

Recherche énergétique  
Programme Solaire actif : Chaleur

## **Supervision automatique d'installations solaires thermiques**

**Première partie consacrée aux kits solaires de production d'eau  
chaude sanitaire**

Rapport final

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

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

**Rapporteurs:** Thierry Prud'homme et Denis Gillet  
**e-mail:** [Thierry.Prudhomme@epfl.ch](mailto:Thierry.Prudhomme@epfl.ch), [Denis.Gillet@epfl.ch](mailto:Denis.Gillet@epfl.ch)

Février 1999

# Table des matières

<b>1 Introduction et motivation</b> .....	6
<b>1.1 Supervision actuelle des chauffe-eau solaires</b> .....	6
<b>1.2 Approches développées</b> .....	7
1.2.1 Commande avancée .....	7
1.2.2 Exploitation d'information en ligne .....	7
1.2.3 Introduction de moyens de calcul.....	8
<b>2 Cahier des charges</b> .....	9
<b>3 Approche de l'automaticien</b> .....	10
<b>3.1 Concept</b> .....	10
<b>3.2 Prédiction du comportement de l'installation</b> .....	10
3.2.1 Modélisation.....	10
3.2.2 Prédiction des perturbations.....	10
<b>3.3 Choix d'une stratégie de commande</b> .....	11
<b>3.4 Etude en simulation</b> .....	11
<b>3.5 Intégration de la solution sur le système réel</b> .....	11
<b>4 Application aux chauffe-eau solaires</b> .....	12
<b>4.1 Description de l'installation considérée</b> .....	12
<b>4.2 Elaboration d'un modèle mathématique</b> .....	13
4.2.1 Choix d'une structure de modèle .....	13
4.2.2 Description des variables d'état et des variables externes .....	15
4.2.3 Equations différentielles.....	15
4.2.4 Identification des paramètres du modèle.....	17
<b>4.3 Prédiction des perturbations</b> .....	17
4.3.1 Données météorologiques .....	19
4.3.2 Comportement des utilisateurs .....	20
<b>4.4 Optimisation des variables manipulées</b> .....	20
4.4.1 Bilan énergétique et choix d'une fonction de coût .....	21
4.4.2 Débit dans le circuit capteur et modifications structurelles .....	24

4.4.3	Puissance d'alimentation des corps de chauffe et modification structurelle .....	24
<b>4.5</b>	<b>Résolution du problème d'optimisation .....</b>	<b>26</b>
4.5.1	Principe.....	26
4.5.2	Caractérisation des entrées .....	26
4.5.3	Algorithme d'optimisation.....	27
<b>4.6</b>	<b>Implantation de la solution sur le système réel .....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>Résultats numériques .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1</b>	<b>Données utilisées pour l'optimisation et choix des paramètres .....</b>	<b>31</b>
<b>5.2</b>	<b>Débit dans le circuit capteur .....</b>	<b>32</b>
5.2.1	Profil du débit optimal .....	32
5.2.2	Alimentation de la pompe par une cellule PV .....	35
<b>5.3</b>	<b>Puissance d'alimentation des corps de chauffe .....</b>	<b>36</b>
5.3.1	Profil de la puissance d'alimentation optimale .....	37
5.3.2	Intérêt du fractionnement de l'appoint .....	42
5.3.3	Alimentation tout ou rien des corps de chauffe .....	44
<b>5.4</b>	<b>Remarques et possibilité d'implantation sur le système réel .....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>Environnement d'expérimentation .....</b>	<b>47</b>
<b>6.1</b>	<b>Description de l'installation à l'ei•vd .....</b>	<b>47</b>
<b>6.2</b>	<b>Stand indoor à l'Institut d'automatique de l'EPFL .....</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>Conclusions et perspectives .....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Références .....</b>	<b>53</b>
<b>9</b>	<b>Remerciements .....</b>	<b>54</b>
<b>Annexe A: Données de l'ISM .....</b>		<b>55</b>
<b>Annexe B: Programmes informatiques .....</b>		<b>56</b>

## Résumé

L'application des méthodes avancées de commande automatique couplée avec quelques modifications structurelles judicieuses permet d'augmenter considérablement les performances énergétiques des kits solaires de production d'eau chaude sanitaire tout en garantissant un haut degré de confort.

En effet, si les utilisateurs sont prêts à consentir un investissement initial plus important que pour un chauffe-eau traditionnel, ils voudront bien entendu rentabiliser cet investissement et en aucun cas sacrifier le confort auquel ils ont toujours été habitués.

Ce double objectif ne peut être atteint qu'au prix d'une supervision intelligente de telles installations. L'évolution des conditions de fonctionnement telles que les données météorologiques et le comportement des utilisateurs en termes de demande en eau chaude doivent être pris en compte dans la gestion des grandeurs manipulées que sont le débit dans le circuit collecteur ou la puissance d'alimentation des appoints auxiliaires d'énergie.

Des améliorations importantes ont été réalisées ces dernières années dans la conception des kits solaires de production d'eau chaude, alors que les algorithmes de commande des variables manipulées n'ont pas fondamentalement changé. Ils sont essentiellement basés sur le savoir-faire des constructeurs mais n'ont pas fait l'objet de validation rigoureuse. Les ébauches de commande avancée [4][6] sont souvent restées au stade de la simulation quand elles furent considérées pour ce genre de système, principalement en raison de limites technologiques. En effet, les capacités de calcul n'étaient pas suffisantes et l'implantation en temps réel des routines d'optimisation étaient quasi-impossibles. De plus, l'accès à des informations en ligne n'était pas envisageable. En résumé, il était difficile de considérer une intégration des prévisions météorologiques dans ces mêmes routines d'optimisation.

Mais les temps ont changé et aujourd'hui le développement des ordinateurs et des cartes à micro-contrôleurs, couplés avec des moyens modernes de diffusion de l'information, permet d'envisager sérieusement l'implantation d'une commande avancée. De plus, une fois implantés sur le système réel, ces moyens technologiques peuvent également être de formidables outils de supervision. En particulier, ils peuvent permettre sans coût supplémentaire une détection de pannes efficace.

Ainsi, il a été envisagé de concevoir une commande qui maximise la fraction solaire en assurant un certain degré de confort. Cette commande est basée sur un modèle mathématique représentatif de l'installation, des prévisions d'ensoleillement fournies par l'Institut Suisse de Météorologie (ISM)<sup>1</sup> et l'estimation des besoins des utilisateurs en termes de soutirage.

Au départ, l'optimisation du kit solaire de production d'eau chaude sanitaire concernait uniquement la synthèse et l'implantation d'une commande avancée. Il ne s'agissait en aucun cas de modifier le design des installations actuelles. Cependant, les diverses simulations qui ont été effectuées ont révélé que certaines modifications structurelles pouvaient se montrer très judicieuses. En effet, si la modélisation

---

1. Kräbühlstrasse 58, Boîte postale, CH - 8044 Zürich

et la simulation sont des outils indispensables à la synthèse d'algorithmes de commande, ils sont également très pratiques pour tester à moindre coût et très rapidement ces quelques modifications structurelles.

Ces modifications consistent essentiellement au remplacement du corps de chauffe électrique unique par plusieurs corps de chauffe de différentes longueurs et de différentes puissances d'alimentation, et à alimenter la pompe par une cellule photovoltaïque.

La mise en place de cette commande ainsi que les quelques modifications structurelles que l'étude a suggérées sont en cours de réalisation sur un KitSOL de l'entreprise AGENA énergies SA<sup>2</sup> installé à l'École d'ingénieurs du Canton de Vaud (ei•vd). Un serveur Web sera également couplé prochainement à cette installation pour permettre une visualisation à distance via Internet de son comportement.

# 1 Introduction et motivation

## 1.1 Supervision actuelle des chauffe-eau solaires

Actuellement, les algorithmes de commande des variables manipulées sont relativement simples. Il s'agit en général de réglage tout ou rien sans aucune prise en compte, ou alors très primaire, de l'évolution des conditions de fonctionnement.

Souvent, la valeur du débit dans le circuit capteur est fixée à la mise en service de l'installation. D'un côté, un débit élevé améliore le rendement instantané du capteur. D'un autre côté, ce même débit élevé peut détériorer la stratification à l'intérieur de la cuve et ainsi provoquer une température du liquide au retour dans le capteur plus élevée, ce qui entraîne une diminution de son rendement. Ainsi, depuis plusieurs années, les partisans du *Low-Flow* et du *High-Flow* défendent leur idée sur la base de ces deux arguments. La pompe est enclenchée ou déclenchée en fonction de la différence de température entre le liquide caloporteur à la sortie du collecteur et à une certaine hauteur de l'eau dans la cuve. Un cycle d'hystérésis est introduit pour éviter d'éventuels cycles d'enclenchements et de déclenchements.

Depuis quelque temps, des régulations un peu plus sophistiquées apparaissent sur le marché, par exemple un débit dans le circuit capteur proportionnel à l'ensoleillement. Des gains, en termes d'énergie collectée, ont été notés, mais aucune justification rigoureuse n'est apportée.

Il en est de même pour la commande de l'appoint auxiliaire. Elle est de type tout ou rien. L'enclenchement ou le déclenchement de l'appoint dépend de la température dans le haut de la cuve, toujours avec l'introduction d'un cycle d'hystérésis pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment.

Par une approche purement intuitive, il est possible de comprendre quelques-unes des limitations de ces stratégies très simples de commande. L'exemple le plus flagrant est celui de l'appoint auxiliaire. Avec la stratégie de commande actuelle une même quantité d'énergie est toujours présente dans la partie supérieure de la cuve. Si l'installation est bien dimensionnée, elle correspond à la limite supérieure des besoins en eau des utilisateurs. Hors, la puissance solaire transférée dans la cuve est d'autant plus importante que la température dans la cuve est basse. Il est donc évident que le conservatisme des algorithmes actuels provoque d'importantes baisses de rendement et il est clair qu'un algorithme qui prendrait en compte une connaissance même grossière des besoins en eau chaude des utilisateurs engendrerait des rendements plus élevés.

De la même manière, des prévisions météorologiques pourraient s'avérer primordiales dans le calcul des entrées optimales. En effet, intuitivement, associées à un modèle mathématique de l'installation adéquat, elles permettraient de prédire la quantité d'énergie solaire transférée et ainsi d'ajouter l'énergie auxiliaire juste nécessaire pour couvrir les besoins des utilisateurs. Ainsi, la diminution de l'énergie solaire transférée à l'intérieur de la cuve engendrée par l'utilisation de l'appoint auxiliaire serait moindre.

En résumé, comme tout système physique, le chauffe-eau solaire a une inertie (thermique dans ce cas précis). Ainsi, une action prise à un instant donné aura son plein effet dans un futur non immédiat, d'où l'importance de connaître à l'avance les perturbations et d'avoir un modèle mathématique du système pour en prédire le comportement.

D'une manière générale, le savoir-faire du constructeur est l'élément essentiel dans le choix des algorithmes de commande. Des efforts considérables ont été faits pour améliorer le design de ces installations, mais les études entreprises pour améliorer les algorithmes de commande de manière rigoureuse ont été peu nombreuses. Il s'agit en effet de deux sciences différentes.

## 1.2 Approches développées

### 1.2.1 Commande avancée

Il est établi au paragraphe précédent que le principal inconvénient des algorithmes classiques de commande des variables manipulées vient du fait qu'ils ne prennent aucunement en compte la connaissance que l'on peut avoir des prévisions météorologiques et du comportement des utilisateurs en termes de débit de soutirage, et qu'ils n'utilisent pas le fait qu'il est maintenant possible de prédire avec une grande précision le comportement d'une telle installation grâce à des algorithmes d'intégration numérique efficaces et une puissance de calcul suffisante.

Cependant, dans la littérature, il est aisé de trouver des méthodes de commande avancée qui utilisent cette information pour satisfaire un objectif précis.

Celle qui vient à l'esprit le plus naturellement est le *Contrôle Optimal* dont le principe est le suivant : supposons que l'on sache prédire avec plus ou moins de précision le comportement de l'installation sur un horizon donné, il est alors aisé de comprendre qu'il va être possible de calculer à l'avance les entrées durant cet horizon qui devront être appliquées à notre système pour obtenir le comportement désiré. Ce comportement désiré est caractérisé par une fonction de coût choisie. Dans notre exemple bien précis, la fonction de coût devra contenir un terme d'inconfort et un terme de consommation énergétique. Un algorithme numérique bien choisi déterminera ensuite quelles valeurs des entrées minimiseront cette fonction de coût. De plus amples explications sur le choix de la fonction de coût seront données plus loin dans ce rapport, le but étant dans un premier temps de comprendre l'idée générale rappelée à la figure 1 dans le cas du chauffe-eau solaire.

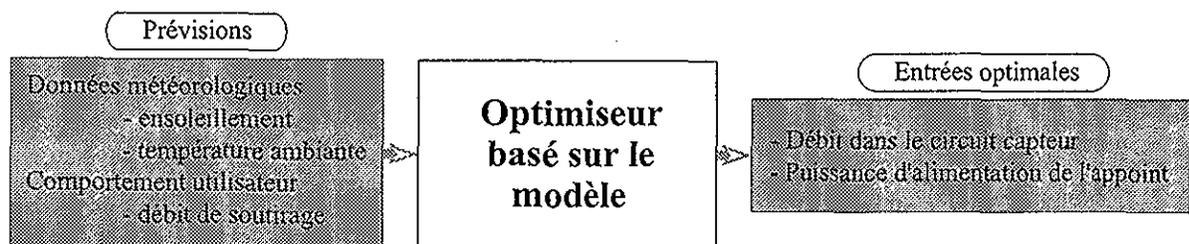


Figure 1: Principe de base de l'optimisation

A première vue, cette technique semble être idéalement adaptée à notre problème. Cependant, son implantation est très délicate. En effet, les entrées optimales sont obtenues en boucle ouverte, ce qui signifie qu'elles sont calculées par exemple à minuit pour un horizon d'une journée et qu'elles sont

ensuite appliquées pour toute la journée sans se soucier de l'évolution réelle de l'installation. En résumé, cette technique ne prend en compte ni les erreurs possibles de modélisation ni les écarts des perturbations réelles par rapport aux perturbations prédites ou estimées.

Pour l'implantation, il faudra préférer un schéma de *Commande Prédicative* qui introduit une rétroaction en répétant l'optimisation à chaque fois que de nouvelles mesures sont disponibles. Cela permet à l'algorithme de supervision de ne pas être trop "déconnecté" de ce qui se passe réellement sur le système en calibrant à intervalles réguliers la prédiction des températures du système sur les températures effectivement mesurées.

### 1.2.2 Exploitation d'information en ligne

Au paragraphe précédent, il a été noté que l'optimisation nécessite des prévisions météorologiques. Il était inconcevable il y a quelques années de supposer disposer de prévisions météorologiques en ligne. Ainsi, des modèles stochastiques des grandeurs météorologiques significatives étaient construits et mis à jour en fonction de nouvelles mesures [12].

Cependant, ces modèles s'avéraient souvent peu précis, mais ils représentaient un passage obligé pour le pilotage d'installations solaires. Depuis, les techniques de transmission de l'information ont fortement progressé et il n'est plus du tout incongru d'imaginer aujourd'hui disposer en ligne de prévisions calculées par un organisme spécialisé comme l'Institut Suisse de Météorologie (ISM).

Les moyens physiques de transmission peuvent être multiples, il est naturel de penser en premier lieu au réseau téléphonique vu sa large utilisation par les internautes, mais dans un futur proche, on peut imaginer que l'information transitera via le télé-réseau ou encore les lignes d'alimentation électrique.

### 1.2.3 Introduction de moyens de calcul

Les capacités de calcul des ordinateurs et autres micro-contrôleurs connaissent une croissance exponentielle et les prix ne cessent de diminuer. Il ne s'agit donc plus d'un facteur limitatif pour l'implantation d'une commande sophistiquée telle que celle présentée précédemment.

Cette formidable croissance des capacités de calcul permet également aux instituts de météorologie de construire des modèles de plus en plus précis de l'atmosphère et d'obtenir ainsi des prévisions météorologiques de grande qualité.

## 2 Cahier des charges

Dans le cadre de ce projet, notre but était de mettre au point des algorithmes de commande pour les variables manipulées permettant d'augmenter les performances énergétiques du système tout en garantissant un degré de confort maximum aux utilisateurs.

Il convenait également d'implanter cette commande sur le système réel avec une carte à micro-contrôleur.

Cependant, au cours de l'élaboration de ces algorithmes de commande, des modifications structurelles mineures nous sont apparues extrêmement judicieuses pour l'augmentation des performances énergétiques. Elles ont donc été étudiées en détail.

L'implantation des algorithmes de commande est en cours sur le site de l'ei•vd et se poursuivra au premier semestre 1999. L'installation sera pilotée par un ordinateur; l'implantation sur une carte à micro-contrôleur reste néanmoins un objectif.

### 3 Approche de l'automaticien

#### 3.1 Concept

L'automaticien n'a pas pour objectif la modification du design d'une installation pour en améliorer les performances. A partir d'une installation donnée et d'un cahier des charges spécifiant le comportement désiré pour cette même installation, l'automaticien devra synthétiser les algorithmes de commande des variables manipulées qui satisfont ce cahier des charges.

La première phase d'une telle entreprise est la construction d'un modèle mathématique ou modélisation. Elle permet de simuler le comportement de l'installation et d'en comprendre ainsi le comportement. Elle s'accompagne généralement d'une phase d'identification qui permet, à partir de données expérimentales, de calculer certains paramètres du modèle qui ne sont pas connus a priori.

Ce modèle mathématique va ensuite servir à synthétiser une loi de commande et à la valider en simulation.

Enfin, la dernière étape est l'implantation de la solution sur le système réel.

#### 3.2 Prédiction du comportement de l'installation

##### 3.2.1 Modélisation

La modélisation est l'élément essentiel de tout projet d'automatique. Bien faite, elle permet à moindres frais de saisir le comportement d'une installation complexe et de synthétiser une loi de commande de qualité.

Dans un premier temps, les variables externes qui agissent sur le système seront énumérées, elles seront de deux types; ① celles qui peuvent être manipulées et pour lesquelles des algorithmes de commande devront être synthétisés; ② celles qui ne peuvent pas être manipulées et qui sont communément appelées perturbations. Enfin, un certain nombre de variables d'état devront être choisies, il s'agit souvent de grandeurs physiques du système qui permettent, couplées à autant d'équations différentielles, de simuler le comportement du système.

##### 3.2.2 Prédiction des perturbations

Dans certains cas, le modèle ne va pas seulement être un moyen hors ligne de synthétiser des algorithmes de commande efficaces pour les variables manipulées. Il pourra également constituer lui-même un élément essentiel de ces algorithmes comme c'est souvent le cas en commande avancée. En particulier, en contrôle optimal, ce dernier est utilisé pour prédire le comportement de l'installation pour un jeu d'entrées donné, et ce jeu d'entrées est ajusté en fonction de l'évolution du comportement simulé jusqu'à l'obtention d'un comportement satisfaisant.

Cependant, il arrive que le modèle ne suffise pas pour prédire le comportement de l'installation. En effet, des perturbations peuvent avoir une influence significative. Ainsi, dans certains cas, il va être indispensable de pouvoir prédire l'évolution de ces mêmes perturbations sur l'horizon choisi.

### 3.3 Choix d'une stratégie de commande

Le choix de la stratégie de commande est clairement dicté par le niveau de qualité attendu du comportement de l'installation. Plus les spécifications sont pointues, plus les algorithmes de commande seront évolués. Ainsi, avant d'entreprendre une modification des algorithmes de commande d'une installation, il faut s'assurer que le gain engendré par ces algorithmes nouveaux ne sera pas ridiculement petit par rapport aux moyens déployés pour les obtenir.

D'une manière générale, les algorithmes simples sont employés en premier lieu, tels que le PID classique. Ils s'avèrent suffisants dans bon nombre de cas. Cependant, la particularité de certains systèmes, systèmes à grand temps de réponse, voire à non-minimum de phase, des contraintes, ou encore certains types de spécification montre les insuffisances de ces algorithmes simples issus des servomécanismes.

### 3.4 Etude en simulation

Avant d'envisager une implantation sur l'installation réelle des algorithmes de commande synthétisés, il est judicieux de s'assurer de son bon fonctionnement grâce à la simulation.

Pour ce faire, deux modèles mathématiques de l'installation pourront être élaborés, un premier, de structure plus simple, sera utilisé pour la synthèse de régulateurs, un second, beaucoup plus précis, servira à valider les algorithmes.

En effet, si le modèle fait partie intégrante de l'algorithme, il apparaît évident que sa structure doit être aussi simple que possible pour diminuer au maximum la charge de calculs. En revanche, en simulation pure, le temps de calcul n'est plus un problème et le critère de choix pour le modèle est simplement sa précision.

### 3.5 Intégration de la solution sur le système réel

Une fois validée en simulation, les algorithmes de commande doivent être implantés. Selon la complexité du régulateur obtenu, on choisira une régulation analogique ou numérique. Il est clair que la tendance actuelle nous incite à choisir une solution numérique qui n'est plus coûteuse et qui offre beaucoup plus de flexibilité. Cette solution numérique peut être implantée sur un ordinateur, sur une carte à micro-contrôleur ou éventuellement sur un automate programmable. Ce choix dépend de la taille de l'installation et du cahier des charges.

## 4 Application aux chauffe-eau solaires

### 4.1 Description de l'installation considérée

L'installation considérée dans cette étude est le KitSOL de l'entreprise AGENA énergies SA représentée schématiquement à la figure 2.

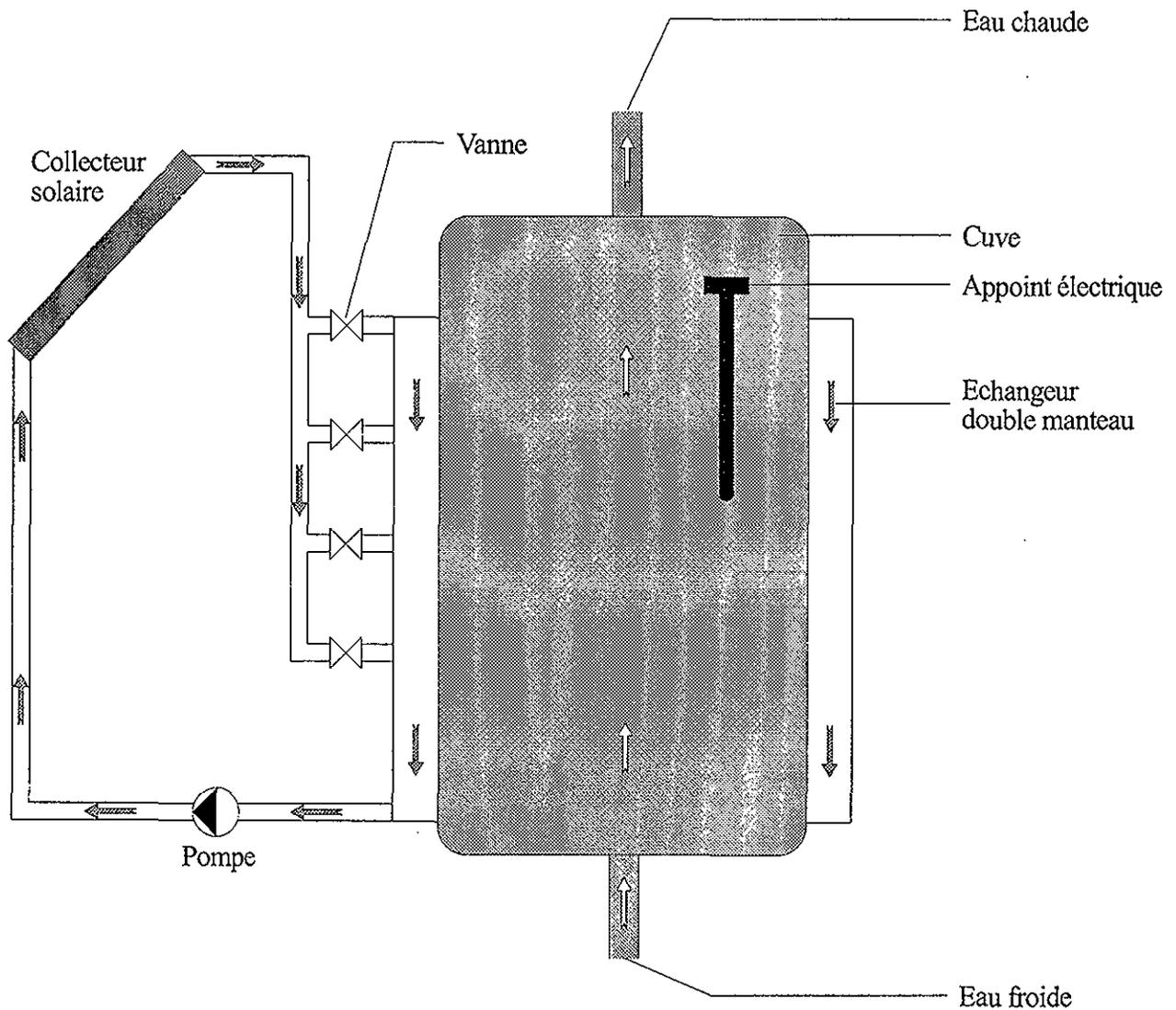


Figure 2 : Schéma de principe de l'installation

L'installation est ici présentée sous sa forme classique sans aucune modification structurelle. Elle est décrite telle qu'elle est commercialisée actuellement.

Lorsque l'ensoleillement est suffisant, la pompe de circulation met en mouvement le liquide caloporteur dans le circuit collecteur.

Ce liquide est chauffé dans le collecteur puis entre dans l'échangeur par l'une des quatre vannes. Ces vannes sont commandées par la régulation et permettent la charge solaire du chauffe-eau par étage. L'entrée dans l'échangeur se fait automatiquement à l'endroit du chauffe-eau où l'eau sanitaire est à une température inférieure au circuit solaire. Cet endroit variera constamment au cours de la journée en fonction de l'ensoleillement et des soutirages d'eau chaude sanitaire.

Dans la cuve, l'eau froide arrive par le bas et l'eau chaude sort par le haut. Une résistance électrique constitue l'appoint auxiliaire. Elle est activée quand l'apport solaire ne suffit pas à lui tout seul à subvenir aux besoins de l'utilisateur.

## 4.2 Elaboration d'un modèle mathématique

### 4.2.1 Choix d'une structure de modèle

Les équations qui décrivent le fonctionnement d'un kit solaire de production d'eau chaude sanitaire sont des équations de transfert de chaleur. Il s'agit donc d'équations différentielles aux dérivées partielles couplées les unes aux autres. Il est impossible de résoudre analytiquement ces équations dans le cas de ce système, il faut donc recourir à l'intégration numérique pour obtenir des solutions approchées.

Des algorithmes existent pour l'intégration numérique de ce genre d'équations différentielles, mais ils sont souvent très compliqués et les temps de calcul peuvent être particulièrement longs. Le principe est souvent le même, il réalise un maillage dans la direction d'une ou de plusieurs variables d'intégration et résout le jeu d'équations différentielles ordinaires résultant de ce maillage à l'aide d'algorithmes d'intégrations numériques courants tels que ceux de Runge-Kutta [2]. Ce maillage est adaptatif et sa précision dépend de la précision voulue pour les résultats de l'intégration.

Dans notre cas, les équations différentielles ne vont dépendre que du temps et de la hauteur, les effets de bord étant négligés. Plutôt que d'utiliser des algorithmes complexes pour résoudre les équations différentielles aux dérivées partielles, le maillage fera partie de la phase de modélisation et le nombre de couches choisi donnera une indication de la précision du modèle. Une fois cette découpe effectuée, il y aura autant d'équations différentielles ordinaires que de couches. Ces équations différentielles ordinaires pourront facilement être intégrées grâce aux algorithmes usuels d'intégration numérique.

La découpe est représentée à la figure 3,  $n$  représente le nombre de couches (h) dans l'échangeur, le nombre total de couches étant de  $2n+4$  ( $n+3$  couches (s) pour la cuve et 1 couche (c) pour le collecteur). Les pertes dans les conduites ne sont pas prises en compte et une seule couche est choisie pour le collecteur, ceci pourra être modifié s'il s'avère que ces hypothèses ne sont pas réalistes.

Pour l'essentiel des résultats qui seront présentés dans ce rapport, le nombre  $n$  a été choisi égal à 12. La découpe de l'ensemble cuve/échangeur qui résulte de ce choix est donnée à la figure 4. Dans cette figure, la forme réelle de la cuve a été respectée et les hauteurs de chaque couche sont données en millimètres. On peut également noter la présence de trois appoints électriques. Cette modification structurelle sera décrite et expliquée plus loin dans ce rapport. Les indices  $S_i$  représentent les sondes de température à l'intérieur de la cuve dans la configuration standard.

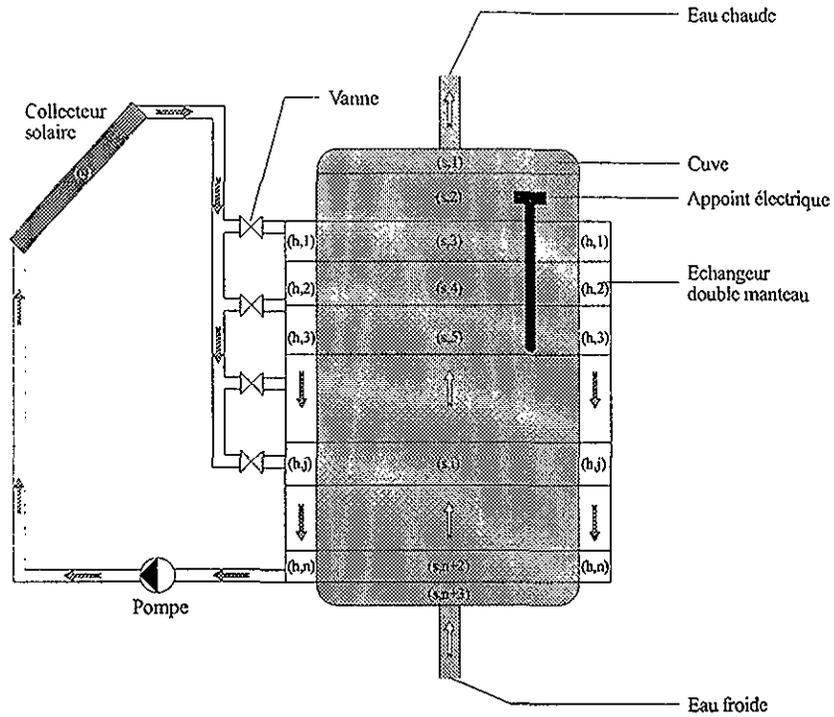


Figure 3 : Découpe de l'installation pour la modélisation

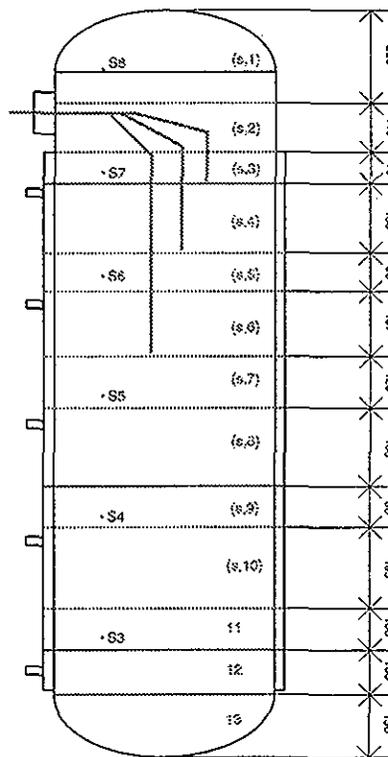


Figure 4 : Découpe choisie pour l'ensemble cuve/échangeur

#### 4.2.2 Description des variables d'état et des variables externes

Les variables d'état suffisent à elles seules à décrire le comportement de l'installation. Elles peuvent avoir une signification physique. Si leur choix peut s'avérer être un exercice difficile dans bien des cas, il n'en est rien pour le système considéré. Il s'agira évidemment des températures des différentes couches pour la découpe qui a été choisie.

A chacune de ces variables d'état sera associée une équation différentielle ordinaire qui permettra de décrire son comportement. Ces équations différentielles sont couplées et la résolution de ce système d'équations différentielles permet de simuler le comportement complet de notre installation.

D'autres variables influencent le comportement de l'installation, il s'agit des variables manipulées et des perturbations. La classification est évidente dans le cas d'un chauffe-eau solaire.

Les variables qui peuvent être manipulées sont le débit dans le circuit capteur et la puissance d'alimentation des corps de chauffe électriques. Les perturbations sont constituées par différentes grandeurs météorologiques et le débit de soutirage.

#### 4.2.3 Equations différentielles

En utilisant le facteur conditionnel  $\xi_i$  (qui active ou désactive le terme correspondant en fonction de la position du nœud) et la température  $T_{test,j}$  qui permet de prendre en compte l'effet des vannes de stratification, la balance énergétique est représentée par l'équation 1 pour chaque nœud  $(s,i)$  de la cuve, par l'équation 2 pour chaque nœud  $(h,j)$  de l'échangeur de chaleur et par l'équation 3 pour le nœud  $(c)$  du collecteur :

$$M_{s,i} C_{pf} \frac{dT_{s,i}}{dt} = \xi_i \kappa_{h,s}^i (T_{h,i-2} - T_{s,i}) + \dot{m}_L C_{pf} (T_{s,i+1} - T_{s,i}) + (1 - \xi_i) \kappa_{s,a}^i (T_{amb,in} - T_{s,i}) + \dot{Q}_i \quad (1)$$

$$i = \{1, \dots, 13\}, \quad T_{s,14} = T_{in}$$

$$M_{h,j} C_{pc} \frac{dT_{h,j}}{dt} = \kappa_{h,s}^{j+2} (T_{s,j+2} - T_{h,j}) + \dot{m}_C C_{pc} (T_{test,j} - T_{h,j}) + \kappa_{h,a}^j (T_{amb,ex} - T_{h,j}) \quad (2)$$

$$j = \{1, \dots, 10\}$$

$$T_{test,j} = \begin{array}{l} T_{test,j} \text{ pour annuler le terme correspondant si la vanne ouverte} \\ \text{est en dessous du nœud } j \text{ de l'échangeur} \\ T_{h,j-1} \text{ si la vanne ouverte est au dessus du nœud } j \text{ de} \\ \text{l'échangeur} \\ T_c \text{ si le nœud } j \text{ de l'échangeur se trouve exactement à la} \\ \text{hauteur de la vanne ouverte} \end{array}$$

$$C_{col} \frac{dT_c}{dt} = c_0 A I_T - c_1 A (T_c - T_{amb,ex}) + \dot{m}_C C_{pc} (T_{h,4} - T_c) \quad (3)$$

$$\xi_i = 1 \text{ si } i \in \{3, \dots, 12\}, \text{ sinon } \xi_i = 0$$

Les variables d'état sont les températures des différentes couches de liquide, les indices sont ceux que l'on retrouve sur la figure 3, soit :

$T_{s,i}$	Température de la $i$ -ème couche de la cuve	[°C]
$T_{h,j}$	Température de la $j$ -ème couche de l'échangeur	[°C]
$T_c$	Température du liquide dans le collecteur	[°C]

Les variables manipulées sont les suivantes :

$\dot{m}_c$	Débit dans le circuit capteur	[kg/s]
$\dot{Q}_i$	Puissance électrique introduite dans la $i$ -ème couche	[kW]

En fait,  $\dot{Q}_i$  peut provenir de plusieurs résistances électriques. Dans les équations, ce terme définit seulement l'ensemble de l'apport électrique pour la  $i$ -ème couche.

Les perturbations peuvent se classer en deux catégories, celles d'ordre météorologique et les autres. Les différentes grandeurs d'ordre météorologique qui interviennent dans les équations sont :

$I_T$	Puissance solaire incidente globale sur le collecteur incliné à 45 °	[kW/m <sup>2</sup> ]
$T_{amb,ex}$	Température ambiante autour du collecteur	[°C]
$T_{amb,in}$	Température ambiante autour de la cuve	[°C]

Les autres perturbations sont les suivantes :

$\dot{m}_L$	Débit de soutirage	[kg/s]
$T_{in}$	Température de l'eau qui entre dans le bas de la cuve	[°C]

Les derniers termes qui restent à expliciter sont les paramètres du modèle, ils sont constants :

$M_{s,i}$	Masse en eau de la $i$ -ème couche de la cuve	[kg]
$M_{h,j}$	Masse en eau de la $j$ -ème couche de l'échangeur	[kg]
$C_{pf}$	Chaleur massique de l'eau dans la cuve	[kJ/kgK]
$C_{pc}$	Chaleur massique du liquide caloporteur dans le circuit collecteur	[kJ/kgK]
$C_{col}$	Capacité effective du collecteur	[kJ/K]
$\kappa_{h,s}^i$	Efficacité de l'échangeur au niveau de la $i$ -ème couche de la cuve	[kW/K]
$\kappa_{s,a}^i$	Coefficient de pertes thermiques de la $i$ -ème couche de la cuve	[kW/K]
$\kappa_{h,a}^j$	Coefficient de pertes thermiques de la $j$ -ème couche de l'échangeur	[kW/K]
$c_0$	Constante du capteur donnant le rendement maximum	[-]
$c_1$	Coefficient du premier ordre de pertes thermiques du capteur	[kW/m <sup>2</sup> K]
$A$	Surface d'absorption du capteur	[m <sup>2</sup> ]

Quelques hypothèses ont été faites pour l'élaboration de ce modèle. La conduction a été négligée, ainsi que les pertes dans les conduites. Ces éléments n'ont qu'une influence faible au regard des autres échanges de chaleur, cependant ils peuvent aisément être rajoutés dans le modèle. En fait, la complexité du modèle dépend de son utilisation. Avec ce modèle, un bon compromis entre précision des résultats et complexité semble avoir été trouvé.

#### 4.2.4 Identification des paramètres du modèle

Les équations d'état du modèle sont des relations physiques qui décrivent différents échanges de chaleur. Ainsi, la plupart des paramètres qui interviennent dans ce modèle sont des constantes physiques bien connues. Il est exclu de vouloir identifier ce que l'on connaît déjà parfaitement. De la même manière, la géométrie des éléments constitutifs du système est connue et les masses en liquide des différentes couches peuvent être aisément calculées.

Pour identifier les paramètres d'un modèle mathématique, il faut mettre en place une série d'expériences qui mettent chacune en avant un transfert de chaleur sensible au paramètre que l'on désire calculer. Si l'expérience est mal choisie, le paramètre à identifier n'aura pas une influence significative sur le comportement de l'installation et son identification sera très imprécise.

L'installation dont nous disposons à l'heure actuelle est en fonctionnement normal, c'est-à-dire que les commandes de la pompe et de l'appoint sont effectuées par le module analogique fourni en standard par AGENA énergies SA. Ainsi, il était très difficile d'envisager d'imposer des séquences tests pour l'identification de tel ou tel paramètre.

Donc, à l'heure actuelle, seuls quelques paramètres ont pu être identifiés. Parmi eux, le coefficient de transfert de chaleur entre la cuve et l'échangeur ainsi que les constantes du capteur qui caractérisent son rendement. Il est par exemple impossible de juger de l'effet du débit sur le coefficient de transfert de chaleur entre la cuve et l'échangeur car le débit est constant quand la pompe est enclenchée ou nul quand elle ne l'est pas. Il est également impossible d'identifier les coefficients de pertes thermiques dans le milieu ambiant pour les différentes couches de la cuve et de l'échangeur.

Ces limitations rendent également difficile l'appréciation de certaines hypothèses comme le fait que les pertes dans les conduites ou encore la conduction dans la cuve n'ont pas été prises en compte.

Le doute sera levé au premier semestre 1999, et une identification aussi précise que possible sera réalisée. En effet, le module de régulation analogique d'AGENA énergies SA sera déconnecté, la régulation des différents éléments sera effectuée par un ordinateur qui recueillera également toutes les mesures à une période d'échantillonnage beaucoup plus petite.

#### 4.3 Prédiction des perturbations

Le modèle est nécessaire pour prédire le comportement de l'installation, en revanche il peut s'avérer qu'il ne soit pas suffisant. En effet, dans notre cas, le comportement du chauffe-eau solaire est fortement dépendant des conditions météorologiques et du comportement utilisateur en termes de besoin en eau chaude. Les graphiques des figures 5 et 6 montrent le comportement d'un même modèle d'une installation dans deux cas différents. Sur la figure 5, l'ensoleillement choisi est celui d'une belle journée et six soutirages sont effectués. Sur la figure 6, l'ensoleillement est choisi nul tout au long de la journée ainsi que le soutirage. Dans les deux cas, l'appoint auxiliaire est choisi nul tout au long de la journée.

Ces deux cas sont bien sur extrêmes. On peut néanmoins noter que les températures des couches d'eau de la cuve représentées sur ces figures sont totalement différentes.

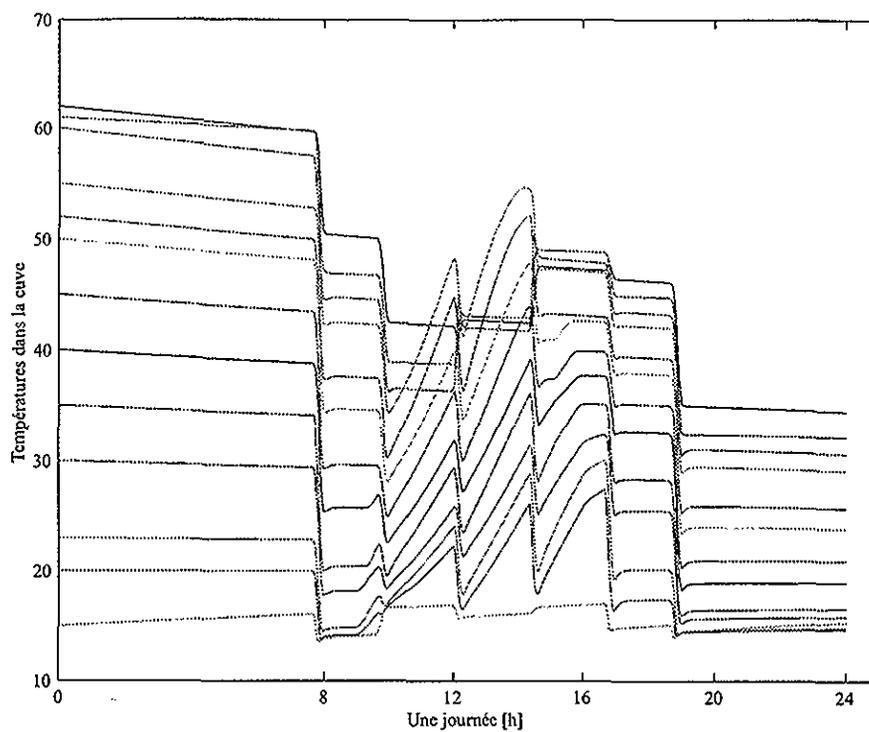


Figure 5 : 1er cas, belle journée, soutirage standard

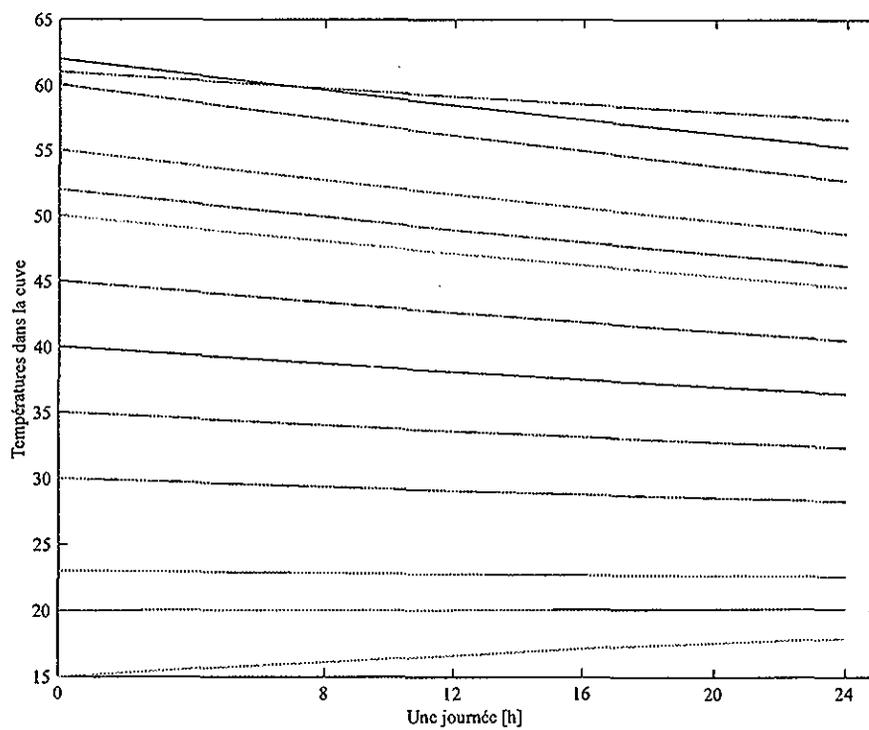


Figure 6 : 2ème cas, ensoleillement nul, pas de soutirage

Il apparaît donc évident à la vue de ces deux graphiques que la connaissance de l'ensoleillement et du débit de soutirage est essentielle pour pouvoir prédire le comportement de l'installation.

La température extérieure a également une importance significative sur le comportement de l'installation, car elle peut fortement varier et elle intervient linéairement dans la représentation du coefficient de pertes thermiques du capteur.

Concernant les autres perturbations, elles sont d'une importance moindre par rapport aux trois citées précédemment. La température de l'eau à l'entrée dans le bas de la cuve ne varie que très peu autour de 12 °C et la température ambiante autour de la cuve ne varie pas beaucoup non plus autour de 20 °C. Il ne sera donc pas nécessaire de les prédire.

Ainsi, étant donné que la stratégie de commande choisie nécessite que le comportement de l'installation soit prédit sur un certain horizon, les perturbations jouant un rôle capital devront elles aussi être prédites sur ce même horizon.

#### 4.3.1 Données météorologiques

Il y a quelques années, il était utopique de penser obtenir des informations en ligne sur l'évolution des conditions météorologiques, ainsi, les gens qui se sont intéressés au contrôle optimal d'installations solaires ont construit des modèles stochastiques des grandeurs météorologiques sur la base de mesures en ligne de l'ensoleillement et de la température ambiante mais également en fonction de la période de l'année.

Il est donc clair que ces modèles présupposent une certaine logique dans l'évolution des conditions météorologiques, mais ce ne sont pas des modèles des processus atmosphériques au sens propre du terme et ils ne peuvent en aucun cas prévoir un passage nuageux, un orage ou encore une averse.

L'évolution des performances des ordinateurs a permis aux instituts de météorologie de créer des modèles très précis des processus atmosphériques basés sur un système complet de lois physiques telles que les équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement ou encore de l'énergie.

Bien entendu, il est inconcevable d'intégrer un tel modèle pour une seule installation solaire. En revanche, il est facile de nos jours d'envisager de prendre, via un réseau de transmission quelconque, les informations provenant d'un institut de météorologie. Ainsi, une collaboration est née entre l'Institut d'automatique et l'Institut Suisse de Météorologie (ISM) pour la transmission de prévisions météo en ligne.

En collaboration avec le service météorologique allemand, l'ISM a développé un modèle de prévision numérique à haute résolution appelé "Modèle Suisse"(SM). Le SM calcule deux fois par jour une prévision de 48 heures. Le modèle possède une grille de 145x145 points au sol, distants de 14 km. La grille couvre un domaine qui s'étend de l'Europe Occidentale et Méridionale (de l'Irlande à la Pologne, en passant par le Danemark au nord, de l'Espagne à la Calabre au Sud). En altitude, le modèle dispose de 20 niveaux. En chacun de ces 420'500 points, le temps (c'est-à-dire la pression, la température, le vent, les précipitations, etc ...) est prédit par intervalles de 4 minutes.

Le calcul du SM se déroule sur le super-ordinateur CRAY-J0 de l'École Polytechnique Fédérale de Zürich (ETHZ). A 4h30 et 16h30 (heure d'été), l'ordinateur fournit à l'ISM les dernières prévisions en environ 90 minutes de calcul. Les résultats sont automatiquement disséminés par le réseau informatique de l'ISM sous la forme de graphiques et de tabelles pour chaque heure de prévision.

Nous concernant, les données sont transmises via e-mail. L'algorithme vient ensuite deux fois par jour lire les dernières prévisions et utilise ces informations dans le calcul des entrées optimales.

#### 4.3.2 Comportement des utilisateurs

Les prévisions de l'ensoleillement ainsi que de la température extérieure sont donc fournies par l'ISM. Cependant, le comportement des utilisateurs en termes de débit de soutirage est également très important dans la prédiction du comportement de l'installation.

Le problème n'est pas encore complètement résolu, cependant plusieurs solutions peuvent être envisagées.

La solution la plus grossière serait d'avoir des profils types de soutirage en fonction du nombre de personnes, de l'âge de ces personnes, et peut-être encore d'autres caractéristiques ayant une influence significative sur les besoins en eau chaude. Cette solution est très simple mais elle a l'inconvénient d'être basée sur une moyenne de comportements, et rien ne prouve que la distribution des comportements soit très serrée autour de cette moyenne

Une autre idée serait de laisser aux utilisateurs le soin de choisir les volumes d'eau chaude dont ils auront besoin au cours de la journée. Il serait ainsi averti des disponibilités. L'inconvénient de cette méthode est que les utilisateurs sont sollicités. Ils doivent eux même estimer leurs besoins en eau chaude, ce qui n'est pas toujours évident.

La troisième solution, qui semble la plus adaptée, consisterait en l'implantation d'un observateur qui, à l'aide de l'évolution des températures dans la cuve, reconstruirait les besoins en eau chaude de l'utilisateur. Cette étude sera conduite au premier semestre 1999.

Il est clair que les prévisions ne seront jamais que des approximations des perturbations réelles et il conviendra de synthétiser un régulateur relativement robuste face à ces erreurs de prédiction. Elles doivent néanmoins être aussi précises que possible, car l'ajout de conditions fortes de robustesse s'accompagne d'un conservatisme non négligeable vis à vis des performances énergétiques du système.

#### 4.4 Optimisation des variables manipulées

Une fois à disposition, un modèle mathématique de l'installation, il convient de choisir une stratégie de commande des variables manipulées. Dans notre cas, le but recherché est une consommation minimale d'électricité pour un degré de confort élevé. L'idéal serait de minimiser la consommation d'électricité sur la durée de vie de l'appareil. Malheureusement, cela impliquerait que l'on sache prédire le comportement de l'installation sur la même durée et cela nécessiterait une puissance de calcul phénoménale. Il est clair qu'il est impossible de prédire le temps et le comportement des utilisateurs à

long terme. Il va donc falloir choisir un horizon d'optimisation plus raisonnable. Les prévisions météorologiques nous sont données sur un horizon de 48 heures. Elles sont relativement fiables sur une journée, ainsi la journée sera donc notre horizon d'optimisation. Ce choix représente également un volume de calculs raisonnable.

Cependant, si pour les raisons invoquées précédemment un horizon d'optimisation d'une journée a été choisi, il ne faut pas oublier que le but final reste quand même une minimisation de l'apport électrique sur la durée de vie de l'installation.

Les variables manipulées seront donc calculées sur une journée entière de façon à minimiser l'appoint électrique tout en garantissant un haut degré de confort. Mathématiquement, il faut quantifier l'inconfort de l'utilisateur de façon à introduire cette notion dans une fonction de coût aux côtés d'un terme de consommation électrique. Cette fonction de coût représentera donc la consommation électrique de l'installation sur la journée, à laquelle s'ajoute le degré d'insatisfaction de l'utilisateur.

#### 4.4.1 Bilan énergétique et choix d'une fonction de coût

Le choix de la fonction de coût est fondamental, il doit traduire exactement la façon dont l'installation doit se comporter.

Avant de la choisir, il convient de dresser un bilan énergétique complet de l'installation en énumérant ce qui entre et ce qui sort de la cuve. La description des termes rencontrés dans les équations qui vont suivre se trouve au paragraphe 4.2.3.

L'énergie qui entre dans la cuve est soit de type électrique par l'intermédiaire des corps de chauffe, soit de type solaire par l'intermédiaire du capteur. Celle-ci est donnée par :

$$E_{sol} = \int_{1\text{jour}} \dot{m}_c C_{pc} (T_c - T_{h,10}) dt \quad (4)$$

Si l'on considère que les pertes sont nulles dans les conduites et que la variation d'énergie interne dans l'échangeur est négligeable étant donné son faible volume, l'énergie collectée par le capteur correspond exactement à l'énergie solaire transférée dans la cuve. L'équation 4 décrit clairement l'énergie collectée par le capteur,  $T_{h,10}$  étant la température de la couche la plus basse de l'échangeur donc la température de retour au capteur.

Pour le calcul de l'énergie électrique, il faut noter qu'elle peut provenir de trois résistances ou d'une seulement, tout dépend de la configuration choisie. L'équation 5 donne la formulation de la dépense électrique dans le cas où trois résistances électriques sont disposées à l'intérieur de la cuve, la formule pour une seule résistance se déduit aisément.

$$E_{elec} = \int_{1\text{jour}} (P_{aux,1} + P_{aux,2} + P_{aux,3}) dt \quad (5)$$

Les  $P_{aux,i}$  représentent les puissances d'alimentation des différentes résistances.

Après les énergies qui entrent dans la cuve, il convient de définir celles qui en sortent. Elles sont au nombre de deux, les pertes dans le milieu ambiant et l'énergie soutirée.

L'équation 6 donne les pertes dans le milieu ambiant :

$$E_{amb} = \int_{1 \text{ jour}} \left\{ \sum_{i \in A} \kappa_{s,a}^i (T_{s,i} - T_{amb,in}) + \sum_{j \in B} \kappa_{h,a}^j (T_{h,j} - T_{amb,in}) \right\} dt \quad (6)$$

$$A = \{1, 2, 13\}, B = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

L'énergie soutirée correspond à l'énergie qui est enlevée à la cuve par les différentes demandes en eau chaude de l'utilisateur. Elle est donnée par l'équation 7 :

$$E_{soutir} = \int_{1 \text{ jour}} \dot{m}_L C_{pf} (T_{s,i} - T_{in}) dt \quad (7)$$

$T_{s,i}$  représente la température de la couche la plus haute de la cuve.

Enfin, pour dresser un bilan énergétique complet de la cuve, il convient de prendre en compte la variation d'énergie interne entre le début et la fin de la simulation pour l'ensemble cuve/échangeur.

Cette variation d'énergie interne de l'ensemble cuve/échangeur est donnée par l'équation suivante :

$$\Delta E = \sum_{i \in A} M_{s,i} C_{pf} [T_{s,i}(t_f) - T_{s,i}(t_0)] + \sum_{j \in B} M_{h,j} C_{pc} [T_{h,j}(t_f) - T_{h,j}(t_0)] \quad (8)$$

$$A = \{1, 2, \dots, 12, 13\}, B = \{1, 2, \dots, 9, 10\}$$

$t_0$  et  $t_f$  représentent respectivement l'instant de départ et de fin de la simulation.

Tous ces calculs d'énergie permettent de dresser le bilan énergétique suivant :

$$\Delta E = E_{sol} + E_{elec} - E_{soutir} - E_{amb} \quad (9)$$

Tous ces calculs sont un excellent point de départ pour une réflexion sur le choix de la fonction de coût. En premier lieu, il convient de noter que dans l'équation 7 qui donne l'énergie soutirée apparaît la température dans le haut de la cuve. On pourrait donc penser que la quantité d'énergie soutirée va dépendre directement du profil de cette température au cours de la journée. Cependant il n'en est rien. En effet, les utilisateurs vont soutirer toujours la même quantité d'énergie quelle que soit la température dans le haut de la cuve, ces derniers vont obtenir la température qu'ils désirent en jouant sur les robinets d'eau chaude et d'eau froide, mélangeant ainsi l'eau qui sort directement de la cuve avec l'eau qui vient du réseau. C'est le débit de soutirage  $\dot{m}_L$  qui va être ajusté de façon à ce que l'énergie soutirée soit toujours la même.

Ainsi, les profils de soutirage qui seront donnés et qui fixeront le débit désiré  $\dot{m}_{des}$  pour une simulation seront également donnés pour une température désirée de l'utilisateur  $T_{des}$ . Le débit  $\dot{m}_L$  sera donc calculé de la façon suivante :

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{des} \frac{T_{des} - T_{in}}{T_{s,1} - T_{in}} \quad (10)$$

Le débit de soutirage  $\dot{m}_L$  est donc d'autant plus élevé que la température dans le haut de la cuve est basse. Il est également intéressant de noter que cette dernière remarque introduit une non-linéarité dans le modèle, puisque  $\dot{m}_L$  va dépendre directement de l'inverse d'une variable d'état.

Pour définir mathématiquement la fonction de coût, il faut se souvenir que l'on désire minimiser la consommation électrique sur la durée de vie de l'installation tout en garantissant un haut degré de confort aux utilisateurs. Ces utilisateurs sont satisfaits si la température de l'eau dans le haut de la cuve est plus chaude que celle qu'il désire. Ainsi, ils pourront obtenir la température qu'ils veulent en mélangeant l'eau qui sort de la cuve avec l'eau froide du réseau. Il faut également que l'eau dans le haut de la cuve ne soit pas trop chaude pour des raisons de sécurité évidentes.

Cette considération de confort se traduit mathématiquement par l'ajout dans la fonction de coût d'un terme d'inconfort. Pour fixer les idées, une première fonction de coût pourrait être :

$$J = \int [P_{aux,1} + P_{aux,2} + P_{aux,3} + \alpha(T_{s,1} - T_{cons})^2] dt \quad (11)$$

$T_{s,1}$  représente toujours la température de l'eau dans le haut de la cuve et  $T_{cons}$  représente la température de consigne, c'est la température que l'on désire pour la première couche. Un bon compromis entre confort et sécurité se situe aux alentours de 60 °C. Le facteur  $\alpha$  permet de donner plus ou moins de poids au terme d'inconfort en comparaison avec la consommation électrique. Le terme d'inconfort est au carré, ceci permet de pénaliser tous les écarts entre la température de l'eau de la première couche et la température de consigne, qu'ils soient positifs ou négatifs. Ceci est cohérent avec les observations précédentes qui stipulaient que la température de l'eau sortant de la cuve devait être assez chaude mais pas trop tout de même pour des questions de sécurité.

Volontairement, dans l'équation 11, l'horizon n'est pas indiqué. Cette fonction de coût est parfaite si l'horizon choisi correspond à la durée de vie de l'installation. En effet, reprenons le bilan énergétique donné par l'équation 9, il a été noté un peu avant dans ce chapitre que l'énergie soutirée était constante et complètement indépendante de ce qui se passe dans la cuve. Il convient de noter également que la variation d'énergie interne est bornée puisque les températures varient grossièrement entre 10 et 100 °C. Donc, si l'horizon est grand, ce terme devient négligeable devant les autres qui ne cessent de croître. Il en est de même pour l'énergie ambiante qui est très petite devant les autres. Le bilan énergétique pourrait donc se résumer de la façon suivante :

$$E_{soutir} \approx E_{sol} + E_{elec} \quad (12)$$

A la vue de cette équation, il apparaît que minimiser l'énergie électrique revient également à maximiser l'énergie solaire, c'est l'effet des vases communicants. Donc, l'équation 11 suffirait, pour peu que l'optimisation soit effectuée sur la durée de vie de l'installation.

Cependant, il a déjà été noté auparavant que cette optimisation n'est pas réalisable pour des raisons de prédiction des perturbations et de volume de calculs. L'horizon choisi est donc la journée et avec ce choix, la variation d'énergie interne ne peut plus être négligée dans le bilan énergétique de l'équation 9. Ainsi, minimiser l'énergie électrique ne correspond pas forcément à maximiser l'énergie solaire, et

inversement, les variations de ces deux grandeurs peuvent se répercuter sur la variation d'énergie interne. En conclusion, il conviendra de minimiser l'énergie électrique et de maximiser l'énergie solaire, d'où la fonction de coût qui suit :

$$J = \int_{1\text{jour}} [P_{aux,1} + P_{aux,2} + P_{aux,3} - \dot{m}_c C_{pc} (T_c - T_{h,10}) + \alpha (T_{s,1} - T_{cons})^2] dt \quad (13)$$

Le terme caractérisant l'énergie solaire transférée dans la cuve apparaît précédé d'un signe moins car il doit être maximisé et la fonction de coût sera minimisée. Il s'agit d'un choix arbitraire. On aurait pu opter pour une maximisation de la fonction de coût et inverser tous les signes dans l'équation 13.

Pour terminer, la fonction de coût peut encore être complétée par l'ajout d'un terme de consommation électrique pour la pompe qui met en mouvement le liquide caloporteur. En effet, il peut paraître inutile de mettre en mouvement le liquide caloporteur si la puissance collectée qui en résulte est inférieure à la puissance d'alimentation de la pompe.

Les pertes de charge sont proportionnelles au carré du débit, la constante de proportionnalité dépend de la structure de la boucle collecteur, en particulier la longueur des conduites et la qualité des soudures. Ainsi, la puissance mécanique nécessaire pour mettre en mouvement ce même liquide sera proportionnelle au cube du débit, soit :

$$P_{méca} = K\dot{m}_c^3 \quad (14)$$

$K$  représente la constante de proportionnalité évoquée ci-dessus.

La puissance électrique d'alimentation de la pompe est proportionnelle à la puissance mécanique, le coefficient de proportionnalité  $\eta$  est le rendement de la pompe, elle vaut donc :

$$P_{pompe} = \eta K\dot{m}_c^3 \quad (15)$$

Ainsi, la fonction de coût finale est :

$$J = \int_{1\text{jour}} [P_{aux,1} + P_{aux,2} + P_{aux,3} - \dot{m}_c C_{pc} (T_c - T_{h,10}) + \eta K\dot{m}_c^3 + \alpha (T_{s,1} - T_{cons})^2] dt \quad (16)$$

#### 4.4.2 Débit dans le circuit capteur et modifications structurelles

Les variables manipulées doivent être calculées sur l'horizon d'optimisation de façon à minimiser la fonction de coût et obtenir ainsi le comportement désiré. Parmi ces variables manipulées se trouve le débit dans le circuit capteur.

Le rendement du collecteur est d'autant plus élevé que le débit est élevé, ceci découle de l'observation simple qu'un débit élevé dans le collecteur entraîne une température moyenne dans ce dernier proche de la température d'entrée. Ainsi, plus la température est basse à l'intérieur du collecteur plus les pertes dans le milieu ambiant sont faibles. Cependant, un débit important entraîne également une

consommation électrique de la pompe plus élevée et provoque une distribution de la température dans l'échangeur de chaleur différente, ce qui à plus long terme pourra influencer la température du liquide caloporteur à l'entrée dans le capteur.

En résumé, il est impossible de vouloir optimiser le débit dans le circuit capteur sans prendre en compte le comportement de l'installation complète.

Une estimation grossière des pertes de charge dans la boucle collecteur d'une installation telle que celle dont nous disposons à l'ei•vd a montré que pour le débit standard fixé par le constructeur, c'est-à-dire 15 l/h par m<sup>2</sup> de capteur, la puissance mécanique nécessaire pour mettre en mouvement le liquide était inférieure à 1 W. En effet, le circuit étant fermé, il n'y a aucune hauteur statique à compenser, la pompe doit se contenter de vaincre les pertes de charge dans la boucle collecteur. Cependant, la pompe utilisée actuellement sur l'installation disponible à l'ei•vd consomme environ 40 W pour assurer la circulation du liquide caloporteur au débit standard. Ainsi, avant même d'entreprendre un ajustement du débit, il nous a paru important de changer cette pompe.

Il semble que les constructeurs préfèrent ces pompes parce qu'elles fonctionnent directement en courant alternatif et que leur prix est très faible du fait qu'elles sont fabriquées en grande quantité.

Pour l'heure, une pompe à courant continu consommant une dizaine de watts pour le même service est en place sur l'installation à l'ei•vd. Une pompe encore plus efficace est actuellement testée sur notre stand indoor à l'Institut d'automatique et sera prochainement testée sur l'installation complète.

#### 4.4.3 Puissance d'alimentation des corps de chauffe et modification structurelle

Les autres variables manipulées sont les puissances d'alimentation des corps de chauffe électriques.

Sur l'installation, telle qu'elle est commercialisée actuellement, un seul corps de chauffe est monté. L'échangeur recouvre quasiment toute la surface de la cuve. Le corps de chauffe se trouve donc en grande partie à la même hauteur que l'échangeur. Une mauvaise utilisation du corps de chauffe va donc considérablement réduire le transfert de l'énergie solaire à l'intérieur de la cuve. Il va falloir chauffer au minimum de façon à maximiser ce transfert. Cependant, avec une seule résistance électrique, la quantité d'eau chauffée est toujours la même quels que soient les besoins en eau chaude des utilisateurs, c'est pourquoi des résistances électriques plus courtes ont été introduites. Elles permettront de mieux s'adapter aux besoins des utilisateurs en évitant une température moyenne à l'intérieur de la cuve trop élevée. Ces trois résistances électriques apparaissent sur la figure 4 du paragraphe 4.2.1.

Avec cette nouvelle configuration, trois puissances d'alimentation devront être calculées pour minimiser la fonction de coût, soit en tout quatre entrées avec le débit dans le circuit capteur.

## 4.5 Optimisation des variables manipulées

### 4.5.1 Principe

Grâce au modèle de l'installation et aux prévisions des perturbations, il est possible de prédire correctement le comportement du système sur une journée complète, ce qui correspond, non pas par hasard, à l'horizon d'optimisation choisi.

Le but est de calculer les valeurs prises par les variables manipulées sur tout l'horizon. Il est clair que ce problème est de dimension infinie. En effet, les variables manipulées sont définies sur tout l'horizon et prennent donc une infinité de valeurs.

Ce problème est un problème classique de contrôle optimal. Sa résolution peut passer par la résolution d'un *Two Point Boundary Value Problem* (TPBVP) résultant de l'utilisation du principe du maximum de Pontryagin. L'explication de ce principe sort du cadre de ce rapport mais des détails peuvent être trouvés en [9]. L'utilisation de ce principe a été possible lors de travaux préliminaires avec un modèle simplifié de l'installation [11]. La prise en compte des vannes de stratification et le plus grand nombre de couches rendent particulièrement difficile la résolution de ce TPBVP et l'on préférera une approche purement numérique [3] pour trouver la solution à notre problème.

La première étape consiste à caractériser les entrées, c'est-à-dire à approcher les solutions par des fonctions très particulières, souvent constantes par morceaux. Il s'en suit un nombre fini de variables à optimiser. Ces variables sont communément appelées variables de décision en optimisation.

Il faudra ensuite choisir des valeurs initiales pour ces variables de décision. Elles peuvent être choisies aléatoirement si le problème d'optimisation est convexe. Dans le cas contraire, il conviendra de les choisir judicieusement pour éviter à l'algorithme d'optimisation de converger vers un minimum local.

A la suite de cela, un algorithme d'optimisation calcule les variables de décision qui minimise la fonction de coût choisie.

### 4.5.2 Caractérisation des entrées

Le débit dans le circuit collecteur peut varier continûment grâce à la pompe à courant continu qui a remplacé l'ancienne pompe à courant alternatif. Le débit pourra donc prendre toutes les valeurs intermédiaires entre 0 et le débit maximal que pourra fournir la pompe.

Le débit optimal sera donc approché par une fonction constante par morceau représentée à la figure 7.

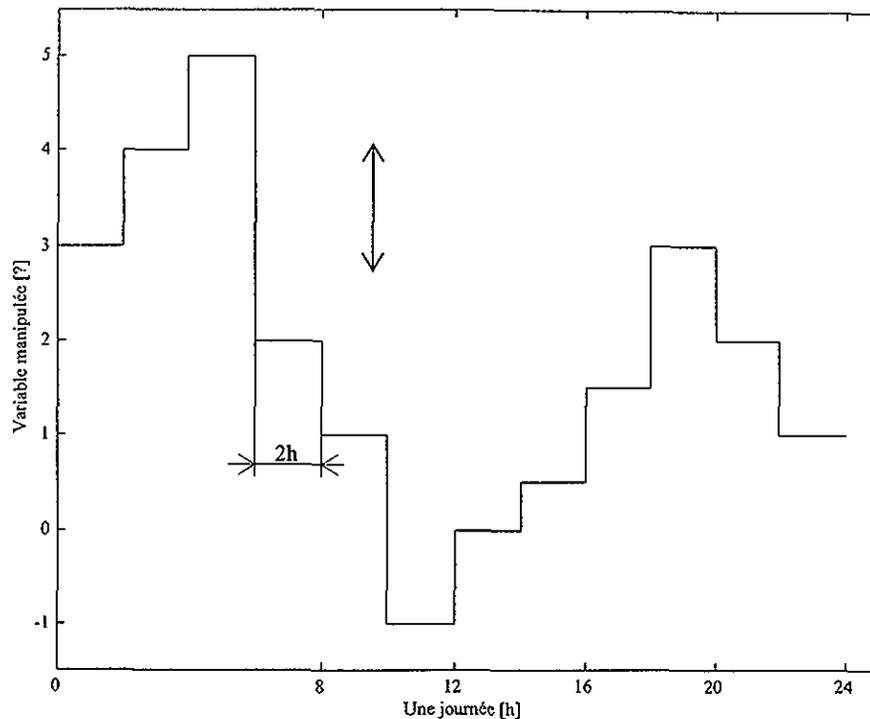


Figure 7 : Caractérisation du débit dans le circuit collecteur

La caractérisation est vraiment grossière pour des raisons de clarté, puisque sur cette figure le débit peut varier toutes les deux heures. En réalité, il pourra varier beaucoup plus fréquemment, toutes les 10 minutes exactement. Les variables de décision pour l'optimisation seront donc les valeurs du débit prises à chaque période d'échantillonnage. La flèche sur le dessin indique que ces valeurs seront diminuées ou augmentées mais les instants de commutation sont fixes.

La caractérisation des puissances d'alimentation des résistances électriques peut prendre deux formes différentes en fonction de choix structurels. En effet, si les puissances d'alimentation des corps de chauffe peuvent prendre des valeurs intermédiaires entre 0 et la puissance maximale admissible par la résistance électrique, alors la caractérisation sera la même que pour le débit dans le circuit capteur.

Cependant, il faut bien noter que cette solution est onéreuse par rapport à une alimentation tout ou rien des corps de chauffe et il n'est pas certain que le gain énergétique engendré par cette structure plus flexible justifie le surcoût initial. Ainsi, l'optimisation sera menée dans les deux cas, de cette manière il sera aisé de mesurer les pertes engendrées par l'imposition d'une commande tout ou rien pour les corps de chauffe.

Si les corps de chauffe sont alimentés en tout ou rien, la caractérisation est différente. Elle devient 'horizontale'. Elle est représentée à la figure 8.

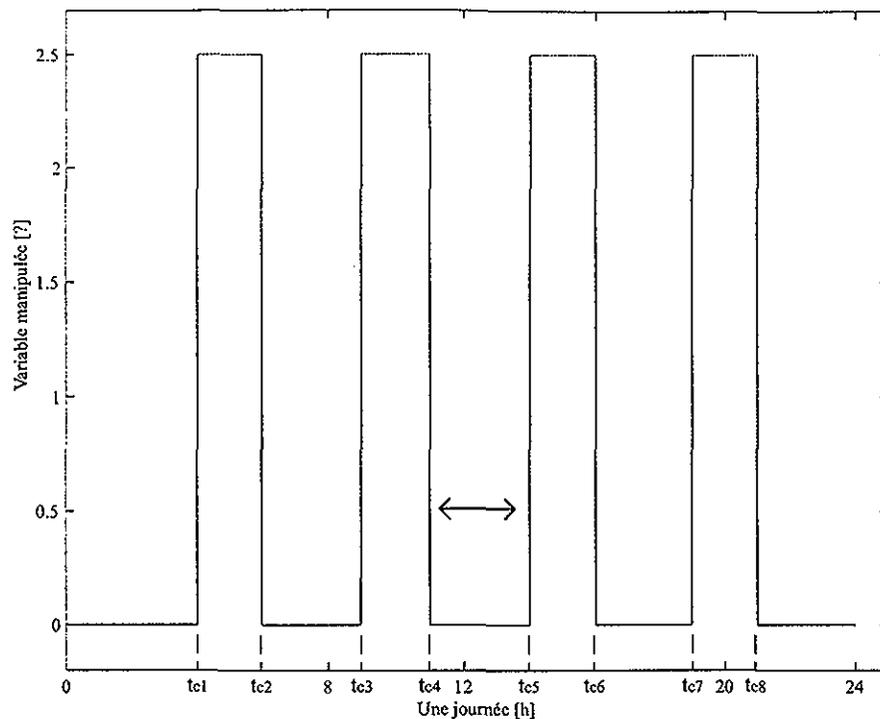


Figure 8 : Caractérisation des puissances d'alimentation des corps de chauffe (alimentation tout ou rien)

Elle devient horizontale dans le sens où une séquence on-off est choisie initialement pour la puissance d'alimentation de chacun des corps de chauffe. Cette séquence reste la même mais les instants de commutation  $t_{ci}$  sont optimisés. Ils sont au nombre de 8 sur cette figure mais seront au nombre de 12 pour chacune des puissances d'alimentation.

#### 4.5.3 Algorithme d'optimisation

Une fois la fonction de coût définie ainsi que les variables de décision, il convient de trouver un algorithme d'optimisation capable de calculer les valeurs de ces variables de décision qui minimisent cette fonction de coût.

Soit  $N$  le nombre de variables de décision, la fonction de coût  $J$  peut alors être vue comme une fonction réelle de ces  $N$  variables de décision. Soit  $a$  le vecteur dont les composantes sont les variables de décision elles-mêmes, ce vecteur est donc de dimension  $N$ ,  $a^*$  correspond au vecteur optimal dont les composantes minimisent  $J$ . La  $i$ -ème composante de  $a$  sera notée  $a_i$ .

La méthode d'optimisation utilisée est l'une des nombreuses méthodes du gradient disponibles. Une description détaillée de ces méthodes est disponible dans [14]. Un choix de variables de décision initiales  $a^0$  est fait. L'algorithme calcule une succession de  $a^k$  qui minimisent de plus en plus la fonction de coût pour finalement arriver à  $a^*$ . Le choix de  $a^0$  ne doit pas se faire au hasard. En particulier si le problème est non convexe. Dans ce cas bien précis, il se peut que le minimum calculé par l'algorithme corresponde à un minimum local et non au minimum global.

Comme son nom l'indique, la méthode va calculer le gradient de  $J$  au point  $a^k$  et utiliser cette information pour calculer  $a^{k+1}$ . Cependant, après quelques investigations, il est clair qu'aucune formulation analytique n'existe pour le calcul de ce gradient, il va donc être calculé numériquement. Le calcul de la  $i$ -ème composante du vecteur gradient se fera de la façon suivante :

$$\frac{\partial J}{\partial a_i}(a^k) \approx \frac{J(a^k + \varepsilon e_i) - J(a^k)}{\varepsilon} \quad (17)$$

$\varepsilon$  étant un scalaire, et  $e_i$  étant le  $i$ -ème vecteur de la base canonique de  $\mathbb{R}^N$ .

Ainsi, à chaque itération, l'algorithme va être obligé d'intégrer  $N+1$  fois le système d'équations différentielles qui régit le comportement du système, et ce, pour le seul calcul du gradient de la fonction de coût. On peut d'ores et déjà noter que le choix de l'algorithme d'intégration numérique et le choix du nombre de variables de décision vont jouer un rôle capital dans la rapidité de l'algorithme à converger vers le minimum. De la même manière, il est bon de noter qu'une augmentation du nombre de variables d'état du système s'accompagne d'une augmentation importante du volume de calcul.

Le choix du scalaire  $\varepsilon$  est également délicat. Pour se rapprocher de la définition de la dérivée, il conviendrait de le choisir très petit. Cependant, s'il est trop petit, le calcul du gradient devient largement faussé par l'erreur globale résultante de l'intégration numérique des équations différentielles du système. En effet, la différence qui se trouve au numérateur, dans la partie droite de l'équation 17, devient trop petite et est perdue dans cette erreur.

Enfin, l'algorithme devra prendre en compte les contraintes qui existent sur les variables de décision, dans notre cas elles sont du type :

$$\underline{a}_i \leq a_i \leq \bar{a}_i \quad (18) \\ 1 < i < N$$

ou  $\underline{a}_i$  et  $\bar{a}_i$  représentent respectivement la borne inférieure et la borne supérieure de la  $i$ -ème variable de décision. Ces contraintes sont bien sûr dues au fait que le débit dans le circuit capteur ainsi que les puissances d'alimentation des corps de chauffe électriques sont compris entre 0 et une valeur maximale.

Ces contraintes permettent une application relativement simple de la méthode de projection du gradient. Cette méthode ne sera pas expliquée en détail dans ce rapport, de plus amples renseignements peuvent être trouvés en [14]. Globalement, la méthode se comporte comme une méthode du gradient classique tant que toutes les composantes  $a_i$  de  $a$  ne sont pas sur les contraintes. Dès que c'est le cas, le gradient défini dans  $\mathbb{R}^N$  est projeté sur l'hyperplan défini par la contrainte et la projection de ce gradient représente la prochaine direction de recherche de l'optimum. Si plusieurs contraintes sont actives en même temps, le gradient est projeté sur l'intersection de tous les hyperplans définis par ces contraintes actives. L'avantage de cette méthode est que, dans le cas de contraintes linéaires, les  $a^k$  calculés sont toujours faisables, c'est-à-dire qu'aucune de leurs composantes ne viole les contraintes. De plus, avec les contraintes définies à l'équation 18, projeter le gradient revient simplement à annuler les composantes du vecteur gradient qui correspondent aux contraintes actives. L'utilisation de cette méthode dans ce cas bien précis est donc aisée.

A chaque étape de l'optimisation, une nouvelle direction de recherche est calculée (gradient ou projeté du gradient sur les contraintes), puis une optimisation à un paramètre dans cette direction de recherche est effectuée. Dans notre cas, la méthode employée est celle du nombre d'or, elle ne présente aucune difficulté et les détails de cette méthode peuvent être trouvés en [14].

L'optimisation est terminée quand la fonction de coût ne diminue quasiment plus.

#### 4.6 Implantation de la solution sur le système réel

L'optimisation devra être répétée plusieurs fois dans la journée. En effet, l'algorithme doit pouvoir supporter des erreurs de modélisation et des différences entre les perturbations estimées et les perturbations réelles.

Elle pourra être répétée à intervalles réguliers. Il est donc important de maîtriser le temps que met l'algorithme pour résoudre le problème d'optimisation. Pour certaines classes de système, il est possible de déterminer une limite maximale pour le nombre d'itérations [8]. Connaissant le matériel utilisé pour faire le calcul, il est alors facile de calculer une limite maximale pour le temps de calcul. D'après [8], ces limites maximales sont raisonnables si le problème d'optimisation est convexe et l'algorithme d'optimisation bien choisi.

Cependant, dans notre cas, il est bien difficile de prouver analytiquement si notre problème est convexe ou non. Il n'est même pas sur que la fonction de coût choisie soit continue pour tous les  $a^k$ . Certaines caractérisations par rapport à d'autres semblent améliorer la convexité du problème, et un problème donné sera considéré comme convexe si une même solution est obtenue à partir de différents points de départ  $a^0$ .

Au premier semestre 1999, une étude détaillée de la convexité du problème ainsi que de la continuité de la fonction de coût sera réalisée dans le but d'arriver, par différentes caractérisations ou éventuellement des changements de variable et un autre choix d'algorithme d'optimisation, à une limite maximale pour le temps nécessaire à l'optimisation et une certitude de bien obtenir le minimum global.

## 5 Résultats numériques

L'optimisation telle qu'elle a été décrite au paragraphe précédent a donc été réalisée en simulation. La commande des corps de chauffe électriques sera donc de type tout ou rien, mais l'optimisation sera également réalisée avec l'hypothèse que les puissances d'alimentation des corps de chauffe peuvent prendre des valeurs intermédiaires. Ceci permettra de juger s'il est nécessaire d'envisager à l'avenir une alimentation continue des corps de chauffe.

Dans un premier temps, l'optimisation a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB et de son extension d'optimisation. Elle est maintenant quasiment complètement réalisée en langage C, seule la visualisation des résultats se fait avec MATLAB. En effet, le code C est plus proche du code qui est utilisé pour la programmation de micro-contrôleurs, et les temps de calculs sont fortement diminués. De plus, l'utilisation d'un code de moins haut niveau offre une plus grande flexibilité pour le choix des algorithmes d'intégration et d'optimisation, permettant ainsi d'adapter ces algorithmes au problème qui nous intéresse.

Les variables manipulées seront donc toutes optimisées en même temps et avec le même programme. Pour des raisons de clarté, les résultats pour le débit dans le circuit capteur seront néanmoins présentés en premier suivis des résultats pour les puissances d'alimentation des corps de chauffe.

### 5.1 Données utilisées pour l'optimisation et choix des paramètres

Avant de commencer l'optimisation, plusieurs choix doivent être faits. Dans un premier temps, il conviendra de choisir les profils des grandeurs météorologiques ainsi que le profil du comportement utilisateur qui seront utilisés.

Deux configurations différentes seront utilisées pour les données météorologiques, une belle journée et une journée moyenne. Les profils d'ensoleillement correspondants sont représentés à la figure 9.

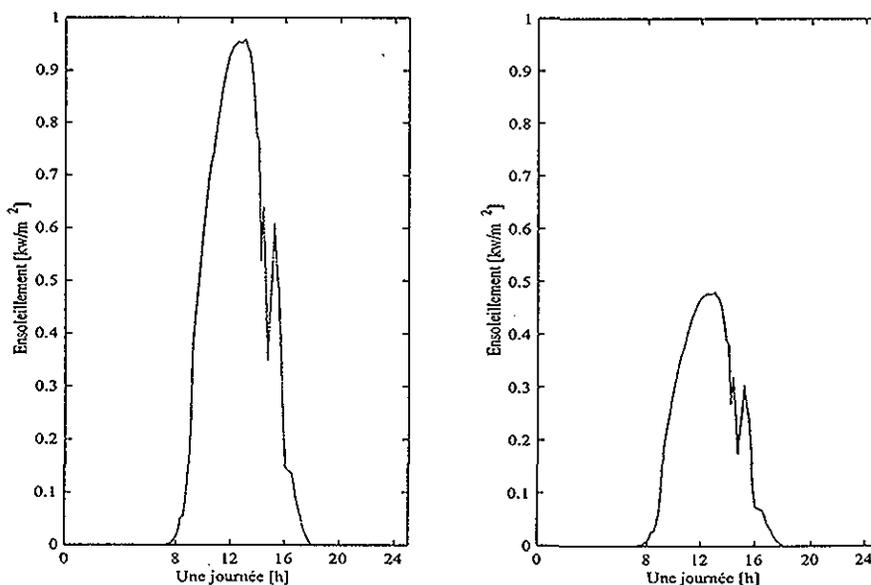


Figure 9 : Profils d'ensoleillement

Concernant les besoins en eau chaude des utilisateurs, on supposera que six soutirages sont effectués : deux plus importants en fin et en début de journée et quatre autres en milieu de journée. En tout 400 litres d'eau sont soutirés. La température désirée pour l'eau de soutirage est de 60 °C. Une autre configuration sera également utilisée. Les soutirages correspondants sont exactement la moitié de ceux décrits juste au dessus. Ces profils sont représentés à la figure 10.

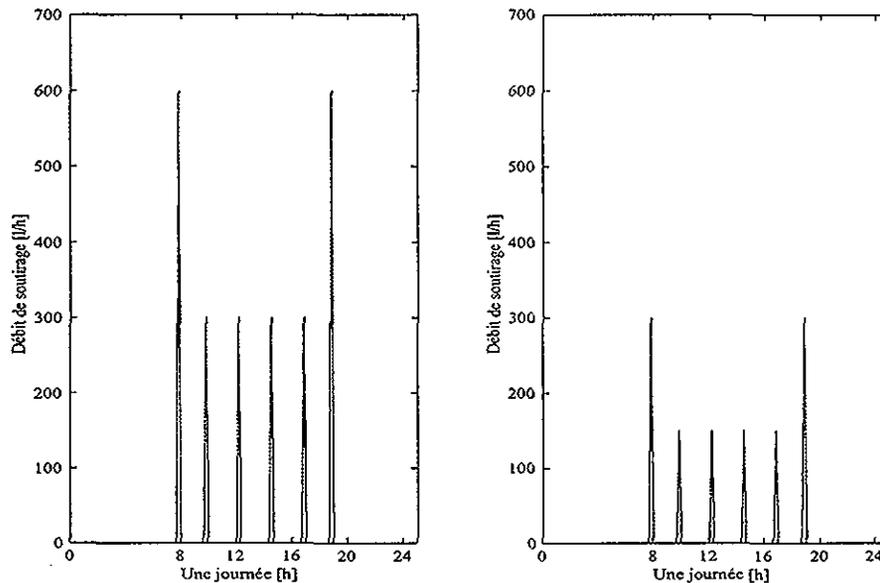


Figure 10 : Profils de soutirage

Enfin, le paramètre  $\alpha$  doit être choisi de la même manière que précédemment. Deux valeurs différentes seront choisies : une valeur dite "forte" égale à  $1e-2$  et une autre dite "faible" égale à  $1e-3$ . Le choix de l'une ou l'autre des valeurs est dicté par le comportement que l'utilisateur préfère pour son installation, plutôt économique avec la valeur faible et plutôt confortable avec la valeur forte.

Pour juger de l'efficacité de la configuration avec trois appoints électriques par rapport à la configuration avec un seul appoint, l'optimisation sera également réalisée dans les deux cas.

Il y a donc en tout 32 configurations différentes. Bien entendu, seuls les résultats significatifs seront montrés et discutés.

## 5.2 Débit dans le circuit capteur

### 5.2.1 Profil du débit optimal

Comme indiqué au paragraphe 4.5.2, le débit a été choisi constant par morceau. Sa valeur peut changer chaque dix minutes, cela signifie qu'il y a 144 variables de décision pour le seul débit ( $144 \cdot 10 = 1440$  minutes soit 24 heures).

Afin de mieux pouvoir comparer les profils obtenus pour le débit optimal dans la boucle collecteur, sur chaque figure apparaîtront deux courbes différentes qui correspondent à deux valeurs différentes d'un paramètre, les autres restant constants. Ces paramètres sont le soutirage qui peut avoir les deux allures montrées à la figure 10 du paragraphe précédent, l'ensoleillement qui peut prendre les deux formes de

la figure 9 et le paramètre  $\alpha$  qui peut prendre comme valeur  $1e-2$  ou  $1e-3$ . Pour de raisons de concision, on parlera par exemple de soutirage fort ou faible, ou encore d' $\alpha$  et d'ensoleillement fort ou faible. Le fait qu'une seule ou que plusieurs résistances électriques soient utilisées ou même qu'elles soient alimentées en continu ou en tout ou rien ne modifie quasiment pas le profil du débit optimal.

La figure 11 représente les profils de débit optimal obtenus pour les deux valeurs de  $\alpha$ .

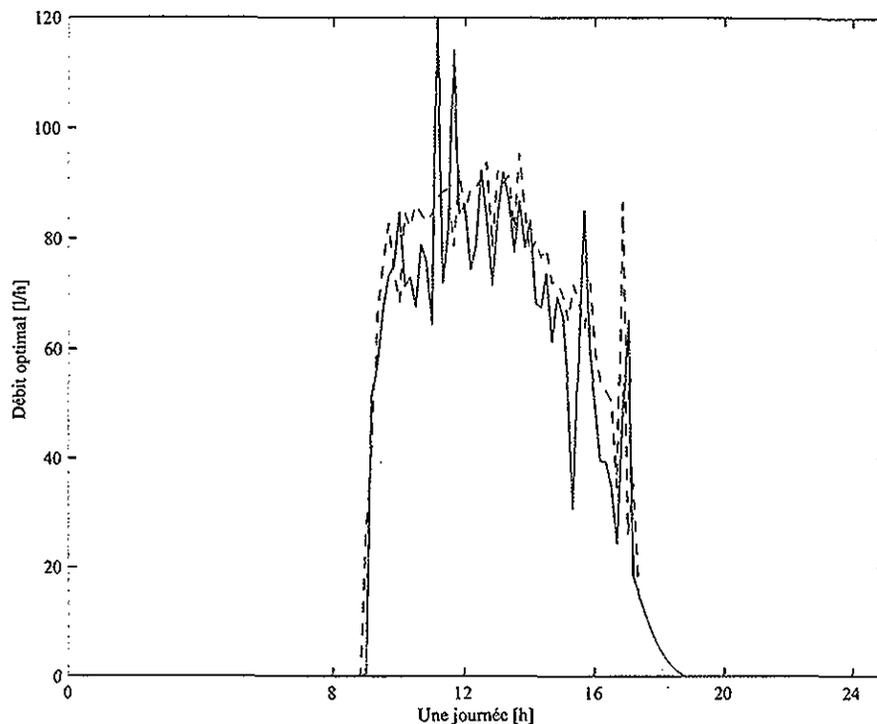


Figure 11 : Profils du débit optimal pour  $\alpha=1e-3$  (--) et  $\alpha=1e-2$  (-)

Il convient de noter que (--) fait référence à la courbe en pointillés et (-) à la courbe continue. Avant même de comparer ces deux courbes, il est intéressant de constater les similitudes qu'il y a entre ces courbes et celle qui représente l'ensoleillement représenté à la figure 9. Le facteur  $\alpha$  n'a pas une influence importante sur le profil du débit optimal obtenu, le débit optimal est simplement un peu plus élevé quand  $\alpha$  est plus petit.

La figure 12 montre les profils obtenus pour le débit optimal avec un ensoleillement fort (--) et un ensoleillement faible (-).

La différence est déjà beaucoup plus importante. Le débit est nettement plus élevé, environ 10 l/h, quand l'ensoleillement est double, de plus les profils obtenus sont toujours très similaires à l'ensoleillement. Il apparaît évident qu'il y a une forte corrélation entre le débit optimal et la forme de l'ensoleillement.

Cette ressemblance nous a naturellement amenés à envisager une alimentation de la pompe de circulation par une cellule photovoltaïque. Cette étude sera décrite au paragraphe suivant.

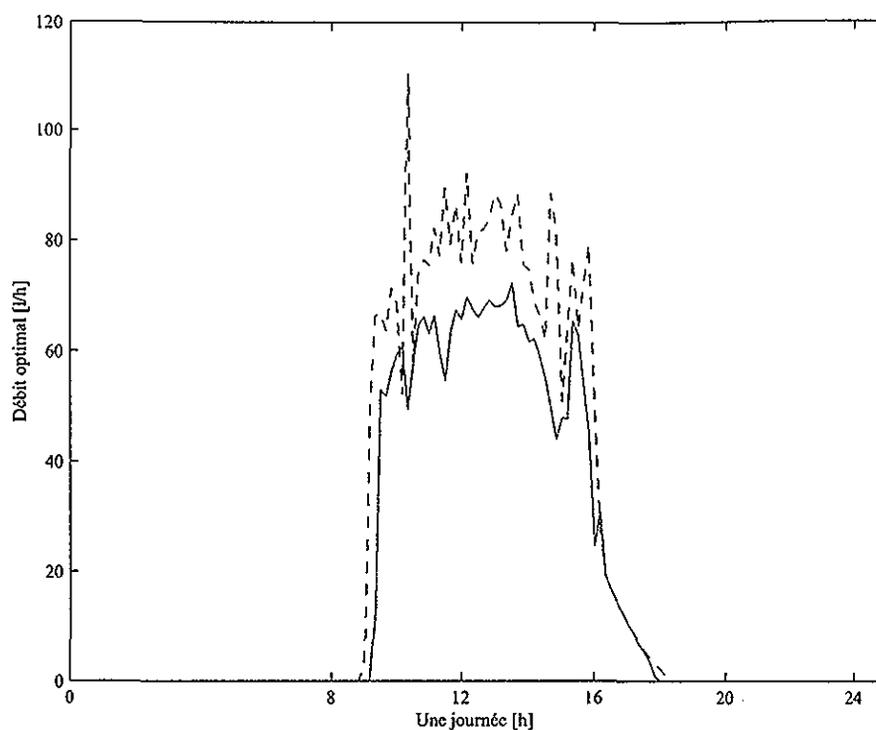


Figure 12 : Profils du débit optimal pour un ensoleillement fort (--) et faible (-)

Sur la figure 13 apparaissent les profils obtenus pour un soutirage fort (--) et un soutirage faible.

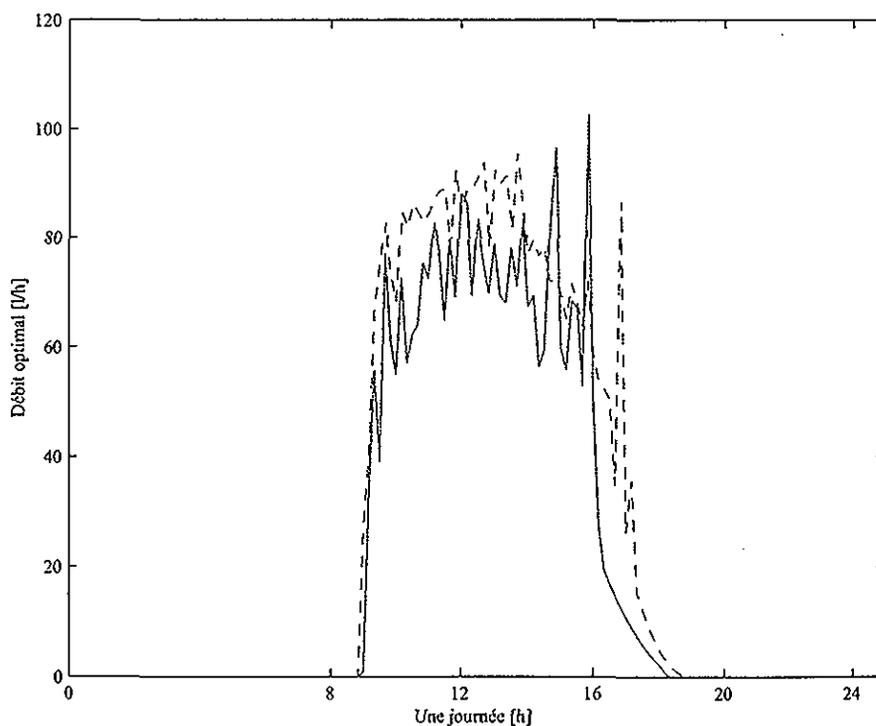


Figure 13 : Profils du débit optimal pour un soutirage fort (--) et faible (-)

On peut noter que le débit optimal est toujours très similaire à l'ensoleillement, il est un peu plus élevé quand le soutirage est important. Un  $\alpha$  petit et un soutirage important ont tous deux pour conséquence

une température moyenne plus faible de l'eau dans la cuve. En effet si  $\alpha$  est petit les appoints auxiliaires seront moins sollicités et si le soutirage est important une quantité plus importante d'eau froide provenant du réseau pénétrera dans cette même cuve. Cette température plus faible de l'eau dans la cuve a pour conséquence une température plus faible du liquide caloporteur au retour dans les capteurs et donc une énergie solaire collectée plus importante. Ainsi, le gain de rendement du collecteur engendré par un débit plus élevé justifie la consommation électrique de la pompe plus importante. Ceci ne serait peut-être pas le cas pour une température plus élevée du liquide caloporteur à l'entrée des capteurs ou encore pour un ensoleillement moins important.

Il est donc possible de justifier intuitivement les différentes courbes obtenues pour le débit optimal et il est important de souligner encore une fois la forte corrélation entre ensoleillement et débit optimal. Cette dépendance peut sembler intéressante, mais elle est également dangereuse dans la mesure où l'ensoleillement n'est pas exactement connu. Il s'agit seulement de prévisions, et si ces prévisions diffèrent de façon significative de l'ensoleillement réel alors le débit calculé n'est plus du tout optimal. Ainsi, si le débit résultant d'une alimentation de la pompe par une cellule photovoltaïque n'est plus exactement le débit optimal calculé (il n'y a plus une prise en compte du comportement complet de l'installation et en particulier de la température de l'eau dans la cuve), cette configuration apporte une robustesse formidable puisque le débit ne dépend plus du tout des prévisions météorologiques.

De plus, le gain énergétique engendré par la seule optimisation du débit dans le circuit capteur, c'est-à-dire sans la commande avancée pour l'appoint électrique, est de l'ordre de 3 % pour une même pompe (plus si l'on prend en ligne de compte le remplacement de l'ancienne pompe à courant alternatif par la nouvelle pompe à courant continu). Donc, une étude financière devra indiquer clairement si le surcoût initial engendré par cette nouvelle configuration est justifié par le gain énergétique. En effet, le prix de ces installations étant déjà plus élevé qu'un système de chauffage d'eau classique, il faudrait faire attention à ne pas l'augmenter davantage.

### 5.2.2 Alimentation de la pompe par une cellule PV

Les résultats du paragraphe précédent montrent clairement qu'il y a une corrélation forte entre le débit optimal et l'ensoleillement. Il apparaît donc intéressant d'envisager l'utilisation d'une cellule photovoltaïque pour l'alimentation d'une pompe bien dimensionnée. Une première étude a été menée sur le stand indoor de l'Institut d'automatique (décrit au paragraphe 6), les détails de cette étude se trouvent dans [5].

En résumé, une pompe entraînée par un moteur à courant continu de type 'brushless' a été achetée, ses performances sont exceptionnelles. Par exemple, avec 5 watts d'alimentation, elle est capable de compenser 0.4 mètre de pertes de charge pour un débit d'environ 110 l/h (elle semble donc capable de remplacer la pompe du KitSOL d'AGENA énergies SA si les pertes de charge données par le constructeur sont représentatives). Une cellule photovoltaïque a également été achetée, elle est capable de fournir 5 watts quand l'ensoleillement est maximal.

Des modèles précis pour ces deux éléments ont été élaborés et les paramètres ont été identifiés grâce aux mesures effectuées sur le stand indoor. Ils ont permis de valider les performances données par les différents constructeurs. La difficulté se situe au niveau du couplage de la cellule photovoltaïque avec la pompe. Ils ont chacun des caractéristiques courant/tension qui leur sont propres et le point de fonctionnement est donné par l'intersection des deux caractéristiques comme indiqué à la figure 14.

Cependant, il arrive souvent que ce point de fonctionnement ne corresponde pas à la puissance maximale que la cellule peut fournir, il convient donc d'envisager une adaptation d'impédance pour tirer le maximum de cette cellule. Cette adaptation permettrait de transformer la caractéristique courant/tension naturelle de la cellule afin de déplacer le point de fonctionnement et ainsi avec un même ensoleillement d'avoir un débit plus élevé. Ceci est clairement indiqué à la figure 14.

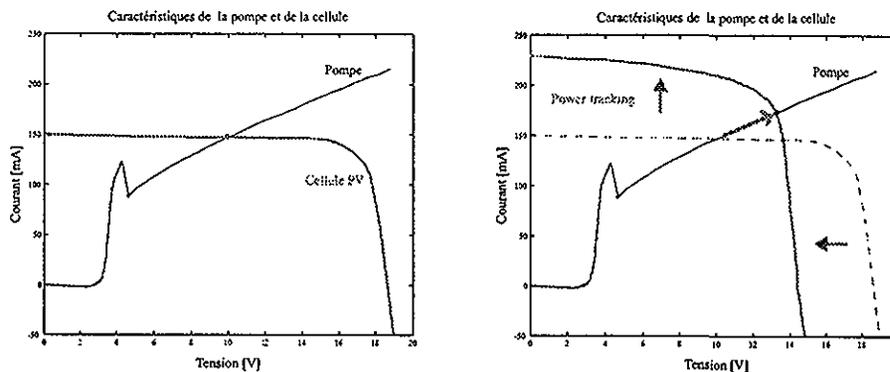


Figure 14 : Principe du Power Tracking

Cette adaptation d'impédance, appelée aussi 'power tracking', est largement expliquée et réalisée en simulation dans [5]. Elle n'a pu être implantée pour l'instant sur le stand indoor pour cause d'un ensoleillement artificiel trop pauvre en infrarouges. L'ensoleillement artificiel sera modifié au début 1999 avec l'ajout de lampes à infrarouges et l'étude sera menée par un étudiant dans le cadre d'un projet de semestre. Si les résultats sont convaincants, une implantation sur le système réel à l'ei•vd est prévue avec une mesure des performances.

Il convient tout de même de noter que l'étude économique d'une telle configuration n'a pas été menée. Il apparaît tout de même que les économies d'énergie engendrées par cette configuration ne compensent par le surcoût initial occasionné par le remplacement de la pompe et l'achat de la cellule photovoltaïque. En effet, l'absence de production en série de ce type d'éléments fait que les prix sont encore prohibitifs.

### 5.3 Puissance d'alimentation des corps de chauffe

Sur l'installation réelle disponible à l'ei•vd, les corps de chauffe ne pourront être alimentés qu'en tout ou rien. Cependant, dans le cadre de cette étude, les deux configurations ont été étudiées afin de déterminer si beaucoup d'énergie peut être économisée en alimentant les corps de chauffe continûment.

De la même manière, différentes simulations ont été effectuées avec un ou plusieurs corps de chauffe afin de juger de l'efficacité de la flexibilité introduite par la présence de trois résistances électriques plutôt qu'une seule.

Dans un premier temps, les résultats seront présentés pour une alimentation continue de trois corps de chauffe, ce qui devrait être le cas le meilleur. Puis, dans une deuxième partie, ces résultats seront comparés avec ceux obtenus dans le cas d'un seul corps de chauffe. Enfin, dans la dernière partie de cette section, l'alimentation tout ou rien des corps de chauffe sera considérée.

### 5.3.1 Profil de la puissance d'alimentation optimale

Dans un premier temps, on considère donc que les puissances d'alimentation des corps de chauffe peuvent prendre n'importe quelles valeurs comprises entre 0 et la puissance maximale admissible par chacune des résistances électriques. La puissance d'alimentation du plus petit des corps de chauffe sera donc comprise entre 0 et 0.5 kW, celle du corps de chauffe intermédiaire entre 0 et 1.0 kW et enfin celle du plus grand des corps de chauffe entre 0 et 1.5 kW, ce qui représente en tout une puissance maximale disponible de 3.0 kW.

Les trois entrées sont donc caractérisées de la même façon que le débit, comme indiqué à la figure 7 du paragraphe 4.5.2.

Comme pour le débit, elles peuvent varier chaque dix minutes, ce qui donne en tout  $3 \cdot 144 = 432$  variables de décision à optimiser.

Les courbes des figures 15 et 16 montrent les puissances d'alimentation des corps de chauffe ainsi que les températures dans la cuve obtenues dans le cas d'un ensoleillement faible, un soutirage fort et un  $\alpha$  fort. Il s'agit donc du cas où l'appoint auxiliaire est le plus sollicité puisqu'un  $\alpha$  fort signifie une haute exigence de confort.

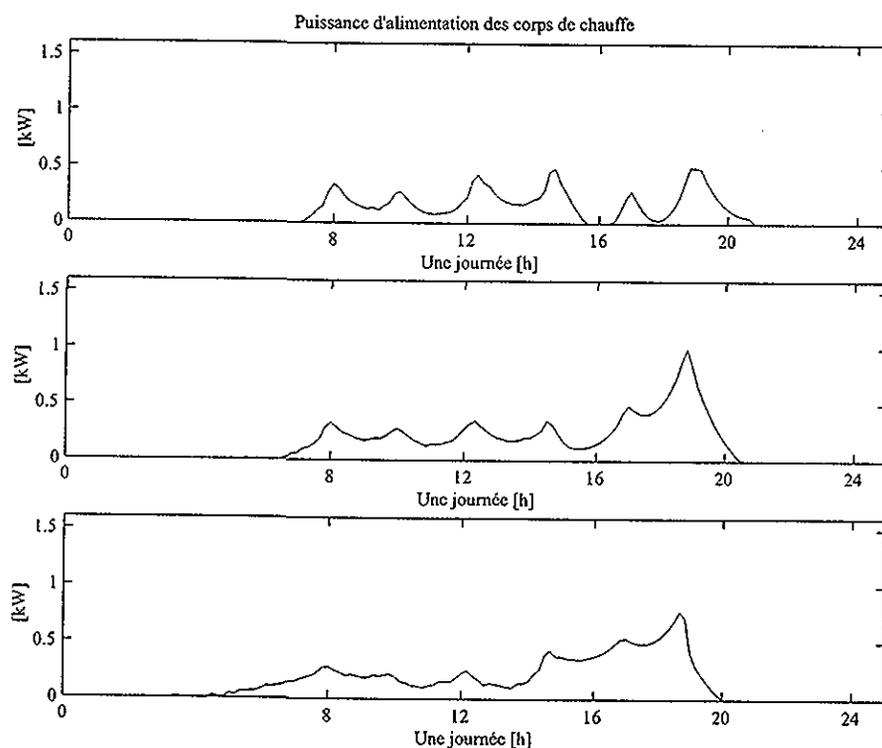


Figure 15 :  $\alpha$  fort, ensoleillement faible et soutirage fort

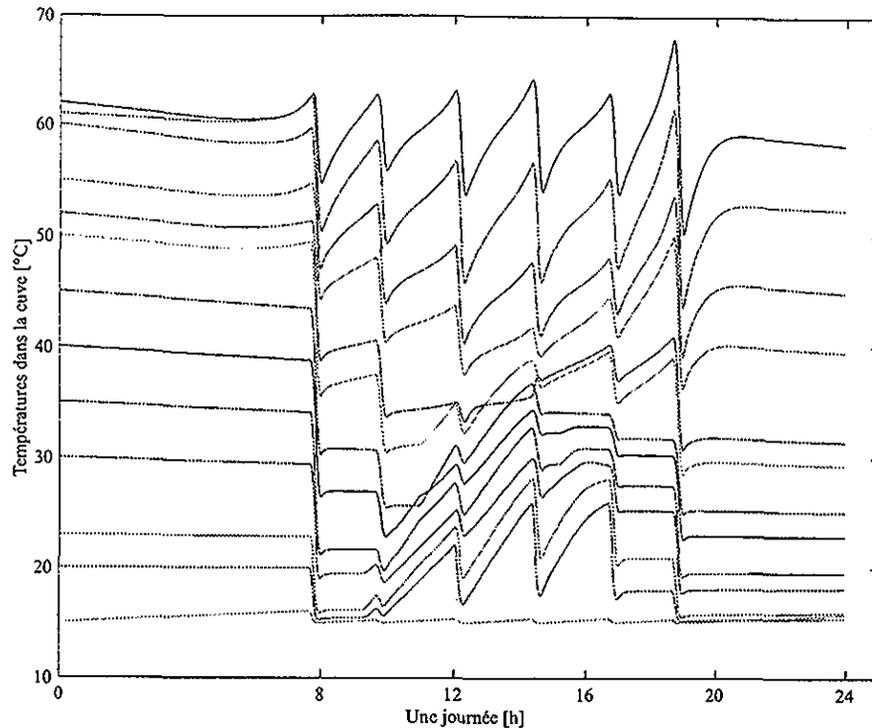


Figure 16 :  $\alpha$  fort, ensoleillement faible et soutirage fort

La température de l'eau dans le haut de la cuve oscille autour de 60 °C, le degré de confort est donc conforme aux attentes. La moyenne de cette température sur toute la journée est de 59.6 °C pour un écart type de 2.5 °C.

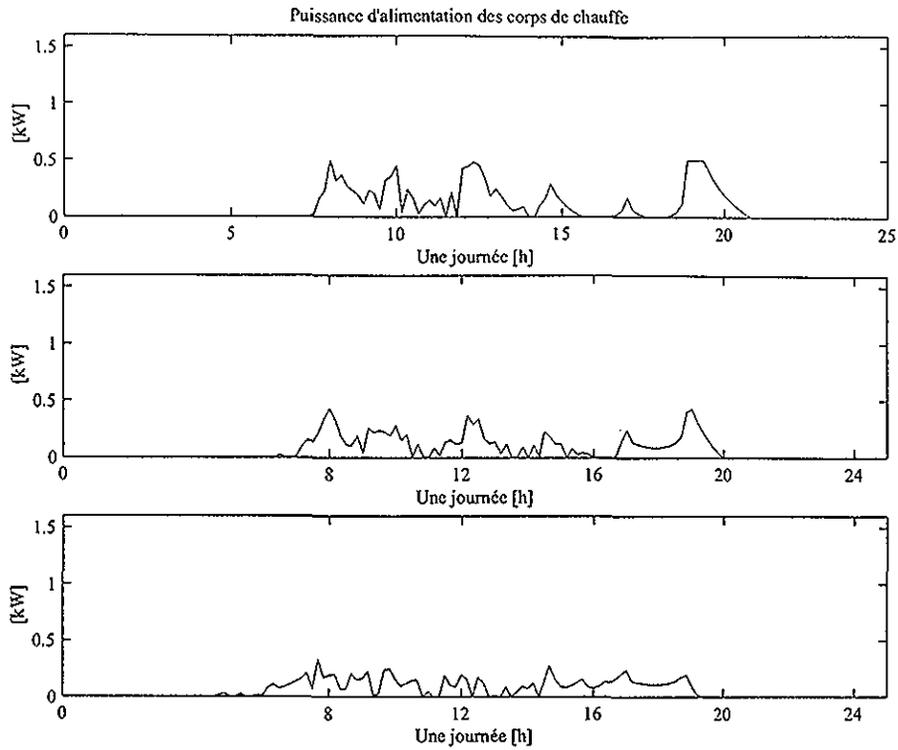
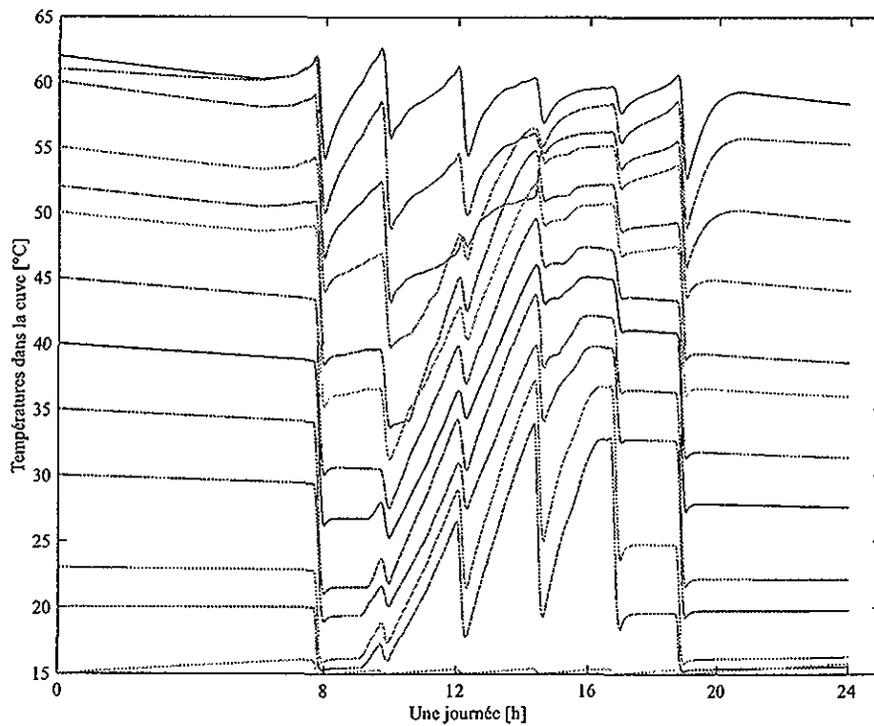
Les profils des puissances d'alimentation optimales montrent que grossièrement les appoints sont surtout sollicités avant les soutirages. La température dans le haut de la cuve n'est pas plus élevée quand de l'énergie solaire est transférée. Les puissances d'alimentation sont calculées au plus juste en fonction de la demande en eau chaude à venir et en fonction de l'énergie solaire qui va être transférée. L'effet prédictif de cette commande est très clair.

D'un point de vue énergétique, 3.88 kWh d'énergie électrique ont été consommés et 5.4 kWh d'énergie solaire ont été transférés pour une demande de 20.95 kWh. Une grande partie de l'énergie qui a été soutirée provient de la variation d'énergie interne. Ceci est très clair sur la figure 16, les températures dans la cuve en fin de journée sont nettement moins élevées qu'en début de journée.

Les deux figures suivantes montrent les mêmes courbes pour les mêmes conditions excepté pour l'ensoleillement qui cette fois-ci est choisi fort.

L'aspect général des puissances d'alimentation des corps de chauffe est le même que précédemment pour les mêmes raisons. Le degré de confort est toujours le même puisque  $\alpha$  n'a pas changé, une température moyenne dans le haut de la cuve de 59.2 °C et un écart type de 1.75 °C.

D'un point de vue énergétique, 1.60 kWh d'électricité ont été consommés pour 11.9 kWh d'énergie solaire transférée avec toujours une demande de 20.95 kWh pour la journée. Encore une fois, l'énergie interne a fortement diminué au cours de la journée.

Figure 17 :  $\alpha$  fort, ensoleillement fort et soutirage fortFigure 18 :  $\alpha$  fort, ensoleillement fort et soutirage fort

Il est bon maintenant de noter l'influence de ce coefficient  $\alpha$ . Pour ce faire, les courbes 19 et 20 représentent les résultats obtenus avec la même configuration que précédemment, c'est-à-dire un ensoleillement fort et un soutirage fort, mais cette fois-ci avec un  $\alpha$  faible.

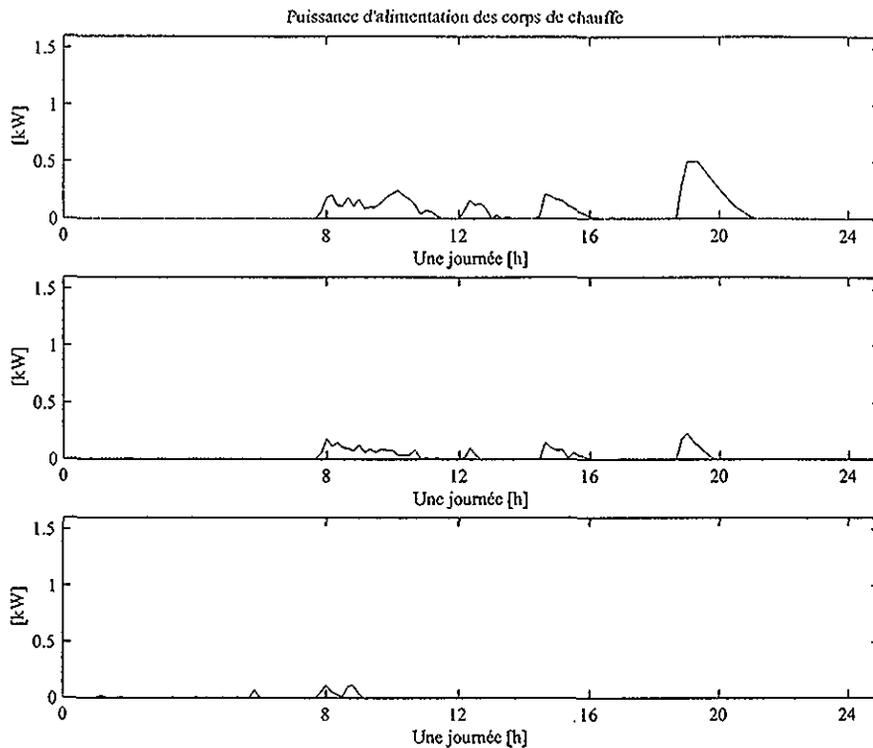


Figure 19 :  $\alpha$  faible, ensoleillement fort et soutirage fort

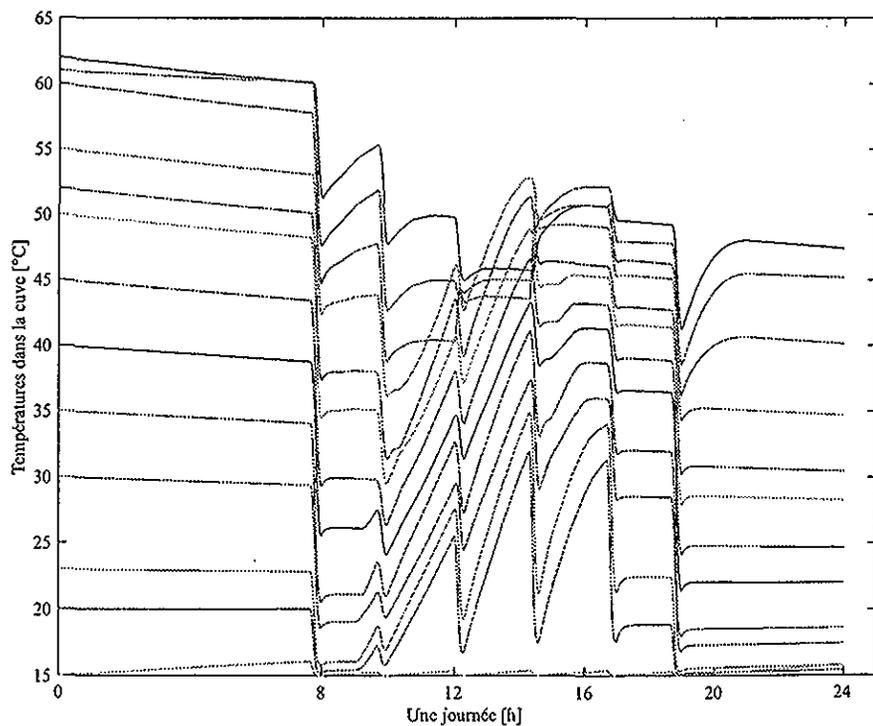


Figure 20 :  $\alpha$  faible, ensoleillement fort et soutirage fort

La température dans le haut de la cuve est largement en dessous de  $60^{\circ}\text{C}$ , sa température moyenne est de  $52.1^{\circ}\text{C}$  pour un écart type de  $6^{\circ}\text{C}$ . Comme prévu, le degré de confort est largement altéré par le choix d'un  $\alpha$  faible.

D'un point de vue énergétique,  $0.12\text{ kWh}$  d'énergie électrique a été consommé pour  $12.26\text{ kWh}$  d'énergie solaire collectés. Ainsi, si ce  $\alpha$  faible représente un mauvais choix en termes de rendement il présente l'avantage d'engendrer une consommation électrique moindre et de ce fait une énergie solaire collectée plus importante.

Le choix de  $\alpha$  représente donc un compromis qui doit être fait par l'utilisateur entre économie d'énergie et confort.

Une dernière série de courbes sur les figures 21 et 22 montrent l'effet d'un soutirage deux fois moins importants. Nous nous plaçons dans le cas d'un ensoleillement important et revenons à un  $\alpha$  fort.

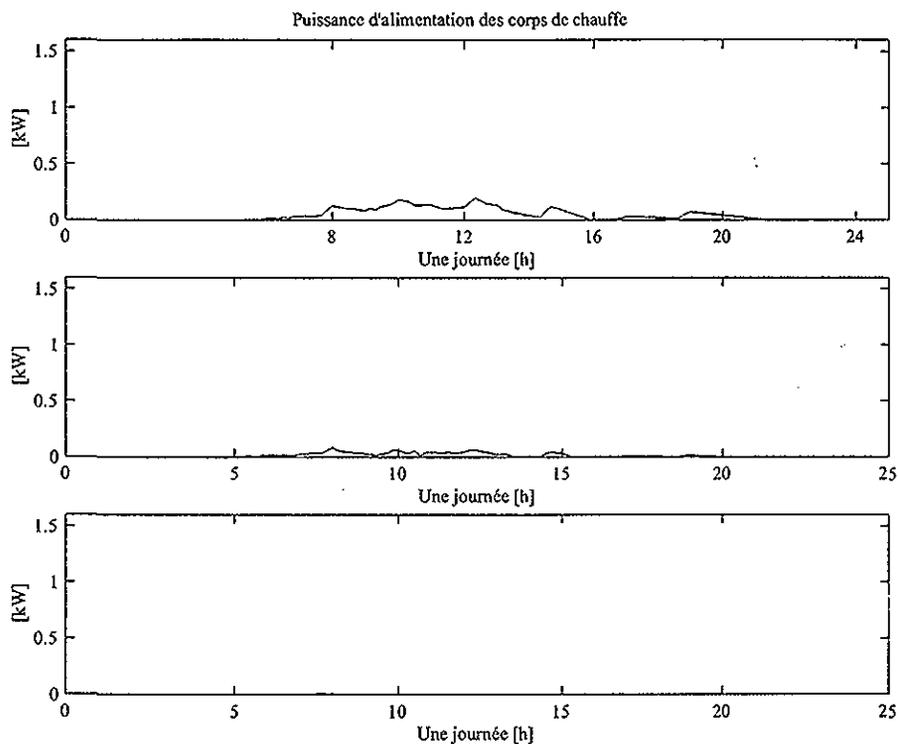


Figure 21 :  $\alpha$  fort, ensoleillement fort et soutirage faible

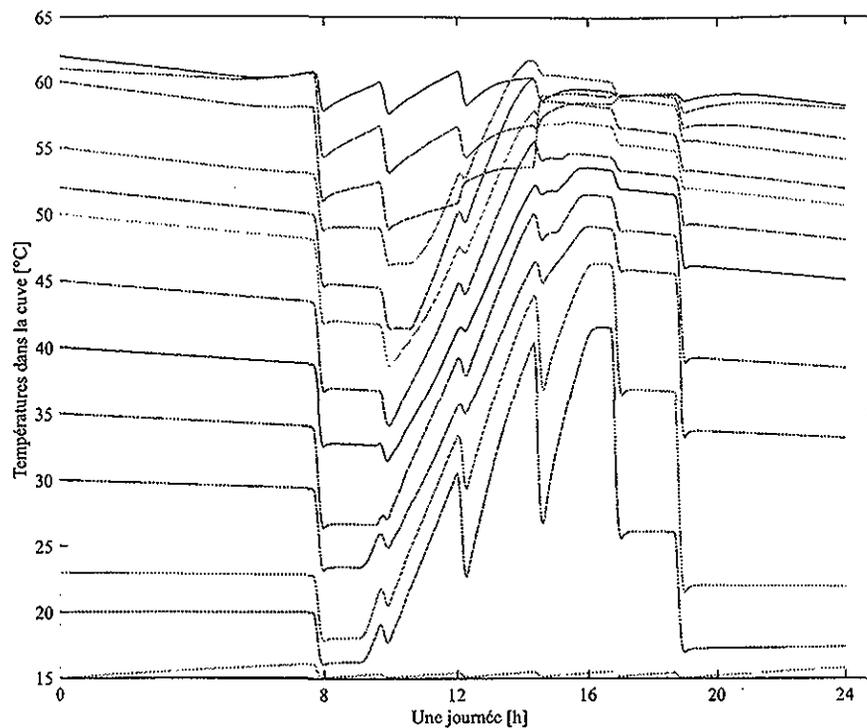


Figure 22 :  $\alpha$  fort, ensoleillement fort et soutirage faible

Les corps de chauffe ne sont donc que très peu sollicités, le plus grand ne l'est d'ailleurs pas du tout.

Le degré de confort est très élevé avec une température moyenne dans le haut de la cuve de 59.6 °C et un écart type de 1.03 °C.

Seul 0.015 kWh d'énergie électrique a été consommé, pour 11.23 kWh d'énergie solaire transférée et une demande de 10.48 kWh. Par rapport aux simulations précédentes, la tendance s'est inversée. En effet, cette fois-ci la variation d'énergie interne dans la cuve est positive. Ceci apparaît à la figure 21 où les températures en fin de journée sont plus élevées que les températures en début de journée.

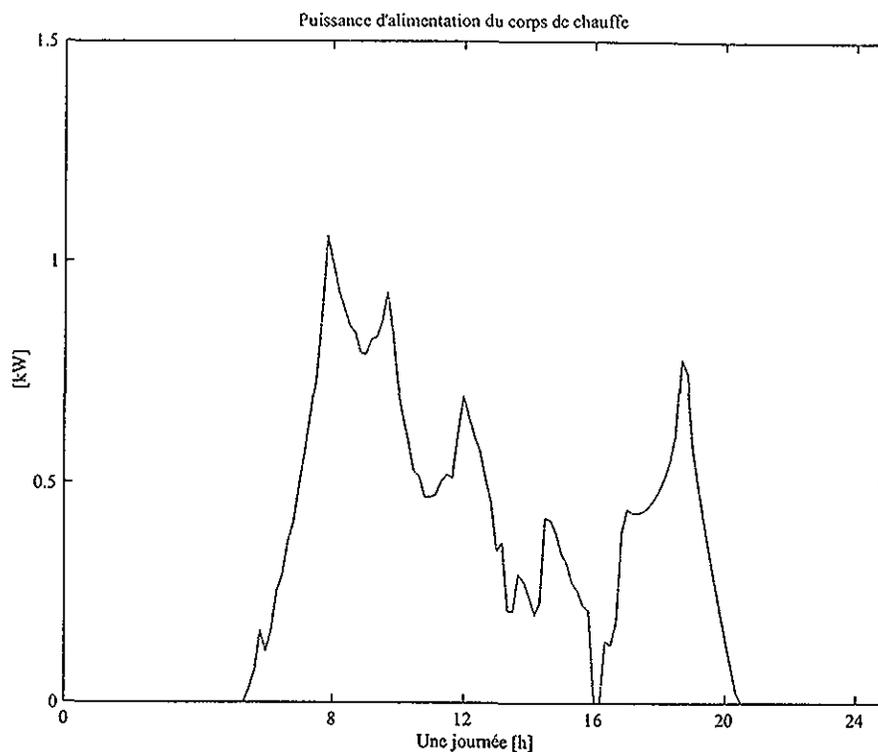
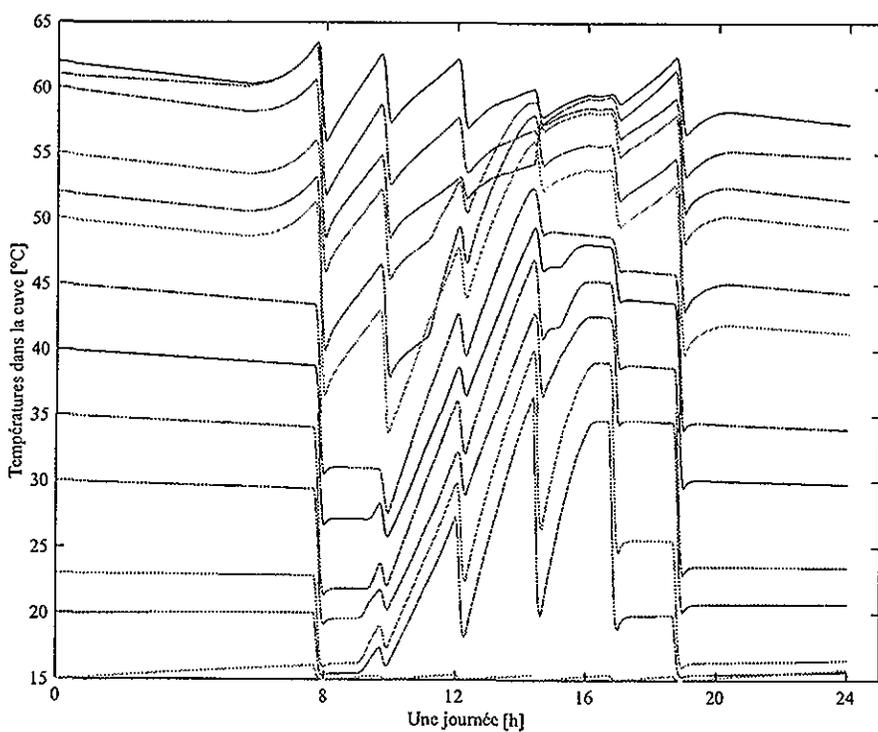
Par rapport à la commande standard du KitSOL, cette optimisation couplée avec le fractionnement de l'appoint engendre des gains énergétiques considérables, de l'ordre de 15 % en termes de fraction solaire. Cependant, cette commande n'a pas pu être testée sur le long terme et il ne s'agit pour l'instant que de résultats de simulation.

### 5.3.2 Intérêt du fractionnement de l'appoint

L'optimisation a également été réalisée dans le cas où un seul appoint est utilisé, ceci pour juger de l'efficacité du fractionnement de l'appoint.

La caractérisation est la même que précédemment, si ce n'est qu'il n'y a qu'une seule entrée. La puissance maximale admissible pour ce seul corps de chauffe est de 3.0 kW.

Les résultats donnés aux figures 23 et 24 concernent un ensoleillement fort, un soutirage fort et un  $\alpha$  fort.

Figure 23 :  $\alpha$  fort, ensoleillement fort et soutirage fortFigure 24 :  $\alpha$  fort, ensoleillement fort et soutirage fort

Le degré de confort atteint avec la configuration à un seul corps de chauffe semble être quasiment le même que celui atteint avec la configuration à trois corps de chauffe. Pour preuve, une température

moyenne dans le haut de la cuve de 59.6 °C contre 59.2 °C avec un seul corps de chauffe et un écart type de 1.6 °C contre 1.75 °C avec un seul corps de chauffe.

Cependant, d'un point de vue énergétique, 6.95 kWh d'électricité ont été dépensés avec cette configuration contre 1.60 kWh avec les trois corps de chauffe. L'énergie solaire transférée s'élève à 11.7 kWh contre 11.9 kWh avec les trois corps de chauffe.

D'une manière globale, un seul corps de chauffe engendre une température moyenne dans la cuve plus élevée, en effet la même quantité d'eau est chauffée que les soutirages soient importants ou au contraire minimes.

Cette température moyenne de l'eau dans la cuve plus élevée se traduit sur une journée par une diminution de 1.7 % de l'énergie solaire transférée. Cela se traduit vraisemblablement par une augmentation des pertes dans le milieu ambiant qui n'a pas été chiffrée.

Des chiffres semblables sont obtenus pour d'autres types de soutirage et d'ensoleillement.

### 5.3.3 Alimentation tout ou rien des corps de chauffe

Les travaux présentés dans ce paragraphe reprennent largement ceux obtenus par un étudiant dans le cadre d'un projet de semestre [7].

L'alimentation en continu des corps de chauffe est onéreuse et les industriels préféreront une alimentation tout ou rien pour ne pas augmenter le coût initial déjà élevé d'une installation solaire de chauffage d'eau sanitaire.

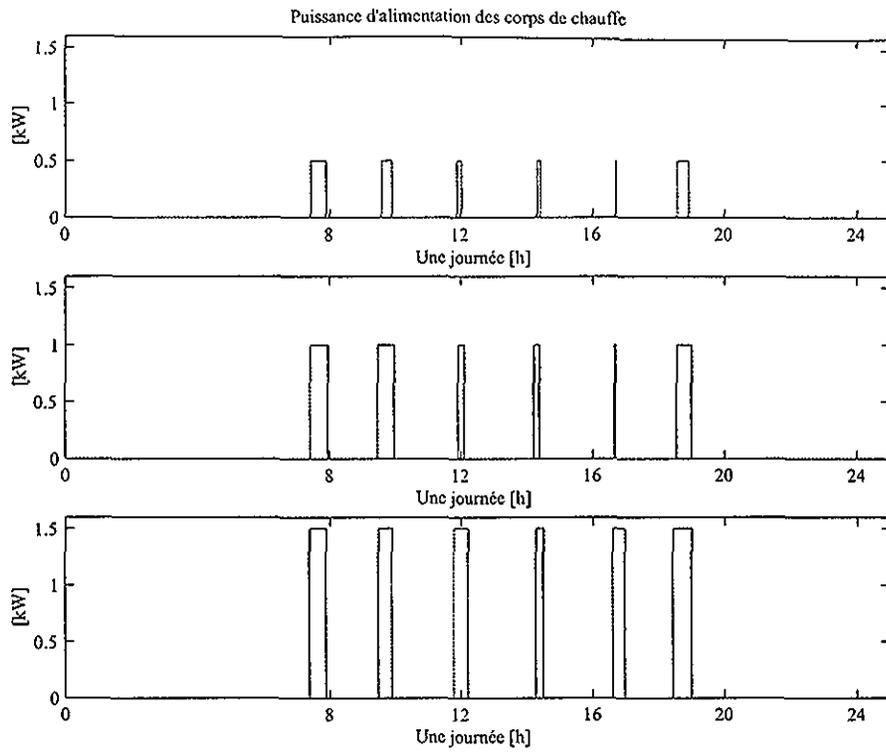
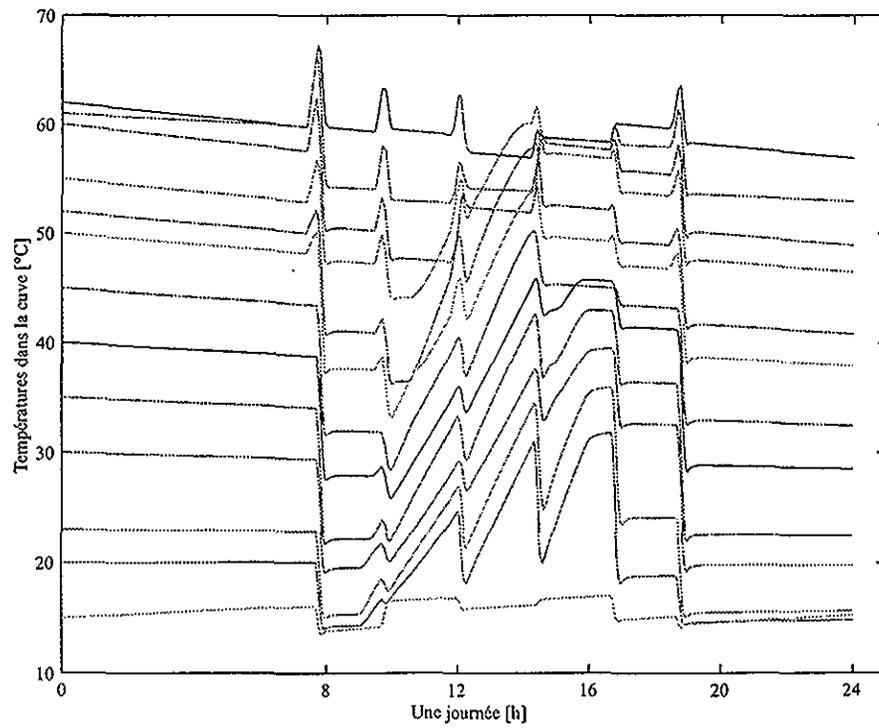
De plus, les profils obtenus aux paragraphes précédents pour les puissances d'alimentation optimales des corps de chauffe révèlent que, d'une manière générale, les appoints sont sollicités juste avant les soutirages. Donc, avec une caractérisation judicieuse imposant une alimentation des corps de chauffe juste avant chaque soutirage, on peut espérer obtenir des résultats similaires en termes de confort et d'économie d'énergie à ceux obtenus avec une alimentation continue.

La caractérisation des entrées correspondant aux puissances d'alimentation sera donc celle de la figure 8 du paragraphe 4.5.2. Le nombre de variables de décision correspond au nombre d'instantes de commutations, il y en aura 12 pour chaque entrée soit 36 pour les trois corps de chauffe.

Il est clair qu'il faut s'attendre à une certaine dégradation des performances par rapport à une alimentation continue des corps de chauffe, cependant on espère que cette dégradation sera minime.

Les résultats pour un ensoleillement fort, un soutirage fort et un  $\alpha$  fort sont donnés aux figures 25 et 26.

A la vue des courbes représentant les températures de l'eau dans la cuve, il apparaît que le degré de confort atteint est à peine moins bon que celui atteint avec une alimentation continue des corps de chauffe, pour preuve une température moyenne dans le haut de la cuve de 59.2 °C et un écart type de 1.24 °C.

Figure 25 :  $\alpha$  fort, ensoleillement fort et soutirage fortFigure 26 :  $\alpha$  fort, ensoleillement fort et soutirage fort

D'un point de vue énergétique, 6.4 kWh d'énergie électrique ont été consommés contre 1.6 kWh avec une alimentation continue. L'énergie solaire transférée est de 11.8 kWh pour 11.9 kWh avec une alimentation continue.

Les résultats énergétiques sont donc moins bons que dans le cas d'une alimentation continue des corps de chauffe mais déjà meilleurs que dans le cas d'une alimentation continue d'un seul corps de chauffe. Il convient tout de même de noter que la séquence d'enclenchements et de déclenchements des différentes résistances électriques choisie est minimaliste avec un enclenchement avant chaque soutirage. Des séquences plus complexes permettent d'obtenir des résultats qui se rapprochent plus de ceux obtenus avec une alimentation continue. Elles présentent néanmoins l'inconvénient d'introduire un plus grand nombre de variables de décision et par conséquent d'augmenter les temps de calcul. Divers essais ont été réalisés dans [7].

Les conclusions sont identiques pour d'autres types d'ensoleillement et de soutirage.

#### 5.4 Remarques et possibilité d'implantation sur le système réel

Dans les précédents paragraphes, les résultats ont été présentés et comparés en fonction du degré de confort et des performances énergétiques.

Cependant, la possibilité d'implantation de ces différentes configurations n'a pas été discutée et fait l'objet du présent paragraphe.

L'optimisation du débit dans le circuit capteur ainsi que des puissances d'alimentation des corps de chauffe doit absolument se faire à intervalles réguliers au cours de la journée pour compenser les éventuelles erreurs de modélisation et les erreurs dans les prédictions des grandeurs météorologiques et du débit de soutirage.

Ainsi, le temps que prend l'optimisation est un facteur déterminant. Avec une alimentation continue des puissances d'alimentations des corps de chauffe, il faut attendre en moyenne cinq heures avant l'obtention des entrées optimales. Ceci est dû au grand nombre de variables de décision. Une réalisation en ligne de cette optimisation est donc exclue. Avec une alimentation tout ou rien des corps de chauffe, le temps de calcul n'est que de quelques minutes, ce qui permet d'envisager une optimisation à intervalles réguliers.

Il convient de noter également que l'algorithme d'optimisation nécessite que les valeurs initiales de toutes les variables d'état soient connues. Cependant seules quelques mesures de température sont effectuées sur l'installation. L'algorithme d'optimisation devra donc inévitablement être couplé à un observateur qui reconstruira le vecteur d'état complet à partir de mesures présentes et passées.

L'implantation de cette optimisation en ligne sur le système réel fait l'objet d'une extension du mandat et sera menée au cours de l'année 1999.

## 6 Environnement d'expérimentation

### 6.1 Description de l'installation à l'ei•vd

L'installation à disposition à l'École d'ingénieurs du Canton de Vaud est représentée de façon schématique à la figure 27. Des photos prises sur place représentent le collecteur solaire et la cuve.

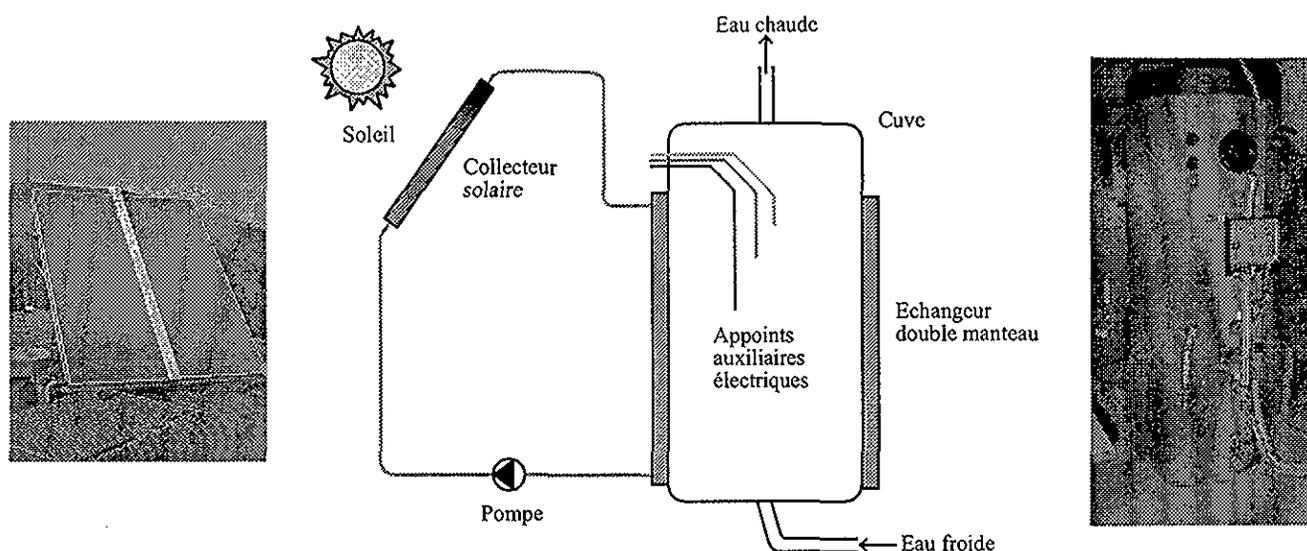


Figure 27 : Plan pilote à l'ei•vd

Les différents capteurs n'apparaissent pas sur cette figure. Différentes températures sont mesurées à l'intérieur de la cuve. Les positions exactes des six sondes à l'intérieur de la cuve sont indiquées sur le schéma de la figure 4 au paragraphe 4.2.1. Les températures du liquide caloporteur à l'entrée et à la sortie du collecteur sont également mesurées, de même que son débit.

Concernant les grandeurs météorologiques, les températures ambiantes autour de la cuve et autour du collecteur sont mesurées, de même que l'ensoleillement global sur le capteur incliné à 45°.

Les températures de l'eau du réseau ainsi qu'à la sortie de la cuve sont mesurées. Le profil du débit de soutirage peut facilement être changé.

Un ordinateur Macintosh collecte les mesures via une carte d'acquisition. Il reçoit également via courrier électronique les prévisions météorologiques de l'Institut Suisse de Météorologie. C'est lui qui exécute la routine d'optimisation et toujours via la carte d'acquisition applique les résultats à la pompe et aux corps de chauffe. Son rôle est également celui d'un serveur Web. Il sera bientôt possible de visualiser à distance le comportement de l'installation. Tout ceci est schématiquement représenté à la figure 28.

Comme indiqué sur cette figure, en plus des mesures prélevées en temps réel sur l'installation, des données vidéo provenant d'une caméra installée près de l'installation pourront également être envoyées aux ordinateurs clients.

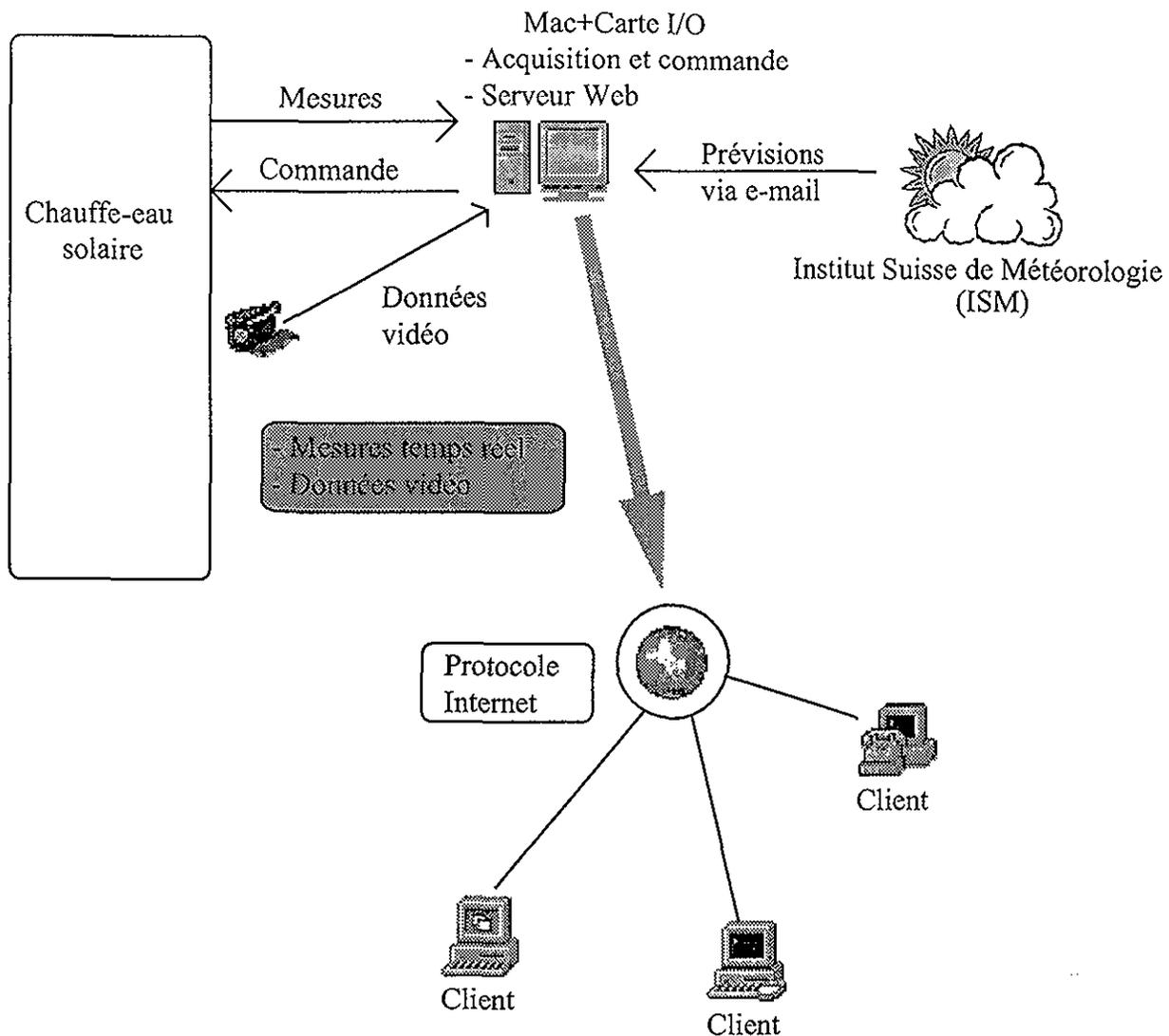


Figure 28 : Dispositif d'expérimentation

## 6.2 Stand indoor à l'Institut d'automatique

L'Institut d'automatique de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne dispose d'un stand indoor avec un ensoleillement artificiel. Ce dernier permet de simuler la boucle collecteur. Il est schématiquement représenté à la figure 29.

L'ensoleillement global sur le collecteur est mesuré grâce à un pyranomètre. La température ambiante près du capteur est également mesurée. Des capteurs de pression se trouvent en amont et en aval de la pompe et permettent ainsi de modéliser les pertes de charge de la boucle. Ces pertes de charge peuvent être ajustées grâce à une vanne à ouverture manuelle qui n'apparaît pas sur le dessin. N'apparaissent également pas sur le dessin pour des raisons de clartés les différents capteurs qui mesurent la température du liquide en différents endroits de la boucle. Un débitmètre permet également de mesurer le débit du liquide. Un échangeur de chaleur permet de refroidir le liquide qui sort du collecteur. Il est largement surdimensionné, ce qui signifie qu'il est capable de refroidir plus le liquide caloporteur que

le collecteur n'est capable de le chauffer. Ainsi, avec une vanne mélangeuse à la sortie de ce même échangeur, on peut facilement réguler la température du liquide à l'entrée du collecteur.

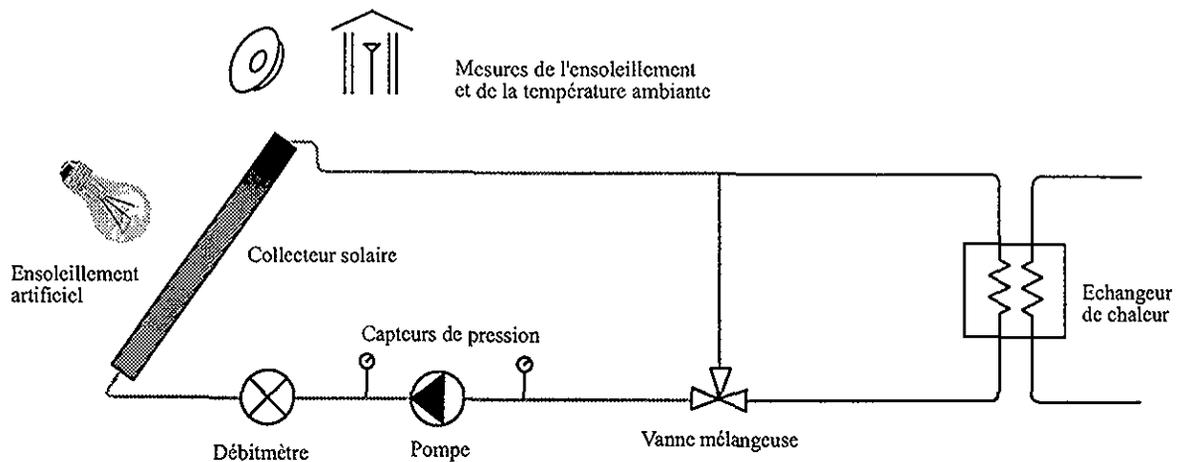


Figure 29 : Stand indoor à l'Institut d'automatique

Différents travaux ont déjà été effectués à l'aide de ce stand indoor, dont ceux sur le couplage de la pompe à faible consommation (qui est celle montée sur ce stand indoor) avec la cellule photovoltaïque décrits au paragraphe 5.2.2. En particulier, le stand a permis d'identifier avec une grande précision les caractéristiques de la pompe. Encore un fois tous ces résultats se trouvent dans [5]. Le couplage n'a pu être testé à cause d'un ensoleillement trop pauvre en infrarouges, mais des lampes à infrarouges seront ajoutées au début 1999.

Un système bon marché construit dans les pays du tiers monde a également pu être testé cet hiver par un étudiant de l'École d'Ingénieurs du Canton de Vaud.

Enfin, un modèle très précis du collecteur a pu être élaboré par un étudiant dans le cadre d'un projet de semestre [1]. Tous les phénomènes de chaleur ont été pris en compte pour écrire les équations différentielles aux dérivées partielles qui régissent le comportement des éléments constitutifs du collecteur. L'essentiel des paramètres intervenant dans ces équations différentielles sont des constantes physiques bien connues et propre aux matériaux. Seuls quelques coefficients ont été identifiés par filtrage de Kalman étendu. Parmi eux, le coefficient d'absorption du collecteur et sa dépendance à l'angle d'incidence de l'ensoleillement sur la surface du capteur. La formule d'Ambrosetti s'est avérée suffisante, elle est donnée à l'équation 17.

$$FR(\theta) = FR_{max} \tan^n \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad (17)$$

$FR(\theta)$  représente le coefficient d'absorption du collecteur,  $\theta$  est l'angle d'incidence,  $FR_{max}$  et  $n$  sont identifiés.

Pour la simulation, il a fallu discrétiser ces équations aux dérivées partielles. Cinq couches sont suffisantes pour obtenir des résultats précis. La comparaison entre la température calculée par le modèle et celle réellement mesurée apparaît sur la figure 30. Une précision identique est obtenue pour différents types de conditions (ensoleillement, température à l'entrée du capteur, débit du liquide caloporteur).

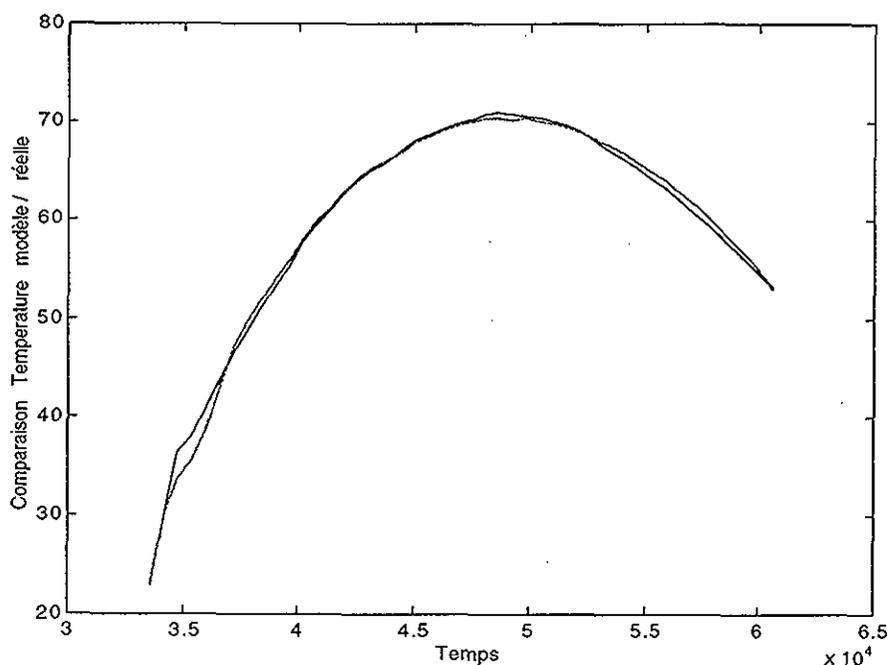


Figure 30 : Comparaison entre température calculée et mesurée

Ces résultats n'ont pas encore été incorporés dans la modélisation complète de l'installation, celle-là même qui sert au calcul des entrées optimales. En effet, actuellement un seul nœud est utilisé pour la modélisation du collecteur. Si lors de l'implantation sur le système réel, le modèle du collecteur apparaît insuffisant alors ces résultats seront pris en compte. Pour l'instant, une représentation minimale en termes de nombre de variables d'états est utilisée, évitant un volume de calculs trop important.

## 7 Conclusions et perspectives

Des gains énergétiques importants sont réalisés par l'optimisation du débit dans le circuit capteur et par l'optimisation des puissances d'alimentation des corps de chauffe électriques. Il apparaît tout de même que l'essentiel de ces gains proviennent d'une meilleure utilisation de l'appoint auxiliaire.

A cette augmentation des performances énergétiques, il convient également d'ajouter le haut degré de confort atteint avec une température de l'eau à la sortie de la cuve qui ne varie que très peu autour de la température désirée.

Ces résultats ont été établis avec comme hypothèse une parfaite connaissance des prévisions météorologiques et du comportement utilisateur.

Les résultats obtenus pour le profil du débit optimal nous ont suggéré d'alimenter la pompe par une cellule photovoltaïque. Une première étude a été menée.

Enfin, un modèle précis du collecteur a été élaboré, il pourra, si nécessaire, être incorporé au modèle complet de l'installation servant à synthétiser les entrées optimales.

Le projet se poursuivra durant toute l'année 1999, l'essentiel des travaux concernera l'implantation sur le système réel de l'optimisation en ligne décrite dans ce rapport. Le système d'acquisition et de supervision de l'installation de l'ei•vd est en pleine restructuration.

Par rapport au KitSOL tel qu'il est commercialisé actuellement, de nombreuses innovations ont été présentées. Cependant, il se peut que seulement quelques-unes d'entre elles seront réellement présentes dans la solution commerciale finale. Ainsi, durant cette année, il conviendra de définir avec précision quelles sont les innovations qui ont une influence significative sur le rendement énergétique de l'installation : prévision du comportement utilisateur, des conditions météorologiques ou encore le fractionnement de l'appoint auxiliaire.

D'autres travaux permettront d'affiner l'optimisation en ligne qui sera implantée, parmi elle une identification très précise des paramètres du modèle de l'installation complète. Cette identification précise sera rendue possible par la plus grande flexibilité introduite avec la mise en place du nouveau système d'acquisition et de supervision. Les mesures seront plus précises et plus nombreuses et des séquences tests pourront être programmées.

Un observateur capable d'identifier le comportement utilisateur à partir des mesures de température à l'intérieur de la cuve sera également étudié.

L'ordinateur effectuant la commande du KitSOL d'Yverdon jouera également prochainement le rôle d'un serveur Web, permettant ainsi un contrôle à distance de l'installation. Des alarmes pourront également indiquer la présence d'éventuelles pannes. Pour ce faire, différents principes de détection de pannes seront étudiés.

Enfin, le couplage pompe/cellule photovoltaïque sera étudié avec précision sur le stand indoor de l'Institut d'automatique. Il sera également testé sur l'installation complète à l'ei•vd.

Trois étudiants travailleront dans le cadre de projets de semestre sur ces différents sujets de mars à juin 1999.

## 8 Références

- [1] Andréa, L. (1998). *Modélisation du collecteur d'énergie solaire*. Projet de semestre, Institut d'automatique, Département de Génie Mécanique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland.
- [2] Ascher, U. M. and Petzold L. R. (1998). *Computer Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations*. SIAM. Philadelphia.
- [3] Bryson, A.E. and Y.-C. Ho (1969). *Applied Optimal Control*. Ginn and Company. Waltham, Massachusetts.
- [4] Dorato, P. and M. Jamshidi (1982). Some Comments on Optimal Collection of Solar Energy. *Solar Energy* 29, pp. 351-353.
- [5] Korner, S. (1998). *Commande d'une pompe de circulation par une cellule photovoltaïque*. Projet de semestre, Institut d'automatique, Département de Génie Mécanique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland.
- [6] Kovarick, M. and P. F. Leese (1978). Optimal Control of Flow in Low Temperature Solar Collectors. *Solar Energy* 18, pp. 431-435.
- [7] Lescroart, P. (1999). *Optimisation de l'apport auxiliaire d'énergie d'une installation solaire de chauffage d'eau sanitaire*. Projet de semestre, Institut d'automatique, Département de Génie Mécanique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland.
- [8] Nemirovsky A. and Yudin D. (1983). *Informational Complexity and Efficient Methods for Solution of Convex Extremal Problems*. J. Willey & Sons.
- [9] Pontryagin, L.S., V. G. Boltyanskii, R. V. Gamkrelidze and E.F. Mishchenko (1962). *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. John Wiley & Sons. New York.
- [10] 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.
- [11] Prud'homme T. et D. Gillet (1998). *Optimization of Solar Domestic Hot Water Systems*. EuroSun'98.
- [12] Scartezzini J.-L. (1986). *Application des méthodes stochastiques à l'étude des systèmes de captage de l'énergie solaire*. Thèse de doctorat en Physique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausanne, Switzerland.
- [13] Winn, C. B. and D. E. Hull (1979). Optimal Controllers of the Second Kind. *Solar Energy* 23, pp. 529-534.
- [14] Luenberger, G. (1984). *Linear and Nonlinear Programming*. Addison-Wesley.

## 9 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

**Annexe A: Données de l'ISM**

Les données arrivent de l'ISM par mail sous la forme suivante :

```

35946 98060100 0 48 1 K2p (15f8.2)
T2M 0048 0.10000E+01 -0.27315E+03 7 11
8.85 8.55 8.00 7.51 7.34 7.92 10.19 12.65 15.23 16.93 18.33 19.41 20.13 20.71
21.07
21.20 20.99 20.44 19.66 18.49 17.50 16.76 15.81 14.93 14.24 13.79 13.38 12.93
12.62 13.09
15.15 17.84 20.01 21.71 23.04 24.03 24.26 23.51 21.06 23.05 20.17 17.99 17.16
16.30 16.02
16.08 16.03 16.03 15.71

35946 98060100 0 48 1 K2p (15f8.2)
GLOBAL 0048 0.10000E+01 0.00000E+00 7 11
0.00 0.00 0.00 0.00 2.29 42.24 162.05 333.10 513.86 669.33 765.12 850.79 849.10
790.99 722.65
614.21 458.19 293.44 122.80 32.57 0.00 0.13 0.00 0.00 0.31 0.00 0.12 0.08 2.18
41.57
156.64 321.62 494.40 644.83 746.02 824.07 833.55 785.30 684.58 531.19 330.26 116.93
61.02 23.92 0.32
0.19 0.00 0.00 0.00

```

Explications :

T2M est la température ambiante extérieure 2 mètres au dessus du sol en °C. GLOBAL est l'ensoleillement global sur une surface horizontale en W/m<sup>2</sup>. Les données sont données pour chaque heure sur un horizon de 48 heures, soit en tout 49\*2=98 données par mail. La date est donnée en début de fichier, 98060100 signifie que la première donnée correspond au 1er juin à minuit.

## Annexe B: Programmes informatiques

Les programmes informatiques qui ont été utilisés pour conduire cette optimisation se trouvent sur la disquette qui accompagne ce rapport.

L'optimisation est quasiment complètement réalisée en langage C, seule la visualisation des résultats se fait avec MATLAB.

Le programme MATLAB `optim_SDHWS.m` est lancé depuis la fenêtre de commande de MATLAB. Ce dernier lit les données météorologiques qui se présentent sous la forme de fichiers `*.mat`. L'explicitation de chacun de ces fichiers se trouve en commentaire dans le fichier `optim_SDHWS.m`. Un exemple de chacun de ces fichiers se trouve sur la disquette. Dans ce fichier `optim_SDHWS.m`, est également choisi le profil de soutirage. Ce fichier appelle la routine d'optimisation qui se nomme `opt.mex`, les données météorologiques et le profil de soutirage sont passés en paramètre de même que les valeurs initiales pour les variables de décision. Cette routine d'optimisation retourne les valeurs calculées des variables de décision optimales ainsi que quelques autres informations utiles pour la compréhension et l'analyse des résultats, par exemple les valeurs des gradients de la fonction de coût en fonction de ces mêmes variables de décision ainsi que les profils des variables d'état, à savoir les températures et la fonction de coût.

Le fichier `opt.mex` est obtenu en compilant et liant le projet `opt_C1.µ`. Les algorithmes d'intégration numérique et d'optimisation se trouvent dans le fichier `opop.c`.

La forme du projet `opt_C1.µ` est visible à la figure 31.

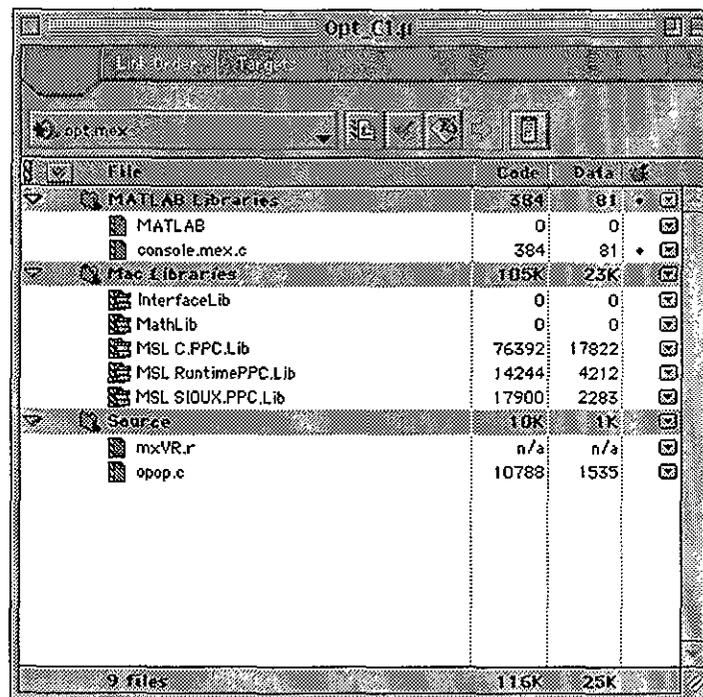


Figure 31: Projet `opt_C1.µ`

La version de l'optimisation qui se trouve sur la disquette accompagnant ce rapport réalise l'optimisation pour trois corps de chauffe avec une alimentation tout ou rien de ceux-ci. Elle réalise également l'optimisation du débit dans le circuit capteur, ce dernier pouvant varier toutes les dix minutes.