

Rapport final à l'attention de l'Office Fédéral de  
l'Énergie  
Commande optimale de systèmes solaires combinés

T. Prud'homme and D. Gillet  
Laboratoire d'automatique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne  
CH-1015 Lausanne, Suisse.  
denis.gillet@epfl.ch  
Téléphone : + 41 21 693 51 68 ; Fax : + 41 21 693 25 74

Mai 2003

## Résumé

Les systèmes solaires combinés sont des installations permettant à la fois le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage du bâtiment grâce à l'énergie solaire. Différents types de systèmes solaires combinés sont actuellement commercialisés en Europe, certains d'entre eux sont inventoriés, analysés, testés et comparés dans le cadre de la tâche 26 de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) <sup>1</sup>. Parmi ces systèmes inventoriés figure la centrale d'énergies Arpège d'Agena <sup>2</sup>. Il s'agit du système sur lequel les améliorations proposées dans ce travail ont été testées. Une installation pilote est en fonctionnement au laboratoire d'énergétique solaire de l'Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud <sup>3</sup>.

Ce travail réalise l'élaboration d'une stratégie de commande avancée visant à minimiser l'utilisation de l'apport auxiliaire d'énergie tout en assurant un très haut degré de confort aux utilisateurs. La stratégie développée est une stratégie de commande optimale intégrant des prévisions météorologiques fournies en ligne par l'Institut Suisse de Météorologie (ISM) <sup>4</sup>. Elle intègre éventuellement, si elles sont disponibles, des prévisions du comportement utilisateur en termes de besoins en eau chaude. Des modèles dynamiques de l'installation et du bâtiment sont également nécessaires.

Le modèle de l'installation peut facilement être maîtrisé par le fabricant, ce qui n'est pas le cas du modèle du bâtiment qui va être différent pour chaque installation en fonctionnement. Pour traiter ce problème, une structure simple de modèle du bâtiment a été retenue et une identification automatique des paramètres ayant une influence significative a été mise en place.

La stratégie de commande optimale présente l'inconvénient majeur d'être une stratégie dite "boucle ouverte", ce qui signifie qu'elle ne prend nullement en compte les mesures qui sont effectuées sur l'installation. Ainsi, dans sa forme de base, cette stratégie ne permet pas de prévenir d'éventuelles erreurs de modélisation ou des différences entre perturbations estimées et réelles. Pour pallier à ce problème, une implantation robuste de cette stratégie a été développée. Elle repose sur la répétition de l'optimisation à intervalles réguliers, le suivi de certaines trajectoires optimales et la mise à jour des prévisions météorologiques fournies par l'ISM sur la base de capteurs de température et d'ensoleillement bon marché éventuellement disponibles.

---

<sup>1</sup><http://www.iea-shc.org/task26/>

<sup>2</sup>Agena énergies, Le grand Pré, CH-1510 Moudon

<sup>3</sup>Laboratoire d'énergétique solaire, Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud, 1, rte de Cheseaux, CH-1400 Yverdon-les-Bains

<sup>4</sup>Institut Suisse de Météorologie (ISM), Kräbühlstrasse 58, Postfach 514, CH-8044 Zürich

La stratégie de commande optimale, son implantation robuste ainsi que la stratégie d'identification automatique des paramètres du modèle de la maison ont été implantées grâce à une solution temps-réel de National Instruments <sup>5</sup> appelée FieldPoint.

---

<sup>5</sup><http://www.ni.com/>

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>3</b>
1.1	Etat de l'art et objectifs visés . . . . .	3
1.2	Organisation du rapport . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Description du système Arpège</b>	<b>5</b>
2.1	Modélisation . . . . .	6
2.2	Régulation actuelle . . . . .	12
2.2.1	Débit dans la boucle collecteur . . . . .	13
2.2.2	Débit dans le circuit de chauffage et vanne trois voies . . . . .	15
2.2.3	Enclenchement du brûleur à gaz . . . . .	17
2.2.4	Limites de la régulation actuelle . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Modélisation du bâtiment</b>	<b>19</b>
3.1	Modèle de référence . . . . .	20
3.2	Structure du modèle retenu . . . . .	21
3.3	Identification automatique des paramètres . . . . .	24
3.4	Etude de sensibilité . . . . .	25
3.5	Résultats . . . . .	30
3.5.1	Reproduction du comportement du modèle de référence . . . . .	31
3.5.2	Identification du bâtiment de Dombresson . . . . .	31
<b>4</b>	<b>Principe de la commande avancée élaborée</b>	<b>34</b>
4.1	Prévisions . . . . .	36
4.2	Fonction de coût . . . . .	36
4.3	Méthode d'optimisation . . . . .	37
<b>5</b>	<b>Stratégie d'implantation robuste</b>	<b>40</b>
5.1	Suivi de trajectoires optimales . . . . .	40
5.2	Répétition de l'optimisation . . . . .	42
5.3	Mise à jour des prévisions météorologiques à l'aide de mesures . . . . .	42

<i>TABLE DES MATIÈRES</i>	2
<b>6 Implantation</b>	<b>43</b>
6.1 Plateforme informatique . . . . .	43
6.2 Commutation entre commande d'origine et stratégie de commande avancée	45
<b>7 Résultats expérimentaux</b>	<b>47</b>
<b>8 Conclusions et perspectives</b>	<b>51</b>
<b>A Nomenclature</b>	<b>52</b>

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Etat de l'art et objectifs visés

Le but principal de ce projet consiste en l'élaboration d'une stratégie de commande avancée pour le système solaire combiné Arpège. Les stratégies de commande actuelles pour ce type de systèmes ne prennent en compte que de façon très approximative l'évolution des conditions de fonctionnement dans le but de maximiser le confort des utilisateurs et minimiser l'utilisation de l'apport auxiliaire d'énergie. La stratégie développée intègre des prévisions des conditions météorologiques et du comportement utilisateur et minimise explicitement un critère qui correspond au comportement désiré de l'installation, c'est-à-dire confort et minimisation de l'utilisation de l'apport auxiliaire.

Une stratégie similaire a été développée pour les chauffe-eau solaires [8] dans le cadre d'un précédent mandat. Il s'agissait ici d'étendre cette stratégie aux systèmes solaires combinés. La problématique est un peu plus complexe dans le sens où non seulement un modèle dynamique de l'installation est nécessaire mais également un modèle dynamique du bâtiment. Il s'avère cependant que ce modèle devra être différent pour chaque système installé. Il a donc été nécessaire de mettre en place une stratégie qui permette d'obtenir un modèle satisfaisant de ce bâtiment de façon automatique. Ainsi, une structure simple du modèle de ce bâtiment a été retenue et les paramètres significatifs de ce dernier ainsi que ceux du comportement utilisateur sont identifiés en minimisant un critère de type moindres carrés.

L'implantation robuste de cette stratégie de commande optimale est réalisée en répétant l'optimisation, en suivant une ou plusieurs trajectoires optimales et en adaptant les prévisions météorologiques si des capteurs mesurant l'ensoleillement et la température ambiante extérieure sont disponibles. Le suivi de trajectoires optimales n'est pas nécessaire si l'on est capable de répéter l'optimisation à une fréquence élevée, ce qui n'est généralement pas le cas au regard de la complexité du problème d'optimisation à résoudre et des moyens de calcul à disposition. Le suivi de trajectoires optimales permet quant à lui d'assurer un

très haut degré de confort aux utilisateurs dans toutes les situations. Les deux méthodes sont facilement combinées en fonction des moyens de calcul à disposition. L'adaptation des prévisions météorologiques représente une amélioration supplémentaire qui donne encore plus de sens à la répétition de l'optimisation.

## 1.2 Organisation du rapport

Le chapitre 2 décrit le système sur lequel les modifications ont été testées. La section 2.1 décrit le modèle dynamique de ce système ainsi que la procédure d'identification des paramètres. La section 2.2 décrit la régulation du système Arpège telle qu'elle est implantée dans la version actuellement commercialisée de l'installation. Le chapitre 3 présente le modèle du bâtiment, en particulier la section 3.2 présente la structure retenue et la section 3.3 la procédure d'identification automatique des paramètres significatifs.

# Chapitre 2

## Description du système Arpège

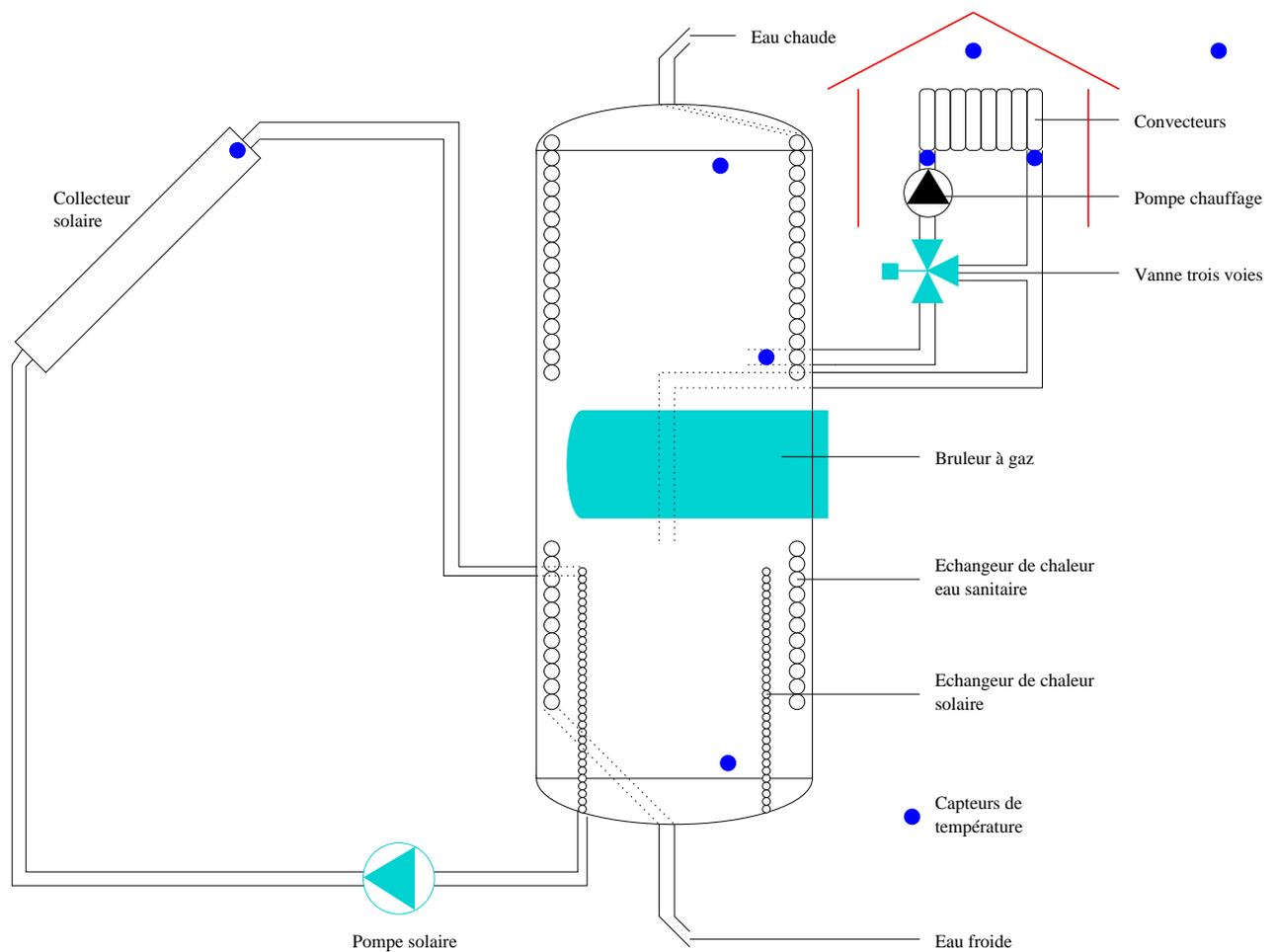


FIG. 2.1 – Schéma de principe du système Arpège.

La figure 2.1 présente un schéma simplifié de la centrale d'énergies Arpège. Sur cette figure n'apparaissent pas les vases d'expansion, ou encore les différentes possibilités de raccorder une chaudière comme appoint supplémentaire ou une deuxième boucle de chauffage. Ce type d'information est disponible dans [3].

Les collecteurs solaires représentent une surface de 12 m<sup>2</sup>. Un mélange eau/propylène glycol (40 %) circule dans ces collecteurs grâce à une pompe. Le liquide chauffé dans ces collecteurs rentre dans l'échangeur du circuit solaire. Ce dernier a une surface d'échange égale à environ 3 m<sup>2</sup>. L'énergie captée par les collecteurs solaires est transférée à l'eau qui se trouve dans la cuve grâce à cet échangeur. La cuve a un volume de 900 l, dont 13 l pour l'échangeur solaire et 60 l pour l'échangeur d'eau sanitaire.

L'échangeur d'eau sanitaire permet le chauffage de l'eau sanitaire. Cette dernière est chauffée de manière instantanée lorsque l'utilisateur ouvre le robinet.

L'apport auxiliaire d'énergie est assuré par un brûleur à gaz. Celui-ci est situé approximativement au milieu de la cuve et peut chauffer un peu plus de la moitié de l'eau qui s'y trouve, soit 480 l.

Dans le cadre de la tâche 26 de l'AIE, une représentation standard des systèmes solaires combinés a été adoptée. Elle stipule notamment que la production d'énergie doit se trouver à gauche du schéma, le transfert, le stockage, la commande et la distribution au milieu et enfin la charge à droite. Différentes couleurs sont utilisées pour définir les différents liens entre les éléments constitutifs de l'installation (régulation, conduites, etc.). La représentation de la central d'énergies Arpège avec cette convention est donnée à la figure 2.2.

## 2.1 Modélisation

La méthode adoptée pour la modélisation du système Arpège est très classique. Tous les volumes de liquide de l'installation ont été divisés en un certain nombre de couches, ceci afin de transformer les équations différentielles aux dérivées partielles en équations différentielles aux dérivées ordinaires, c'est-à-dire sans dépendance spatiale explicite. Un bilan thermique a été ensuite effectué pour chacune de ces couches. Au final, il y a donc autant d'équations différentielles que le nombre de couches choisi. Un bon modèle de simulation requiert un très grand nombre de couches. Cependant dans notre cas le modèle n'est pas seulement utilisé pour la simulation. Il fait partie intégrante de la stratégie de commande avancée. Par conséquent, il convient de trouver un compromis pour le nombre de couches entre représentativité du modèle et complexité.

Une vue schématique de l'installation est donnée à la figure 2.3. Sur cette figure apparaît également la découpe qui a été faite pour la modélisation.

Tous les éléments introduits dans les équations qui suivent sont répertoriés à l'annexe A en fin de rapport.

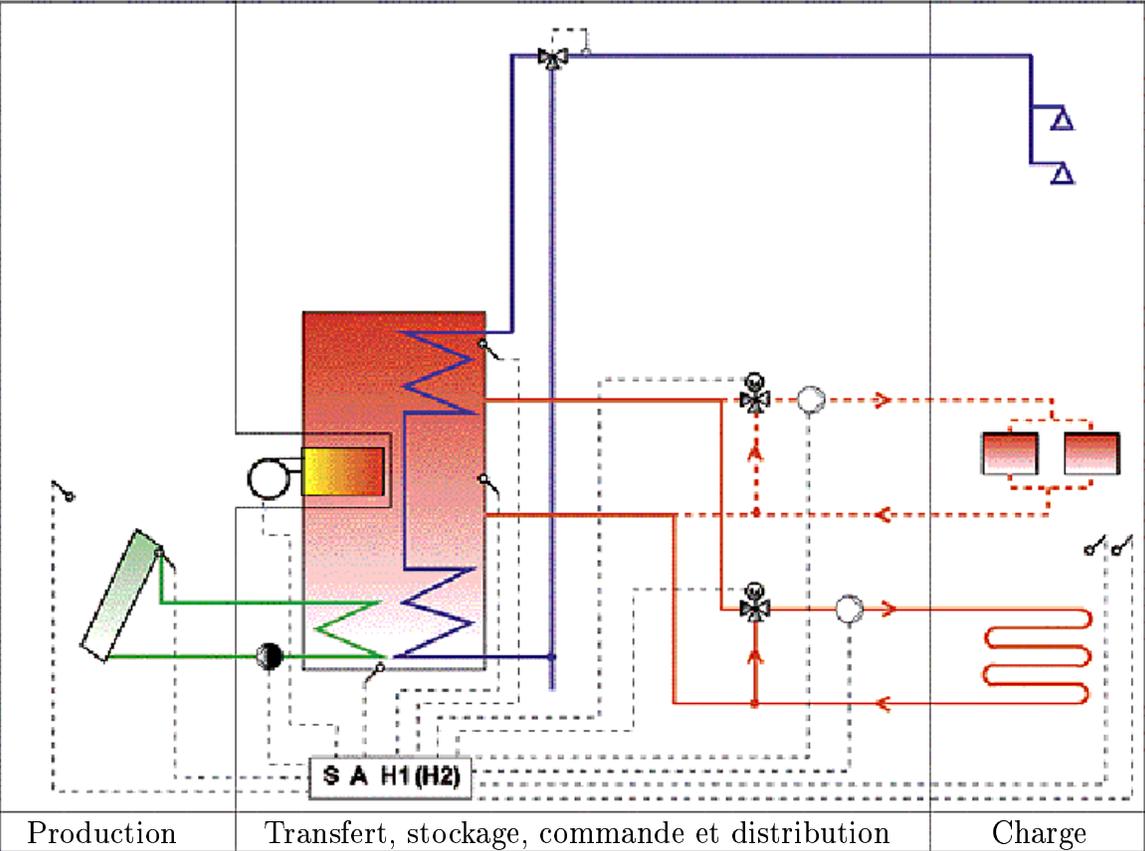


FIG. 2.2 – Schéma du système Arpège dans la brochure de la tâche 26 de l’AIE.

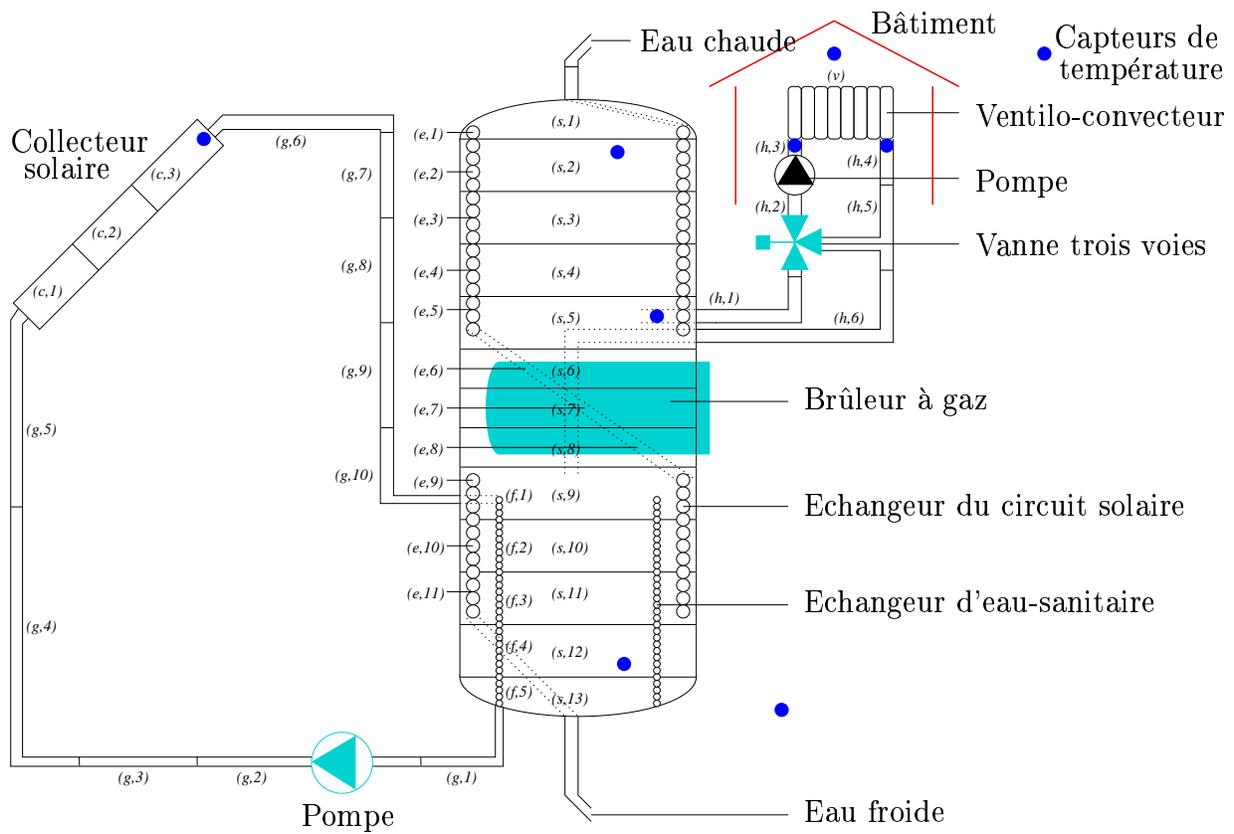


FIG. 2.3 – Le système Arpège et sa découpe en noeuds pour la modélisation.

Le volume de liquide dans la cuve a été découpé en 13 couches ( $s, i$ ) conduisant à autant d'équations différentielles (2.1).

$$\begin{aligned}
M_{s,i} C_{pf} \frac{dT_{s,i}}{dt} = & \xi_{e,i} K_{s,e} (T_{e,i} - T_{s,i}) \\
& + K_{s,a} (T_{amb,in} - T_{s,i}) \\
& + \xi_{f,i} K_{s,f} (T_{f,i-8} - T_{s,i}) \\
& + \xi_{h,i} (1 - \alpha) \dot{m}_H C_{pf} (T_{test,i} - T_{s,i}) \\
& + \lambda_i (T_{s,i-1} - T_{s,i}) + \lambda_{i+1} (T_{s,i+1} - T_{s,i}) \\
& + \dot{Q}_i \\
& + \Theta(T_{s,i-1} - T_{s,i}) + \Theta(T_{s,i} - T_{s,i+1})
\end{aligned} \tag{2.1}$$

$$\begin{aligned}
i &= \{1, \dots, 13\}, T_{s,0} = T_{s,1}, T_{s,14} = T_{s,13} \\
\xi_{e,i} &= 1 \text{ si } i \in \{1, \dots, 11\}, \text{ sinon } \xi_{e,i} = 0 \\
\xi_{f,i} &= 1 \text{ si } i \in \{9, \dots, 13\}, \text{ sinon } \xi_{f,i} = 0 \\
\xi_{h,i} &= 1 \text{ si } i \in \{5, \dots, 9\}, \text{ sinon } \xi_{h,i} = 0 \\
T_{test,i} &= T_{s,i+1} \text{ si } i \in \{5, 6, 7, 8\}, T_{test,i} = T_{h,6} \text{ si } i = 9 \text{ sinon } T_{test,i} = T_{s,i}
\end{aligned}$$

Les termes de droite de cette équation définissent les différentes puissances entrantes et sortantes pour chacune des couches de la cuve. Certains termes n'apparaissent que pour certaines de ces couches, c'est pourquoi ils sont multipliés par un coefficient  $\xi_{.,i}$ . Dans l'ordre, ces termes représentent la puissance échangée avec l'échangeur d'eau sanitaire, la puissance perdue dans le milieu ambiant, la puissance reçue de l'échangeur du circuit solaire, la puissance échangée entre les couches juxtaposées lorsque la boucle de chauffage est en fonctionnement, la puissance échangée entre les couches juxtaposées par conduction, la puissance reçue du brûleur à gaz et enfin le dernier terme permet de prendre en compte ce qui se passe quand il y a inversion de température. En effet, quand une couche est plus chaude que la couche juste au dessus d'elle, elle devient plus légère et remonte rapidement. Ainsi, pour prendre en compte ce phénomène, une fonction  $\Theta$  a été introduite (en effet, sur la ligne correspondante il faut comprendre  $\Theta$  comme étant une fonction de la différence de température ( $T_{s,i-1} - T_{s,i}$ ) et non comme dans les autres cas comme un coefficient qui multiplierait cette différence de température). Ainsi lorsque ( $T_{s,i-1} - T_{s,i}$ )  $\leq 0$ , on a  $\Theta = 0$ , en revanche lorsque ( $T_{s,i-1} - T_{s,i}$ )  $> 0$ ,  $\Theta$  prend une grande valeur ce qui revient à mélanger parfaitement les deux couches. Ce n'est bien entendu pas ce qui se passe dans la réalité mais cette technique permet de simuler le phénomène avec une précision acceptable dans ce cas bien précis. En résumé,  $\Theta$  est représentée de la façon suivante :

$$\Theta(a) = \begin{cases} 14 & \text{si } a > 0 \\ 0 & \text{si } a \leq 0 \end{cases} \tag{2.2}$$

La valeur 14 a été identifiée à l'aide de mesures effectuées sur l'installation réelle.

Le volume de liquide dans l'échangeur d'eau sanitaire a été découpé en 11 couches  $(e, j)$  conduisant aux équations (2.3).

$$\begin{aligned}
 M_{e,j}C_{pf}\frac{dT_{e,j}}{dt} &= K_{s,e}(T_{s,j} - T_{e,j}) \\
 &\quad + (1 - \xi_{s,j})K_{e,a}(T_{amb,in} - T_{e,j}) \\
 &\quad + \dot{m}_L C_{pf}(T_{e,j+1} - T_{e,j}) \\
 j &= \{1, \dots, 11\} \\
 T_{e,12} &= T_{in}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Dans l'ordre, les termes à droite du signe égal représente l'énergie transférée entre le liquide dans l'échangeur d'eau sanitaire et le liquide dans la cuve d'Arpège, les pertes dans le milieu ambiant et la variation d'énergie due au débit de soutirage  $\dot{m}_L$ .

Le circuit solaire est composée de plusieurs parties : le collecteur solaire, l'échangeur circuit solaire et les conduites entre cet échangeur et le collecteur. Le volume de liquide dans le collecteur solaire a été découpé en trois couches  $(c, l)$  conduisant aux équations différentielles (2.4).

$$\begin{aligned}
 A_{c,l}C_{col}\frac{dT_{c,l}}{dt} &= c_0 A I_T \\
 &\quad - c_1 A (T_{c,l} - T_{amb,ex}) \\
 &\quad + \dot{m}_C C_{pc}(T_{c,l-1} - T_{c,l}) \\
 l &= \{1, 2, 3\}, T_{c,-1} = T_{g,5}
 \end{aligned} \tag{2.4}$$

Le premier terme de droite représente la puissance solaire captée par le collecteur, le deuxième terme représente les pertes thermiques et enfin le dernier décrit la puissance échangée entre les différentes couches du collecteur à cause du débit  $\dot{m}_C$ .

Le volume de liquide dans l'échangeur du circuit solaire a été découpé en 5 couches  $(f, k)$  conduisant aux équations différentielles (2.5).

$$\begin{aligned}
 M_{f,k}C_{pc}\frac{dT_{f,k}}{dt} &= K_{s,f}(T_{s,k+8} - T_{f,k}) \\
 &\quad + \dot{m}_C C_{pc}(T_{f,k-1} - T_{f,k}) \\
 k &= \{1, \dots, 5\}, T_{f,-1} = T_{g,10}
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Le premier terme à droite représente la puissance échangée avec le liquide dans la cuve et le second la puissance échangée à cause du débit dans le circuit solaire  $\dot{m}_C$ .

Le volume de liquide dans les conduites entre l'échangeur, le circuit solaire et le collecteur a été découpé en 10 couches ( $g, n$ ) conduisant aux équations différentielles (2.6).

$$M_{g,n}C_{pc}\frac{dT_{g,n}}{dt} = K_{g,a}(T_{amb,n} - T_{g,n}) + \dot{m}_C C_{pc}(T_{test,n} - T_{g,n}) \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} n &= \{1, \dots, 10\} \\ T_{test,n} &= T_{g,n-1} \text{ si } n \in \{2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10\} \\ T_{test,n} &= T_{f,5} \text{ si } n = 1 \\ T_{test,n} &= T_{c,3} \text{ si } n = 6 \\ T_{amb,n} &= T_{amb,ex} \text{ si } n \in \{4, \dots, 7\} \\ T_{amb,n} &= T_{amb,in} \text{ si } n \in \{1, 2, 3, 8, 9, 10\} \end{aligned}$$

Le premier terme à droite représente les pertes dans le milieu ambiant et le deuxième la puissance échangée à cause du débit  $\dot{m}_C$ .

Concernant le circuit de chauffage, deux éléments le constituent. Le premier est le convecteur qui permet de chauffer le bâtiment et le second est constitué des conduites entre ce même convecteur et la cuve du système Arpège.

Le convecteur est constitué d'un seul noeud ( $v$ ) dont le comportement est régi par l'équation (2.7).

$$C_v \frac{dT_v}{dt} = K_{v,b}(T_b - T_v) + \dot{m}_H C_{pf}(T_{h,3} - T_v) \quad (2.7)$$

Le premier terme à droite représente la puissance échangée entre le seul noeud du convecteur et l'air à l'intérieur du bâtiment et le deuxième la puissance échangée à cause du débit de chauffage  $\dot{m}_H$ .

6 couches ( $h, m$ ) ont été utilisées pour modéliser l'évolution thermique du liquide à l'intérieur des conduites, autant d'équations différentielles (2.8) en ont découlé.

$$\begin{aligned} M_{h,m}C_{pf}\frac{dT_{h,m}}{dt} &= K_{h,a}(T_{amb,in} - T_{h,m}) \\ &+ \xi_{c,m,1}\dot{m}_H C_{pf}(T_{test,m} - T_{h,m}) \\ &+ \xi_{c,m,2}(1 - \alpha)\dot{m}_H C_{pf}(T_{test,m} - T_{h,m}) \\ &+ \xi_{c,m,3}(\alpha\dot{m}_H C_{pf}(T_{h,5} - T_{h,2}) + (1 - \alpha)\dot{m}_H C_{pf}(T_{h,1} - T_{h,2})) \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} m &= \{1, \dots, 6\} \\ T_{test,m} &= T_v \text{ si } m = 4 \\ T_{test,m} &= T_{s,5} \text{ si } m = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_{test,m} &= T_{h,m-1} \text{ si } m \in \{3, 5, 6\} \\
\xi_{c,m,1} &= 1 \text{ if } m \in \{3, 4, 5\} \text{ sinon } \xi_{c,m,1} = 0 \\
\xi_{c,m,2} &= 1 \text{ if } m \in \{1, 6\} \text{ sinon } \xi_{c,m,2} = 0 \\
\xi_{c,m,3} &= 1 \text{ if } m = 2 \text{ sinon } \xi_{c,m,3} = 0
\end{aligned}$$

Le premier terme à droite représente les pertes dans le milieu ambiant et le deuxième la variation d'énergie provoquée par le débit dans la boucle de chauffage  $\dot{m}_H$ .

Le nombre de couches total est donc de 49. Les 49 températures correspondantes forment le vecteur d'état du système. Dans tout ce qui suit, on regroupera ces 49 températures dans un même vecteur appelé  $x_a$ .

Les paramètres constants de ce modèle sont répertoriés à l'annexe A. Ils correspondent souvent à des valeurs physiques bien connues (géométrie du système, grandeurs physiques universelles, etc.), néanmoins certains d'entre-eux ont du être identifiés sur la base de mesures expérimentales effectuées sur l'installation pilote en fonctionnement au laboratoire d'énergétique solaire de l'école d'ingénieurs du canton de Vaud. Ce travail d'identification a été réalisé dans le cadre d'un travail de diplôme à l'EPFL. Les détails ne sont pas rappelés ici et peuvent être trouvés dans [6].

## 2.2 Régulation actuelle

Pour rappel, le but de ce projet est l'élaboration et l'implantation d'une stratégie de commande avancée pour le système solaire combiné Arpège. Le but de la présente section est de présenter la commande actuelle.

Les grandeurs manipulées sont au nombre de quatre :

$\alpha$	degré d'ouverture de la vanne troies voies
$\dot{m}_C$	débit dans le circuit capteur
$\dot{m}_H$	débit dans la boucle de chauffage
$\sum \dot{Q}_i$	puissance dissipée par le brûleur à gaz dans la cuve

En réalité, le débit dans la boucle de chauffage  $\dot{m}_H$  ne peut prendre que deux valeurs, 0 ou la valeur maximale que la pompe autorise  $\dot{m}_{H,max}$ . Dans notre cas précis  $\dot{m}_{H,max}$  vaut approximativement 1000 l/h. En effet, la pompe utilisée pour mettre l'eau en circulation dans cette boucle est de type tout ou rien, elle est soit enclenchée soit déclenchée. Il en est de même du brûleur à gaz et pour cette raison la puissance dissipée par ce dernier est soit nulle soit égale à approximativement 25 kW.

En revanche, le débit dans le circuit capteur peut prendre toutes les valeurs comprises entre zéro et la valeur maximale qu'autorise la pompe. Cette valeur est appelée  $\dot{m}_{C,max}$  et vaut approximativement 360 l/h. Il est de même de l'ouverture de la vanne troies qui peut varier entre 0 et 100 %.

Différents capteurs de température sont utilisés par la régulation actuelle pour manipuler ces quatre grandeurs. Leur emplacement peut être vu à la figure 2.3. Dans la cuve,

on distingue trois capteurs, un en haut de cuve, un en milieu de cuve et un en bas de cuve. Ils correspondent respectivement aux couches  $(s, 2)$ ,  $(s, 5)$  et  $(s, 12)$ . Ils seront nommés de la façon suivante dans ce qui suit :

$T_{h,s}$	température mesurée en haut de cuve
$T_{m,s}$	température mesurée en milieu de cuve
$T_{b,s}$	température mesurée en bas de cuve

Sont également mesurées la température à l'entrée et à la sortie du ventilateur-convecteur. On rappelle que le système permet l'existence d'une deuxième boucle de chauffage mais que le travail s'est porté sur une seule. Ces deux grandeurs mesurées sont appelées :

$T_{in,h}$	température mesurée à l'entrée du ventilateur-convecteur
$T_{out,h}$	température mesurée à la sortie du ventilateur-convecteur

La température ambiante extérieure est également mesurée, cette mesure sera appelée  $T_{amb,ex,m}$ .

Une sonde d'ambiance peut également être éventuellement présente à l'intérieur du bâtiment à chauffer. Elle sera appelée  $T_{build,m}$ .

La température à la sortie des collecteurs solaires est également mesurée, elle est appelée  $T_{out,c}$ .

Les capteurs mentionnés précédemment sont les seuls utilisés par la régulation actuelle pour commander les quatre grandeurs manipulées.

### 2.2.1 Débit dans la boucle collecteur

Dans tout ce qui suit, on supposera que la période d'échantillonnage, c'est-à-dire la période à laquelle les mesures sont effectuées est égale à 5 s. La vraie valeur n'est pas connue mais est certainement très proche de celle-ci.

La pompe peut se mettre en marche en cas de surchauffe solaire, typiquement quand la température mesurée à la sortie des collecteurs solaires  $T_{out,c}$  est supérieure à 90°C. Dans ce cas précis, la pompe tourne à sa vitesse maximale ce qui engendre un débit approximativement égal à 360 l/h. Elle s'arrête quand  $T_{out,c}$  redescend en dessous de 70°C.

Il est à noter qu'une loi a été établie de façon expérimentale sur l'installation pilote pour déterminer la relation entre la vitesse de la pompe de circulation et le débit résultant. Si on appelle  $v_{sol}$  la vitesse de la pompe de circulation en pourcentage de sa valeur maximale, la loi établie est la suivante :

$$\dot{m}_C = (0.35v_{sol}^2 + 0.6988v_{sol} - 0.045) \dot{m}_{C,max} \quad (2.9)$$

$$\dot{m}_{C,max} = 360.0l/h \quad (2.10)$$

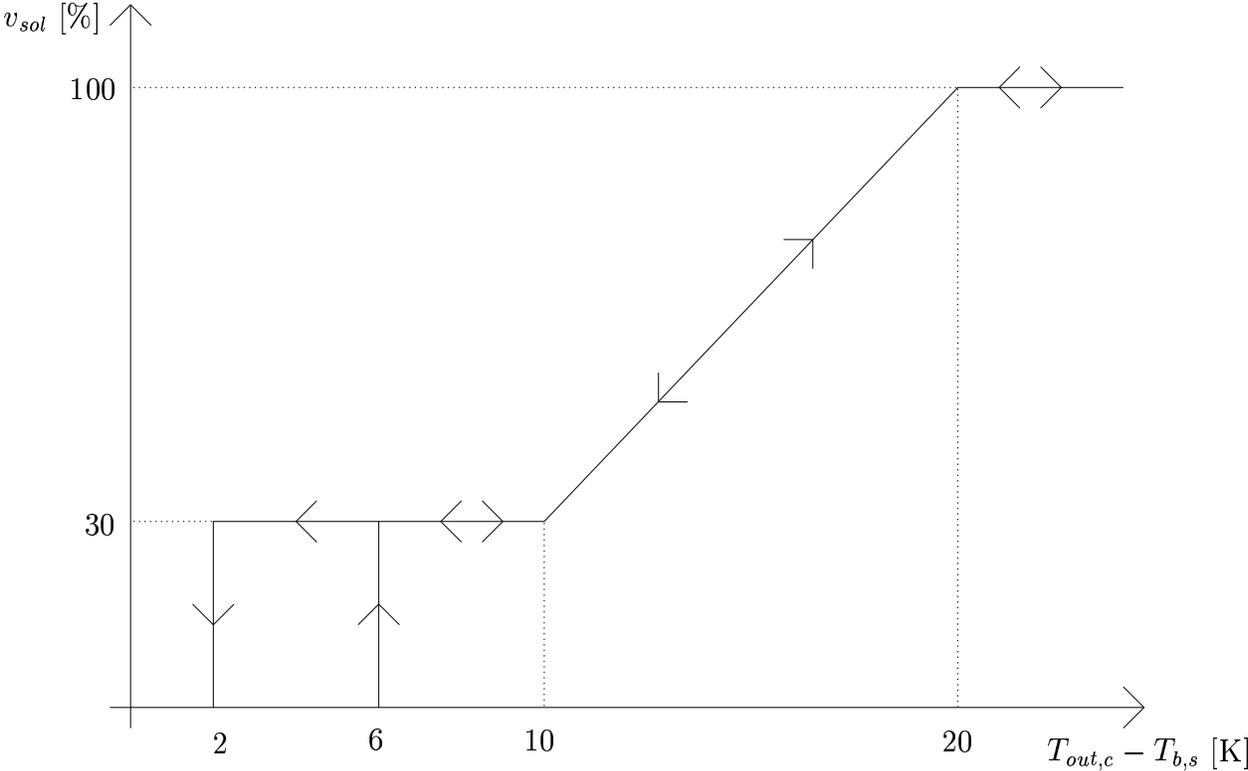


FIG. 2.4 – Débit dans le circuit collecteur.

En fonctionnement normal, c'est-à-dire quand il n'y a pas surchauffe, la vitesse de la pompe de circulation  $v_{sol}$  est donnée par la figure 2.4.

$v_{sol}$  va donc dépendre de la différence entre la température à la sortie du collecteur et la température dans le bas de la cuve. Une hystérésis est utilisée pour les basses valeurs de cette différence afin d'éviter de trop nombreux enclenchements et déclenchements de la pompe. Les valeurs qui apparaissent sur cette figure sont celles d'usine mais elles peuvent facilement être changées.

Intuitivement, cette stratégie semble être beaucoup plus judicieuse qu'un débit constant dans la boucle collecteur. En effet, des travaux antérieurs sur les chauffe-eau solaires [8, 7] ont montrés une très forte corrélation entre le débit optimal dans cette boucle et l'ensoleillement. Or, comme un capteur d'ensoleillement n'est pas toujours disponible, il est fortement conseillé de faire varier le débit dans la boucle collecteur au moins en fonction de la température à la sortie des capteurs. Ces mêmes travaux ont souligné le fait que les gains possibles en appliquant une stratégie de commande optimale pour ce débit sont minimes.

### 2.2.2 Débit dans le circuit de chauffage et vanne trois voies

La pompe du circuit de chauffage est enclenchée quand il y a une demande en chauffage. Le débit dans la boucle de chauffage est alors de 1000 l/h. La vanne trois voies sert à moduler la puissance dissipée dans le bâtiment en fonction de cette même demande en chauffage.

Cette demande en chauffage va être caractérisée par une température de consigne à l'entrée du ventilateur-convecteur. Cette température de consigne sera calculée par la régulation. Elle est notée  $T_{in,h,des}$ . Toute l'intelligence de la régulation réside dans la façon dont cette consigne est calculée. Pour des raisons de confidentialité, la méthode utilisée ne peut être donnée dans les moindres détails. Elle est décrite succinctement dans ce qui suit.

La mesure de la température ambiante externe  $T_{amb,ex,m}$  ainsi que la moyenne de cette mesure sur les 21 dernières heures de la journée sont utilisées. Cette température moyenne est appelée  $T_{amb,ex,av,21}$ . L'inertie du bâtiment est grossièrement prise en compte à l'aide d'une variable  $K_{iner}$  qui peut prendre trois valeurs, 1, 2 ou 3. La valeur 1 correspond à un bâtiment avec une faible inertie et la valeur 3 correspond à un bâtiment avec une forte inertie. Si une sonde d'ambiance est présente, la température mesurée par cette sonde  $T_{build,m}$  est également utilisée. L'influence de cette sonde est pondérée par un facteur que l'on appellera  $\beta$ . D'autres paramètres interviennent dans le calcul de  $T_{in,h,des}$  mais ils ne sont pas donnés ici. Ainsi, une fonction  $F$  permet de calculer cette grandeur, on a donc :

$$T_{in,h,des} = F(T_{amb,ex,m}, T_{amb,ex,av,21}, K_{iner}, T_{build,m}, \beta, \dots) \quad (2.11)$$

Cette stratégie permet donc de prendre en compte de façon grossière le niveau d'énergie dans le bâtiment et calcule une courbe de chauffe en fonction de la température ambiante

extérieure et de la moyenne de la température ambiante extérieure des 21 dernières heures. Cette courbe de chauffe peut être influencée par une éventuelle mesure de la température dans la bâtiment. En regardant de plus près les équations, on s'aperçoit assez rapidement que l'influence de la sonde d'ambiance peut être largement prépondérante si  $\beta$  est choisi très grand et on se retrouve quasiment avec une unique rétroaction sur la température dans le bâtiment.

Une fois calculée  $T_{in,h,des}$ , cette valeur est utilisée pour décider d'enclencher la pompe du circuit de chauffage ou non et également pour commander la vanne trois voies. La pompe passe de la position éteinte à la position enclenchée lorsque  $T_{in,h,des} > T_{amb,ex,m} + 3.0$  et inversement elle est déclenchée lorsque  $T_{in,h,des} < T_{amb,ex,m} + 1.0$ .

L'ouverture de la vanne trois voies n'est pas directement commandable. En réalité, on peut commander à la vanne de s'ouvrir, de se fermer ou de garder son ouverture courante. Cette vanne est utilisée pour faire en sorte que la température mesurée à l'entrée du ventilo-convecteur  $T_{in,h}$  est proche de celle calculée  $T_{in,h,des}$ . Un relais à double hystérésis est utilisé pour commander cette vanne. Ce dernier est décrit à la figure 2.5.

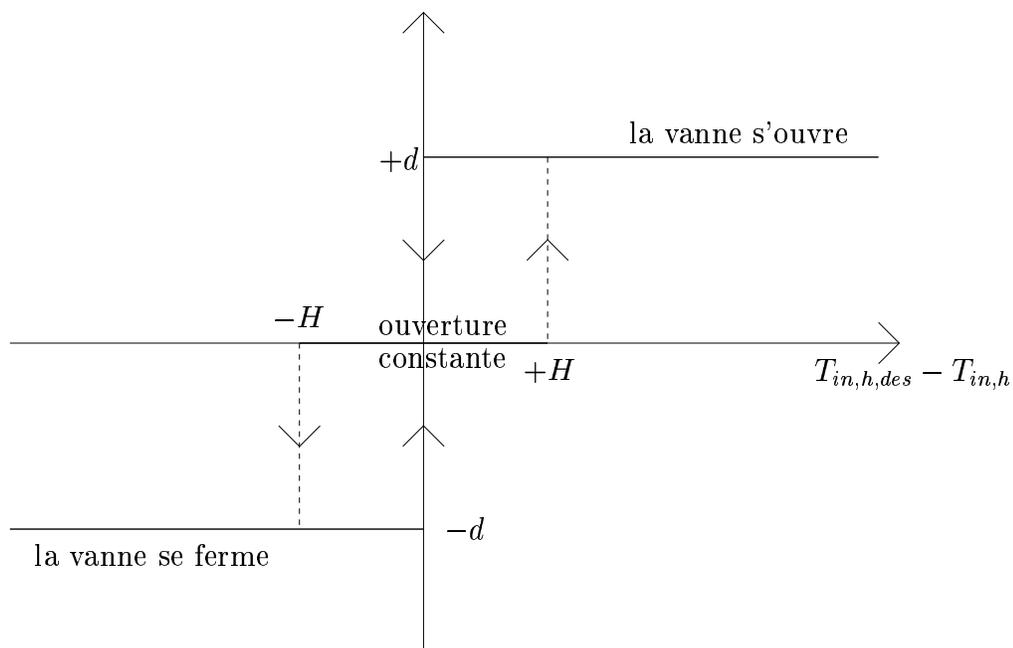


FIG. 2.5 – Débit dans le circuit collecteur.

$H$  a été choisi égal à  $1^{\circ}\text{C}$ . Une ouverture de la vanne permet d'augmenter  $T_{in,h}$  puisque la part de liquide qui vient de la cuve grandit. Cette vanne n'est pas infiniment rapide, il

s'en suit que la différence  $T_{in,h,des} - T_{in,h}$  oscille très souvent plutôt que de rester proche de zéro et ce même lorsque  $T_{in,h,des}$  varie peu.

### 2.2.3 Enclenchement du brûleur à gaz

Le brûleur à gaz peut être enclenché pour deux raisons complètement indépendantes. L'une d'elle correspond à une demande en eau sanitaire et l'autre à une demande en chauffage. Dans les deux cas, les stratégies employées sont très simples.

Pour subvenir aux besoins en eau chaude sanitaire, la mesure  $T_{h,s}$  de la température en haut de cuve est utilisée et comparée à une température désirée de l'eau chaude sanitaire appelée  $T_{h,s,set}$ . Dans notre cas, cette dernière est choisie égale à 60.0°C. Ainsi, le brûleur à gaz est enclenché quand  $T_{h,s} < 60.0 - 3.0$  et déclenché quand  $T_{h,s} > 60.0 + 3.0$ . L'hystérésis introduite permet d'éviter de nombreux cycles d'enclenchements/déclenchements du brûleur. Il est à noter que le brûleur à gaz n'est pas enclenché quand la température en bas de cuve  $T_{l,s}$  est supérieure à 52.0°C.

De la même manière, la température mesurée en milieu de cuve  $T_{m,s}$  est comparée à la consigne calculée pour la température à l'entrée du ventilo-convecteur  $T_{in,h,des}$ . Le brûleur s'enclenche dès que  $T_{in,h,des} > T_{m,s}$  et se déclenche quand  $T_{in,h,des} + 11.0 < T_{m,s}$ .

### 2.2.4 Limites de la régulation actuelle

La régulation actuelle présente quelques caractéristiques intéressantes. Comme déjà mentionné, la stratégie de commande pour le débit dans la boucle collecteur est "suffisante" puisque très proche des conclusions données dans [8]. Avant de parler de la gestion de la boucle de chauffage, regardons de plus près ce qui peut être amélioré au niveau de l'enclenchement du brûleur pour des besoins en eau chaude sanitaire. La stratégie actuelle enclenche le brûleur à gaz quand la température en haut de cuve descend en dessous d'une valeur de consigne. Ainsi, la température en haut de cuve est toujours supérieure ou égale à cette valeur de consigne. Le problème vient du fait que lorsque le brûleur est enclenché, pas moins de 480 l d'eau environ sont chauffés. Il est cependant évident que l'énergie contenue dans ces 480 l ne sera pas utilisée dans une période courte qui suit l'enclenchement du brûleur. Ceci pourra avoir pour conséquence de réduire de façon significative l'énergie solaire transférée. En effet, si un ensoleillement conséquent suit cet enclenchement du brûleur, la haute température dans le haut de la cuve retardera le transfert vers le haut de la cuve de l'énergie transférée par l'échangeur du circuit solaire. On voit donc bien ici qu'une simple prévision court terme de l'apport solaire permettrait de réduire le nombre d'enclenchement du brûleur à gaz. Cette prévision de l'apport solaire peut également être avantageusement couplée à une prévision du comportement utilisateur en termes de besoins en eau chaude. Cette première observation met en évidence l'intérêt d'utiliser des prévisions météorologiques et des prévisions du comportement utilisateur.

La gestion de la boucle de chauffage telle qu'elle est réalisée à l'heure actuelle présente également quelques caractéristiques intéressantes. En effet, on voit que le fabricant donne une indication grossière de l'inertie du bâtiment. Cette information, couplée à une historique de la température ambiante des 21 dernières heures, est utilisée pour déterminer de façon approximative l'état énergétique courant du bâtiment. La régulation adapte la courbe de chauffe en fonction de cet état. Il y a donc eu un effort de fait pour prendre en compte l'aspect dynamique du comportement du bâtiment. Une éventuelle sonde d'ambiance peut également être exploitée par la régulation actuelle. Si la confiance en cette dernière est grande, c'est-à-dire si son emplacement dans le bâtiment est idéal, alors la régulation n'effectuera simplement qu'une contre-réaction sur cette mesure en essayant de suivre une température de consigne de 20°C environ. Le gros inconvénient de cette régulation vient du fait qu'une éventuelle connaissance des conditions météorologiques à venir n'est pas prise en compte. En effet, elle se prive de caractéristiques intéressantes telle que l'anticipation des gains passifs. Cette anticipation laisse volontairement la température dans le bâtiment chuter de quelques degrés avant le lever du soleil pour éviter une trop grande surchauffe dans la maison pendant la journée et réduit ainsi la consommation de gaz. On peut imaginer également que le brûleur ne s'enclenche pas quand un apport solaire important va suivre. De la même manière, l'utilisation d'un modèle plus précis du bâtiment en lieu et place d'une représentation approximative de l'inertie par trois valeurs différentes, permettrait d'envisager un stockage de l'énergie solaire dans le bâtiment pendant la journée pour des besoins à venir le soir et la nuit. Ceci serait tout à fait possible dans le cas du chauffage au sol par exemple.

En résumé, la régulation actuelle semble être une bonne régulation par rapport aux autres régulations du marché. Quelques considérations intuitives ont permis de mettre en place des stratégies qui peuvent être proches des résultats que l'on obtiendrait en utilisant la commande optimale, notamment pour la commande du débit dans le circuit collecteur. Néanmoins, de nombreuses améliorations peuvent être apportées en exploitant notamment des prévisions météorologiques et des prévisions du comportement utilisateur. Ces prévisions, couplées à des modèles dynamiques du bâtiment et du système solaire combiné, peuvent être utilisées dans une stratégie de commande optimale de façon à anticiper les gains solaires passifs et même actifs en évitant d'enclencher le brûleur quand cela n'est pas nécessaire. Cette stratégie permettra également le stockage de l'énergie solaire "active" dans ce même bâtiment si son inertie le permet.

# Chapitre 3

## Modélisation du bâtiment

La modélisation du bâtiment est un élément clé dans le bon fonctionnement de la stratégie de commande optimale développée. En effet, les besoins en chauffage représentent la plus grande partie de la totalité de l'énergie consommée, ils sont environ 4 fois plus importants que les besoins en eau chaude sanitaire. Il va donc être crucial de bien estimer ces besoins et cette estimation passe par un bon modèle dynamique du bâtiment.

Le problème majeur inhérent à cette modélisation vient du fait que le bâtiment sera différent pour chaque système solaire combiné installé. Ainsi, s'il est relativement facile de maîtriser le modèle dynamique de la centrale d'énergies Arpège, il est quasiment impossible de le faire pour le modèle du bâtiment. Il est donc absolument nécessaire de mettre en place une stratégie de modélisation automatique du bâtiment. Plusieurs pistes existent pour la réalisation d'un tel objectif.

Dans [2], un modèle neuronal est utilisé pour prédire le comportement thermique du bâtiment sur un horizon de 6 heures. Cette approche n'a pas été retenue pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'horizon de six heures semble un peu court au regard des caractéristiques recherchées (anticipation de gains passifs, stockage du surplus d'énergie solaire "active" dans le bâtiment, etc.). De plus, l'intégration du modèle neuronal avec les algorithmes d'optimisation réalisant le calcul de la solution au problème de commande optimale ne semble pas aisée après une rapide analyse. Enfin, il n'est pas prouvé que le modèle neuronal fonctionne mieux que l'approche retenue dans ce travail.

L'approche retenue dans le cadre de ce projet est la suivante. Un modèle physique très simple du bâtiment a été choisi. Il ne comporte que 2 noeuds et quelques paramètres. Ces paramètres seront identifiés de façon automatique sur la base de mesures effectuées sur l'installation. Ils représentent à la fois les caractéristiques physiques du bâtiment et le comportement utilisateur. Le choix et le nombre de ces paramètres ont été arrêtés sur la base d'observations expérimentales et de critères intuitifs. Cette approche s'est révélée très efficace en simulation et appliquée à un bâtiment réel se trouvant Dombresson (Neuchâtel). Il convient cependant de noter qu'il faut rester très modeste dans les performances demandées à ce type de modèle, en effet, l'estimation de paramètres tels

que le renouvellement d'air ou encore les gains internes est très difficile voire impossible dans certains cas. Le but ici n'est bien entendu pas de donner un modèle de simulation très précis du bâtiment mais de donner un modèle simple représentatif des grandes tendances dans le bâtiment. La stratégie de commande mise en place doit être capable de gérer ces erreurs de modélisation tout comme elle doit être capable de gérer des erreurs dans les prévisions météorologiques ou les prévisions du comportement utilisateur.

Avant d'être confrontée au bâtiment de Dombresson, le modèle simplifié retenu a été comparé à un modèle de référence beaucoup plus complexe. Ce modèle est présenté à la section 3.1. La structure simplifiée retenue est quant à elle présentée à la section 3.2. La procédure d'identification automatique des paramètres est présentée à la section 3.3. La section 3.4 présente l'étude de sensibilité qui définit l'influence de chacun des paramètres du modèle simplifié sur chacun des noeuds de ce même modèle. Cette étude est nécessaire pour choisir parmi les 7 paramètres présents dans ce même modèle simplifié quels sont ceux qui seront identifiés de façon automatique. Le nombre de ces paramètres identifiés pourra varier en fonction de l'évolution des conditions de fonctionnement. Cette étude est nécessaire, en effet, trop de paramètres à identifier pour une excitation insuffisante peut entraîner des problèmes numériques importants et inversement trop peu de paramètres identifiés conduit à un nombre insuffisant de degrés de liberté pour décrire les phénomènes qui influencent le comportement du bâtiment. Enfin, la section 3.5 présente les résultats de l'approche développée appliquée en premier lieu au modèle de référence puis au bâtiment de Dombresson.

### 3.1 Modèle de référence

Dans la première phase de ce projet, un modèle très complexe d'un bâtiment fictif a été réalisé en collaboration avec l'entreprise Estia SA <sup>1</sup>. Les caractéristiques du bâtiment standard No2 60 kWh/m<sup>2</sup>/an défini dans le cadre de la tâche 26 de l'AIE ont été retenues. Le principe adopté pour cette modélisation du bâtiment est le même que celui utilisé pour la modélisation du système combiné Arpège. En effet, tous les murs ont été découpés dans le sens de l'épaisseur, idem pour les fenêtres. Les spécifications données par la tâche AIE concernant la composition de chaque couche sont très précises, ce qui a permis sans difficulté de trouver dans des catalogues les caractéristiques thermiques de ces derniers. Les équations différentielles pour chacune de ces couches décrivent un simple bilan de puissance.

De la même manière, le nombre de personnes dans le bâtiment, les gains internes de base et les taux d'occupation sont spécifiés par cette même tâche.

Un seul noeud décrit le comportement thermique de l'air de la maison qui n'est autre que la température  $T_b$  qui apparaît dans l'équation (2.7).

---

<sup>1</sup>Manuel Bauer, PSE / EPFL, CH-1015 Ecublens

Ainsi, il est évident que les deux modèles sont extrêmement liés. D'un côté  $T_b$  est calculé par le modèle du bâtiment et de l'autre la puissance dissipée par le convecteur qui dépend de la température aller de chauffage est nécessaire au modèle du bâtiment pour le calcul de ce même  $T_b$ .

Les équations de ce modèle sont classiques et ne sont pas données ici. Le nombre de paramètres qui composent ce modèle est supérieur à 100. Il est donc évidemment impensable d'identifier de façon automatique plus de 100 paramètres sans capteur additionnel et sans une excitation plus riche que celle qui correspond au fonctionnement normal de l'installation.

Ce modèle a donc servi de modèle de référence, c'est-à-dire que dans un premier temps le comportement de la structure simplifiée retenue et décrite dans la prochaine section a été comparé au comportement de ce modèle de référence. Il s'agissait d'une étape préalable avant la confrontation de cette structure simplifiée à des données réelles, dans notre cas des données provenant d'un bâtiment réel à Dombresson (Neuchâtel).

## 3.2 Structure du modèle retenu

La structure retenue est donc une version ultra-simplifiée de la structure présentée à la section précédente. Pour résumer, tous les noeuds correspondant aux quatre murs, au toit, au sol et aux fenêtres ont été regroupés en un seul et même noeud. Un deuxième noeud représente toujours le volume intérieur du bâtiment. Cette découpe peut être observée à la figure 3.1.

L'important est justement de modéliser ce qui se passe dans ce deuxième noeud. Intuitivement, on observe que les gains à l'intérieur du bâtiment sont influencés par l'ensoleillement et la température ambiante, soit de manière instantanée à cause du renouvellement d'air et des fenêtres essentiellement soit décalés dans le temps à cause principalement de l'inertie des murs. Deux noeuds suffisent donc à décrire ces deux phénomènes et les paramètres à identifier représentent l'inertie de ce mur "équivalent", l'inertie du volume intérieur, les différents coefficients qui traduisent l'influence de la température extérieure et de l'ensoleillement sur ces deux noeuds et le coefficient d'échange de chaleur entre ce mur "équivalent" et l'air intérieur.

De façon plus mathématique, cette structure simplifiée comprend seulement 2 noeuds et 7 paramètres à identifier.

L'équation régissant le comportement du mur équivalent est donné par (3.1).

$$\theta_5 \frac{\delta T_{m,eq}}{\delta t} = \theta_1 (T_{amb,ex} - T_b) + \theta_2 (T_b - T_{m,eq}) + \theta_3 I_{T,H} \quad (3.1)$$

L'équation régissant le comportement de la température du milieu ambiant est donné par (3.2)

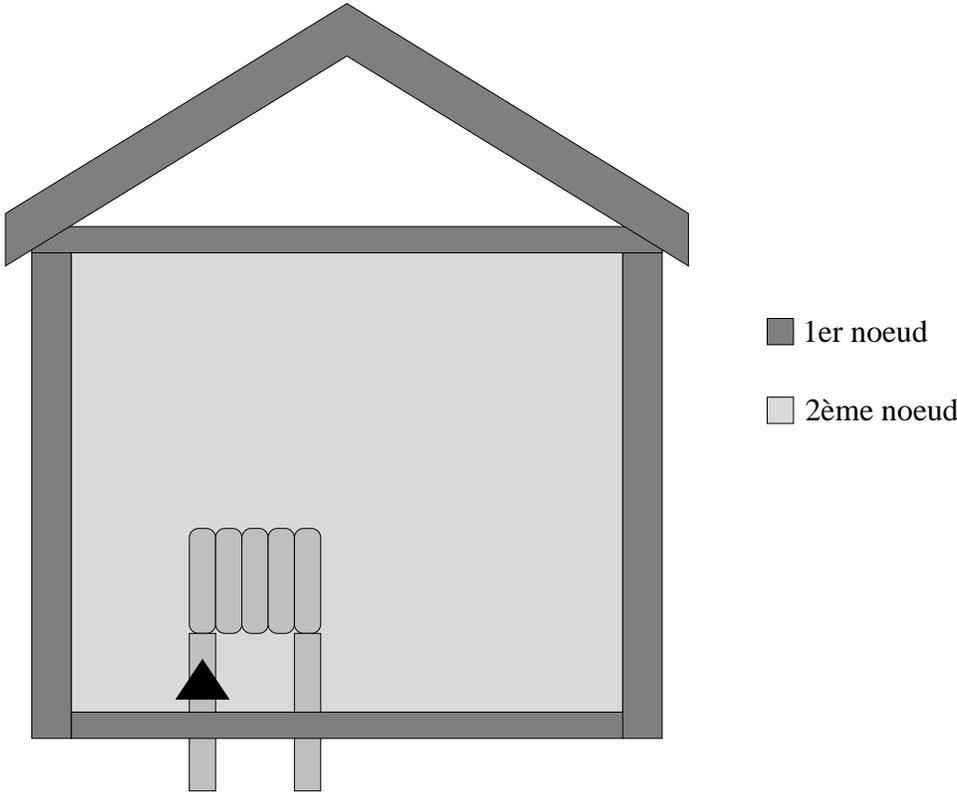


FIG. 3.1 – Modélisation du bâtiment.

$$\theta_6 \frac{\delta T_b}{\delta t} = P_{dissip} + \theta_2(T_{m,eq} - T_b) + \theta_7(T_{amb,ex} - T_b) + \theta_4 I_{T,H} \quad (3.2)$$

$T_{m,eq}$  est donc la température de mur équivalent et  $T_b$  comme déjà indiqué précédemment représente la température dans l'air ambiant. Cette température  $T_b$  est donc le lien avec le modèle du système solaire combiné.  $I_{T,H}$  représente l'ensoleillement horizontal global à ne pas confondre avec  $I_T$  qui correspond à l'ensoleillement global sur le plan des capteurs (45°C) et qui intervient dans le modèle du système solaire combiné.

La description des paramètres  $\theta_i$  qui forment le vecteur  $\theta$  est évidente à la vue des deux équations qui précèdent. Leur signification est donnée dans ce qui suit et rappelée à l'annexe A.

$\theta_1$	influence de la température extérieur sur le mur équivalent	[kW/K]
$\theta_2$	coefficient d'échange de chaleur entre le mur équivalent et l'air ambiant	[kW/K]
$\theta_3$	influence de l'ensoleillement sur le mur équivalent	[m <sup>2</sup> ]
$\theta_4$	influence de l'ensoleillement sur l'air ambiant	[m <sup>2</sup> ]
$\theta_5$	inertie du mur équivalent	[kJ/K]
$\theta_6$	inertie de l'air ambiant	[kJ/K]
$\theta_7$	influence de la température extérieur sur l'air ambiant	[kW/K]

Ce modèle peut sembler très simple. En effet, par exemple, il n'essaie pas d'identifier explicitement le comportement des usagers. Aucun terme correspondant aux gains internes n'apparaît explicitement dans les équations. De la même manière, le paramètre à identifier correspondant aux renouvellement d'air est constant. Les raisons pour ceci sont au nombre de deux. Premièrement, du fait du comportement fortement aléatoire des usagers, en particulier pour une villa individuelle, il est très difficile voire impossible d'identifier des comportements précis. Ainsi, il est par exemple très dangereux de vouloir identifier un renouvellement d'air qui varie dans le temps, horaire typiquement. En effet, l'ouverture des fenêtres et des portes influencent grandement ce dernier et il est très difficile d'identifier ce type de comportement. La deuxième raison est que les paramètres à identifier sont au nombre de 7. Malgré la simplicité du modèle, ces paramètres ont une signification physique (influence de la température extérieure, de l'ensoleillement etc.) donc si le renouvellement d'air ou les gains internes sont corrélés par exemple à l'ensoleillement extérieur ou à l'air ambiant les paramètres identifiés vont naturellement rendre compte de ces derniers. Plus généralement, avec sept paramètres, il semble qu'il y ait assez de degrés de liberté pour rendre compte fidèlement de ce qui se passe dans un bâtiment.

Une autre raison serait que les attentes de ce modèle sont modestes. Comme déjà mentionné, il ne s'agit nullement d'un modèle précis de simulation mais d'un modèle utiliser par la régulation pour augmenter les performances énergétiques et de confort du

système complet. Par conséquent, il doit être capable de reproduire les tendances principales. Une stratégie d'implantation robuste doit ensuite prévenir les éventuelles erreurs entre le modèle et la réalité.

### 3.3 Identification automatique des paramètres

La structure retenue pour modéliser le bâtiment a donc été présentée à la section qui précède. Les paramètres qui composent cette structure ont également été mentionnés, ils sont groupés ensemble dans le vecteur  $\theta$ .

Pour chaque système vendu, le bâtiment chauffé sera différent. Il est donc nécessaire d'être capable en ligne de calculer la valeur du vecteur  $\theta$  qui permettra de décrire le comportement de ce bâtiment.

La stratégie adoptée pour calculer  $\theta$  est très simple. Elle consiste à mémoriser le comportement du bâtiment sur une certaine période, dans notre cas précis 5 jours, puis comparer la sortie du modèle aux mesures réelles.  $\theta$  est ensuite modifié de façon itérative jusqu'à ce que la sortie du modèle corresponde à la réalité.

Généralement, seule la température dans le bâtiment est mesurée grâce à une sonde d'ambiance. Sur cette période de 5 jours, les données météorologiques, c'est-à-dire la température extérieure et l'ensoleillement global doivent également avoir été mesurés. Si tel n'est pas le cas les prévisions météorologiques peuvent être utilisées. L'utilisation des prévisions météorologiques plutôt que les données météorologiques réelles peut être une bonne chose. En effet, s'il s'avère que les prévisions météorologiques diffèrent souvent de la même façon de la réalité, en d'autres termes s'il est possible d'identifier une tendance pour caractériser les différences entre prévisions et données réelles, alors le fait d'utiliser les prévisions pour le calcul de  $\theta$  va permettre d'intégrer directement ces erreurs dans le modèle du bâtiment. Au contraire, si les différences entre prévisions météorologiques et données réelles présentent un caractère tout à fait aléatoire, il convient si possible d'utiliser les données réelles pour le calcul de  $\theta$ .

La puissance dissipée dans le bâtiment au cours de ces cinq derniers jours doit également être enregistrée.

Ainsi, en observant les équations du modèle simplifié du bâtiment (3.1) et (3.2), on s'aperçoit que les conditions précédentes stipulent que toutes les entrées exogènes au système doivent avoir été enregistrées au cours des 5 derniers jours. Il est ainsi possible de simuler le comportement du bâtiment au cours de cette même période et ainsi comparer la température  $T_b$  mesurée notée  $T_{b,mes}$  avec celle calculée par le modèle pour une valeur donnée de  $\theta$  notée  $\hat{T}_b(\theta)$ .

La stratégie consiste donc simplement à résoudre le problème suivant :

$$\min_{\theta} \int_{\text{5 derniers jours}} (T_{b,mes} - \hat{T}_b(\theta))^2 dt \quad (3.3)$$

Ce problème d'optimisation pourra être résolu par exemple chaque jour à minuit quand les ressources informatiques peuvent facilement être uniquement dédiées à cette tâche.

L'algorithme d'optimisation utilisé pour résoudre ce problèmes est similaire à celui utilisé dans la stratégie de commande avancée décrite au prochain chapitre. Elle n'est donc pas donnée ici.

### 3.4 Etude de sensibilité

Une étude de sensibilité est effectuée pour déterminer l'influence des paramètres qui composent le vecteur  $\theta$  sur les deux noeuds du modèle simplifié retenu pour décrire le comportement du bâtiment. Cette étude permet de déterminer quels sont les paramètres qui ont une influence significative. Ces derniers sont identifiés par la procédure décrite au paragraphe précédent, ceux qui restent ne sont pas identifiés et une valeur figée physiquement raisonnable leur est assignée.

Dans le cas précis de la modélisation d'un bâtiment, il se trouve que l'influence des paramètres va dépendre grandement de l'évolution des conditions météorologiques. En effet, dans les équations (3.1) et (3.2), on voit très bien qu'en été  $P_{dissip}$  sera nul et donc il ne sera pas nécessaire d'identifier  $\theta_2$ ,  $\theta_4$ ,  $\theta_6$  et  $\theta_7$  en même temps. La valeur de l'un d'entre eux devra être fixée. De la même manière, lorsque l'ensoleillement sera très faible, les paramètres  $\theta_3$  et  $\theta_4$  auront une influence quasi-nulle et il sera donc dangereux de vouloir les identifier.

Le but de l'étude de sensibilité décrite à cette section est de donner quelques règles simples pour définir quels sont les paramètres à identifier en fonction des conditions météorologiques

Mathématiquement, les fonctions de sensibilité sont définies de la façon suivante

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial x_{b,i}}{\partial \theta_j} \quad (3.4)$$

avec  $x_{b,0} = T_{m,eq}$  et  $x_{b,1} = T_b$ .

En dérivant les équations (3.1) et (3.2) par rapport aux  $\theta_j$ , on obtient :

$$\frac{\partial}{\partial \theta_j} \left( \frac{dx_{b,i}}{dt} \right) = \frac{\partial f_i}{\partial \theta_j} + \sum_k \frac{\partial f_i}{\partial x_{b,k}} \frac{\partial x_{b,k}}{\partial \theta_j} = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial x_{b,i}}{\partial \theta_j} \right) = \frac{d}{dt} \sigma_{ij} \quad (3.5)$$

Sous certaines hypothèses facilement vérifiées, on a :

$$\frac{\partial}{\partial \theta_j} \left( \frac{dx_{b,i}}{dt} \right) = \frac{\partial}{\partial dt} \left( \frac{dx_{b,i}}{\theta_j} \right)$$

On obtient donc les équations différentielles suivantes qui déterminent l'évolution temporelle des fonctions de sensibilité :

$$\dot{\sigma}_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial \theta_j} + \sum_k \frac{\partial f_i}{\partial x_{b,k}} \sigma_{kj} = \frac{\partial f_i}{\partial \theta_j} + \frac{\partial f_i}{\partial x_0} \sigma_{0j} + \frac{\partial f_i}{\partial x_{b,1}} \sigma_{1j} \quad (3.6)$$

Dans notre cas précis, ces équations sont :

$$\begin{aligned}
\dot{\sigma}_{01} &= \frac{1}{\theta_5} [T_{amb,ex} - x_{b,0} + (-\theta_1 - \theta_2)\sigma_{01} + \theta_2\sigma_{11}] \\
\dot{\sigma}_{02} &= \frac{1}{\theta_5} [x_{b,1} - x_{b,0} + (-\theta_1 - \theta_2)\sigma_{02} + \theta_2\sigma_{12}] \\
\dot{\sigma}_{03} &= \frac{1}{\theta_5} [I_{T,H} + (-\theta_1 - \theta_2)\sigma_{03} + \theta_2\sigma_{13}] \\
\dot{\sigma}_{04} &= \frac{1}{\theta_5} [(-\theta_1 - \theta_2)\sigma_{04} + \theta_2\sigma_{14}] \\
\dot{\sigma}_{05} &= -\frac{1}{\theta_5^2} [\theta_1(T_{amb,ex} - x_{b,0}) + \theta_2(x_{b,1} - x_{b,0}) + \theta_3 I_{T,H}] \\
&\quad + \frac{1}{\theta_5} [(-\theta_1 - \theta_2)\sigma_{05} + \theta_2\sigma_{15}] \\
\dot{\sigma}_{06} &= \frac{1}{\theta_5} [(-\theta_1 - \theta_2)\sigma_{06} + \theta_2\sigma_{16}] \\
\dot{\sigma}_{07} &= \frac{1}{\theta_5} [(-\theta_1 - \theta_2)\sigma_{07} + \theta_2\sigma_{17}] \\
\dot{\sigma}_{11} &= \frac{1}{\theta_6} [\theta_2\sigma_{01} + (-\theta_2 - \theta_7)\sigma_{11}] \\
\dot{\sigma}_{12} &= \frac{1}{\theta_6} [x_{b,0} - x_{b,1} + \theta_2\sigma_{02} + (-\theta_2 - \theta_7)\sigma_{12}] \\
\dot{\sigma}_{13} &= \frac{1}{\theta_6} [\theta_2\sigma_{03} + (-\theta_2 - \theta_7)\sigma_{13}] \\
\dot{\sigma}_{14} &= \frac{1}{\theta_6} [I_{T,H} + \theta_2\sigma_{04} + (-\theta_2 - \theta_7)\sigma_{14}] \\
\dot{\sigma}_{15} &= \frac{1}{\theta_6} [\theta_2\sigma_{05} + (-\theta_2 - \theta_7)\sigma_{15}] \\
\dot{\sigma}_{16} &= -\frac{1}{\theta_6^2} [P_{dissip} + \theta_2(x_{b,0} - x_{b,1}) + \theta_7(T_{amb,ex} - x_{b,1})] \\
&\quad + \theta_4 I_{T,H} + \frac{1}{\theta_6} [\theta_2\sigma_{06} + (-\theta_2 - \theta_7)\sigma_{16}] \\
\dot{\sigma}_{17} &= \frac{1}{\theta_6} [T_{amb,ex} - x_{b,1} + \theta_2\sigma_{07} + (-\theta_2 - \theta_7)\sigma_{17}]
\end{aligned}$$

Ces équations sont résolues numériquement en même temps que (3.1) et (3.2). Les fonctions de sensibilité ont également été normées par la valeur nominale initiale du paramètre correspondant de façon à faciliter les comparaisons.

Les résultats (Fig.3.2 et Fig.3.3) montrent que les fonctions de sensibilités sont approximativement du même ordre de grandeur pour la période considérée. Ces résultats

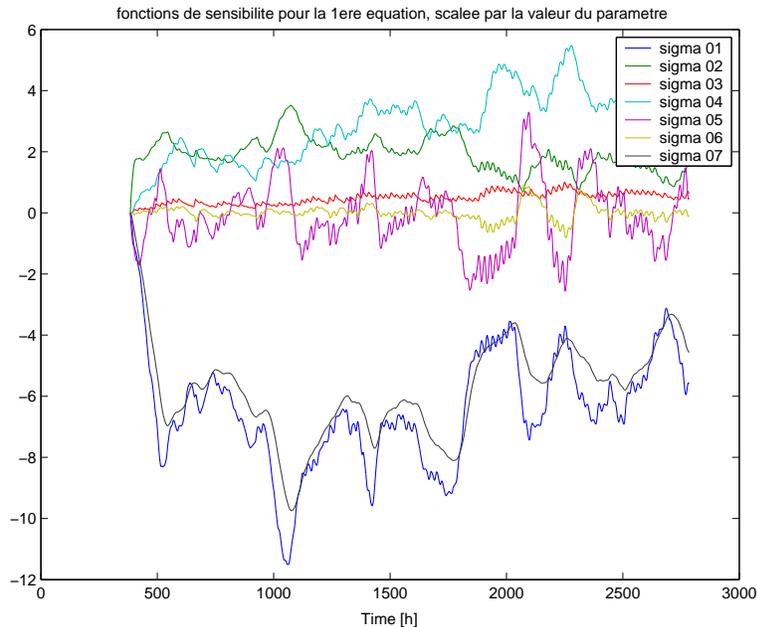


FIG. 3.2 – Fonctions de sensibilité normées, calculées sur 100 jours, données générées par le modèle complet de bâtiment.

sont obtenus avec une valeur pour  $\theta$  et des données qui correspondent au bâtiment de référence décrit dans 3.1.

Le paramètre  $\theta_3$ , influence de l'ensoleillement sur le mur équivalent, semble avoir une importance moindre en raison très certainement d'un ensoleillement faible sur la période considérée.

Pour valider ces suppressions de paramètres, des essais doivent être effectués sur la base d'autres mesures, sur un bâtiment dont les paramètres ont potentiellement un ordre de grandeur différent. Celles-ci proviennent du bâtiment de Dombresson dont on ne connaît a priori rien. Les équations de sensibilité ont été résolues en utilisant les données de ce bâtiment pour des journées typiques. Les différents types de journée feront ressortir l'importance de certains paramètres vis à vis de certaines influences.

Il a été distingué 4 types de journée :

1. temps chaud et ensoleillé, 1er juillet 2000, Fig.3.4.
2. temps chaud et pas ensoleillé, 10 juillet 2000, Fig.3.5.
3. temps froid et ensoleillé, 17 janvier 2000, Fig.3.6.
4. temps froid et pas ensoleillé, 11 janvier 2000, Fig.3.7.

Les résultats (Fig.3.4, Fig.3.5, Fig.3.6 et Fig.3.7) portent moins à penser que l'on pourrait légitimer la suppression de certains paramètres à identifier plutôt que d'autres. Nous

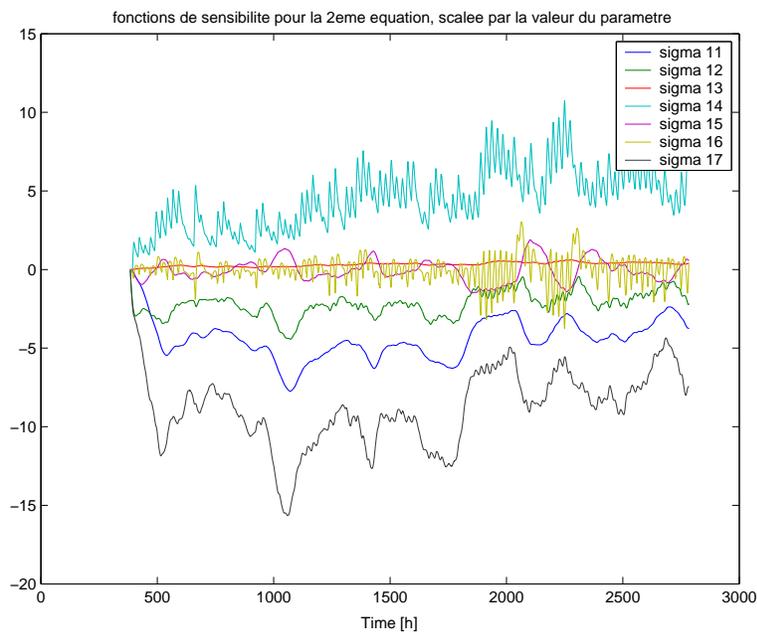


FIG. 3.3 – Fonctions de sensibilité normées, calculées sur 100 jours, données générées par le modèle complet de bâtiment.

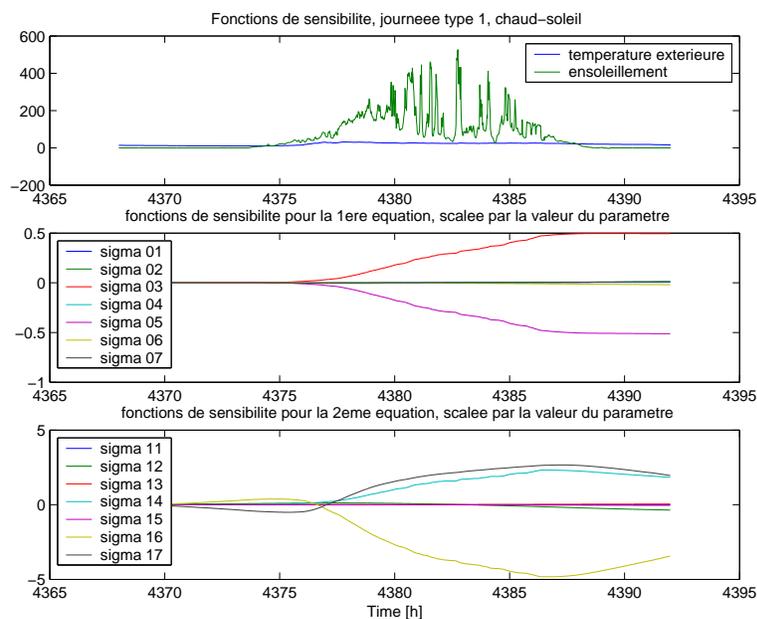


FIG. 3.4 – Fonctions de sensibilité calculée sur les données de Dombresson et normées, jour chaud et ensoleillé.

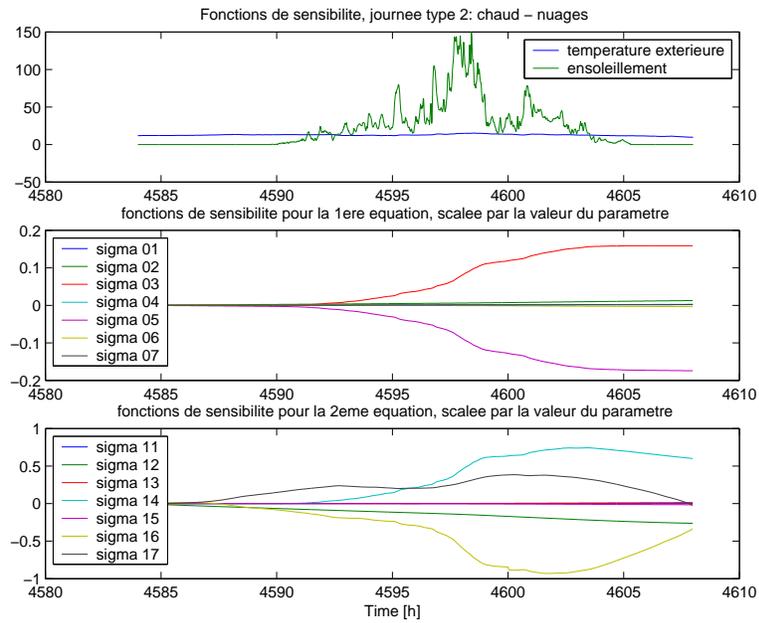


FIG. 3.5 – Fonctions de sensibilité calculée sur les données de Dombresson et normées, jour chaud et pas ensoleillé.

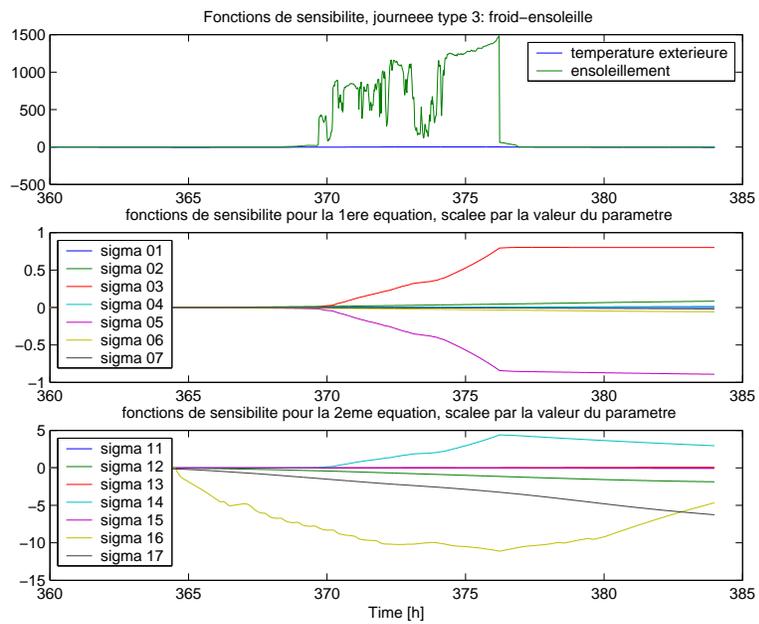


FIG. 3.6 – Fonctions de sensibilité calculée sur les données de Dombresson et normées, jour froid et ensoleillé.

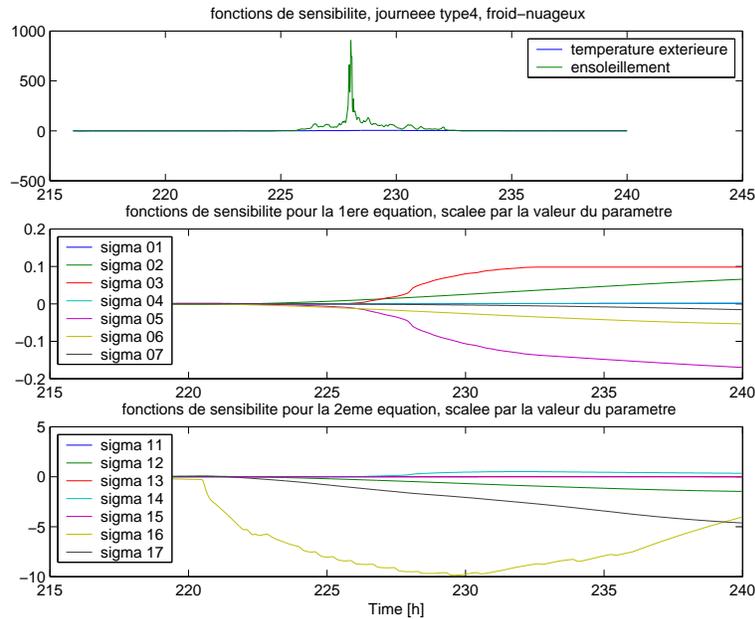


FIG. 3.7 – Fonctions de sensibilité calculée sur les données de Dombresson et normées, jour froid et pas ensoleillé.

constatons que ce bâtiment est plus sensible au soleil (plusieurs explications possibles : plus de fenêtres, peinture foncée, isolation moins importante, etc.) et de ce fait les fonctions de sensibilité associées aux paramètres  $\theta_3$  et  $\theta_4$  sont plus importantes que dans le cas du modèle de référence (figures 3.2 et 3.3).

Ainsi, on peut noter que les paramètres qui ont une influence significative sur le comportement du bâtiment ne sont pas les mêmes et dépendent justement du type de ce bâtiment.

En pratique, deux solutions peuvent être adoptées, soit les fonctions de sensibilité sont calculées en ligne et la régulation est capable toute seule de décider quels sont les paramètres qui doivent être identifiés ou alors hors ligne, avant la mise en service, le fabricant est capable, en fonction de quelques informations sur le bâtiment, de dire quels sont les paramètres à identifier et quels sont ceux à fixer.

### 3.5 Résultats

L'approche précédemment présentée a été appliquée dans deux cas de figure différents. Dans un premier temps, le modèle de référence présenté à la section 3.1 a été considéré comme le bâtiment dont il faut identifier le comportement. Les résultats sont présentés à la sous section 3.5.1. Dans un deuxième temps, le comportement d'un bâtiment réel a

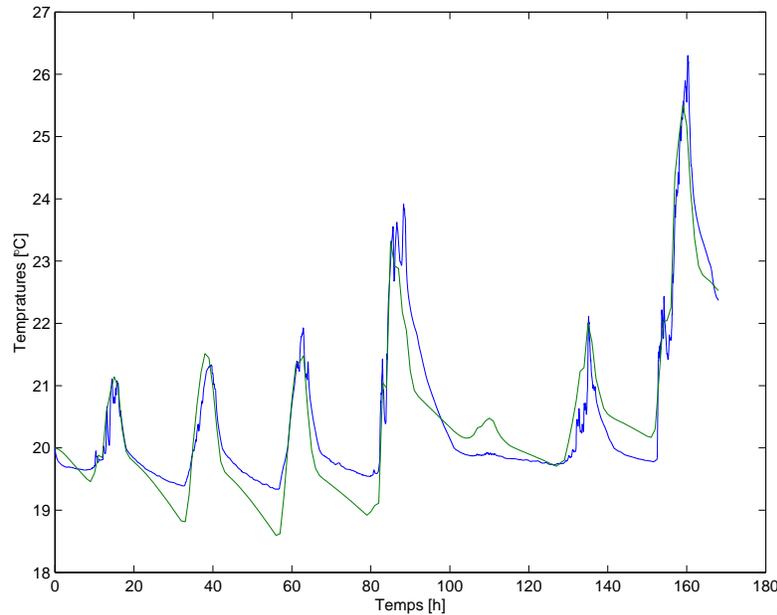


FIG. 3.8 – Modélisation du bâtiment de référence (température mesurée en bleu et calculée avec le modèle en vert)

été identifié avec le même approche. Il s'agit d'une bâtiment situé à Dombresson dans le canton de Neuchâtel en Suisse. Les résultats sont présentés à la sous section 3.5.2.

### 3.5.1 Reproduction du comportement du modèle de référence

En ce qui concerne le modèle de référence, les 7 paramètres ont été identifiés. La comparaison entre la température dans le bâtiment calculée par le modèle de référence et celle dans le bâtiment calculée par le modèle simple identifié est donnée à la figure 3.8.

La période de 5 jours est celle qui a été utilisée pour calculer le vecteur  $\theta$ . On voit donc que le modèle simplifié est capable de reproduire le comportement du modèle de référence.

### 3.5.2 Identification du bâtiment de Dombresson

Dans ce cas précis, les 7 paramètres ont également été identifiés pour la saison d'hiver et seulement 6 pour la saison d'été. La comparaison en hiver sur les 5 jours utilisés pour l'identification est donnée à la figure 3.9. La même comparaison pour 5 jours en mi-saison est donnée à la figure 3.10.

D'une manière générale les résultats sont très satisfaisants. En été les résultats sont

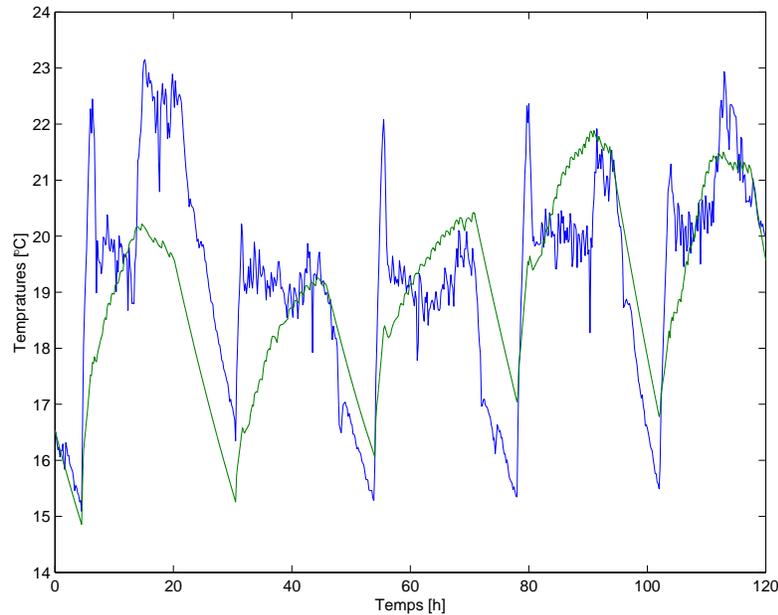


FIG. 3.9 – Modélisation de la villa de Dombresson en hiver (température mesurée en bleu et calculée avec le modèle en vert)

meilleurs. En effet, en observant la courbe 3.9 on s'aperçoit assez facilement qu'un système de chauffage annexe est enclenché presque tous les jours en fin de journée provoquant une montée soudaine de la température dans le bâtiment. Ce comportement n'est pas identifié explicitement du fait de son caractère trop aléatoire. En revanche, les 7 paramètres identifiés sont calculés de telle sorte à miniser la différence entre température mesurée et calculée par le modèle ce qui conduit des erreurs acceptables qui pourront être prises en compte dans la stratégie de commande avancée.

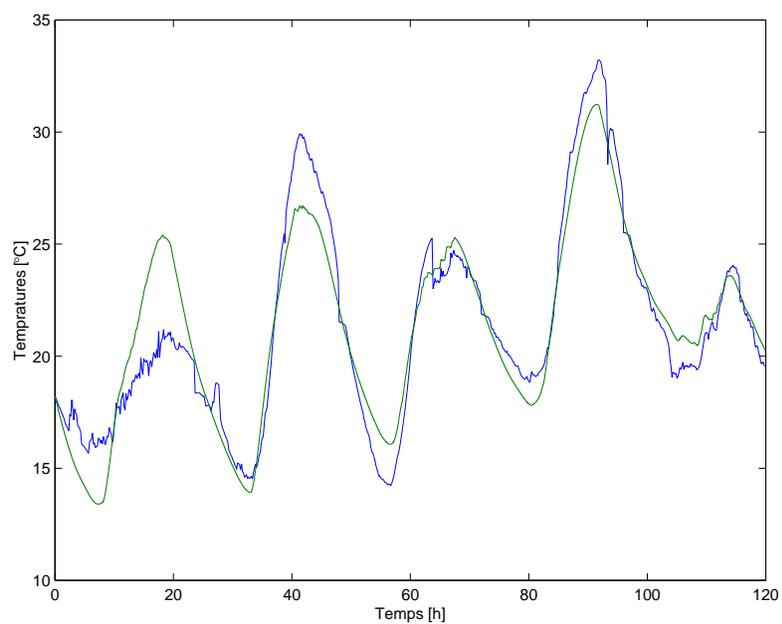


FIG. 3.10 – Modélisation de la villa de Dombresson en mi-saison (température mesurée en bleu et calculée avec le modèle en vert)

# Chapitre 4

## Principe de la commande avancée élaborée

La stratégie de commande avancée utilisée est appelée *commande optimale* dans la communauté du réglage automatique. Cette stratégie est décrite en détails dans [5, 4].

Son application dans le cadre de ce projet est schématisé à la figure 4.1.

Intuitivement, et pour le système qui nous concerne, les modèles dynamiques du système solaire combiné et du bâtiment sont utilisés pour prédire le comportement de l'installation sur un horizon donné. Les entrées externes au système et non manipulables doivent être prédites. Il s'agit ici des données météorologiques et des besoins utilisateurs en termes d'eau chaude et de chauffage. La prochaine section décrit la façon dont ces prévisions sont obtenues. Ainsi, si l'on est capable de prédire le comportement du système, il est possible de calculer à l'avance le profil des entrées manipulées sur ce même horizon de façon à obtenir un comportement "optimal". Ce comportement est optimal dans le sens des performances attendues, dans notre cas, il s'agit de minimiser l'utilisation du brûleur tout en garantissant un haut degré de confort aux utilisateurs. Ce comportement désiré se traduit mathématiquement par le choix d'une fonction de coût. Enfin, une fois les modèles dynamiques, les prévisions, et la fonction de coût à disposition, il convient de résoudre le problème d'optimisation posée. Il s'agit d'une problème d'optimisation dynamique non linéaire très complexe à résoudre. Aucune solution analytique ne peut être trouvée et par conséquent une méthode numérique a du être employée. Pour le système considéré, une seule grandeur est manipulée, il s'agit de la puissance dissipée dans le bâtiment. La stratégie de commande pour le débit dans la boucle collecteur est celle de la régulation standard. En effet, comme déjà mentionné, l'application d'une stratégie de commande optimale pour ce dernier conduit à une amélioration des performances dérisoire au regard des calculs effectués pour l'obtenir. Il est également supposé dans ce projet qu'aucune connaissance du comportement utilisateur en termes de besoin en eau chaude n'est disponible. Ainsi, il n'y a pas anticipation de l'enclenchement du brûleur en cas de besoins en eau chaude à venir. Si des prévisions de ce type étaient disponibles, la stratégie développée

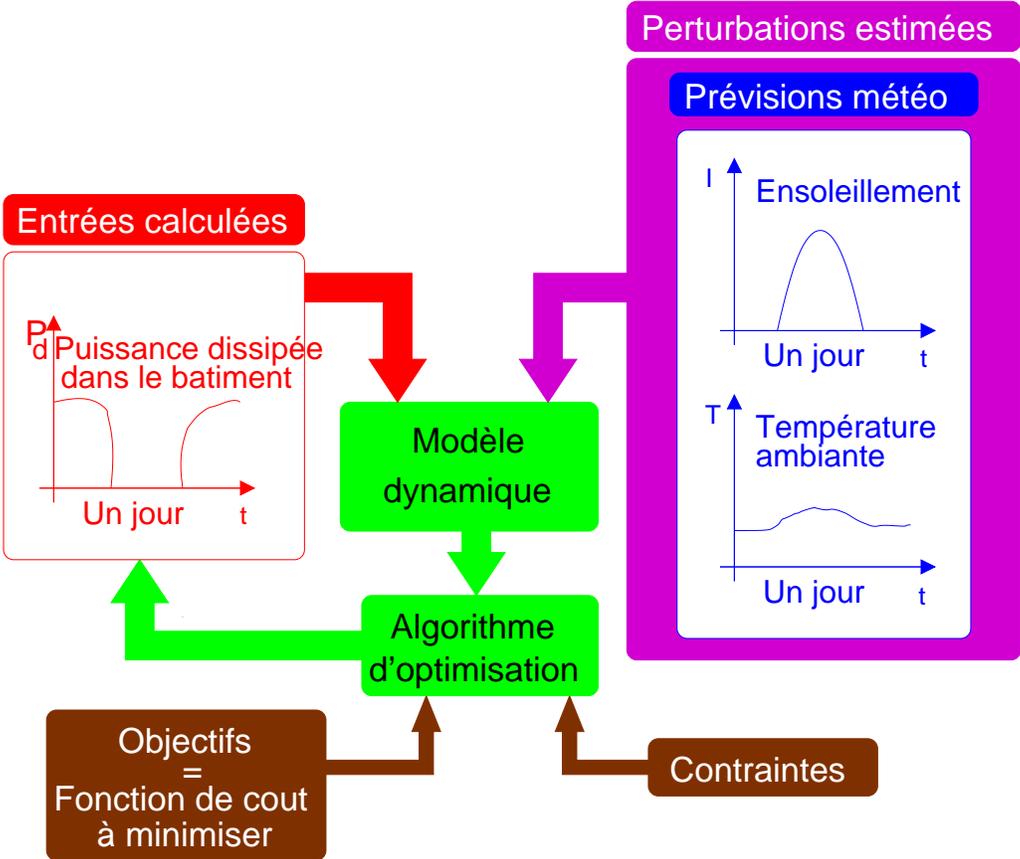


FIG. 4.1 – Schéma de principe de la commande avancée

dans [8] pourrait s'ajouter à celle présentée dans ce rapport et les performances obtenues seraient encore un peu plus améliorées.

Les trois sous sections de ce chapitre décrivent respectivement la façon dont les prévisions sont obtenues, la fonction de coût choisie et la méthode numérique employée.

## 4.1 Prévisions

Comme déjà mentionné, les prévisions météorologiques sont de deux types. Il s'agit soit de prévisions d'ordre météorologique soit de prévisions du comportement utilisateur.

Les prévisions météorologiques proviennent de l'Institut Suisse de Météorologie. Il s'agit de prévisions à deux jours. L'ensoleillement global horizontal ainsi que la température ambiante sont fournies. Il s'agit de données horaires. Ces données sont reçues deux fois par jour, la première fois à cinq heures du matin pour les deux journées à venir à partir de minuit le jour ou le fichier est reçu et la deuxième fois vers dix sept heures pour les deux jours à venir à compter de midi. Ce retard d'environ cinq heures entre le début de la prévision et la date à laquelle le fichier contenant les prévisions est reçu s'explique par le fait qu'il faut un certain temps aux ordinateurs de l'ISM pour effectuer les calculs nécessaires et acheminer les résultats. Un exemple de fichier type reçu de de l'ISM est montré à la figure 4.2.

```

02120200 0 48 1 732 (15f8.2)
T2M 0048 0.10000E+01 -0.27315E+03 12 20 475
4.17 3.55 3.43 3.74 3.63 3.55 2.88 2.13 2.07 3.17 4.51 5.10 4.57 3.95 4.38
4.37 4.02 3.79 3.77 3.70 3.60 3.54 3.61 3.51 3.30 2.83 2.27 2.88 3.27 3.24
3.13 3.10 3.39 4.22 4.96 5.06 4.83 4.80 4.67 4.56 4.06 3.45 3.60 3.69 3.82
3.64 3.46 3.37 2.91
GLOBAL 0048 0.10000E+01 0.00000E+00 12 20
0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.58 27.99 113.71 204.86 236.25 150.61 35.79 67.21
40.32 7.25 0.04 -0.04 0.06 0.13 -0.01 -0.04 -0.04 -0.11 0.25 -0.20 0.27 -0.23 0.18
-0.20 0.33 16.36 76.10 129.60 133.81 122.45 89.85 64.61 48.76 5.40 0.25 -0.15 0.06 -0.11
0.37 -0.11 0.05 -0.26

```

FIG. 4.2 – Exemple de fichier de prévisions météorologiques.

## 4.2 Fonction de coût

La fonction de coût traduit mathématiquement le comportement attendu de l'installation. La stratégie de commande optimale consiste à minimiser cette fonction de coût. Pour le système considéré dans ce travail, on essaie de minimiser la consommation d'énergie fossile, en d'autres termes, l'énergie consommée par le brûleur à gaz, tout en maximisant le confort.

Elle est ainsi donnée par l'équation suivante :

$$J = \int_{\text{Un jour}} (P_b + \alpha(T_{b,set} - T_b)^2) dt \quad (4.1)$$

où  $T_{b,set}$  représente la température de consigne dans le bâtiment et  $P_b$  la puissance dissipée par le brûleur, cette puissance est donnée par :

$$P_{dissip} = \sum_i Q_i \quad (4.2)$$

Le paramètre  $\alpha$  est souvent appelé facteur de pondération. Intuitivement, on voit qu'une valeur élevée pour ce dernier va imposer une température dans le bâtiment très proche de la température de consigne, au contraire une valeur plus faible va autoriser la température dans le bâtiment à varier autour de la température de consigne pour diminuer l'énergie consommée par le brûleur. Il s'agit donc de trouver un bon compromis entre performances énergétiques et confort.

### 4.3 Méthode d'optimisation

La stratégie de commande optimale calcule donc sur une journée la puissance à dissiper dans le bâtiment qui minimise la fonction de coût décrite par l'expression 4.1.

Mathématiquement, il s'agit donc de calculer une fonction du temps sur un horizon de 24 heures, cependant il est évident qu'une fonction continue prend une infinité de valeurs sur une portion finie de l'axe réel. En d'autres termes, présenté de la sorte, le problème à résoudre est de dimension infinie. La première étape de la résolution de ce problème d'optimisation consiste donc à paramétrer la puissance à dissiper de façon à rendre finie la dimension du problème à résoudre.

La paramétrisation choisie pour la puissance à dissiper dans le bâtiment est une paramétrisation continue par morceaux avec une période d'une heure. En d'autres termes, l'algorithme d'optimisation va donc calculer une puissance à dissiper optimale constante sur des intervalles d'une heure. Sur un horizon d'une journée, cela conduit à 24 variables à calculer pour l'algorithme d'optimisation, ces variables sont souvent appelées variables de décision. Elles sont appelées  $d_j$  dans ce qui suit et groupées dans le vecteur  $d$ . La paramétrisation en question est donnée à la figure 4.3.

Les 49 températures qui décrivent le comportement du modèle du système solaire combiné ainsi que les 2 températures qui décrivent le comportement du modèle du bâtiment sont groupées dans un vecteur unique appelé  $x$ . Les équations différentielles pour ces deux modèles sont groupées dans le champ de vecteur  $f$ , on a donc l'équation différentielle vectorielle suivante pour décrire le comportement dynamique du système complet :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), d, w(t)) \quad (4.3)$$

où  $w(t)$  représente le vecteur des perturbations estimées, dans notre cas précis les perturbations météorologiques uniquement puisque la stratégie consistant à anticiper les besoins en eau chaude sanitaire pour maximiser l'énergie solaire transférée n'a pas été implantée.

De la même manière, les perturbations représentant les gains internes dans la maison sont directement pris en compte par la stratégie d'identification automatique des paramètres du modèle du bâtiment.

Ainsi, pour un choix initial  $d_0$  pour  $d$ , l'équation précédente permet de simuler le comportement du système complet sur un horizon choisi, dans notre cas une journée. Elle permet donc également le calcul de la fonction de coût,  $J(d_0)$ . Plus généralement, cette équation permet d'évaluer la fonction de coût  $J(d)$  pour n'importe quel choix de  $d$ . Une procédure itérative permet donc de calculer très facilement  $d^*$  qui minimise  $J(d)$ .

La procédure utilisée dans ce projet est très simple, il s'agit d'une méthode basée sur le calcul du gradient. Pour chaque  $d_i$ , le gradient correspondant  $g_i$  est évalué de la façon suivante :

$$g_i(d^k) = \frac{\delta J}{\delta d_i}(d^k) = \frac{J(d^k + \epsilon e_i) - J(d^k)}{\epsilon} \quad (4.4)$$

où  $e_i$  est  $i$ -ème vecteur de la base orthornormée classique de  $\mathbb{R}^n$  avec  $n = \dim d$ . Cette méthode est appelée méthode des perturbations parce que chaque variable de décision  $d_i$  est perturbée par une constante  $\epsilon$ .  $\epsilon$  doit être choisi petit pour avoir une approximation de la dérivée précise mais s'il est choisi trop petit la différence  $J(d^k + \epsilon e_i) - J(d^k)$  devient plus petite que l'erreur d'intégration numérique globale et donc l'évaluation du gradient est complètement faussée. Il y a donc un bon compromis à trouver pour le choix d' $\epsilon$ . Il n'existe pas de méthode systématique pour le déterminer, il doit être évalué expérimentalement en même temps que les paramètres de l'algorithme d'intégration numérique (erreur absolue, relative, etc.).

L'algorithme va donc calculer  $d^{k+1}$  de la façon suivante :

$$d^{k+1} = d^k - \beta g(d^k) \quad (4.5)$$

où  $g$  est le vecteur groupant les  $n$   $g_i$ .  $\beta$  est calculé par dichotomie à chaque itération.

Pour résumer, à chaque itération, le vecteur  $g$  est calculé pour  $d = d^k$ , ensuite  $d^{k+1}$  est calculé par dichotomie. Quand  $J(d^{k+1}) - J(d^k)$  est plus petit qu'une valeur prédéfinie, l'algorithme s'arrête.

On voit que pour évaluer  $g(d^k)$ , les 51 équations différentielles décrites par l'expression 4.3 doivent être résolues numériquement  $n+1$  fois,  $n$  représentant le nombre de variables de décision. L'algorithme d'intégration numérique utilisé est un algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4-5 avec adaptation du pas, cet algorithme est décrit en détail dans [1].

Le nombre  $n$  de variable de décision a donc une influence significative sur le temps nécessaire pour résoudre ce problème d'optimisation. En revanche, plus  $n$  est grand, plus le paramétrage de l'entrée à calculer sera précis. Il y a donc un compromis à trouver entre le temps de calcul et la précision de la représentation de la grandeur manipulée.

Si le modèle dynamique utilisé pour représenter le comportement du système solaire combiné présente une caractéristique "hybride", c'est-à-dire si les équations différentielles sont discontinues dans le temps (essentiellement dues à la présence d'actuateurs tout

ou rien), les résultats présentés dans [9] peuvent être utilisés pour résoudre le problème d'optimisation en un temps raisonnable.

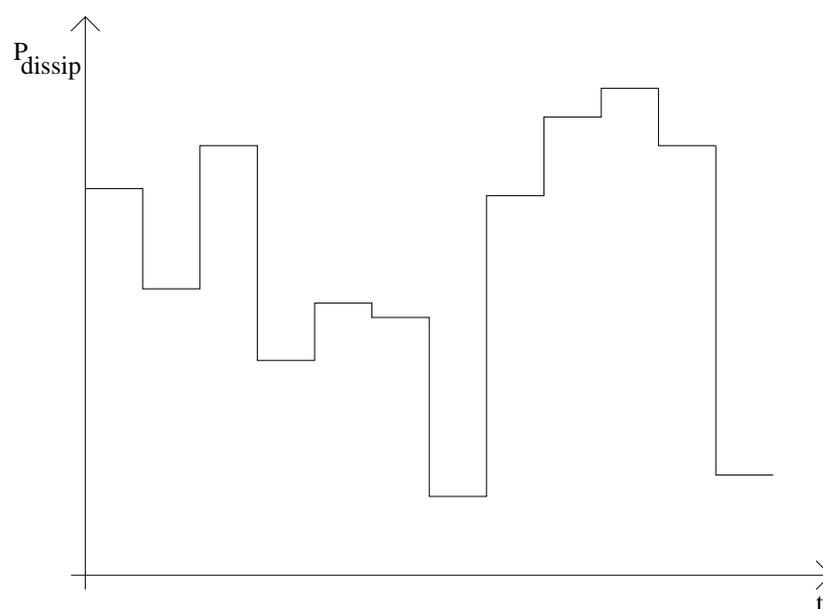


FIG. 4.3 – Paramétrisation choisie pour la puissance à dissiper dans le bâtiment.

# Chapitre 5

## Stratégie d'implantation robuste

La stratégie de commande optimale décrite dans le chapitre qui précède est une stratégie dite *boucle ouverte*. Le problème d'optimisation est résolu à un instant  $t_0$  donné, minuit typiquement, et la puissance optimale à dissiper dans le bâtiment est calculée sur  $[t_0; t_0 + D]$ .  $D$  est l'horizon d'optimisation choisi, soit une journée. Il est important d'avoir à l'esprit que cette puissance optimale est calculée sur la base de prévisions météorologiques et sur la base de modèles dynamiques à la fois de l'installation et du bâtiment. Il est cependant évident que ces modèles ne sont pas parfaits, et que les prévisions météorologiques peuvent être mauvaises. Qu'advient-il dans ces circonstances? Le scénario le plus parlant concerne le cas où les prévisions météorologiques surestiment les conditions réelles. Dans ce cas précis, la puissance à dissiper calculée sur la base de ces mauvaises prévisions sera insuffisante pour assurer un haut degré de confort aux occupants.

### 5.1 Suivi de trajectoires optimales

Il a donc été nécessaire de penser une stratégie d'implantation capable de minimiser l'influence de ces erreurs de modélisation et de ces erreurs de prévisions météorologiques. Comme déjà mentionné, elle est décrite à la figure 5.1. La routine d'optimisation calcule non seulement la puissance optimale à dissiper dans le bâtiment optimale mais également les 51 températures du modèle global correspondantes. Le principe de la stratégie d'implantation robuste consiste à introduire une boucle de rétroaction pour suivre une ou plusieurs de ces 51 températures. Dans ce projet, il a été décidé d'introduire une boucle de rétroaction de type PID sur la température dans le bâtiment.

Si les prévisions météorologiques sont bonnes et les modèles parfaits, la boucle de rétroaction ne corrigera presque pas et la puissance effectivement dissipée dans le bâtiment sera très proche de celle calculée par la routine d'optimisation. Il est à noter que les deux boucles de rétroaction internes servent à contrôler la puissance dissipée dans le bâtiment. En effet, dans la stratégie de commande optimale utilisée dans ce projet, la puissance à

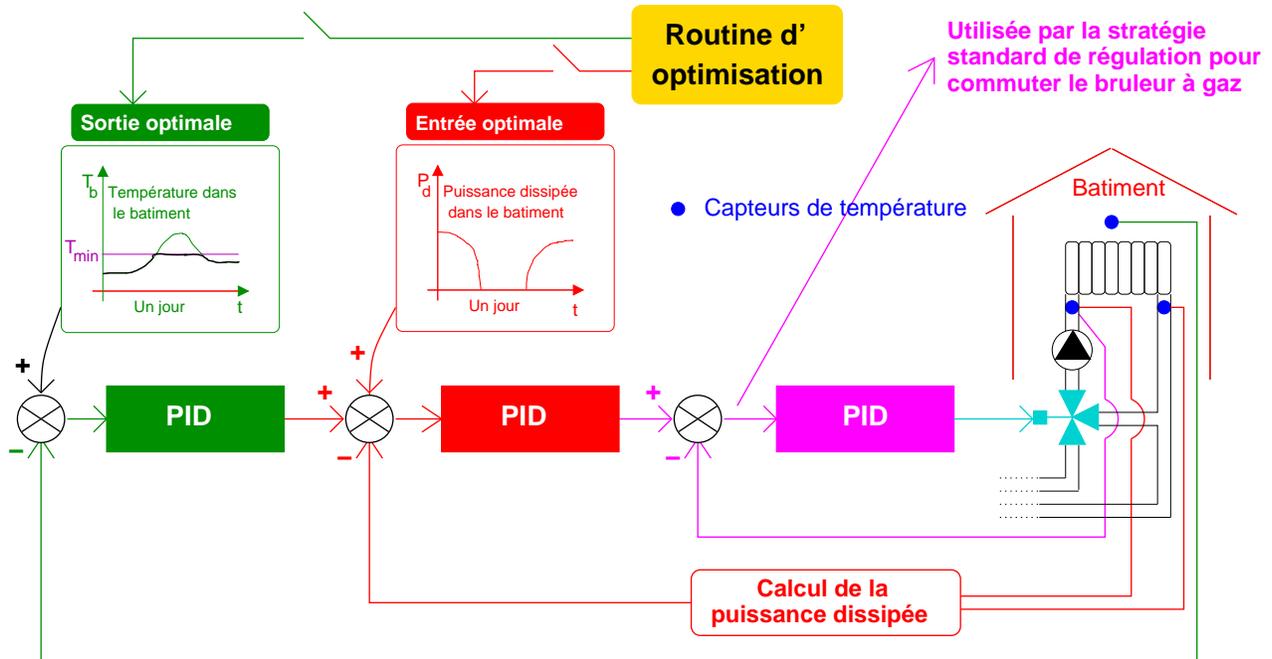


FIG. 5.1 – Stratégie d'implantation robuste.

dissiper dans le bâtiment a été considérée comme variable manipulée. On a pu considérer qu'elle était effectivement manipulée grâce au bon fonctionnement de ces deux boucles internes. Sur la figure 5.1, il peut facilement être vu que la boucle la plus interne réalise une rétroaction sur la température à l'entrée des convecteurs. Cette boucle n'est pas nécessaire pour contrôler la puissance à dissiper, une seule boucle interne serait suffisante. Il s'avère néanmoins que cette variable intermédiaire qui est la température à l'entrée des convecteurs est utilisée pour commander l'enclenchement du brûleur. Il s'avère donc que les trois boucles sont nécessaires.

La stratégie de commande optimale peut ainsi être vue comme un outil permettant de générer des consignes optimales, consignes qui sont suivies par les trois boucles de rétroaction présentées dans ce qui précède. La puissance optimale calculée par la routine intervient comme une commande a priori dans ce schéma. On pourrait s'interroger sur la nécessité de cette dernière. En effet, qu'advierait-il si on utilisait la seule consigne optimale de température dans le bâtiment? On peut deviner des résultats en poursuite inférieurs, en effet le terme intégral du régulateur PID de la boucle externe devra compenser cette absence. Il lui faudra un certain temps pour arriver à la valeur de la commande a priori. Ainsi, la puissance optimale calculée par la routine d'optimisation sert à suivre correctement la température de consigne optimale.

## 5.2 Répétition de l'optimisation

En plus de la boucle de rétroaction additionnelle présentée à la section précédente, le problème d'optimisation est résolu à intervalles réguliers de façon à mettre à jour les profils de puissance optimale et de température optimale dans le bâtiment. En effet, ces profils seront susceptibles d'être changés s'il s'avère que la puissance optimale dissipée dans le bâtiment diffère de façon significative de celle calculée par la routine d'optimisation.

Même si ce n'était pas le cas dans ce projet, on peut également imaginer que les instituts de météorologie seront bientôt capables de fournir des prévisions météorologiques actualisées plusieurs fois dans la journée. Il serait alors très judicieux de résoudre le problème d'optimisation à chaque fois que de nouvelles prévisions sont disponibles. Dans le cadre de ce projet, il a été décidé de résoudre le problème d'optimisation chaque 3 heures.

## 5.3 Mise à jour des prévisions météorologiques à l'aide de mesures

Diverses méthodes ont été testées pour mettre à jour les prévisions météorologiques au cours de la journée à l'aide de l'information fournie par une sonde de température externe et un capteur d'ensoleillement. Aucun résultat probant n'a été obtenu et cette piste a rapidement été abandonnée.

# Chapitre 6

## Implantation

### 6.1 Plateforme informatique

La stratégie de commande optimale, la stratégie d'implantation robuste ainsi que la stratégie d'identification automatique des paramètres du bâtiment ont été codées en langage C sous forme de bibliothèques dynamiques. Elles sont donc facilement portables sur quasiment toutes les plateformes informatiques pour peu que la fréquence du processeur et la mémoire couvrent les besoins des différents algorithmes.

La plateforme retenue dans le cadre de ce projet est la plateforme FieldPoint de National Instruments. Les principales caractéristiques de cette plateforme sont listées dans ce qui suit :

- *Processeur 486, 33 Mhz (FP 2010)*
- *16 Mb RAM*
- *Programmation LabVIEW + DLLs*
- *Pour*
  - *Programmation aisée*
  - *Moyens de communication : TCP/IP, FTP, HTTP, etc.*
  - *Modularité des entrées sorties, conditionnement de signaux tels que sondes résistives de température (PT100, PT1000), thermocouples (J,K, etc.), etc.*
- *Contre*
  - *Prix : CHF- 1800- (module principal et entrées sorties)*
  - *Rapport prix/performances*

Une photo des modules FieldPoint est donnée à la figure 6.1



FIG. 6.1 – Modules FieldPoint.

## 6.2 Commutation entre commande d'origine et stratégie de commande avancée

Le but de l'expérimentation est de comparer les performances de la commande d'origine avec la stratégie de commande optimale développée dans le cadre de ce projet. Une seule installation étant à disposition, il a donc été nécessaire de penser un mécanisme permettant de commuter facilement d'une stratégie de commande à une autre. Un simple interrupteur manuel a été réalisé et permet de connecter en une seule opération toutes les entrées et sorties soit au module FieldPoint soit à la commande d'origine.

Il était également nécessaire de pouvoir simuler les conditions météorologiques, en effet, pour faciliter la comparaison il était indispensable de pouvoir reproduire des conditions d'ensoleillement et de température ambiante identique pour les deux expérimentations, avec la commande d'origine et la stratégie de commande avancée. Pour ce faire, le simulateur de capteurs solaires développé au laboratoire d'énergétique solaire de l'Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud a été utilisé. Ce dernier permet de simuler les capteurs solaires à l'aide de résistances électriques, le principe est simple et représenté à la figure 6.2.

Un modèle des collecteurs solaires est donc utilisé. Ce dernier utilise en entrée des données météorologiques réelles mesurées dans le passé et la température mesurée à l'instant présent à l'entrée d'un ensemble de résistances électriques qui vont reproduire la puissance de chauffe des collecteurs réels. Ce modèle calcule donc une température théorique à la sortie des collecteurs. La puissance d'alimentation des résistances est donc calculée par un régulateur PID de sorte que la température à la sortie des résistances électriques soit aussi proche que possible de la température théorique calculée par le modèle.

La bâtiment est également simulé à l'aide de ventilo-convecteurs. Ces derniers permettent de moduler la puissance dissipée dans les locaux du laboratoire d'énergétique solaire de l'EIVD. Un modèle détaillé d'un bâtiment est là-aussi utilisé. Il permet de calculer la température théorique désirée à la sortie des ventilo-convecteurs. Il utilise en entrée la température mesurée à l'entrée des ventilo-convecteurs et les données météorologiques. Un PID est également utilisé. Ce dispositif est également représenté de façon schématique à la figure 6.2.

Ce dispositif complet permet donc de reproduire le comportement d'un système complet, c'est-à-dire bâtiment et système solaire combiné, pour toutes les périodes pour lesquelles la température ambiante et l'ensoleillement ont été mesurés. Il permet de reproduire des séquences exactement identiques pour les deux stratégie de commande, la stratégie de commande standard et la stratégie de commande avancée décrite dans les précédentes sections de ce rapport.

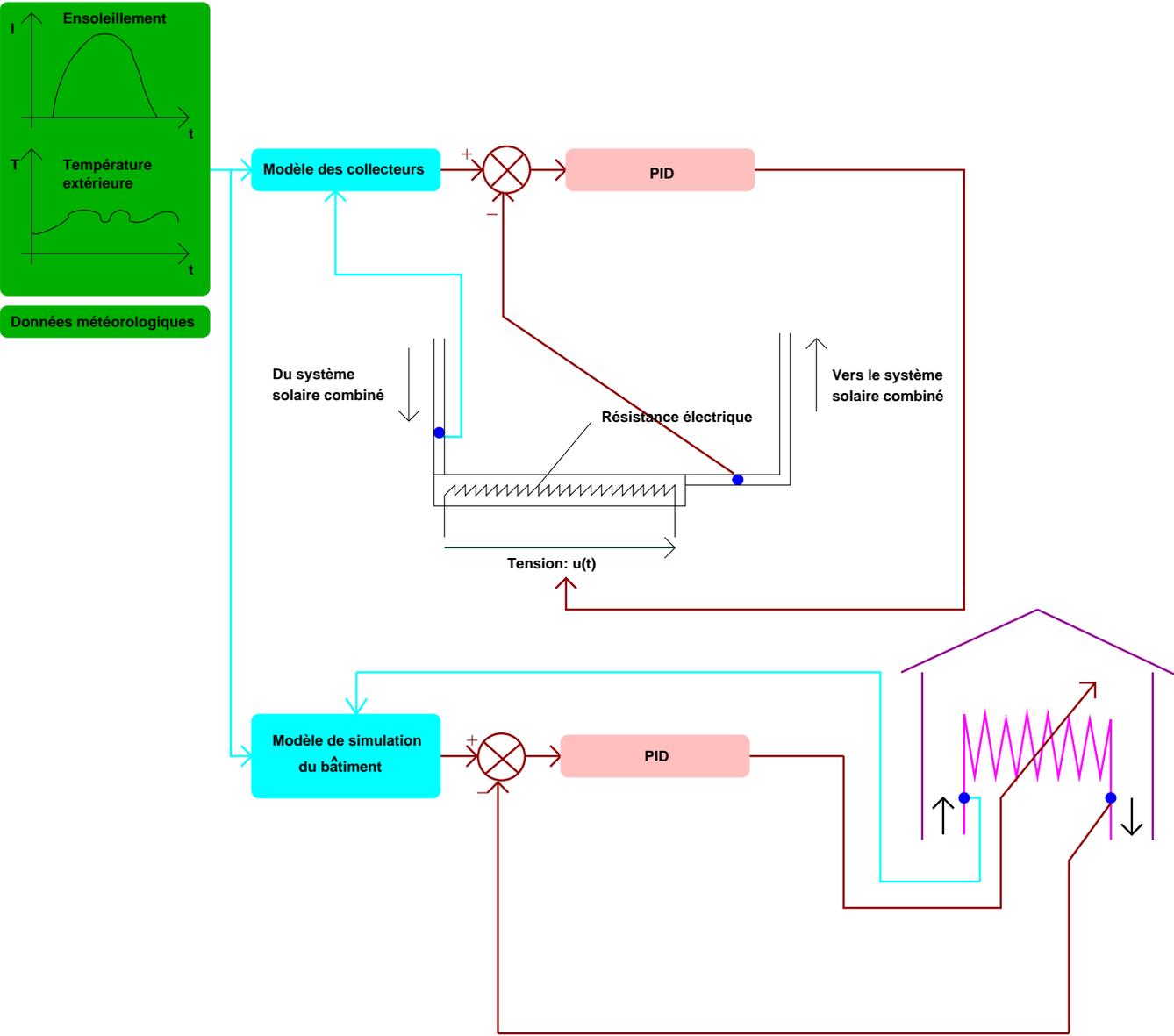


FIG. 6.2 – Simulateur de capteurs solaires et simulateur du bâtiment.

# Chapitre 7

## Résultats expérimentaux

Le présent chapitre présente une synthèse des principaux résultats obtenus. Le temps à disposition n'a pas permis de réaliser des tests sur une période de plusieurs mois comme cela aurait été souhaitable. De plus, l'environnement d'expérimentation présenté au chapitre précédent s'est avéré très fragile. En effet, deux ordinateurs compatibles PC ont été utilisés pour piloter les simulateurs du bâtiment et des collecteurs solaires. Ces ordinateurs se sont avérés peu fiables lorsqu'il s'est agi de réaliser des expériences s'étendant sur plusieurs jours.

Néanmoins, en théorie, ce dispositif permet de réaliser des tests pour toutes les séquences pour lesquelles on possède à la fois les données météorologiques réelles mesurées et les prévisions fournies par l'Institut Suisse de Météorologie. Fort heureusement, le choix était assez vaste et il a ainsi été possible de réaliser quatre tests de six jours consécutifs représentatifs des quatre saisons de l'année. Ces résultats expérimentaux ont confirmé ceux obtenus en simulation. En moyenne, une réduction de 13% de la consommation de gaz a été mesurée. Les courbes présentées aux figures 7.1 et 7.2 présentent des résultats typiques. Il apparaît que l'essentiel des gains est obtenu par anticipation des gains passifs, en effet, les surchauffes observées lors de journées ensoleillées sont nettement moins importantes avec la commande avancée. Lors de journées non ensoleillées (entre la 100-ème et la 120-ème heure sur les courbes), les performances en régulation de la commande avancée sont meilleures, et ce, pour une température de consigne dans le bâtiment de 20°C pour les deux stratégies de commande. Il est difficile de dire si les gains de 13 % mesurés sont dus majoritairement aux meilleures performances en régulation ou à l'anticipation des gains passifs.

En ce qui concerne le confort, il apparaît qu'il est excellent avec la stratégie de commande standard. En effet, la température dans le bâtiment descend approximativement à 19.5°C lorsqu'il y a anticipation des gains passifs. Intuitivement, on peut dire que la stratégie de commande avancée "joue" avec l'inertie du bâtiment pour minimiser l'énergie dissipée dans ce dernier.

Il convient d'être très prudent dans l'interprétation de ces résultats. En effet, il est

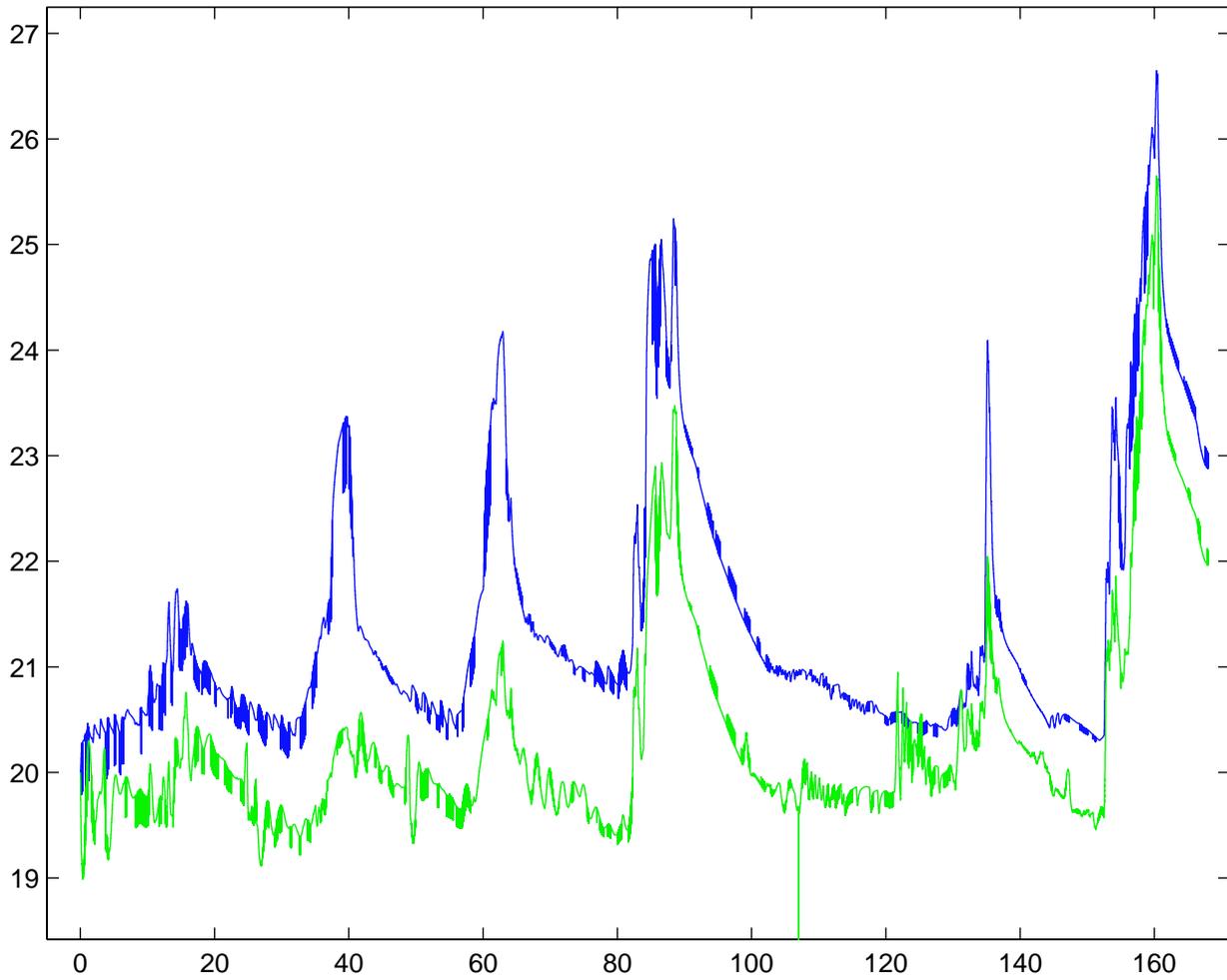


FIG. 7.1 – Comparaison température dans le bâtiment avec commande standard (bleu) / avancée (vert).

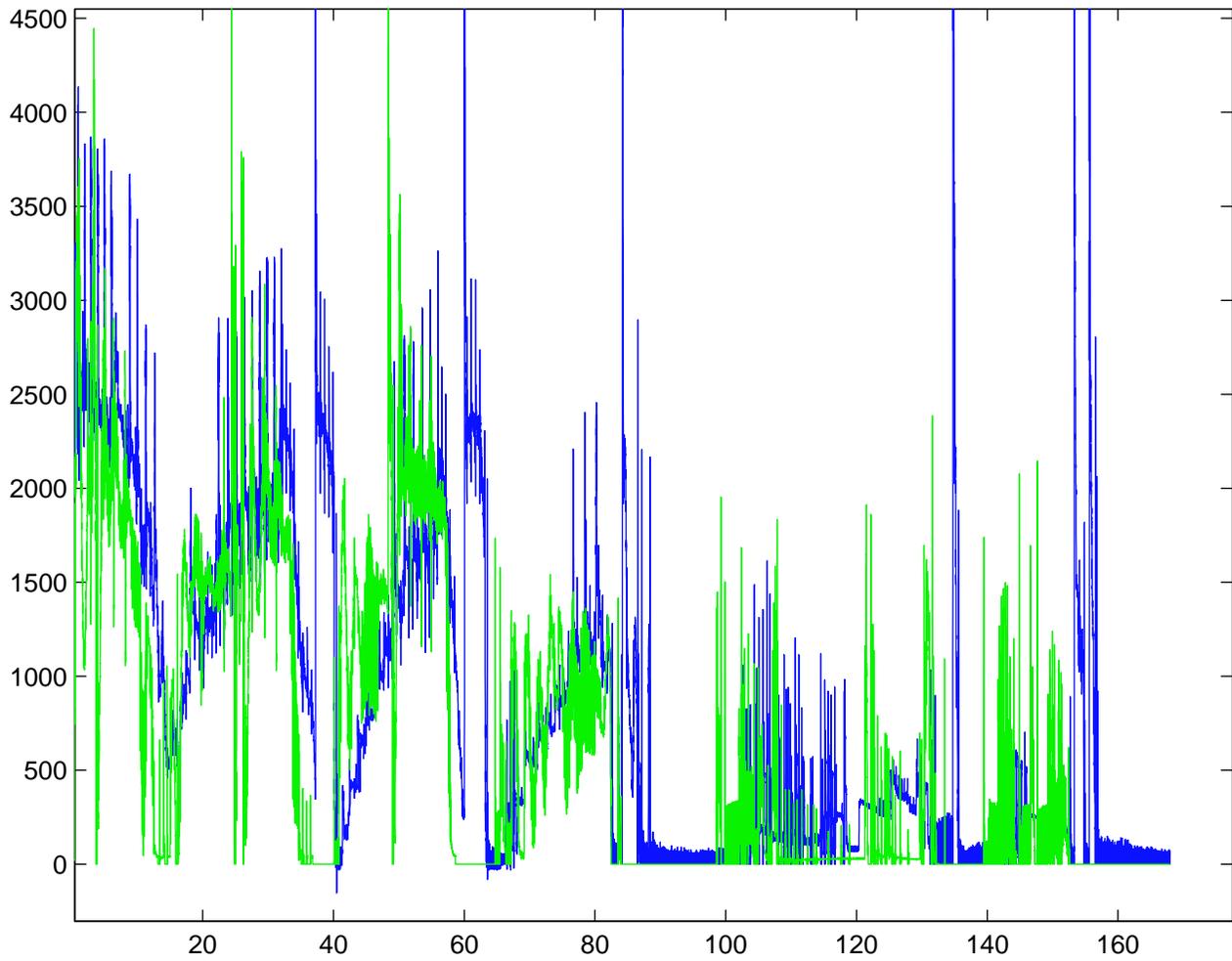


FIG. 7.2 – Comparaison puissance dissipée dans le bâtiment avec commande standard (bleu) / avancée (vert).

apparu que les résultats obtenus varient de façon significative en fonction du bâtiment simulé. Il apparaît que plus l'inertie du bâtiment est importante et mieux il est isolé plus la différence en termes de performances est grande entre la commande optimale et la commande standard. En effet, une inertie élevée signifie une plus grande importance de l'anticipation des gains passifs. Dans certains cas, typiquement dans le cas de planchers solaires chauffants, un phénomène de stockage de l'énergie solaire pendant la journée pour la nuit a été observée en simulation avec la stratégie de commande avancée.

Egalement, au cours de la campagne de mesures menée, il a été supposé qu'une sonde d'ambiance était présente. La stratégie de commande standard prend en compte la présence de cette sonde en implantant une contre réaction très basique, d'où les piètres performances en régulation mentionnées précédemment. Aucune campagne comparative n'a été menée si aucune sonde d'ambiance n'est présente.

Les prévisions météorologiques se sont avérées d'excellente qualité. Ils seraient biaisés de ne donner dans ce rapport que des comparaisons pour quelques journées choisies au hasard. Cette étude devrait faire à elle seule l'objet d'un rapport. Pour des comparaisons plus précises, il est conseillé de prendre directement contact avec l'Institut Suisse de Météorologie.

La procédure de modélisation automatique du bâtiment n'a pu être réalisée en même temps que les tests présentés dans ce qui précède essentiellement du fait des trop courtes périodes d'expérimentation. En effet, en une semaine, les paramètres du modèle 2 noeuds du bâtiment ont à peine le temps d'être identifiés correctement. Ainsi, ces paramètres ont du être estimées avant le début de chaque simulation.

Toutes ces remarques amènent à penser que des tests plus significatifs, typiquement dans deux villas identiques habitées, doivent être menées pour estimer l'intérêt commercial de la stratégie de commande avancée.

# Chapitre 8

## Conclusions et perspectives

Ce rapport présente donc la stratégie de commande avancée développée au laboratoire d'automatique de l'EPFL. Cette stratégie présente les caractéristiques suivantes :

- une stratégie de commande optimale utilisant des prévisions météorologiques fournies en ligne par l'Institut Suisse de Météorologie.
- une stratégie de modélisation automatique du bâtiment. Cette stratégie utilise un modèle simplifié à 2 noeuds et calcule en ligne 7 paramètres de ce modèle.
- une stratégie d'implantation robuste réalisant grâce à plusieurs régulateurs PID en cascade le suivi de la température optimale dans le bâtiment.

Une campagne de mesures expérimentales a permis de comparer les performances de la stratégie de commande avancée à la stratégie de commande standard. Une réduction de l'ordre de 13% de la consommation de gaz a été mesurée. Il convient néanmoins de noter que l'environnement d'expérimentation n'est pas très représentatif d'une villa individuelle réelle et que de nombreux facteurs peuvent influencer ce résultat.

Les perspectives possibles à ce travail sont :

- une campagne de mesures plus représentative de conditions réelles pour évaluer les performances de la stratégie de commande avancée
- le développement d'un produit commercial ?

# Annexe A

## Nomenclature

Variables d'état du modèle d'Arpège :

$T_{s,i}$	Température du $i$ -ème noeud de la cuve	[K]
$T_{e,j}$	Température du $j$ -ème noeud de l'échangeur eau sanitaire	[K]
$T_{f,k}$	Température du $k$ -ème noeud de l'échangeur circuit solaire	[K]
$T_v$	Température du noeud du convecteur	[K]
$T_{h,m}$	Température du $m$ -ème noeud de la conduite du circuit de chauffage	[K]
$T_{g,n}$	Température du $n$ -ème noeud de la conduite de la boucle collecteur	[K]
$T_{c,l}$	Température du $l$ -ème noeud du collecteur	[K]
$T_b$	Température de l'air à l'intérieur de la maison	[K]

Paramètres constants du modèle d'Arpège :

$A_{c,l}$	Aire du $l$ -ème noeud du collecteur	[m <sup>2</sup> ]
$C_{pc}$	Capacité calorifique du liquide du circuit solaire	[kJ/(kgK)]
$C_{pf}$	Capacité calorifique du liquide dans la cuve	[kJ/(kgK)]
$C_{col}$	Capacité calorifique surfacique du collecteur	[kJ/(K <sup>2</sup> m <sup>2</sup> )]
$C_v$	Capacité calorifique du convecteur	[kJ/K]
$c_0$	Efficacité optique du collecteur	[-]
$c_1$	Coefficient de pertes du collecteur	[kJ/(m <sup>2</sup> K)]
$K_{s,a}$	Coefficient de pertes dans le milieu ambiant de la cuve	[kW/K]
$K_{h,a}$	Coefficient de pertes dans le milieu ambiant de la conduite du chauffage	[kW/K]
$K_{g,a}$	Coefficient de pertes dans le milieu ambiant de la conduite du circuit solaire	[kW/K]
$K_{s,e}$	Coefficient de transfert de chaleur de l'échangeur de chaleur eau sanitaire	[kW/K]
$K_{s,f}$	Coefficient de transfert de chaleur de l'échangeur	[kW/K]

	de chaleur circuit solaire	[kW/K]
$M_{s,i}$	Masse du $i$ -ème noeud de la cuve	[kg]
$M_{e,j}$	Masse du $j$ -ème noeud de l'échangeur de chaleur eau sanitaire	[kg]
$M_{f,k}$	Masse du $k$ -ème noeud de l'échangeur de chaleur circuit solaire	[kg]
$M_{g,n}$	Masse du $n$ -ème noeud de la conduite du circuit solaire	[kg]
$M_{h,m}$	Masse du $m$ -ème noeud de la conduite du circuit de chauffage	[kg]

Variables manipulées :

$\dot{m}_C$	Débit massique du liquide dans le circuit solaire	[kg/s]
$\dot{Q}_i$	Puissance brûleur au $i$ -ème noeud de la cuve	[kW]
$\alpha$	Degré d'ouverture de la vanne troies voies entre 0 et 1	[%*100]
$\dot{m}_H$	Débit massique du liquide dans le circuit de chauffage	[kg/s]
$P_{dissip}$	Puissance dissipée dans la maison	[W]

Perturbations météorologiques :

$I_T$	Ensoleillement solaire global sur la surface du collecteur	[kW/m <sup>2</sup> ]
$I_{T,H}$	Ensoleillement solaire global horizontal	[kW/m <sup>2</sup> ]
$T_{amb,in}$	Température ambiante autour de la cuve	[K]
$T_{amb,ex}$	Température ambiante autour du collecteur	[K]

Autres perturbations :

$\dot{m}_L$	Débit massique de soutirage	[kg/s]
-------------	-----------------------------	--------

Paramètres identifiés du modèle du bâtiment :

$\theta_1$	influence de la température extérieur sur le mur équivalent	[kW/K]
$\theta_2$	coefficient d'échange de chaleur entre le mur équivalent et l'air ambient	[kW/K]
$\theta_3$	influence de l'ensoleillement sur le mur équivalent	[m <sup>2</sup> ]
$\theta_4$	influence de l'ensoleillement sur l'air ambient	[m <sup>2</sup> ]
$\theta_5$	inertie du mur équivalent	[kJ/K]
$\theta_6$	inertie de l'air ambient	[kJ/K]
$\theta_7$	influence de la température extérieur sur l'air ambient	[kW/K]

# Bibliographie

- [1] U.M Ascher and L. R. Petzold. *Computers Methods for Ordinary Differential Equations and Differential-Algebraic Equations*. SIAM, 1998.
- [2] M. Bauer. *Gestion biomimétique de l'énergie dans le bâtiment*. PhD thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998.
- [3] J. Bony and O. Renoult. Installations solaires combinées pour villas : optimisation eau chaude, chauffage et climatisation. *Rapport final à l'attention de l'Office Fédéral de l'Energie, Laboratoire d'énergétique solaire, Ecole d'Ingénieurs du Canton de Vaud (EIVD)*, 1999.
- [4] A. E. Bryson and Y.-C. Ho. *Applied Optimal Control*. Hemisphere, New-York, 1975.
- [5] D. E. Kirk. *Optimal Control Theory : An Introduction*. Network Series. Prentice-hall. Englewood Cliffs, New Jersey, 1970.
- [6] L. Pedrinis. Travail de diplôme : Modélisation d'une installation solaire combinée eau chaude-chauffage. *Laboratoire d'automatique, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*, mars 2000.
- [7] T. Prud'homme. *Commande optimale d'une classe de systèmes hybrides : application aux kits solaires de production d'eau chaude sanitaire*. PhD thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- [8] T. Prud'homme and D. Gillet. Optimisation of solar domestic hot water systems. In *EuroSun'98*, volume 2, Portorož, Slovenia, 1998.
- [9] T. Prud'homme and D. Gillet. Advanced control strategy for solar domestic hot water systems. *Energy and Building*, 33(5) :463–475, 2001.