

## MODELISATION D'UN SYSTEME REEL: CHAMP DE CAPTEURS DE LA CENTRALE SOLAIRE DE VIGNOLA (CORSE)

G. GIROLAMI\*, J. H. BALBI, N. BALBI, P. ORENGA et C. RIOLACCI

*Laboratoire d'Hélioénergétique, Université de Corse, Vignola, Route des Sanguinaires, 20000 Ajaccio (France)*

(Reçu le 17 juillet 1987; en version révisée le 18 février 1988)

### 1. Introduction

La Centrale Solaire de Vignola a été construite entre 1979 et 1981 pour servir essentiellement de champ d'expérimentation pour les techniques solaires.

Elle comprend principalement:

- des capteurs à concentration: environ 1200 m<sup>2</sup>;
- un réservoir de 40 m<sup>3</sup> pouvant servir à régulariser le fonctionnement de l'ensemble;
- deux groupes turbo-alternateurs de 50 kW chacun, fournissant de l'électricité à partir de l'énergie solaire incidente.

Ces divers sous-systèmes ont déjà fait l'objet d'un certain nombre d'articles [1 - 5], en particulier, le champ de capteur qui nous intéresse ici.

### 2. Position du problème

Le but de cet article est d'exposer le travail réalisé en complément de celui déjà décrit par ailleurs [1, 4] afin de pouvoir réaliser une commande prévisionnelle en temps réel du champ. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthodologie déjà décrite [4 - 12] qui se trouve être bien adaptée à notre problème, et qui suppose essentiellement que le système étudié est linéaire.

#### *Problèmes*

Il faut modéliser un ensemble qui est caractérisé par: 1176 m<sup>2</sup> de miroirs, organisé en 8 rangées de capteurs orientées est-ouest (Fig. 1) et dont on modifie la température de sortie en jouant sur le débit de fluide dans les épingles.

La structure du champ montre que l'on peut à priori, prévoir quelques problèmes parmi lesquels nous citerons:

- des temps de propagation différents suivant les trajets envisagés;
- des paramètres caractéristiques du système, variables suivant le débit dans les conduites.

---

\*L'auteur pour correspondance.

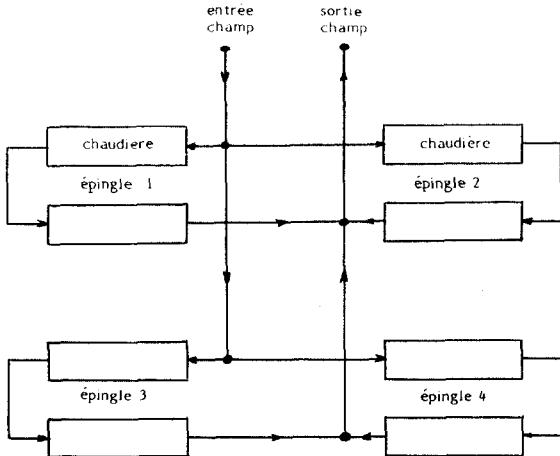


Fig. 1. Topologie du champ de capteur.

L'expérience montre que, si en pratique le champ est bien équilibré du point de vue des débits, il existe effectivement des différences de temps de propagation très nettes suivant les chemins parcourus par le fluide.

#### Organisation du modèle

Pour pouvoir espérer modéliser le champ, il est nécessaire de déterminer les variables d'entrée, de sortie et de commande. Une analyse rapide montre que l'on peut prendre:

*en entrée*: le flux solaire  $\phi$  ( $W/m^2$ ); la température d'entrée du champ  $T_e$  ( $^{\circ}C$ )

*en sortie*: la température de sortie du champ  $T_s$  ( $^{\circ}C$ )

*en commande*: le débit massique du champ  $Q$  ( $kg/s$ )

On pourrait ajouter la température ambiante  $T_a$  parmi les variables d'entrée, mais son influence est en général négligeable.

Il faut noter en effet, que pour le site choisi, la température ambiante varie dans des limites assez faibles. Une journée hivernale ensoleillée typique correspond à une température ambiante comprise entre 8 et 15  $^{\circ}C$  environ, au voisinage du midi solaire. De même, une journée estivale correspond à une température ambiante comprise en moyenne entre 20 et 30  $^{\circ}C$ , à cause de la présence de brise marine. Il est à noter de plus que le fluide caloporteur est en permanence aux environs de 220  $^{\circ}C$  (en moyenne 200 à 250  $^{\circ}C$ ) et que dans ces conditions, avoir une température ambiante de 15 ou 30  $^{\circ}C$  ne change pas grand chose, en particulier, du fait de la présence d'une importante isolation thermique sur les chaudières et les canalisations.

Il a donc fallu déterminer les lois de variation des différents paramètres du système en fonction de la variable de commande  $Q$  (débit massique).

Notons au passage que le système étudié n'est pas invariant dans le temps, puisque les paramètres qui le décrivent, dépendent de  $Q$ , lui-même fonction du temps. L'organisation du modèle est indiqué Fig. 2.

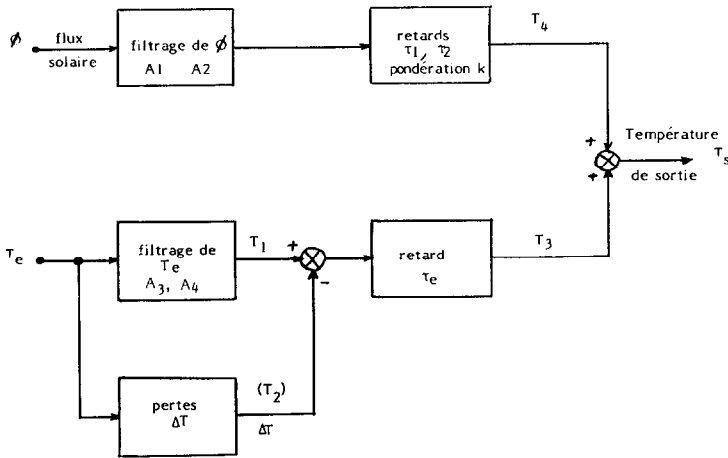


Fig. 2. Organisation du modèle.

### 3. Variation des paramètres en fonction du débit $Q$

La Fig. 2 indique les divers paramètres qui seront étudiés. Nous commencerons par l'un des plus simples à obtenir expérimentalement.

#### (A). Modélisation des pertes dans le champ

Ces pertes dépendent principalement du débit ( $Q$ ) et de la température d'entrée ( $T_e$ ). Pour les déterminer on peut procéder de manière statique de la façon suivante:

- le champ est défocalisé pour que le flux solaire ( $\phi$ ) n'intervienne pas;
- la température d'entrée ( $T_e$ ) est maintenue constante;
- le débit ( $Q$ ) est maintenu constant.

A l'équilibre, la différence  $T_s - T_e$ , traduit les pertes globales du système pour la valeur du débit ( $Q$ ) fixé.

Il est alors nécessaire de recommencer l'expérience pour diverses autres valeurs du débit ( $Q$ ) dans sa plage de variation nominale (1 à 2,5 kg/s par épingle) et pour diverses valeurs de la température d'entrée ( $T_e$ ) (entre 120 et 220 °C environ), afin d'avoir une vue complète du phénomène.

*Remarques pratiques:* le dépouillement des résultats conduit à adopter une loi approchée, qui peut être représentée par

$$\Delta T \approx (-0,62 + 1,07 \times 10^{-2} \cdot T_e) (9,4 + 14,9/Q^2)$$

avec  $\Delta T$  en °C,  $T_e$  en °C,  $Q$  en kg/s, et conduit à des écarts de  $\pm 1,5$  °C avec les mesures réelles.

Le Tableau 1 donne les valeurs mesurées et calculées dans diverses expériences et la Fig. 3 un tracé de  $Q$ ,  $T_e$  et  $T_s$  expérimental qui permet de mesurer les pertes réelles.

TABLEAU 1

Pertes ( $\Delta T$ ) en fonction de  $T_e$  et  $Q^a$ 

| $T_e = ^\circ\text{C}$<br>$Q = \text{kg/s}$ | $\Delta T$ mesuré<br>( $^\circ\text{C}$ ) | $\Delta T$ calculé<br>( $^\circ\text{C}$ ) |
|---------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 93,5 $^\circ\text{C}$<br>2,11 kg/s          | 5,8                                       | 4,8                                        |
| 100,4 $^\circ\text{C}$<br>1,46 kg/s         | 8,7                                       | 7,4                                        |
| 102,2 $^\circ\text{C}$<br>0,9 kg/s          | 14,8                                      | 13,2                                       |
| 103,5 $^\circ\text{C}$<br>1,42 kg/s         | 9,8                                       | 8,2                                        |
| 120,8 $^\circ\text{C}$<br>2,5 kg/s          | 9                                         | 7,9                                        |
| 128,8 $^\circ\text{C}$<br>1,66 kg/s         | 13,5                                      | 11,2                                       |
| 151,6 $^\circ\text{C}$<br>1,050 kg/s        | 24,4                                      | 23                                         |
| 154,6 $^\circ\text{C}$<br>1,43 kg/s         | 18,3                                      | 17,3                                       |
| 157,7 $^\circ\text{C}$<br>2,07 kg/s         | 13,8                                      | 13,7                                       |
| 157,8 $^\circ\text{C}$<br>0,87 kg/s         | 31,2                                      | 31,1                                       |
| 160 $^\circ\text{C}$<br>1,45 kg/s           | 18                                        | 18                                         |
| 167,2 $^\circ\text{C}$<br>1,4 kg/s          | 21,4                                      | 19,9                                       |
| 171,3 $^\circ\text{C}$<br>2,22 kg/s         | 13                                        | 15                                         |
| 191,2 $^\circ\text{C}$<br>1,66 kg/s         | 25                                        | 21,1                                       |
| 203,8 $^\circ\text{C}$<br>1 kg/s            | 37                                        | 37,9                                       |
| 213,5 $^\circ\text{C}$<br>1,36 kg/s         | 30,1                                      | 29                                         |
| 217,7 $^\circ\text{C}$<br>2,1 kg/s          | 20,5                                      | 21,8                                       |

$$^a \Delta T = (-0,62 + 1,07 \times 10^{-2} \cdot T_e) (9,4 + 14,9/Q^2)$$

*(B) Filtrage des variations de la température d'entrée  $T_e$*

La température d'entrée ( $T_e$ ) du champ de capteurs est une donnée très importante pour la détermination de la température de sortie.

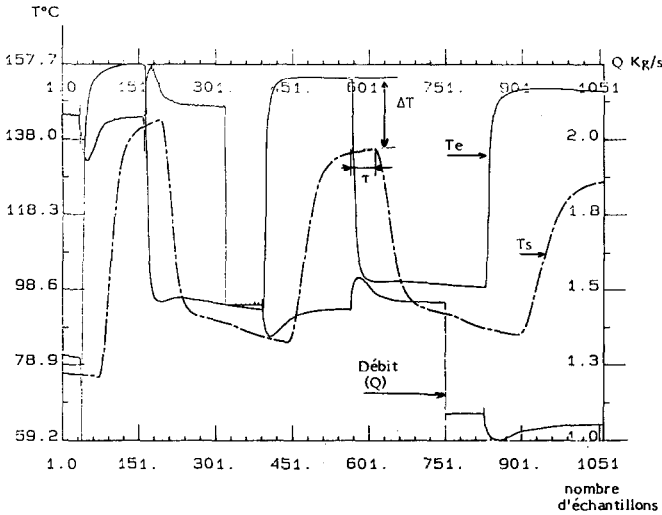


Fig. 3. Système défocalisé. Détermination des pertes:  $\Delta T$ , du retard:  $\tau_e$ .

Dans le cas où le champ est rebouclé sur le réservoir de stockage, on observe qu'en pratique  $T_e$  varie très lentement dans le temps.

Il n'en est pas de même quand les groupes turbo-alternateurs sont en service, surtout lors des phases de démarrage. On observe alors les variations rapides et importantes de  $T_e$  dont il faut tenir compte.

La Fig. 3 montre la réponse du champ à une telle sollicitation, et fait apparaître deux effets distincts

- un filtrage du signal d'entrée ( $T_e$ )
- un retard apporté par le système ( $\tau$ ).

### (1) Analyse du filtrage

Nous avons supposé que le système pouvait être décrit par une équation différentielle de la forme:

$$T_1'' + (A_3 + A_4)T_1' + A_3A_4T_1 = A_3A_4T_e$$

qui correspond à un filtre passe-bas du 2<sup>o</sup> ordre, dont les valeurs propres sont  $A_3$  et  $A_4$ .

Il est à noter que nous n'utiliserons pas la notion de fonction de transfert (en Laplace) car en pratique  $A_3$  et  $A_4$  dépendent du temps. Nous avons donc dû, comme pour le cas des pertes procéder à diverses expériences pour déterminer leurs lois de variations en fonction de  $Q$ .

La procédure expérimentale est sensiblement la même que celle utilisée pour modéliser les pertes.

- système défocalisé;
- débit constant;
- température d'entrée constante;
- une fois l'équilibre établi, on crée un échelon de température en entrée.

L'analyse de  $T_s$  permet alors au moyen d'une procédure d'optimisation (méthode de gradient) d'obtenir les coefficients  $A_3$  et  $A_4$  pour le débit donné. On peut alors, en modifiant  $Q$ , obtenir les variations de  $A_3$  et  $A_4$  indiqués à la Fig. 4.

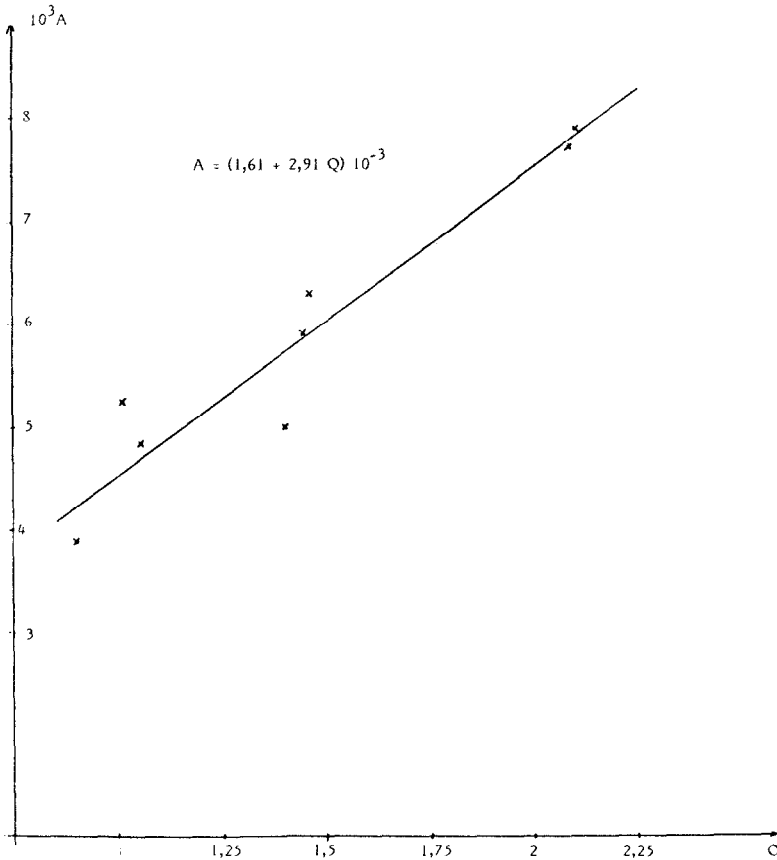


Fig. 4. Evolution des valeurs propres  $A_3$  et  $A_4$  en fonction du débit  $Q - A = A_3 = A_4$ .

**Résultats pratiques:** On observe que le système est bien décrit en prenant des valeurs propres indépendantes de  $T_e$  et obéissant à la loi:

$$A_3 = A_4 = (1,61 + 2,91 Q) 10^{-3}$$

La Fig. 5 montre la correspondance courbe réelle/courbe calculée dans le cas  $Q \neq 1,45$  kg/s.

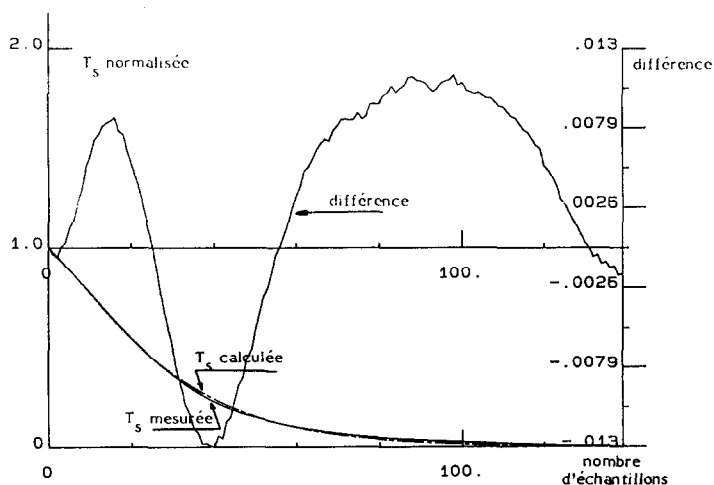


Fig. 5. Approximation de la réponse à un échelon de température d'entrée  $T_e$ .

La courbe expérimentale,  $T_s$ , a été normée entre 0 et 1 pour la détermination pratique des exposants.

### (2) Analyse du retard $\tau_e$

Les expériences précédentes permettent aussi d'obtenir les valeurs de  $\tau_e$ , retard entre l'entrée et la sortie du champ, en fonction de  $Q$ . La dépendance expérimentale peut être approximée par la loi:  $\tau_e = (-5 + 74/Q)$  en nombre d'échantillons de retard (10 s par échantillon).

La Fig. 6 montre la répartition des valeurs de  $\tau_e$  en fonction  $Q$ .

La connaissance de  $\tau_e$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,  $\Delta T$ , nous permet de calculer une estimation de  $T_s$  dans le cas d'un système défocalisé. Un tel résultat est donné Fig. 7.

### (C) Modélisation de l'influence du flux solaire ( $\phi$ )

Le flux solaire est évidemment la variable d'entrée dont la connaissance est la plus importante pour l'évolution du système.

Le processus de détermination des paramètres essentiels est tout à fait semblable à celui utilisé pour traiter  $T_e$ . On suppose que:

- la température d'entrée ( $T_e$ ) est constante;
- le débit ( $Q$ ) est constant;
- le flux solaire ( $\phi$ ) est stable.

Quand le système a atteint son état d'équilibre, on procède à une défocalisation c'est-à-dire à un échelon de flux.

L'enregistrement des données (Fig. 8) montre que la réponse du système est plus complexe que précédemment, et incite à chercher la solution sous forme de superposition à deux échelons d'amplitude  $k$  et  $1 - k$  décalés dans le temps. On suppose donc que  $T_4$  vérifie une loi de la forme.

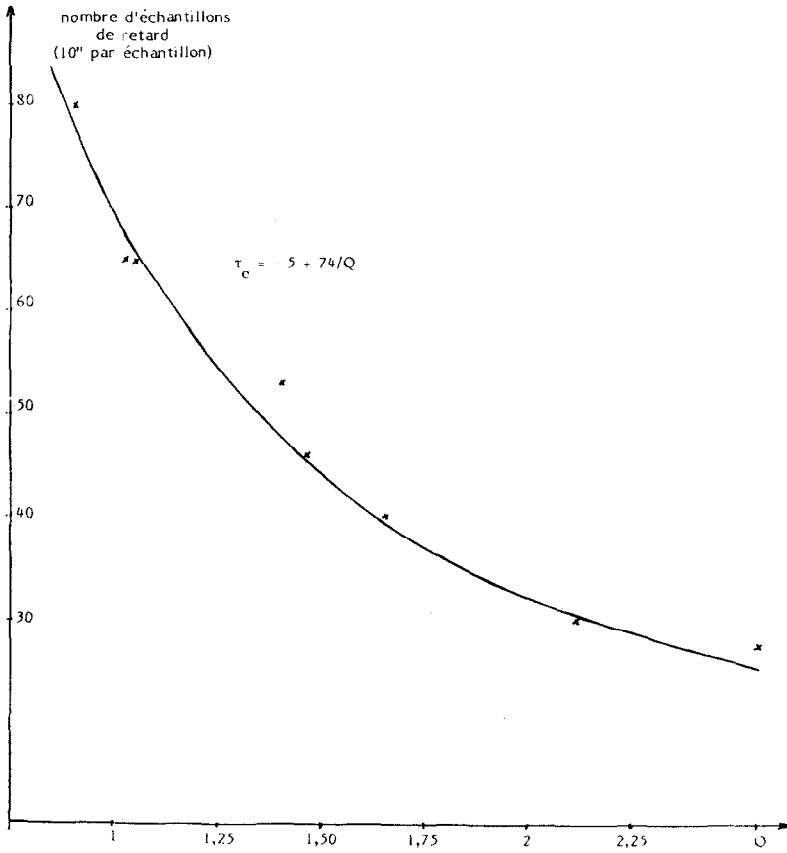


Fig. 6. Evolution de  $\tau_e$  en fonction du débit  $Q$ .

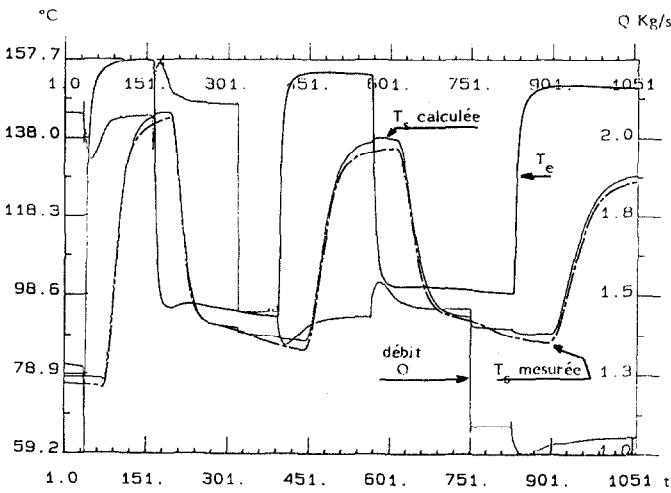


Fig. 7. Système défocalisé: comparaison  $T_s$  mesurée -  $T_s$  calculée.



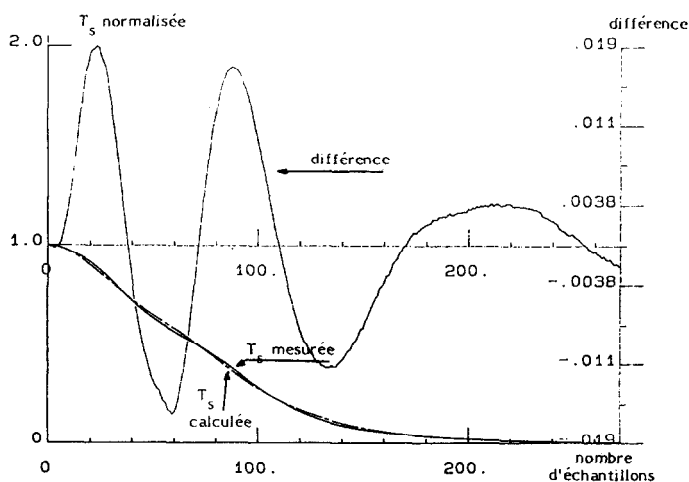


Fig. 8. Approximation de la réponse à un échelon de flux  $\phi$ .

$$T_4'' + (A_1 + A_2)T_4' + A_1A_2T_4 = \alpha(k \cdot \phi(t - \tau_1) + (1 - k) \cdot \phi(t - \tau_2))$$

dans laquelle  $A_1$  et  $A_2$  sont les valeurs propres du système,  $k$  un coefficient de pondération  $0 \leq k \leq 1$ ,  $\tau_1$  le retard entre l'excitation et la 1ère partie de la réponse,  $\tau_2$  le retard entre l'excitation et la 2ème partie de la réponse, and  $\alpha$  une constante tenant compte du rendement optique des miroirs.

La Fig. 9, donne l'évolution de  $A_1$ ,  $A_2$  en fonction de  $Q$ . On peut de même tracer  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $k$  et obtenir ainsi les lois approchées:

$$A_1 = (-0,8 + 5,3 \cdot Q)10^{-3}$$

$$A_2 = (-3,75 + 9,75 \cdot Q)10^{-3}$$

$$k = 0,5 + 0,3/Q$$

$$\tau_1 = (0,5 + 0,24/Q)$$

$$\tau_2 = (-1,5 + 107/Q)$$

#### 4. Résultats de simulation

Le modèle a été testé sur un grand nombre de journées réelles de fonctionnement. Le programme de calcul tient compte de la valeur utile du flux solaire, c'est-à-dire du flux direct, corrigé en fonction de l'heure solaire vraie, du jour de l'année, et des ombres portées sur les miroirs par les dispositifs de commande des chaudières.

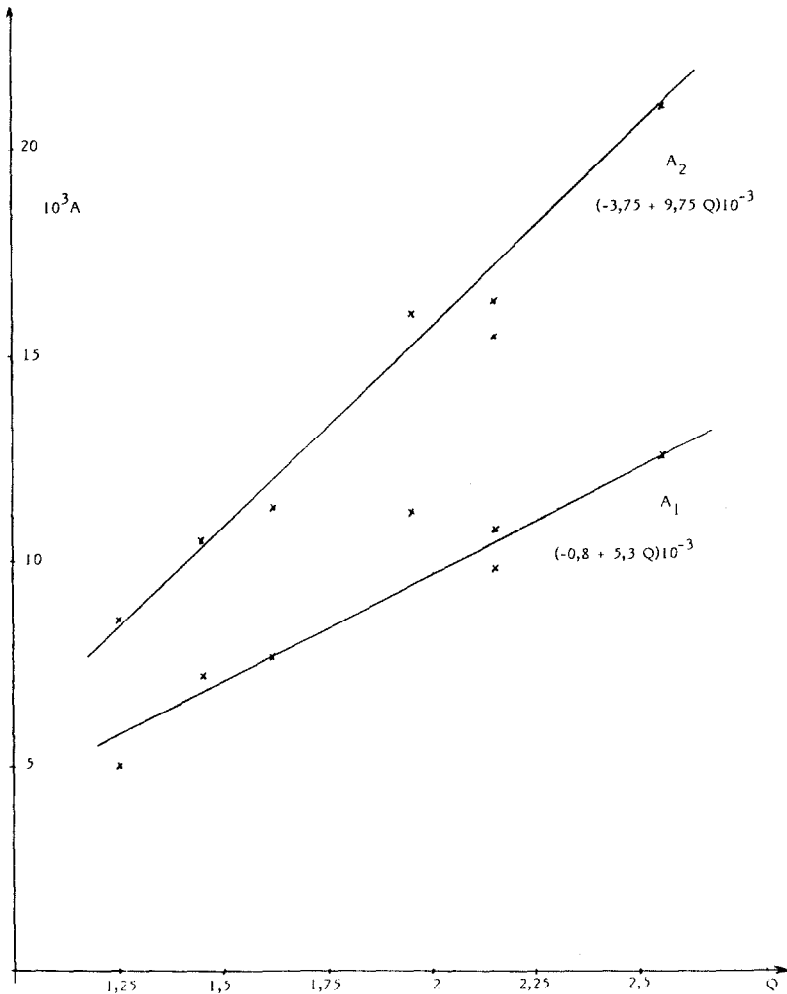


Fig. 9. Evolution des valeurs propres  $A_1$  et  $A_2$  (filtrage de  $\phi$ ) en fonction du débit  $Q$ .

Les Figs. 10 et 11 indiquent en fonction du temps  $T_e$ ,  $T_s$ ,  $Q$ ,  $\phi$ . Les résultats obtenus permettent de constater que la correspondance: réalité-simulation est bonne et permettent donc de prévoir en fonction des données antérieures, la température de sortie en un instant donné. L'écart maximum est en général de  $\pm 2$  °C avec parfois une différence un peu plus grande lors d'une variation importante et brutale du débit (Figs. 12 - 15). Notons que lors du fonctionnement normal du système il est très rare que de telles fluctuations du débit se produisent, car le système fonctionne en régulateur (on veut par exemple que  $T_s = \text{cte}$ ) ce qui se traduit par des variations lentes de  $Q$  en fonction du temps, ou bien on travaille systématiquement à  $Q = \text{cte}$  en laissant évoluer  $T_s$ .

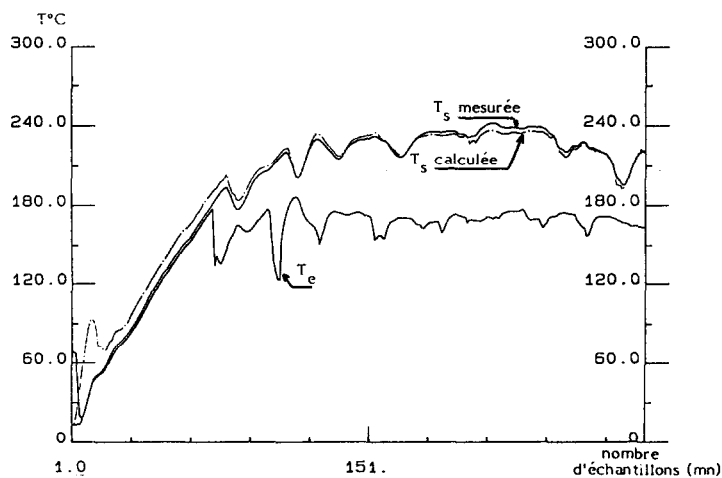


Fig. 10. Comparaison modèle-expérience.

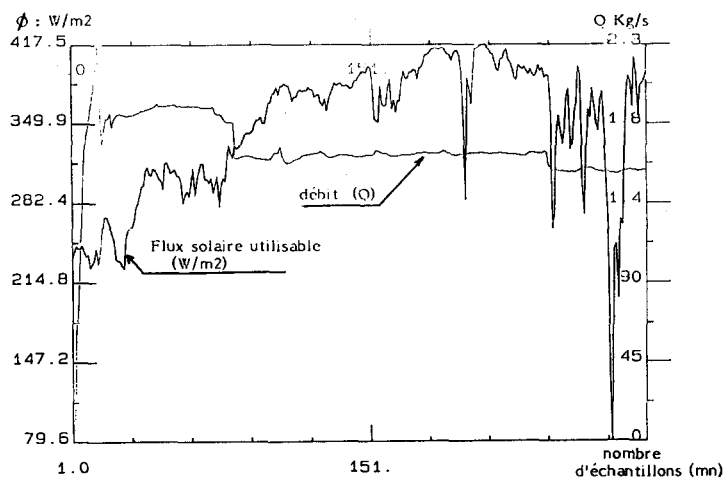


Fig. 11. Débit ( $Q$ ) et flux solaire ( $\phi$ ) correspondant à la Fig. 10.

## Conclusions

Nous pouvons donc dire en conclusion que la méthode employée ici est bien adaptée au système réel, et permet de prévoir les variations de  $T_s$ , avec une erreur faible malgré la rusticité des moyens employés (intégration des équations différentielles par la méthode d'Euler par exemple).

Il est à noter que le choix des modèles faits n'est pas le seul possible. Il est aussi possible de modéliser le filtrage de  $T_e$  avec  $A_3 = A_4$ , de rechercher un modèle pour  $T_4$  qui soit plus simple, ou d'utiliser des modèles à trois valeurs propres.

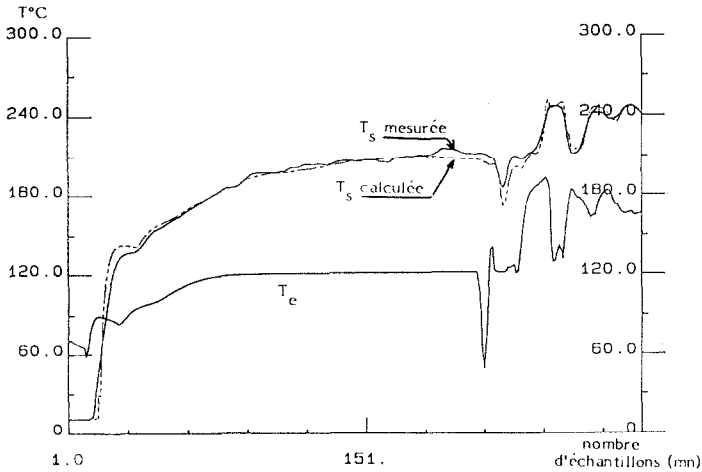


Fig. 12. Comparaison modèle—expérience.

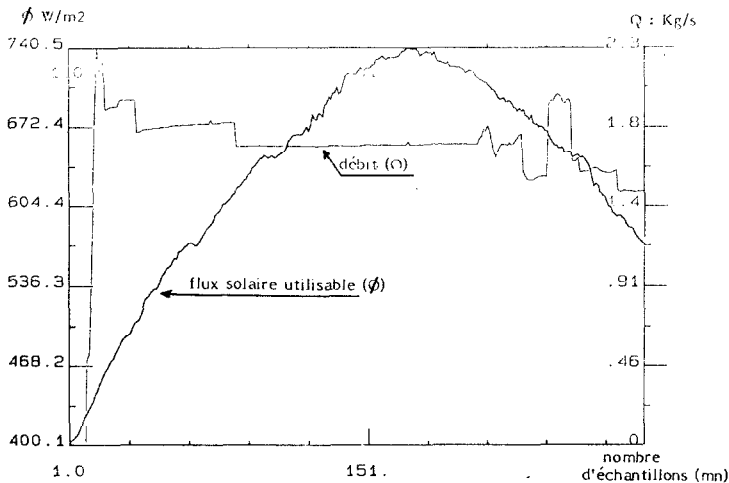


Fig. 13. Débit ( $Q$ ) et flux solaire ( $\phi$ ) correspondant à la Fig. 12.

Ces différents choix (et bien d'autres) sont laissés à la discrétion de l'expérimentateur qui doit essayer de trouver un compromis entre la complexité du modèle et les performances minimum qu'il en attend.

La prochaine étape importante sera la réalisation de la commande en temps réel du champ, afin d'assurer une loi  $T_s = f(t)$  à priori quelconque, et ce pour des variations arbitraires ou aléatoires de  $\phi$  et  $T_e$ .

Notons à cet effet que la présence de retards importants et variables, aussi bien sur l'expression du flux solaire, que sur celle de  $T_e$  peut poser à priori quelques problèmes de commande. On peut supposer en effet qu'il sera délicat, sinon impossible, en particulier pour des questions de stabilité,

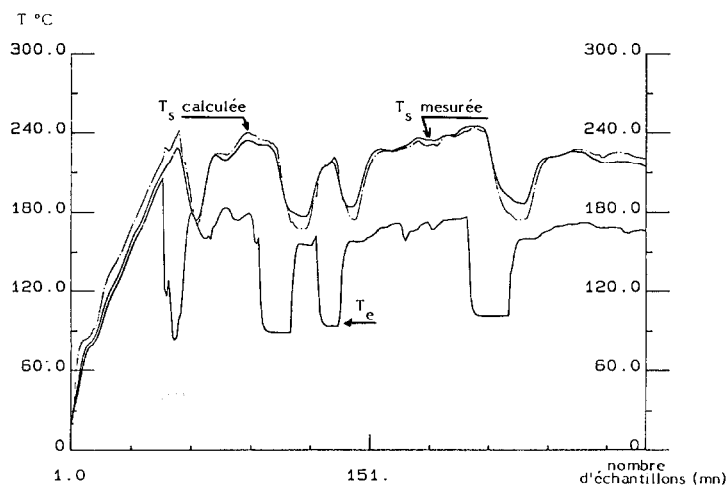


Fig. 14. Comparaison modèle–expérience.

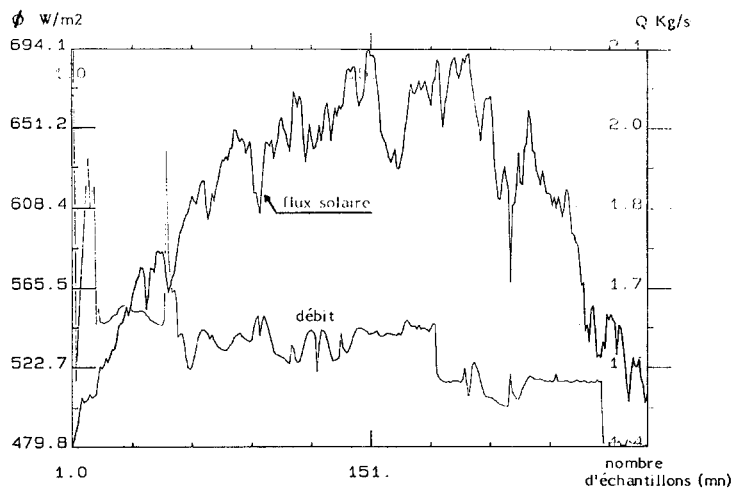


Fig. 15. Débit ( $Q$ ) et flux solaire ( $\phi$ ) correspondant à la Fig. 14.

de procéder à une commande en boucle fermée. Dans ces conditions, s'il est possible d'envisager une commande en boucle ouverte, il n'en demeure pas moins quelques désavantages liés à ce type de fonctionnement, tels que difficulté d'assurer une bonne précision dans le suivi de la loi d'évolution de la température de sortie.

Ce problème doit ici être tempéré par le fait que en pratique, et pour le système qui nous intéresse, il n'est en général pas nécessaire que la température de sortie soit parfaitement exacte: une erreur maximum de  $\pm 5$  °C est en général satisfaisante.

## Notations utilisées

|                            |                                                            |
|----------------------------|------------------------------------------------------------|
| $A_1$ (s <sup>-1</sup> )   | } Coefficients de filtrage du flux solaire                 |
| $A_2$                      |                                                            |
| $A_3$ (s <sup>-1</sup> )   | } Coefficients de filtrage de la température d'entrée      |
| $A_4$                      |                                                            |
| $k$                        | Coefficient de pondération                                 |
| $Q$ (kg/s)                 | Débit massique du fluide caloporteur                       |
| $T_e$ (°C)                 | Température d'entrée du champ de capteurs                  |
| $T_s$ (°C)                 | Température de sortie du champ de capteurs                 |
| $T_1$ (°C)                 | Température résultant du filtrage par les conduites        |
| $T_2$ (°C)                 | Température résultant des pertes dues au champ             |
| $T_3$ (°C)                 | Composante de $T_s$ due au filtrage et aux pertes du champ |
| $T_4$ (°C)                 | Composante de $T_s$ due au flux solaire                    |
| $\Delta T$ (°C)            | Pertes de température due au champ                         |
| $\tau_1$ (s)               | } Retards dans la réponse au flux solaire                  |
| $\tau_2$                   |                                                            |
| $\tau_e$ (s)               | Retards dans la réponse à la température d'entrée          |
| $\phi$ (W/m <sup>2</sup> ) | Flux solaire                                               |
| $\alpha$                   | Constante optique des miroirs                              |

## Références

- 1 J. H. Balbi, N. Balbi, P. Orenge, G. Simonnot, G. Girolami, A. Louche, C. Riolacci et G. Peri, *Rev. Phys. Appl.*, 21 (1986) 169 - 180.
- 2 A. Louche, G. Girolami, C. Riolacci et G. Peri, *2ème Journées Internationales sur les Transferts Héliothermiques, Rabat, Maroc, 2 - 5 avril 1985*, ENIM/CNRS, T2, pp. 1015 - 1031.
- 3 A. Louche, G. Simonnot, G. Girolami et G. Peri, *XXIIIe Rencontre Internationale COMPLES, Séville, Espagne, 8 - 12 avril 1985*, Actes du Congrès, pp. 571 - 585.
- 4 J. H. Balbi, N. Balbi, G. Girolami, P. Orenge et G. Simonnot, *Séminaire AFME sur l'Héliothermie, Valbonne, 16 - 19 sept. 1986*.
- 5 G. Simonnot et M. Marques, *Séminaire AFME sur l'Héliothermie, Valbonne, 16 - 19 sept. 1986*.
- 6 J. Ragot et M. Roesch, *Exercices et Problèmes d'Automatique*, Masson, Paris, 1982.
- 7 C. Foulard, S. Gentil et J. P. Sandraz, *Commande et Régulation par Calculateur Numérique*, Eyrolles, Paris, 1982.
- 8 J. H. Balbi et N. Balbi, accepté *Entropie*, 1987.
- 9 J. H. Balbi, N. Balbi et P. Orenge, *J. Power Sources*, 21 (1987) 113 - 117.
- 10 P. Bacot, A. Neveu et J. Sicard, *Rev. Gén. Therm.*, (267) (Mars 1984) 189 - 201.
- 11 P. Bacot, *Rev. Gén. Therm.*, (277) (Jan. 1985) 15 - 21.
- 12 R. Pasquetti, J. Suzzoni, M. Audibert, J. P. Battistelli et F. Papini, *Rev. Gén. Therm.*, (270) (Juin 1984) 413 - 420.