

Recherche énergétique  
Programme Solaire actif: Chaleur

# Supervision automatique de kits solaires de production d'eau chaude sanitaire

## Rapport final

### **MANDANT**

Office fédéral de l'énergie  
OFEN  
Case postale  
CH - 3003 Berne 3

### **MANDATAIRE**

Institut d'automatique - École Polytechnique Fédérale de Lausanne  
CH - 1015 Lausanne  
<http://iawww.epfl.ch>

**Rapporteurs:**  
**email:**

Thierry Prud'homme et Denis Gillet  
[Thierry.Prudhomme@epfl.ch](mailto:Thierry.Prudhomme@epfl.ch), [Denis.Gillet@epfl.ch](mailto:Denis.Gillet@epfl.ch)

---

Décembre 1999

## Résumé

Ce travail se concentre sur les chauffe-eau solaires d'eau domestique. Le travail réalisé dans le cadre d'un précédent mandat a montré l'intérêt de l'implantation d'une commande avancée incorporant des prévisions météorologiques et des prévisions du comportement utilisateur en termes de besoins en eau chaude. En plus de l'élaboration de cette stratégie de commande avancée, des modifications structurelles judicieuses ont été proposées. Il s'agit de la segmentation de l'apport auxiliaire d'énergie et de l'alimentation de la pompe par une cellule photovoltaïque. L'objet du présent mandat concerne la mise en place sur une installation réelle des améliorations proposées précédemment.

L'installation réelle utilisée pour la validation est fabriquée par Agena SA et est en fonctionnement à l'École d'Ingénieurs du canton de Vaud (ei•vd)<sup>1</sup>. Les prévisions météorologiques sont fournies en ligne via email par l'Institut Suisse de Météorologie (ISM)<sup>2</sup>. La segmentation de l'appoint auxiliaire d'énergie consiste à remplacer le corps de chauffe unique par trois corps de chauffe de différentes longueurs. Cette modification a été réalisée par l'entreprise Walser & Co<sup>3</sup>, fournisseur habituel de corps de chauffe pour Agena. Enfin, l'implantation de la commande avancée est réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, un ordinateur personnel est utilisé pour valider la stratégie de commande. Dans un deuxième temps, une solution de type PC industriel a été adoptée pour montrer une possible implantation commerciale.

## Abstract

This work concentrates on Solar Domestic Hot Water Systems (SDHWS). Former investigations have shown the benefit induced by the introduction of an advanced control strategy. This strategy incorporates weather forecasts and estimation of the users' needs in terms of draw-off. Some structural improvements have also been proposed, such as the segmentation of the auxiliary heater and the use of PV cells to supply the circulating pump with power. The purpose of the present work is the implementation of the proposed modifications on a commercial solar kit.

The system under consideration is manufactured in Switzerland by Agena SA. It is in use at the École d'Ingénieurs du canton de vaud (ei•vd)<sup>1</sup>. Weather forecasts are provided via email by the Swiss Meteorological Institute (SMI)<sup>2</sup>. The segmentation of the auxiliary heater consists in the replacement of the only electrical element by three ones with different lengths. This modification has been realised by Walser & Co<sup>3</sup>. The implementation of the advanced control strategy is carried out in two steps. First, a standard PC is used to validate the control strategy. Secondly, an industrial PC has been chosen as a feasible commercial solution.

---

1. Route de Cheseaux 1, CH - 1440 Yverdon  
2. Kräbühlstrasse 58, Boîte postale, CH - 8044 Zürich  
3. BahnStation herde, CH - 9044 Wald

## **Table des matières**

### **1 Introduction**

### **2 Améliorations proposées**

#### **2.1 Vue d'ensemble**

#### **2.2 Alimentation de la pompe par une cellule photovoltaïque**

2.2.1 Motivation et problématique

2.2.2 Réalisation

#### **2.3 Segmentation de l'apport auxiliaire d'énergie**

2.3.1 Réalisation de trois corps de chauffe de taille différente

2.3.2 Alimentation

#### **2.4 Stratégie de commande avancée**

2.4.1 Moyens de calculs nécessaires

2.4.2 Transmission des données météorologiques

2.4.3 Implantation avec un ordinateur personnel

2.4.4 Implantation de type PC industriel

### **3 Conclusions et perspectives**

### **4 Références**

### **5 Remerciements**

## 1 Introduction

L'objectif initial du projet porte sur l'optimisation du fonctionnement des chauffe-eau solaires d'eau sanitaire par la mise en place d'une stratégie de commande avancée. Une méthodologie complète a donc été élaborée de façon à aboutir à une stratégie de commande adéquate qui minimise l'utilisation de l'apport auxiliaire d'énergie tout en maximisant le degré de confort des utilisateurs. Cependant, le bénéfice potentiel de modifications structurelles novatrices a été mis en lumière grâce à l'utilisation d'outils puissants de simulation. L'objet du mandat étendu présenté dans ce document focalise donc sur l'implantation sur une installation réelle des solutions envisagées.

Les solutions préconisées sont décrites en détail dans le rapport final du mandat initial [3]. Elles sont toutefois brièvement rappelées. La plus importante est la stratégie de commande avancée. Une stratégie de type commande prédictive a été retenue. Les autres solutions sont des modifications structurelles qui concernent l'alimentation de la pompe par une cellule photovoltaïque et la segmentation de l'apport auxiliaire d'énergie.

## 2 Améliorations proposées

### 2.1 Vue d'ensemble

L'ensemble des travaux à réaliser représente un volume de travail important et requiert des compétences dans des domaines très divers. Les deux prochaines sections décrivent l'alimentation de la pompe par une cellule photovoltaïque et la réalisation de la segmentation de l'apport auxiliaire d'énergie. La dernière section présente l'implantation de la commande avancée.

### 2.2 Alimentation de la pompe par une cellule photovoltaïque

#### 2.2.1 Motivation et problématique

Le débit optimal dans le collecteur présente un profil similaire à celui de l'ensoleillement. L'idée qui découle de cette observation est d'alimenter la pompe par une cellule photovoltaïque. La seule difficulté inhérente à une telle modification réside dans la combinaison de ces deux éléments. En effet, un couplage direct ne permet pas un transfert de puissance optimal. Cette problématique est résumée à la figure 1.

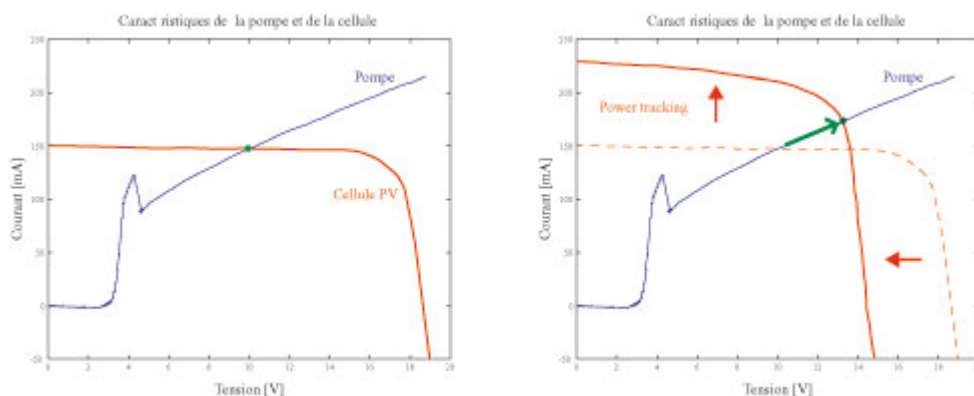


Figure 1: Principe du couplage passif ou actif.

Sur la figure de gauche, les caractéristiques courant-tension de la pompe et de la cellule ont été dessinées dans le cadre d'un couplage direct passif. Le point de fonctionnement est donné par

l'intersection des deux courbes. Il est clair qu'il ne correspond pas au maximum de puissance que la cellule peut délivrer. La figure de droite montre une adaptation active d'impédance qui permet de modifier la caractéristique de la cellule de façon à maximiser ce transfert de puissance. Une interface électronique d'adaptation automatique de l'impédance entre la cellule et la pompe a été proposée.

### 2.2.2 Réalisation

L'adaptation d'impédance est réalisée grâce à deux circuits distincts, un abaisseur et un élévateur de tension. Dans les deux cas, le rapport de la tension d'entrée sur la tension de sortie peut facilement être ajusté. Un algorithme simple a été mis au point pour commuter entre l'abaisseur et l'élévateur, ainsi que pour sélectionner le bon rapport entre tension de sortie et tension d'entrée. Les détails peuvent être trouvés dans [6].

## 2.3 Segmentation de l'apport auxiliaire d'énergie

### 2.3.1 Réalisation de trois corps de chauffe de taille différente

Nous avons montré que l'apport auxiliaire d'énergie tel qu'il est conçu habituellement offre peu de flexibilité. En effet, il est constitué d'un corps de chauffe unique qui plonge dans la cuve et qui chauffe par conséquent toujours la même quantité d'eau, quels que soient les besoins en eau chaude des utilisateurs. Ainsi, la température dans la cuve est trop élevée quand les besoins sont faibles. Ceci entraîne une diminution notable du potentiel d'échange entre la cuve et le circuit du collecteur solaire.

L'idée est donc de remplacer ce corps de chauffe unique par plusieurs corps de chauffe de différentes longueurs qui peuvent être alimentés séparément en fonction des besoins des utilisateurs. Trois corps de chauffe représentent un bon compromis entre maîtrise du volume d'eau chauffée et facilité de commande. La disposition des trois corps de chauffe à l'intérieur de la cuve peut être observée à la figure 2. Ils sont enclenchés indépendamment par le système de commande suivant l'importance du soutirage.

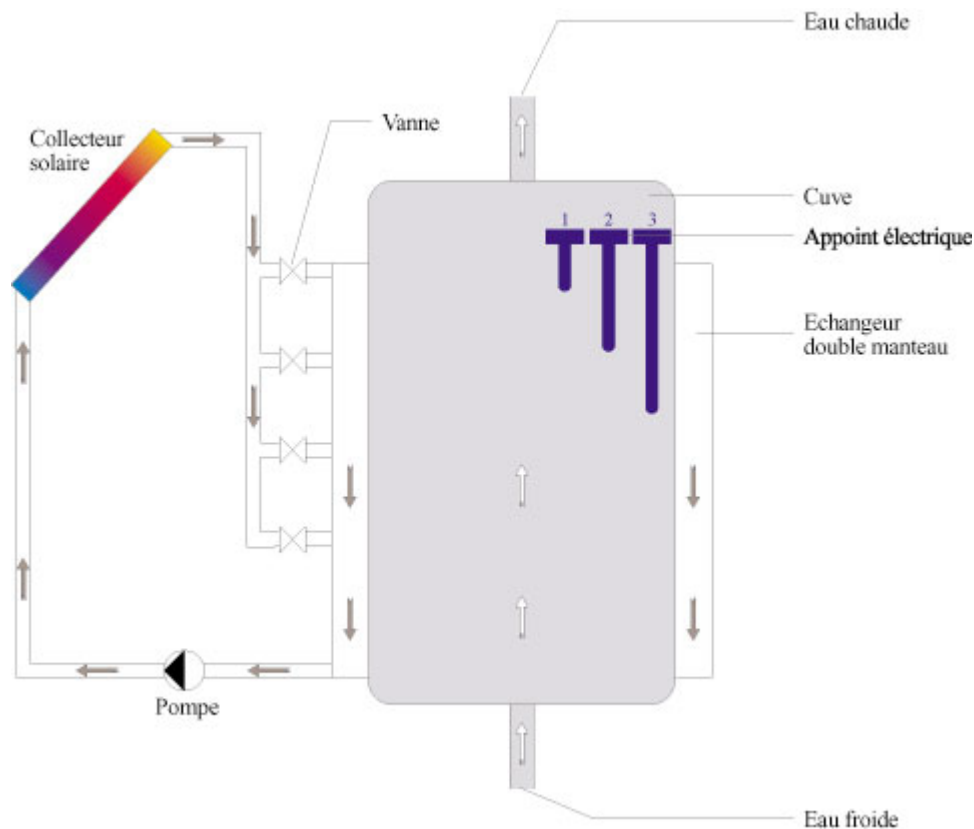


Figure 2: Disposition des trois corps de chauffe

Les trois appoints ont été réalisés par l'entreprise Walser & Co. Une photo de cet apport auxiliaire segmenté est présentée à la figure 3.



Figure 3: Apport auxiliaire d'énergie segmenté

### 2.3.2 Alimentation

Deux choix étaient possibles pour l'alimentation de ces trois corps de chauffe, soit une alimentation continue, soit une alimentation tout ou rien. Le choix retenu a été l'alimentation tout ou rien. Les résultats de l'optimisation présentée dans [3] montrant clairement que la complexification résultant d'une alimentation continue ne conduit pas à un bénéfice significatif au niveau de l'efficacité.

## 2.4 Stratégie de commande avancée

### 2.4.1 Moyens de calculs nécessaires

Le principe envisagé pour la mise en œuvre d'une stratégie de commande avancée est résumé à la figure 4.



Figure 4: Principe de l'optimisation

Le principe de cette commande est relativement simple. Pour prédire le comportement de l'installation sur un horizon d'une journée, les prévisions du comportement utilisateur et des données météorologiques sont exploitées. De plus, le modèle dynamique complet de l'installation est utilisé pour anticiper l'effet consécutif à l'ajustement des commandes. Grâce à ces informations, il est possible de déterminer à l'avance les entrées qui conduiront à un fonctionnement optimal de l'installation. Cette méthodologie a été mise en place et validée en simulation, de nombreux détails peuvent être trouvés dans [1-5].

Cette stratégie de commande repose cependant sur la résolution d'un problème complexe d'optimisation. Le modèle mathématique de l'installation est utilisé un grand nombre de fois. Comme toutes les grandeurs internes (états) dans ce modèle ne sont pas mesurées, il a également été nécessaire de construire un estimateur basé sur un filtre de Kalman étendu pour les estimer. Cette estimateur est présenté en détail dans [6]. La figure 5 illustre le principe de la commande dans sa globalité.

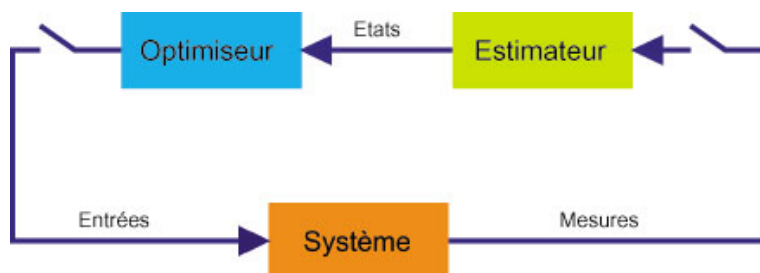


Figure 5: Structure de la commande avancée

L'optimisation et l'estimation sont des opérations qui induisent une importante charge de calculs. Cette charge est néanmoins acceptable pour des ordinateurs personnels tels ceux que l'on peut trouver aujourd'hui sur le marché.

#### 2.4.2 Transmission des données météorologiques

Les données météorologiques sont transmises via internet par l'ISM. Pour l'heure, elles sont envoyées par emails à chaque fois que de nouvelles prévisions sont calculées. Ainsi, il convient pour l'implantation d'intégrer à la commande des moyens de communication permettant de recevoir ces données. Ces moyens de communications peuvent également être utilisés pour piloter à distance l'installation. Ils permettent aussi de détecter d'éventuelles pannes et de modifier les algorithmes de commande sans avoir à se déplacer physiquement.

### 2.4.3 Implantation avec un ordinateur complet

La première solution envisagée pour tester les algorithmes proposés a été d'utiliser un ordinateur personnel équipé d'une carte d'acquisition de données. Le système d'exploitation utilisé est le MacOS qui présente des atouts importants pour implanter des solutions temps réel. Le logiciel de supervision utilisé est LabVIEW et les algorithmes d'optimisation et d'estimation sont écrits en langage C. Des modules ont dû être élaborés afin de conditionner les signaux de mesure et de commande. Le logiciel de gestion des e-mails utilisé est Eudora. Ce dernier permet en effet de lire automatiquement les e-mails envoyés par l'ISM sans l'intervention d'un utilisateur. L'ordinateur est relié au réseau local de l'ei•vd par l'intermédiaire d'une carte réseau Ethernet. Cette implantation est représentée de façon schématisée à la figure 6.

Cette solution est opérationnelle. Certains modules électroniques doivent toutefois encore être modifiés. Il s'agit néanmoins d'une infrastructure de recherche et développement dont l'industrialisation n'est pas envisageable. En effet, un ordinateur personnel ne peut pas être vendu avec chaque installation pour des raisons de prix et de place. La solution envisagée pour une commercialisation de la commande est décrite au paragraphe 2.4.4.

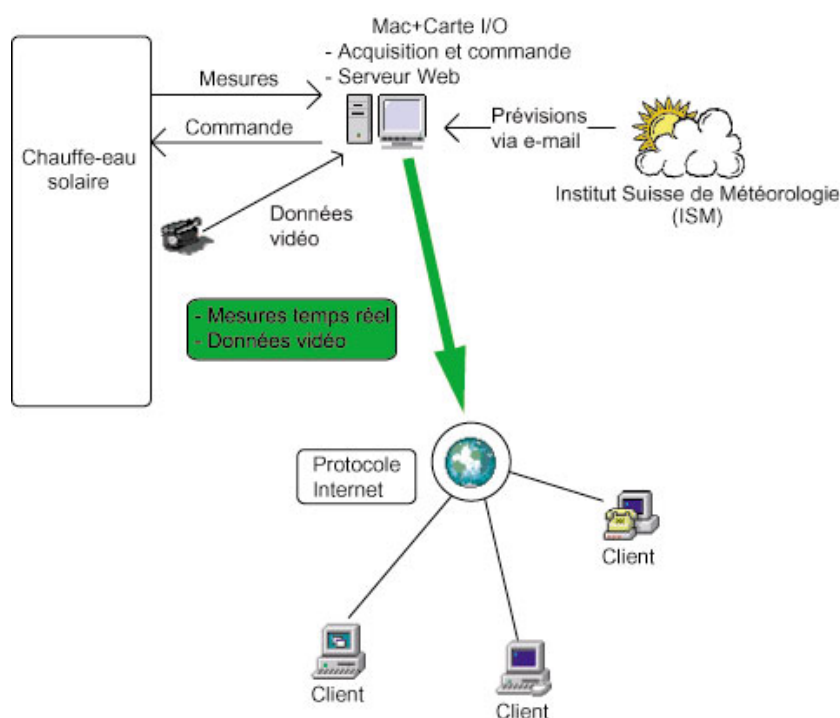


Figure 6: Implantation avec un ordinateur complet

### 2.4.4 Implantation de type PC industriel

Le système de commande industriel doit réaliser les mêmes fonctions que le système de développement tout en présentant un prix et un encombrement raisonnable. De plus, la tendance sur le marché des commandes numériques est de choisir des systèmes ouverts. Un développement dédié n'a donc pas été envisagé. Les capacités de calculs et de communication nécessaires nous ont amenés naturellement à opter pour un PC industriel. Il existe des PC très abordables qui intègrent des ports de communication standard et permettent un fonctionnement sans disque dur (ce dernier est simplement remplacé par une EPROM).



D'un point de vue logiciel, ce sont les conditions de fiabilité et de coût qui sont déterminantes. Le système d'exploitation doit être bon marché, stable et offrir les outils nécessaires à l'accomplissement des tâches de calculs et de communication préconisées. C'est donc le système d'exploitation Linux qui a été choisi. Il est gratuit, stable et il existe une version minimale n'occupant qu'un espace de 2.7 MB.

Les algorithmes d'optimisation et d'estimation sont portés actuellement dans ce nouvel environnement. Les modules électroniques réalisés pour le système de développement sont réutilisés. L'acquisition est réalisée au moyen d'une carte d'interface AD&DA "Low cost" se branchant sur le port parallèle du PC industriel.

La taille de la carte-mère PC choisie est de 24cm x 22cm (format standard MicroATX) et son prix, qui inclut un processeur Intel Celeron à 466 Mhz, est de CHF 150.- environ. La carte d'acquisition est deux fois plus petite que la carte PC et son prix avoisine également CHF 150.-. Les prix peuvent encore être réduits de manière considérable sachant que le processeur choisi est surdimensionné et qu'un nouveau format de carte mère (format FlexATX) vient d'apparaître. La carte en question est meilleur marché (environ 20 %) et plus petite (18cm x 23cm).

### 3 Conclusions et perspectives

Les modifications structurelles proposées ont été réalisées. Une implantation commercialement acceptable de la stratégie de commande avancée est quasiment terminée. Elle sera opérationnelle au début de l'année 2000.

La méthodologie utilisée pour les chauffe-eau solaires peut être transposée à des kits solaires thermiques plus complexes comme les installations solaires combinées réalisant le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage du bâtiment.

### 4 Références

- [1] Prud'homme T. et D. Gillet (1997). Supervision automatique d'installations solaires thermiques: Applications aux kits solaires de production d'eau chaude sanitaire. *CISBAT'97*, Lausanne, Switzerland.
- [2] Prud'homme T. et D. Gillet (1998). *Optimization of Solar Domestic Hot Water Systems*. EuroSun'98, Portoroz, Slovenia.
- [3] Prud'homme T. et D. Gillet (février 1999). Supervision automatique d'installations solaires thermiques: Première partie consacrée aux kits solaires de production d'eau chaude sanitaire. Rapport final à l'attention de l'Office fédéral de l'énergie, Lausanne, Switzerland.
- [4] Prud'homme T. et D. Gillet (juin 1999). *Optimisation of Solar Domestic Hot Water Systems*. Sun At Work in Europe, volume 14, number 2.
- [5] Prud'homme T. et D. Gillet (septembre 1999). Predictive control of a solar domestic hot water system with a segmented auxiliary heater. *CISBAT'99*, Lausanne, Switzerland.

- [6] Prud'homme T. et D. Gillet (décembre 1999). Supervision automatique d'installations solaires thermiques. Rapport intermédiaire à l'attention de l'Office fédéral de l'énergie, Lausanne, Switzerland.

## **5 Remerciements**

- L'Office fédéral de l'énergie qui a financé ce projet
- Jean-Christophe Hadorn pour ses précieux conseils
- L'entreprise Agena Energies SA comme principal partenaire industriel
- L'équipe du Professeur Ph. Dind de l'École d'ingénieurs du Canton de Vaud pour son assistance technique