.G.C. Toulouse (Doc. interne), juin 1981.
7. M. BOUABDALLAH et J.C. MORA, 2^{ème} Cong. Med. Ing. Quim. ; Barcelone, Espagne, Novembre 1981.