

## RAPPORT ANNUEL 1997

*Pour les travaux de recherche définis dans le mandat: Solaire DIS 22260/61679 Supervision*

*Titre du projet:*       **Supervision automatique d'installations solaires thermiques.**  
Première partie consacrée aux kits solaires de production d'eau chaude sanitaire.

### *Résumé:*

Les kits solaires de production d'eau chaude sanitaire ont fait l'objet d'une certaine standardisation ces dernières années, ceci pour des raisons techniques et sous la pression du marché. La clientèle de telles installations est prête à payer un prix plus élevé que celui d'un chauffe-eau traditionnel, pour autant qu'une grande fiabilité soit garantie et qu'une information sur les économies énergétiques réalisées soit disponible. Pour accroître les performances dans ce sens et aboutir à la fiabilité souhaitée, trois mesures doivent être prises. ❶ La procédure de mise en service doit être automatisée et doit tenir compte de l'environnement propre à chaque installation. ❷ La commande doit prendre en compte l'évolution des conditions d'exploitation. ❸ En cours de fonctionnement, les dérives ou pannes éventuelles doivent être détectées, annoncées, voire corrigées. L'élaboration et la mise en oeuvre de ces différentes procédures sur un KitS\*<sup>®</sup>L de l'entreprise AGENA font l'objet de ce mandat.

Dans la phase initiale du projet réalisée en 1997, un modèle dynamique complet du KitS\*<sup>®</sup>L a été élaboré. Sur cette base, une commande optimale du circuit du collecteur solaire a été proposée. Elle sera validée sur le site pilote mis en place à l'École d'ingénieurs de l'État de Vaud à Yverdon.

*Durée du projet:*       18 mois, du 1er juillet 97 au 31 décembre 98.

*Mandataire:*        Denis Gillet  
*Rapporteur:*        Denis Gillet et Thierry Prud'homme  
*Adresse:*            Institut d'automatique, DGM - EPFL, 1015 Lausanne  
  
*Téléphone:*         (021) 693-5168

## 1. Objectifs du projet

Les objectifs pour 1997 comprenaient:

à l'IA L'établissement du modèle dynamique du KitS<sup>®</sup>L et l'élaboration d'une approche expérimentale en vue de l'identification des paramètres intervenant dans cette représentation mathématique. Une étude de sensibilité préliminaire et la mise en place des outils de simulation et d'optimisation. Une présélection des composants hydrauliques et le choix du support numérique d'implantation de la commande avancée.

*Le modèle est disponible sous forme de fichiers Simulink. Une pompe à entraînement magnétique a été choisie, ainsi qu'un micro-contrôleur de type MC 68331\* pour la commande. Un banc test indoor est en préparation pour une modélisation fine du comportement du capteur solaire.*

Sélection de la structure et développement de la commande optimale du circuit du capteur solaire. Validation et amélioration par simulation de l'étage de supervision intégrant le capteur solaire optimal.

*L'approche est choisie et les outils d'optimisation sont disponibles. La solution finale est en cours d'élaboration.*

à l'EINEV Installation et mise en service de l'installation KitS<sup>®</sup>L, ainsi que de l'instrumentation nécessaire. Réalisation d'essais actifs de courte durée, en vue de l'identification des paramètres intervenant dans le modèle mathématique du KitS<sup>®</sup>L.

*L'installation pilote est prête, ainsi que l'instrumentation. Les premiers essais n'ont débuté qu'en novembre pour permettre la conclusion d'autres expériences en cours sur le site d'Yverdon.*

Réalisation d'essais permettant d'affiner la description de la dynamique dans différentes configurations de fonctionnement, en particulier pour différents débits dans le circuit du capteur solaire.

*Vu les limites imposées aux conditions de fonctionnement sur le site d'Yverdon, des essais complémentaires seront réalisés indoor à l'IA.*

### \*Description du MC68331

Le MC 68331 est un micro-contrôleur à 32 bits. Il dispose de 4 blocs fonctionnels interconnectés par un bus interne:

Systeme Integration Module (SIM) (watchdog, Programmable chip-select, ...)

Central Processing Unit (CPU32) (32 bit architecture, virtual memory, ...)

Queued Serial Module (QSM) (serial communication Interface, function I/O, ...)

General-Purpose Timer (GPT) (counters 16 bit, 3 input capture channels, 4 output compare channel, ...)

## 2. Travaux effectués et résultats obtenus en 1997

### 2.1. Introduction

Aujourd'hui, deux tendances se dessinent chez les fournisseurs de kits solaires de production d'eau chaude sanitaire, celle du *High flow* et celle du *Low flow* qui préconisent respectivement un débit élevé ou un débit faible dans le circuit capteur. Cependant, dans ces deux cas, le débit est fixé une fois pour toutes à la mise en service de l'installation. L'évolution des conditions de fonctionnement de cette même installation au cours de la journée n'est ainsi pas prise en compte. La conception d'une commande plus évoluée nécessite l'élaboration d'un modèle détaillé qui puisse être exploité par des procédures d'optimisation, telles celles disponibles dans le logiciel MATLAB. Un modèle mathématique du KitS<sup>®</sup>L d'AGENA qui satisfait cette spécification est présenté dans [2]. Grâce à cette représentation fidèle, le comportement dynamique de cette installation peut être reproduit et il est possible de faire ressortir l'influence du débit sur la fraction solaire. Suite à cette constatation et pour augmenter le rendement de l'installation, une commande ad hoc a été élaborée. Elle est basée sur le maintien de l'optimum de transfert de puissance. Cette approche et les résultats préliminaires qui découlent de son implantation sont présentés à la section 2.2. Les travaux entrepris pour expérimenter cette solution sont quant à eux présentés à la section 2.3.

Le schéma de principe du KitS<sup>®</sup>L est représenté à la figure 1.

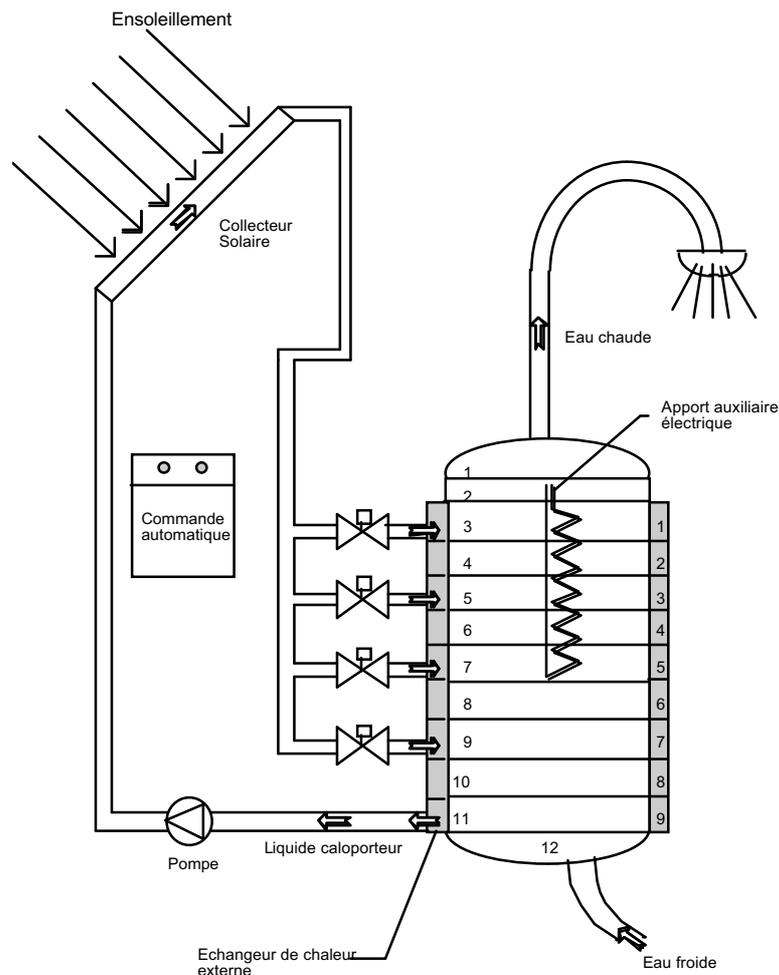
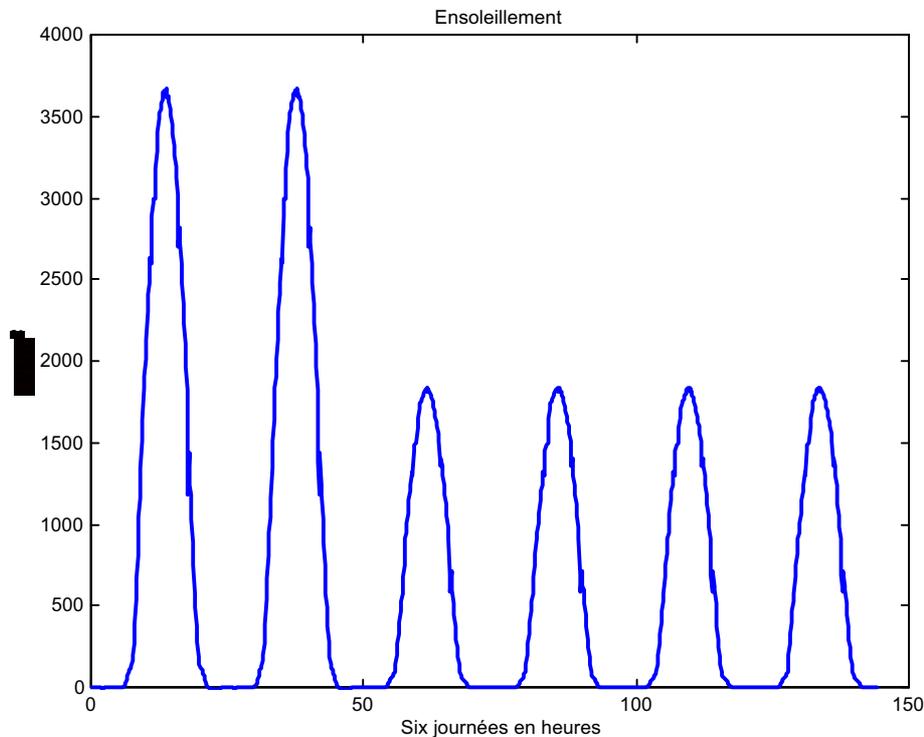


Figure 1: Schéma de principe du KitS<sup>®</sup>L.

Le KitS\*L se compose de plusieurs éléments essentiels dont le collecteur qui absorbe l'énergie solaire et la transmet au liquide caloporteur, l'échangeur de chaleur constitué d'un manteau externe, une cuve de stockage de l'eau sanitaire et un apport auxiliaire d'énergie fourni par une résistance électrique. L'originalité de ce système vient de ses quatre vannes automatiques qui assurent une bonne stratification du chauffe-eau. En effet, la charge solaire est dirigée automatiquement à l'endroit où l'eau sanitaire est à une température inférieure à celle du circuit solaire. La pompe assure la circulation du liquide caloporteur dans le circuit capteur. C'est ce débit qu'il convient d'ajuster en vue d'optimiser continûment l'apport solaire.

## 2.2 Résultats

Pour maximiser la fraction solaire, il est souhaitable d'optimiser le transfert de puissance au niveau du circuit du collecteur. Cet optimum a été déterminé par simulation sur la base des données journalières d'ensoleillement représentées à la figure 2. Les essais sont réalisés sur 6 jours pour minimiser l'effet de l'état initial de la cuve et de l'échangeur.



**Figure 2:** Ensoleillement.

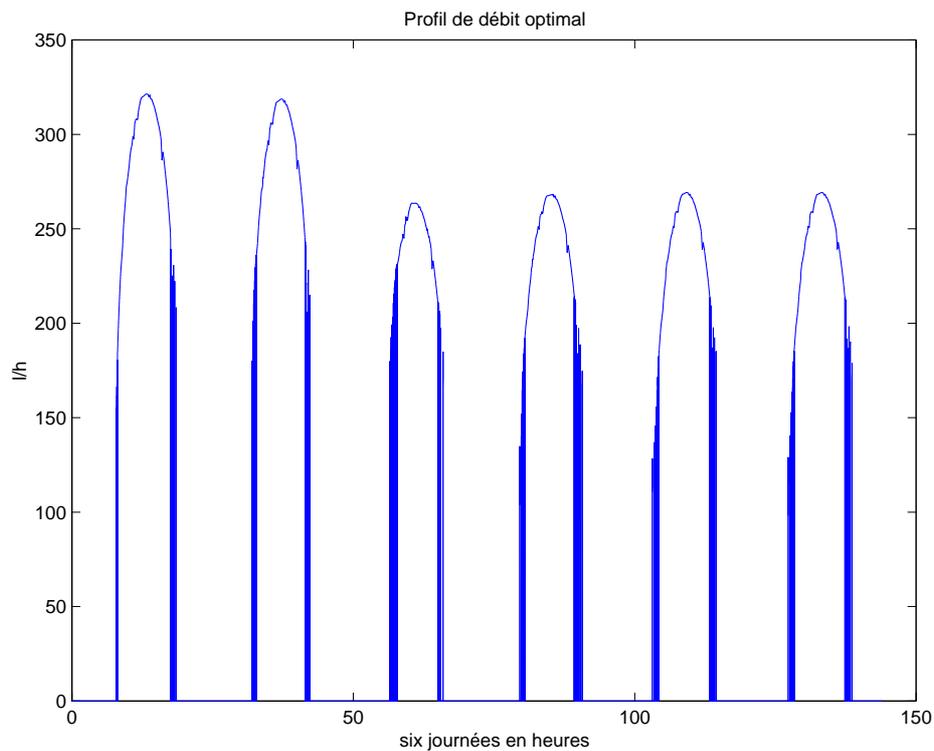
Le profil du débit de soutirage utilisé pour cette étude est un profil classique pour une famille d'environ quatre personnes, il est le même pour les six journées.

Le calcul de la fraction solaire est effectué au moyen de la relation:  $f = \frac{E_{coll} - E_{pompe}}{E_{utile}}$ .

$E_{coll}$ : Energie fournie par le collecteur au circuit caloporteur;  
 $E_{pompe}$ : Energie électrique consommée par la pompe;  
 $E_{utile}$ : Energie fournie à l'eau de soutirage.

Le débit optimal obtenu pour maximiser cette fraction solaire est représenté à la figure 3. Les conditions de test sont les suivantes:

- ❶ L'appoint électrique a été considéré comme idéal, à savoir que l'eau de soutirage est chauffée à la température désirée instantanément après sa sortie de la cuve.
- ❷ Le débit peut être ajusté de façon continue au cours du temps.



**Figure 3:** Débit optimal.

La similitude constatée entre le profil d'ensoleillement et le débit optimal conduit à préconiser l'usage d'une pompe alimentée par des cellules photovoltaïques. Pour minimiser la surface de cellules nécessaire, une pompe à entraînement magnétique de consommation inférieure à 10 watts a été choisie et sera prochainement montée sur l'installation pilote. Une caractéristique non linéaire optimale liant les cellules et la commande de la pompe a été élaborée pour maximiser la fraction solaire. Cette caractéristique dépend du modèle dynamique du circuit du collecteur.

L'approche proposée a été présentée à la conférence CISBAT'97 et sera prochainement validée sur le site de l'EINEV. En parallèle, des tests indoor seront réalisés à l'IA sur un panneau solaire de 2m<sup>2</sup> pour affiner la description de son comportement dynamique et pour étendre le domaine de fonctionnement couvert par le modèle.

Les résultats présentés restent valables pour un appoint électrique classique, la comparaison entre ces deux appoints montre une différence de près de 20% en terme de fraction solaire, ce qui nous amène tout naturellement à penser qu'il y a des perspectives très prometteuses d'amélioration du rendement d'une telle installation en modifiant la commande de l'appoint électrique. En pratique néanmoins, un appoint idéal présente de nombreux inconvénients parmi lesquels une très forte demande en électricité susceptible de ne pas être supportée par les installations électriques domestiques, ainsi qu'une robustesse très discutable face au vieillissement. Pour contourner ces limitations, l'idée est donc de mettre en place une commande prédictive de l'appoint électrique pour se rapprocher le plus possible de l'appoint idéal. En plus d'une modification de la

commande, d'autres modifications technologiques judicieuses obtenues par simulation et par l'étude de sensibilité seront discutées avec les représentants de l'entreprise AGENA à Moudon.

## 2.3 Travaux

Un système complet a été acquis et installé sur le site d'expérimentation de l'EINEV. Il comprend une cuve, les conduites et 4 m<sup>2</sup> de capteurs solaires.

Le système a été connecté aux instruments déjà en place sur le site. Il s'agit d'un environnement comprenant un système d'acquisition de mesures et d'ajustement de la charge piloté par un PC et LabVIEW®.

Un Macintosh mis à disposition par l'IA a aussi été installé sur le site. Il communique avec l'environnement précédent par le port série. Il est utilisé comme serveur de fichiers sur Internet au travers du protocole TCP/IP. Il permet aux chercheurs de l'EPFL de collecter automatiquement des mesures depuis Lausanne, sans se déplacer sur le site d'Yverdon.

## 2.4 Conclusions

Les études entreprises jusqu'à ce jour dans le cadre du présent mandat ont montré que les pompes actuellement utilisées sont largement surdimensionnées. Il y a donc un intérêt certain à introduire des pompes à entraînement magnétique. Cette adjonction permet également de modifier le débit de manière continue.

Un fonctionnement à débit optimal (en mode tout ou rien [2] ou en continu grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïques) permet une amélioration substantielle de la fraction solaire de quelques pour-cent par rapport à un fonctionnement classique. La recherche du débit optimal dans la boucle du collecteur repose essentiellement sur la dépendance de l'efficacité du collecteur vis-à-vis de ce même débit. Cette dépendance est cependant encore mal connue (un modèle empirique largement utilisé en simulation a été choisi dans un premier temps pour mener à bien l'optimisation). Par conséquent, des tests indoor sur un panneau solaire du même type que ceux installés sur le KitS\*L seront réalisés à l'IA. Conscients de la difficulté de recréer un environnement extérieur plausible, notre objectif se limitera dans un premier temps à la mise en évidence de la corrélation existante entre l'efficacité du collecteur et le débit. L'élaboration d'un modèle complexe prenant en compte tous les phénomènes extérieurs (vent, radiation diffuse, etc...) ne sera pas considérée.

La comparaison entre l'appoint électrique idéal et l'appoint classique a montré qu'un gain beaucoup plus significatif pouvait être obtenu en adoptant une stratégie prédictive de réglage de cet apport auxiliaire, en se basant à la fois sur notre modèle dynamique et sur une connaissance statistique des variables d'environnement et du profil de débit de soutirage. Cette commande prédictive pourrait également être avantageusement couplée à un appoint auxiliaire par 'étage' qui permettrait de contrôler le volume d'eau chauffée dans la cuve et ainsi éviter de présenter trop longtemps une température trop élevée au niveau supérieur d'injection du circuit du collecteur. D'autres solutions originales comme l'utilisation de micro-ondes pourraient également être envisagées pour obtenir des temps de réponse plus courts. Ces éléments seront abordés en 1998.

### 3. Collaborations

Ce projet repose sur une collaboration entre l'Institut d'automatique (IA) de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), l'École d'ingénieurs de l'État de Vaud (EINEV) à Yverdon et l'entreprise AGENA à Moudon.

Lors de l'European Control Conference organisée à Bruxelles, des contacts informels ont été établis avec M. Pedro Balsa Escalante de la Plataforma Solar de Almeria. Ce groupe est particulièrement intéressé aux solutions de pilotage à distance développées à l'Institut d'automatique et exploitées pour le présent mandat.

Lors du Symposium on advance in Control Education organisé à Istanbul, des contacts informels ont été pris avec le Prof. A. Kuzucu de l'Istanbul Technical University (ITU) qui travaille sur un projet de commande de chauffe-eau solaire.

### 4. Transferts

Les transferts technologiques sont prévus dans la phase du projet qui sera conduite en 1998.

### 5. Perspectives pour 1998

#### Janvier à février 98

IA	Conclusion de l'étude de sensibilité, proposition de la structure de supervision (capteurs et actuateurs additionnels).
	Mise en place de l'environnement de développement de la commande avancée et émulation numérique de l'ancienne solution analogique.
EINEV	Validation de l'étude de sensibilité (mesure des indices de performances dans des situations standard).
AGENA	Évaluation des solutions permettant d'exploiter la pompe d'ajustement du débit dans le circuit du capteur solaire de façon continue.

#### Mars à juin 98

IA	Élaboration de la commande anticipative de l'appoint d'énergie et de l'étage d'identification des habitudes des usagers.
	Implantation de l'ajustement optimal du débit dans la commande avancée.
AGENA	Réalisation des modifications sur le KitS*L pour permettre une supervision automatique intégrant le capteur solaire optimal.

EINEV Test de l'installation intégrant un capteur solaire optimal et campagne de comparaison avec une installation standard.

Milestone Validation par l'expérimentation de l'approche d'optimisation des performances proposée pour l'étage de supervision.

### **Juillet à septembre 98**

IA Élaboration de la stratégie de détection de pannes et validation par simulation (vaporisation dans le capteur solaire, dysfonctionnement des vannes de stratification, etc.).

Implantation de l'appoint prédictif dans la commande avancée.

AGENA Réalisation des modifications sur le KitS\*L pour permettre une supervision automatique intégrant l'appoint prédictif.

EINEV Test de l'installation complété par un appoint prédictif et campagne de comparaison avec une installation standard.

Milestone Concept complet intégrant l'optimisation des performances et la détection de pannes.

### **Octobre à décembre 98**

IA Validation par simulation de la structure combinant l'optimisation et la détection de pannes.

Implantation de la détection de panne dans la commande avancée.

Dépouillement des essais globaux, rédaction et publication du rapport final.

Organisation d'une présentation publique.

EINEV Poursuite des tests comparatifs et validations expérimentales des procédures de détection de pannes.

AGENA Évaluation des coûts et industrialisation des solutions élaborées sur le prototype du KitS\*L avec la supervision automatique complète.

Milestone Solution industrielle intégrant l'optimisation des performances et la détection de pannes.

Passage du test d'homologation au Technicum de Rapperswil.

## **6. Publications éditées ou soumises en 1997**

- [1] T. Prud'homme, "Optimisation du fonctionnement d'une installation de chauffage solaire d'eau sanitaire", Rapport de travail de diplôme 96/97, Institut d'automatique, EPFL, Lausanne, février 1997.

- [2] T. Prud'homme, et D. Gillet, "Supervision automatique d'installations solaires thermiques: Application aux kits solaires de production d'eau chaude sanitaire", CISBAT'97, Lausanne, octobre 1997.