

## Réduction de modèle pour une centrale solaire à capteurs distribués

J. H. Balbi, N. Balbi, G. Girolami, P. Orenca and C. Riolacci  
*CMCS, Université de Corse, Faculté des Sciences, B.P. 52, 20250 Corté (France)*

J. F. Durastanti  
*ENSEM, route de L'Oratoire, 58000 Nevers (France)*

(Reçu 16 janvier 1991)

### Abstract

The aim of this paper is to show that it is in some cases possible to simplify the modeling of some kinds of complex systems. Originally, a theoretical approach was used to derive a model which was complicated and slow. Our goal was to obtain a much simpler and faster model using global experiments instead of local equations. This method proved to be very effective, and the new model was as precise as the theoretical one, but much faster and simpler.

### Résumé

Le travail présenté est l'application à un système énergétique complexe, la Centrale THEK 2 (Saint-Chamas, Marseille), des méthodes de modélisation et de réduction modèles développées par les auteurs et testées avec succès sur divers systèmes. Le principal objectif de la méthodologie mise au point est la description, par un modèle simple, des comportements dynamiques du système, de manière à résoudre ensuite au mieux les problèmes de commande de gestion optimale (malaisés à traiter avec les modèles classiques à résolution numérique lourde). Les principales étapes de la démarche de modélisation sont: choix de structure pour le modèle; ensemble de procédures d'identification permettant de cerner les contributions de différents paramètres de structure du système; combinaison des lois de variation ainsi obtenues et construction du modèle complet. Les aspects originaux du travail de réduction de modèle par la centrale à capteurs distribués THEK 2 comprennent: le modèle — simplissime — obtenu permet d'appréhender de manière très performante les comportements dynamiques mêmes les plus rapides d'un système à domaine d'intégration aussi étendu que la Centrale expérimentale THEK 2; la démarche des réductions de modèle est applicable aussi bien à des données de simulation fournies par un modèle de connaissance que sur la base de données proprement expérimentales. Ce dernier aspect permet de conclure à la complémentarité des approches locale numérique et globale expérimentale et met l'accent sur la richesse de leur utilisation conjuguée.

### 1. Introduction

La modélisation d'un système physique est généralement abordée à partir de méthodes locales-numériques. Elles consistent à écrire les équations aux dérivées

partielles locales qui traduisent le phénomène étudié, puis à les intégrer numériquement sur l'ensemble de la structure [1, 2].

Les avantages d'une telle approche sont considérables: tout d'abord il est possible d'effectuer une étude sur plans du système et d'autre part, l'analyse fonctionnelle permet de construire un cadre théorique rigoureux qui assure existence et unicité de la solution dans un espace fonctionnel approprié, ainsi que la convergence des algorithmes numériques.

Mais cette démarche a aussi des inconvénients qui sont coûteux et lourds.

Or, pour les auteurs, la qualité essentielle demandée à un modèle est, outre la bonne adéquation à la réalité, la simplicité. De ce fait, à une méthode locale numérique, ils préfèrent une approche du type global expérimental qui conduit à une équation traduisant le comportement global d'un système, équation obtenue directement sur la base de résultats de mesures expérimentales.

La démarche est donc la suivante.

- On part d'un prototype déjà réalisé.
- On rend le système passif, c'est-à-dire, on supprime les commandes de manière à accéder à l'évolution naturelle ou libre du système. Ainsi les paramètres de la structure, qui en régime de commande sont variables, deviennent constants.
- On soumet le système à des excitations type et l'on mesure expérimentalement la réponse (pour un jeu de paramètres constants).
- On construit à partir de ces réponses un modèle d'état linéaire, caractérisé par une structure mathématique et par les coefficients de celui-ci. Ce modèle n'est valable alors que pour le jeu de paramètres choisis.
- On se donne d'autres jeux de paramètres et l'on refait l'identification du modèle. Ainsi, arrive-t-on, avec quelques expériences et en utilisant les lois physiques qui régissent le système, à déterminer les lois de dépendance des coefficients par rapport aux paramètres. Le modèle est alors complet et permet de prévoir la réponse du système à des excitations extérieures quelconques et pour des variations arbitraires, mais connues, des paramètres de structure.
- L'analyse du comportement du système et éventuellement des sous-systèmes, permet de faire des modifications de la structure nécessaires à un fonctionnement plus satisfaisant.

Le système passif étant optimisé et modélisé, on s'intéresse alors à la gestion, c'est-à-dire à la commande de certains paramètres de structure. Etant donné que la plupart des systèmes énergétiques comportent des retards, nous nous orientons vers une commande prévisionnelle; celle-ci, grâce à l'utilisation en temps réel du modèle, permet de corriger les variations des sollicitations extérieures par des variations correspondantes des paramètres de structure, de telle manière que la réponse du système soit celle désirée.

Cette méthode a déjà été utilisée avec succès pour la modélisation de différents systèmes, entre autres, le champ de capteurs de la Centrale de Vignola constitué de capteurs COSS (capteurs optiques à secteurs segmentés) [3]; un autre système a été modélisé de la même façon, il s'agit d'un capteur THEK [4]: c'est un capteur solaire particulièrement efficace, constitué par un paraboloïde réfléchissant, au foyer duquel est placée une chaudière. Les modèles auxquels on a abouti dans les deux cas sont très simples, et représentent respectivement la température de sortie du champ de capteurs et celle du capteur THEK. Ils se résument à deux équations différentielles du second ordre.

## 2. Description de la Centrale solaire THEK 2

(i) Cette centrale a été conçue et étudiée par le Département d'Héliophysique de la Faculté des Sciences St Jérôme de Marseille (Unité associée au CNRS no. 1168) [4-7]. Elle se compose (Fig. 1):

(a) d'un champ de capteurs solaires (appelés THEK) paraboloides, conduisant donc à une forte concentration des rayons solaires au foyer où se trouve placée une chaudière (Fig. 2);

(b) d'un système de canalisations qui recueillent la chaleur reçue et la transportent dans un réservoir de stockage par chaleur sensible;

(c) d'un circuit secondaire de production de vapeur.

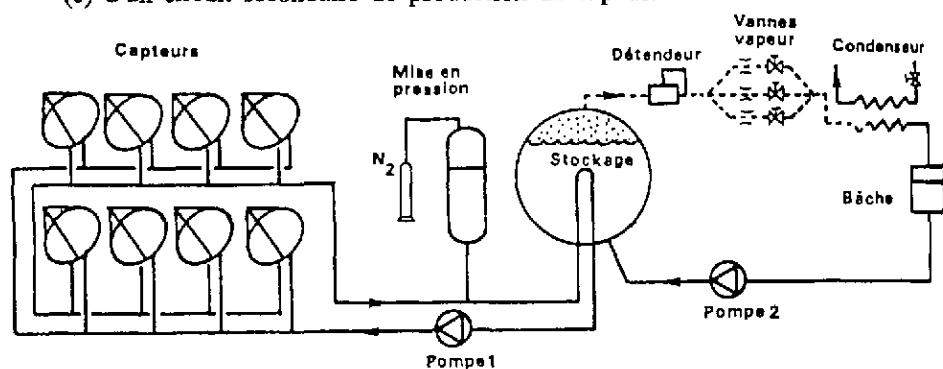


Fig. 1. Schéma de principe de la Centrale THEK 2.

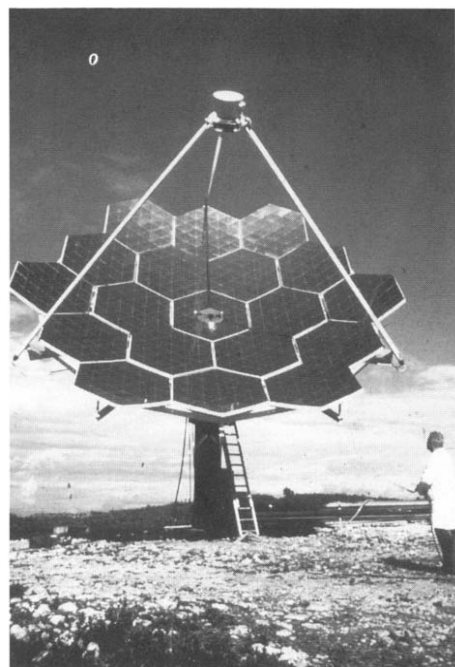


Fig. 2. Photo d'un THEK.

La puissance nominale de la Centrale est de 200 kW. La commande est assurée par un système de gestion automatisé faisant largement appel aux techniques informatiques. A titre expérimental, la Centrale a fonctionné pendant plusieurs années et ainsi il a été démontré que la production de chaleur industrielle était possible à des niveaux de température de 300 °C, grâce à cette technologie de centrale solaire à capteurs paraboliques distribués.

(ii) Les capteurs, au nombre de huit, devaient être identiques aux capteurs prototypes développés au cours de la première phase du projet THEK 2. Les seules modifications qui étaient demandées concernaient:

- la température maximale d'utilisation qui passait de 340 à 260 °C;
- la pression de service maximale fixée à 60 bars;
- la perte de charge ramenée de 1 bar à 0.35 bar pour un débit de 600 l/h;
- l'électronique qui devait satisfaire aux spécifications que nous verrons plus loin, lors de la présentation du système de gestion automatisé de la Centrale.

Dans un souci d'améliorer la fiabilité des capteurs et de réduire leurs coûts, les deux fabricants ont apporté des modifications par rapport aux prototypes.

Pour SEP, le vérin hydraulique de site a été remplacé par un système à vis et moteur réducteur et le moteur hydraulique d'azimut a été remplacé par un moteur électrique. De plus, deux capteurs ont été équipés de chaudières cavité optimisées par le Département d'Héliophysique. Une batterie d'accumulateurs a été prévue afin de pouvoir ramener les capteurs en position de sécurité, en cas de coupure secteur.

Pour Creusot Loire, c'est en fait un capteur entièrement nouveau qui a été développé puisque seuls le vérin de site et la Centrale hydraulique ont été conservés (Fig. 3).

### 3. Modèle de connaissance de la Centrale THEK 2

Le Département d'Héliophysique a publié une série de travaux [6, 8] sur la modélisation de chacun des composants de la Centrale THEK 2 [9-12], puis sur la modélisation complète de celle-ci par assemblage [1].

Dans tous les cas, la procédure est locale-numérique. A partir d'équations locales (aux dérivées partielles): équation de transport, équation de diffusion thermique, une discrétisation est faite: spatialement par une méthode modale et temporellement par une méthode de différences finies. Un tel modèle de connaissance permet la simulation fine du processus réel et la prévision des performances de nouveaux systèmes.

C'est un outil très complexe mettant en jeu 8 000 points de discrétisation (8 000 températures connues).

Les simulations fournies par ce code de calcul ont été validées expérimentalement (comparaison entre les températures calculées et les températures expérimentales mesurables), en particulier lors des régimes dynamiques transitoires: démarrage-arrêts de la centrale, éclaircissement ou débit perturbés.

Les différentes figures (Figs. 4-8) permettent de constater l'accord très satisfaisant entre les courbes théoriques et les courbes expérimentales.

### 4. Construction d'un modèle réduit (à débit constant)

Le modèle de connaissance (local-numérique) décrit ci-dessus est très fiable et surtout très riche en informations.

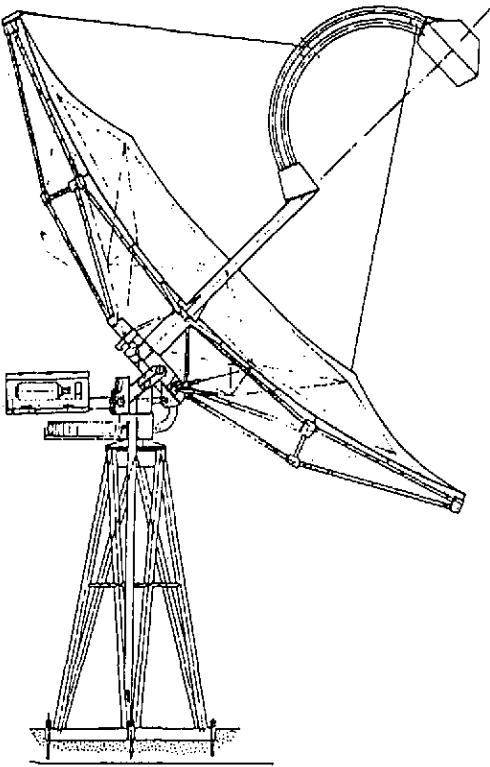


Fig. 3. Schéma d'un capteur THEK.

Cependant, pour la gestion et la commande de la Centrale, une telle richesse est superflue; le programme informatique est beaucoup trop lourd donc beaucoup trop lent pour être utilisé en temps réel: pour simuler une minute de fonctionnement de la Centrale, le code de calcul a besoin de trois minutes sur un ordinateur HP 1000.

Ceci conduit à élaborer un modèle réduit (global expérimental), certes moins riche en informations, mais nettement plus rapide (trois secondes de calcul pour une minute de fonctionnement de la Centrale).

Servant la démarche exposée dans l'introduction, ce modèle peut être obtenu à partir des expériences.

Nous avons préféré ici le construire à partir du modèle de connaissance afin de mieux illustrer la notion de réduction dynamique de modèle. En somme, au lieu d'utiliser les données expérimentales, nous nous appuyons sur des données numériques résultant de simulations fournies par le modèle de Durastanti [1].

La démarche est la suivante. Le système est donc tout d'abord rendu passif: le champ de capteurs est doté d'une commande qui asservit le débit de manière à ce que la température de sortie soit égale à une valeur de référence, qui est la valeur nominale pour le fonctionnement des turbo-alternateurs; cette commande est donc supprimée conformément à notre approche, et le débit du fluide caloporteur devient constant.

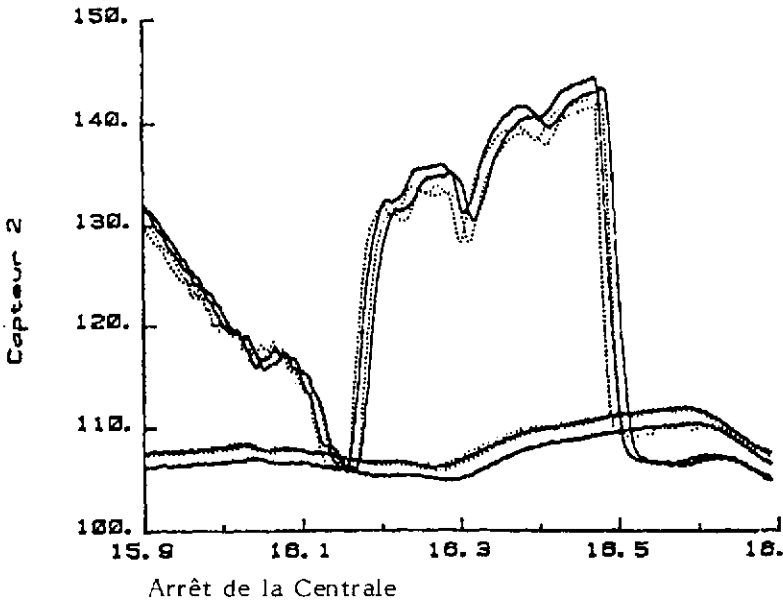


Fig. 4. Enregistrement de la température du capteur 2.

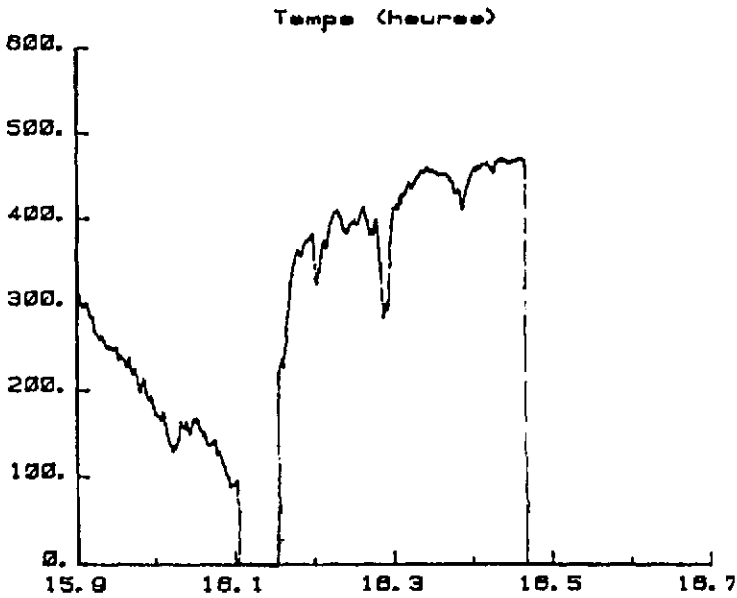


Fig. 5. Eclairement capteur 2.

On soumet ensuite la structure à un échelon de flux solaire (Fig. 9); il suffit pour cela de défocaliser totalement ou partiellement les chaudières, et l'on mesure la température de sortie du champ (la température d'entrée étant constante pendant la durée de l'expérience).

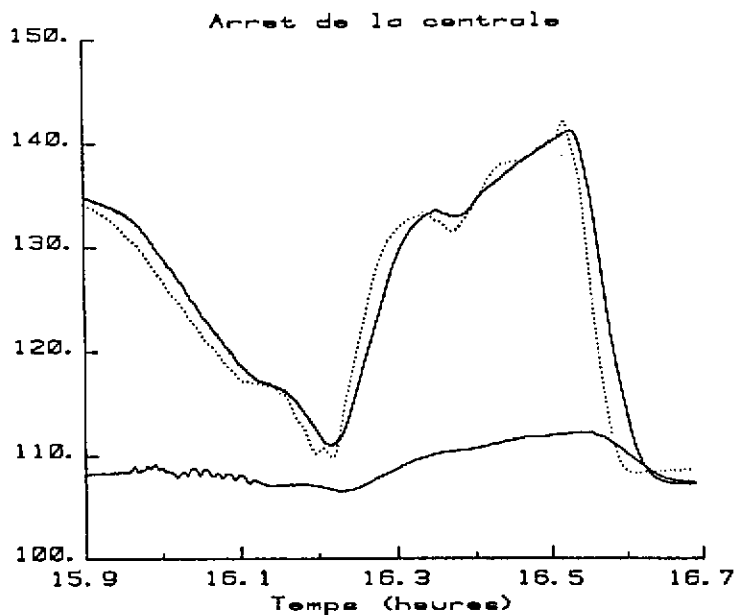


Fig. 6. Sortie pompe-retour échangeur.

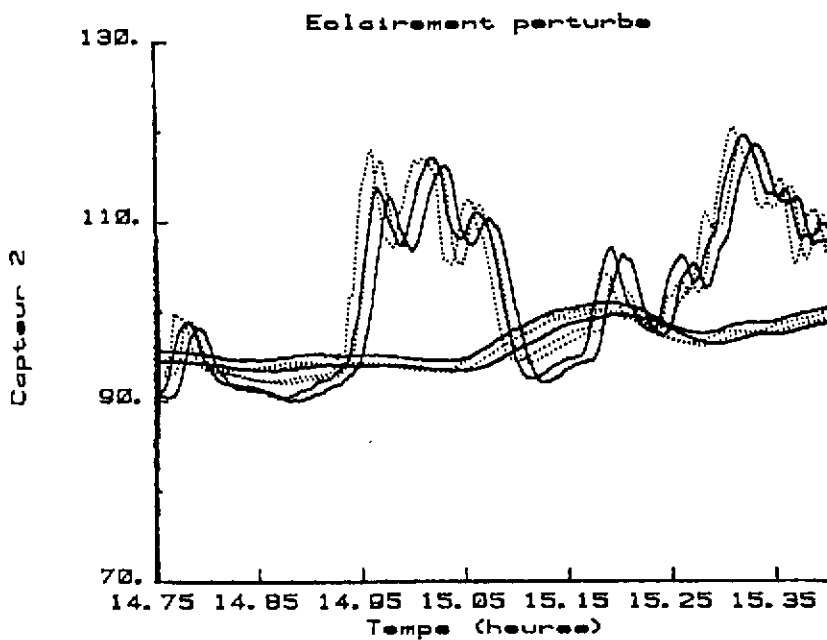


Fig. 7. Température capteur 2.

La figure 10 montre la réponse de la température  $T$  de sortie du champ, en fonction du temps. Elle évolue de la température d'équilibre initiale  $T_i$  quand le champ était focalisé, à la température d'équilibre finale  $T_d$  quand le champ est défocalisé.

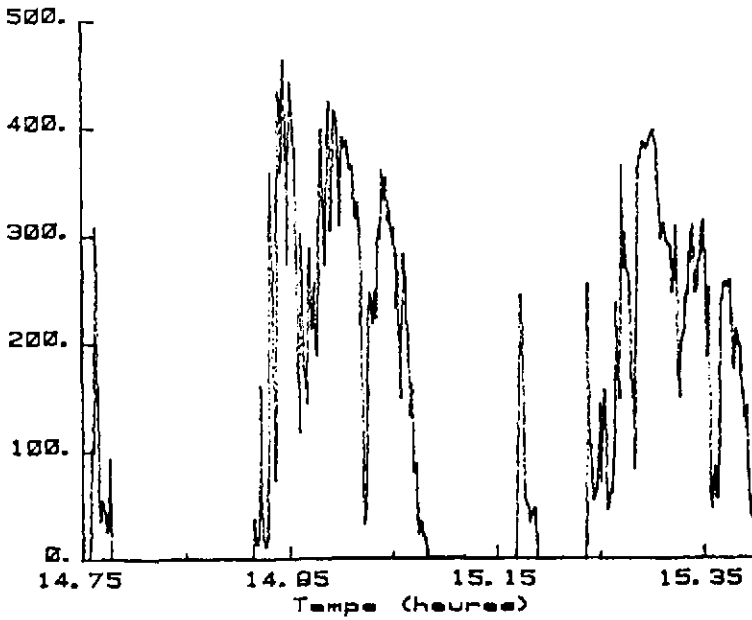


Fig. 8. Eclairage capteur 2.

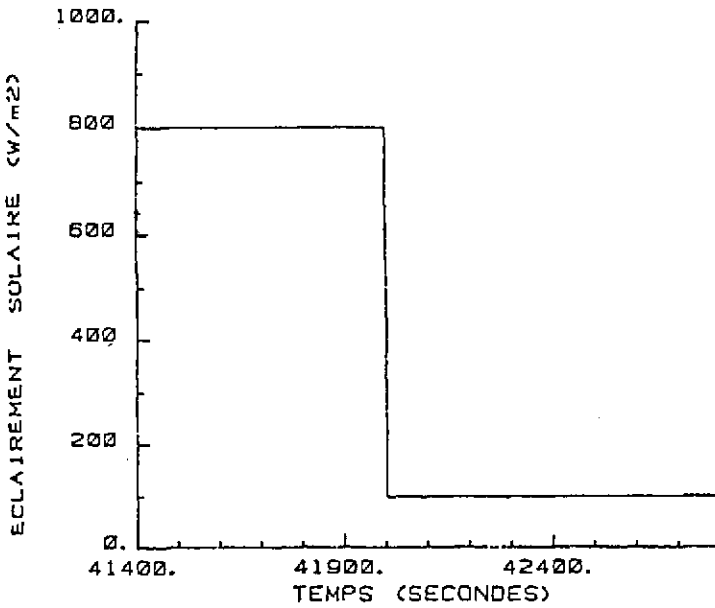


Fig. 9. Défocalisation champ THEK 2.

C'est une utilisation adéquate de cette courbe fondamentale qui fournit le modèle.  
 Quel type de modèle convient-il donc de retenir, pour représenter ce comportement et également satisfaire à l'exigence de simplicité maximale?



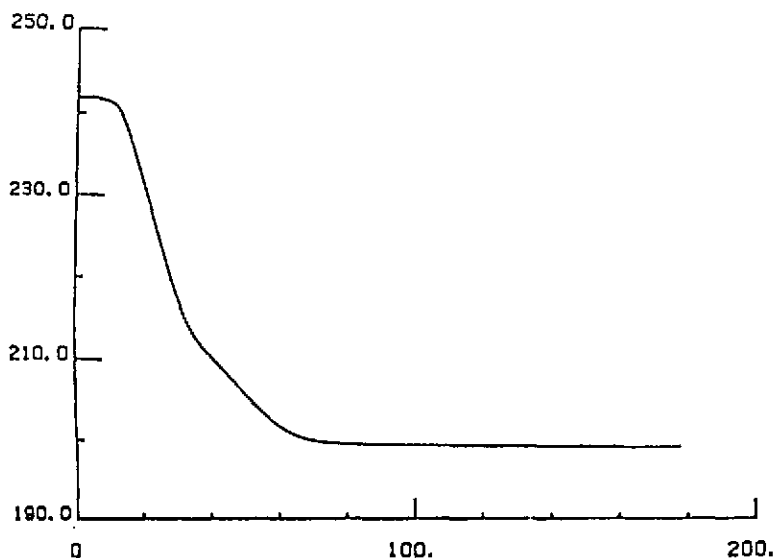


Fig. 10. Réponse température sortie du champ.

L'expérience montre qu'une équation linéaire à coefficients constants est une représentation possible:

$$\ddot{T} + (G_1 + G_2)\dot{T} + G_1G_2(T - T_d) = C\phi(t - \tau) \quad (1)$$

dans lequel les paramètres sont respectivement:  $t$  = temps;  $T$  = température de sortie du champ;  $T_d$  = valeur de  $T$  en l'absence de flux, à l'équilibre;  $G_1, G_2$  = valeurs propres du champ;  $C$  = coefficient optique;  $\phi$  = flux solaire;  $\tau$  = temps de retard du champ.

Pour obtenir les coefficients inconnus ( $G_1, G_2, T_d, \tau, C$ ) on identifie la courbe expérimentale 1 (en fait numérique) avec la réponse du modèle à savoir:

$$A_1 \exp(-G_1 t) + A_2 \exp(-G_2 t)$$

On utilise pour cela une méthode d'optimisation de gradient conjugué afin d'accélérer la convergence de l'algorithme.

La courbe (Fig. 11) illustre l'approximation de la courbe expérimentale par la somme d'exponentielles.

## 5. Première validation du modèle

Pour tester l'efficacité du modèle nous soumettons le champ de capteurs à un flux solaire (numérique), extrêmement perturbé sous forme d'une succession de créneaux (Fig. 12).

On procède à une intégration numérique de l'équation (1), avec cette loi de flux. La figure 13 montre la très bonne adéquation entre la réponse 'expérimentale' et la réponse du modèle réduit suivant l'équation (1).

Cette première comparaison est donc extrêmement satisfaisante. Cependant elle s'est effectuée pour une valeur constante du débit, valeur pour laquelle avaient été identifiés des coefficients de l'équation.

Dans un fonctionnement opérationnel de la centrale, le débit est appelé à varier. Il faut donc que le modèle puisse prendre en compte ces variations.

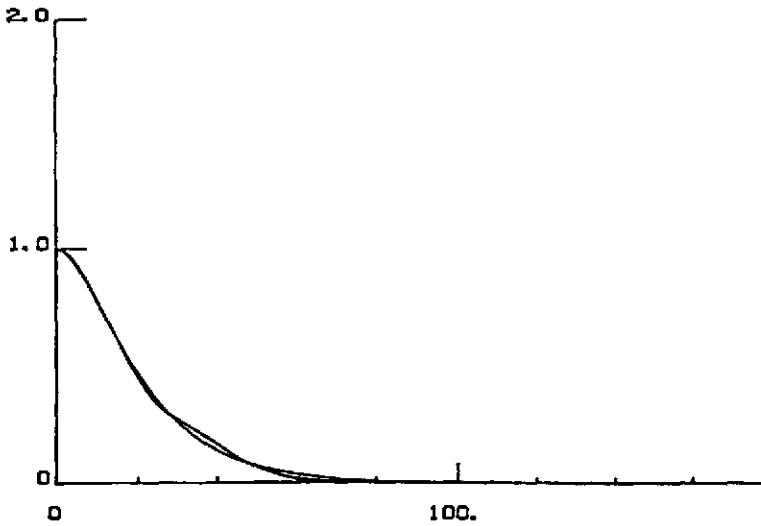


Fig. 11. Approximation de la courbe expérimentale par la somme d'exponentielles.

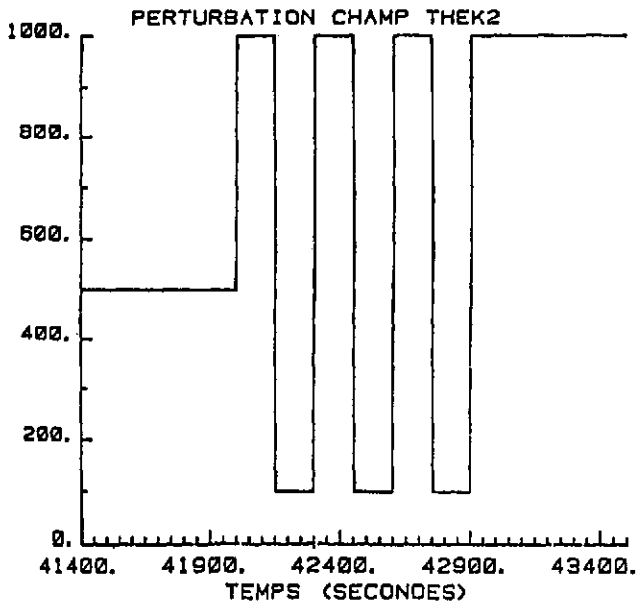


Fig. 12. Eclaircissement solaire.

## 6. Modèle réduit; débit et température d'entrée variables

Les coefficients de l'équation (1) dépendent de la valeur du débit et de la température d'entrée. Pour déterminer les lois de dépendance, on procède à plusieurs identifications pour des valeurs différentes du débit et de la température d'entrée en suivant la démarche du paragraphe 4.

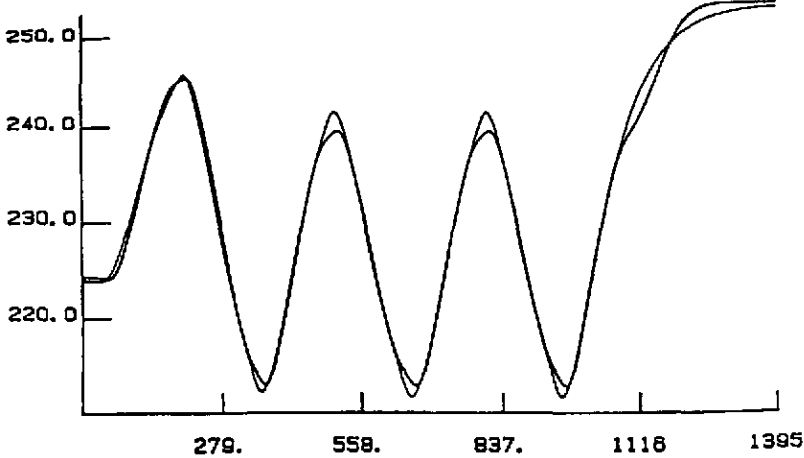


Fig. 13. Réponse expérimentale et réponse du modèle réduit.

Il apparaît que, dans la plage d'utilisation (3–14 kg/s), une représentation linéaire convient bien. Les résultats sont:

$$G_1 = 2.1 \times 10^{-2} q + 4.2 \times 10^{-4} \quad (\text{unités } s^{-1})$$

$$G_2 = 1.4 \times 10^{-2} q + 2.8 \times 10^{-4} \quad \text{pour } T_e = 200 \text{ } ^\circ\text{C}$$

De même la température d'entrée du fluide caloporteur dans le champ est un paramètre considéré constant jusqu'alors mais appelé en réalité à varier. On procède comme ci-dessous et l'on obtient:

$$G_1 = -5 \times 10^{-6} T_e + 2.15 \times 10^{-2}$$

$$G_2 = 4 \times 10^{-5} T_e + 5.6 \times 10^{-2} \quad \text{pour } q = 1 \text{ kg/s}$$

## 7. Deuxième validation du modèle

On place la centrale dans des conditions très dures d'utilisation: créneaux d'éclaircissement (Fig. 14); échelon de débit (Fig. 15).

Les réponses expérimentales et calculées sont représentées à la figure 16. On constate un accord surprenant et ceci bien que les perturbations imposées à la centrale soient extrêmement dures; l'accord sera bon, à fortiori, pour des dynamiques plus douces.

## 8. Conclusions

La réduction du modèle dynamique que nous venons de présenter a d'incontestables avantages: simplicité de mise en œuvre, très bonne adéquation à la réalité, possibilité d'utilisation en temps réel. Si l'on dispose du système expérimental, la même démarche conduit alors à une modélisation globale qui ne nécessite pas un modèle de connaissance à priori.

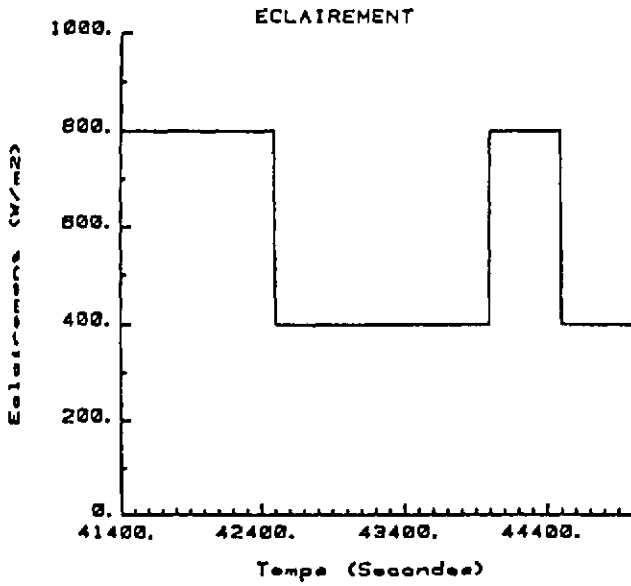


Fig. 14. Eclairment.

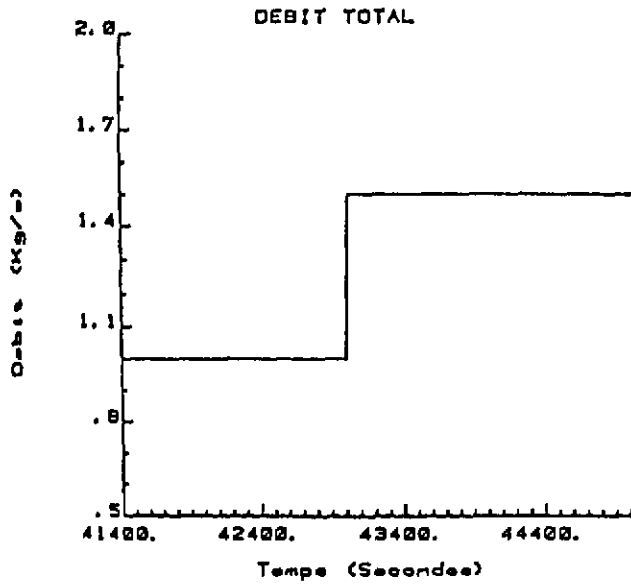


Fig. 15. Débit total.

Il ne s'agit pas pour nous d'opposer les modèles de connaissances (locale-numérique) avec le modèle réduit ou global-expérimental: ils sont en fait complémentaires.

Les modèles de connaissance fournissent une information très abondante sur le comportement du système; ils sont bien reliés à la physique du problème, et peuvent

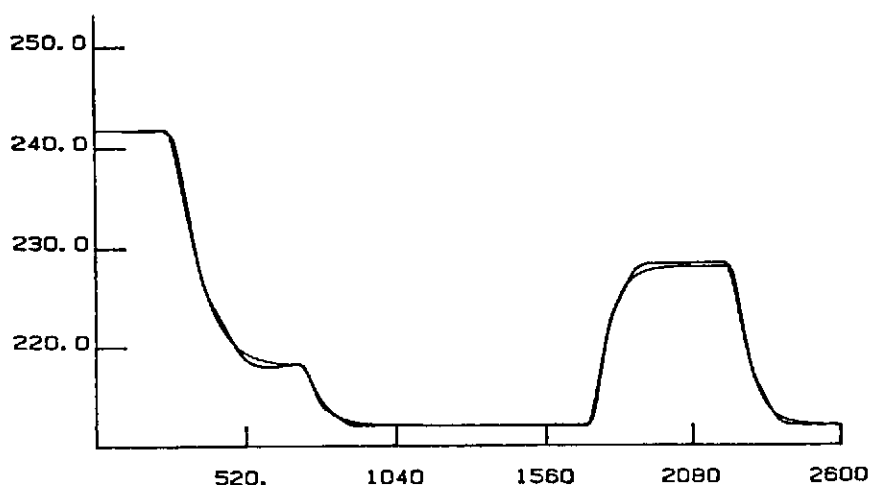


Fig. 16. Réponse expérimentale et calculée.

être élaborés à partir de plans du système (en réalité il est quand même nécessaire de disposer d'un prototype pour procéder à certains recalages).

Néanmoins ils ont deux défauts majeurs: ils sont coûteux et ne sont pas adaptés à la gestion de la commande des systèmes.

Les modèles globaux au contraire sont économiques en temps de calcul et adaptés à la gestion et la commande. En revanche, ils nécessitent l'existence d'un prototype (ou d'un modèle de connaissance) et fournissent une information moins riche. Le couplage modèle de connaissance/modèle de gestion est donc appelé à se développer.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé au Laboratoire d'Hélioénergétique de Vignola (Ajaccio) grâce à une concertation avec le Département d'Héliophysique de l'Université de Provence en utilisant les données de la thèse de J. F. Durastanti. Nous sommes heureux de remercier ici nos collègues. Mlle Catherine Bourdon a ensuite effectué un stage de fin de maîtrise de Sciences et Techniques ISI à Vignola en s'intéressant surtout à l'informatique du sujet. Qu'elle soit ici remerciée pour sa compétence et sa grande conscience professionnelle.

## Bibliographie

- 1 J. F. Durastanti, Modélisation numérique d'un système thermique complexe: la Centrale solaire THEK 2, *Thèse*, Université de Provence, Sept. 1985.
- 2 C. Bourdon, Contribution à la modélisation du champ de capteurs THEK de la Centrale de St Chamas, *Rapport de stage de fin de MST*, Laboratoire Vignola, Ajaccio, Oct. 1986.
- 3 J. H. Balbi, N. Balbi, P. Orenge et G. Simmonnot, Modélisation du champ de capteurs de la Centrale Solaire de Vignola, *Rev. Phys. Appl.*, 21 (1986) 169-180.
- 4 J. H. Balbi, N. Balbi et P. Orenge, Réduction de modèle pour un capteur solaire à concentration, *J. Power Sources*, 21 (1987) 113-117.

- 5 G. Peri, J. Desautel, B. Imbert, M. Audibert, R. Pasquetti et J. P. Battistelli, Unités de conversion héliothermique dans la gamme des moyennes puissances. *Rev. Int. Hélio-technique*, Déc. (1978) 27-31.
- 6 M. Audibert, La Centrale expérimentale THEK 2 – Programme d'essais et d'expérimentations, Rapport fin de contrat, Laboratoire Héliophysique, Université de Provence, Aix-Marseille 1, France, *Réf. HP/37/84 THEK 2*, Jan. 1984.
- 7 R. Pasquetti, Contrôle-commande THEK 2, *Ref. HP/31/82 THEK 2*; Commande analogique de la pompe primaire, Rapport fin de contrat, Laboratoire Héliophysique, Université de Provence, Aix-Marseille 1, France, *Réf. HP/36/THEK 2*, Oct. 16, 1983.
- 8 R. Pasquetti, J. F. Durastanti, J. Suzzoni, M. Audibert, F. Papini et J. P. Battistelli, Modélisation numérique des sous-systèmes thermiques constitutifs d'une centrale solaire de type THEK, Rapport interne, Laboratoire Héliophysique, Université de Provence, Aix-Marseille 1, France, 1984.
- 9 S. Ahmed, Etude expérimentale et modélisation du comportement dynamique d'un convertisseur thermique d'énergie solaire de type THEK, *Th. Doct. Ing.*, Université de Provence, Jan. 1980.
- 10 J. Mignot, Modélisation, identification et commande adaptative d'un module de conversion héliothermique de type THEK, *Docteur de 3ème cycle*, Faculté des Sciences Paul Sabatier de Toulouse, 1984.
- 11 B. Stravakakis, Modélisation et commande du fonctionnement thermique d'un capteur solaire de type THEK, *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Faculté des Sciences Paul Sabatier de Toulouse, 1984.
- 12 J. M. Cagniant, Modélisation-identification et commande optimale d'un module de conversion héliothermique de type THEK, *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Faculté des Sciences de Marseille, 1983.