

Rapport final à l'attention des Services Industriels de  
la ville de Lausanne  
Optimisation de la gestion d'installations de chauffage.

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

Juin 2003

## Résumé

Ce rapport décrit les composants logiciels développés pour les Services Industriels de la Ville de Lausanne (SIL). Ces composants logiciels contribuent à l'amélioration des performances énergétiques de certaines installations de chauffage à la fois du bâtiment et de l'eau sanitaire. Ensemble, ils permettent d'appliquer la stratégie de commande avancée développée par le laboratoire d'automatique de l'EPFL. La stratégie en question est décrite dans les moindres détails dans [1][3][2]. Son principe sera rappelé dans ce rapport.

# Table des matières

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                 | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Présentation d'une installation typique</b>      | <b>4</b>  |
| 2.1      | Schéma et mode de fonctionnement . . . . .          | 4         |
| 2.2      | Bilan des grandeurs en présence . . . . .           | 6         |
| 2.2.1    | Entrées . . . . .                                   | 7         |
| 2.2.2    | Perturbations . . . . .                             | 7         |
| <b>3</b> | <b>Stratégie de commande actuelle</b>               | <b>8</b>  |
| 3.1      | Bloc chaudière . . . . .                            | 8         |
| 3.1.1    | Grandeurs manipulées . . . . .                      | 8         |
| 3.1.2    | Mesures . . . . .                                   | 8         |
| 3.1.3    | Paramètres . . . . .                                | 9         |
| 3.1.4    | Logique . . . . .                                   | 9         |
| 3.1.5    | Commentaires . . . . .                              | 11        |
| 3.2      | Groupe chauffage . . . . .                          | 11        |
| 3.2.1    | Grandeurs manipulées . . . . .                      | 11        |
| 3.2.2    | Mesures . . . . .                                   | 11        |
| 3.2.3    | Paramètres . . . . .                                | 11        |
| 3.2.4    | Logique . . . . .                                   | 12        |
| 3.2.5    | Commentaires . . . . .                              | 13        |
| <b>4</b> | <b>Principe de la stratégie de commande</b>         | <b>14</b> |
| 4.1      | Commande optimale . . . . .                         | 14        |
| 4.2      | Implantation robuste . . . . .                      | 16        |
| 4.3      | Identification automatique des paramètres . . . . . | 18        |
| <b>5</b> | <b>Description logiciel</b>                         | <b>22</b> |
| 5.1      | Programme principal . . . . .                       | 22        |
| 5.2      | PID groupes . . . . .                               | 25        |
| 5.3      | Optimisation . . . . .                              | 25        |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 5.4 Optimisation . . . . .   | 25 |
| 5.5 Identification . . . . . | 25 |
| 5.6 Optimisation . . . . .   | 25 |

# Chapitre 1

## Introduction

Les stratégies de commande actuelles pour les installations de chauffage du bâtiment et le chauffage de l'eau sanitaire reposent souvent sur le savoir-faire des fabricants actuels. Ces stratégies ont évolué au cours de ces dernières années pour prendre en compte de façon empirique l'évolution de conditions de fonctionnement. Par exemple, des paramètres permettant de caractériser grossièrement l'inertie du bâtiment à chauffer sont parfois utilisés pour mieux évaluer la période de relance. La stratégie de commande avancée prend en compte l'évolution des conditions de fonctionnement de manière explicite. En effet, des modèles dynamiques de l'installation et du bâtiment sont couplés à des prévisions météorologiques pour calculer les grandeurs optimales. Les objectifs recherchés sont directement traduit en une fonction de coût qui est minimisée par la stratégie. C'est pourquoi cette stratégie de commande est appelée commande optimale.

Les prévisions météorologiques sont fournies en ligne par l'Institut Suisse de Météorologie<sup>1</sup>. Ces prévisions prennent la forme de données horaires pour l'ensoleillement horizontal global et la température extérieure. L'horizon de prévision est de 48 heures.

Le modèle dynamique du bâtiment, et plus précisément, le modèle dynamique des groupes est plus difficile à obtenir. Ainsi, la stratégie développée dans [3] est utilisée pour chacun des groupes. En résumé, une structure à 2 noeuds est utilisé pour chaque groupe et 7 paramètres par groupe sont identifiés en ligne.

Une installation typique gérée par les SIL est présentée au chapitre 2. La section 3 présente la stratégie de commande actuelle. Il est en effet important de connaître cette dernière pour pouvoir la comparer avec celle développée dans le cadre de cette étude.

---

<sup>1</sup>Institut Suisse de Météorologie (ISM), Kräbühlstrasse 58, Postfach 514, CH-8044 Zürich

# Chapitre 2

## Présentation d'une installation typique

### 2.1 Schéma et mode de fonctionnement

Une vue schématique de l'installation est donnée à la figure 2.1.

Sur cette figure apparaissent en bleu clair tous les actuateurs qui seront manipulés par la stratégie de commande avancée. Les capteurs de température à disposition apparaissent en bleu foncé.

L'installation comprend 42 m<sup>2</sup> de capteurs solaires montés sur le toit à 30 °C et orientés sud. L'apport solaire se fait dans une première cuve au moyen d'un échangeur de chaleur externe. Cette cuve sera appelée accumulateur solaire dans tout ce qui suit. Le volume de cette cuve est de 1000 litres. Un capteur de température est présent à l'intérieur de l'accumulateur solaire, la température mesurée est repérée par  $T_{accu,sol}$ . Ce capteur de température est situé approximativement au 2/3 de la hauteur de la cuve. La température dans les collecteurs solaires est également mesurée, elle est repérée par  $T_{col}$ . L'emplacement exact de cette sonde n'est pas connue à l'heure de la rédaction de ce document. Une pompe repérée par  $P_{s,p}$  permet de faire circuler le fluide caloporteur dans les collecteurs et dans le circuit primaire de l'échangeur de chaleur externe. Une deuxième pompe permet de faire circuler l'eau dans le circuit secondaire de cet échangeur, elle est repérée par  $P_{s,s}$ .

L'apport auxiliaire d'énergie pour l'eau chaude sanitaire est réalisée dans une deuxième cuve qui sera appelée accumulateur d'énergie auxiliaire. Le volume de cette cuve est de 1000 litres. Un capteur de température est également présent dans cette accumulateur, la température mesurée est repérée par  $T_{accu,aux}$ . Il est également situé approximativement au 2/3 de la hauteur de la cuve. L'apport d'énergie auxiliaire se fait là encore par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur externe, deux pompes sont donc nécessaires, une au primaire repérée par  $P_{g,ecs,p}$  et une autre au secondaire repérée par  $P_{g,ecs,s}$ . La température

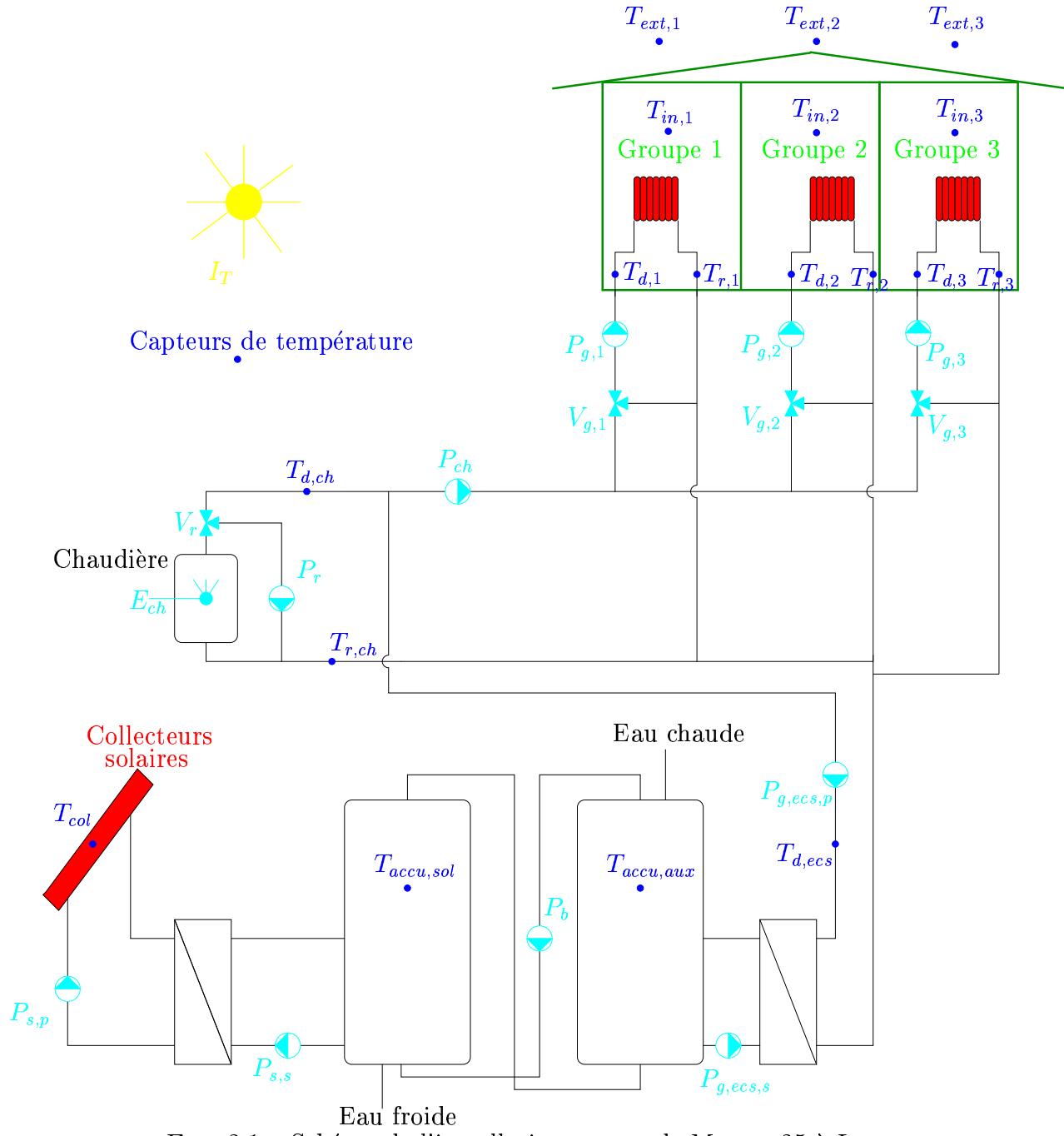


FIG. 2.1 – Schéma de l'installation avenue de Morges 25 à Lausanne.

de l'eau dans le circuit primaire à l'entrée de l'échangeur est repérée par  $T_{d,ecs}$ .

Une pompe appelée pompe de brassage et repérée par  $P_b$  sert à transférer l'énergie solaire de l'accumulateur solaire à l'accumulateur d'énergie auxiliaire.

Trois groupes de chauffage sont présents dans cette installation, ils seront appelés respectivement groupe 1,2 et 3. Ils sont connectés en parallèle sur le circuit fermé de chauffage. L'apport d'énergie auxiliaire pour l'eau chaude sanitaire peut être vu comme un quatrième groupe connecté également en parallèle sur le circuit de chauffage. L'apport d'énergie à ce circuit de chauffage est réalisé par une chaudière au fioul. La puissance de cette chaudière est de 200 kW. La température du liquide à la sortie de la chaudière est donnée par  $T_{d,ch}$ , la température du liquide qui retourne dans la chaudière est donnée par  $T_{r,ch}$ . La pompe principale du circuit de chauffage est repérée par  $P_{ch}$ .  $E_{ch}$  représente la chaudière. Pour chaque groupe, une pompe permet de faire circuler de l'eau chaude dans les chauffages. Ces pompes sont repérées par  $P_{g,1}$ ,  $P_{g,2}$  et  $P_{g,3}$  pour respectivement les groupes 1,2 et 3. Trois vannes trois voies  $V_{g,1}$ ,  $V_{g,2}$  et  $V_{g,s}$  permettent de contrôler la température à l'entrée des convecteurs de chacun des groupes. Ces températures sont mesurées et repérées par  $T_{d,1}$ ,  $T_{d,2}$  et  $T_{d,3}$ . Les températures à la sortie de ces convecteurs sont également mesurées et repérées par  $T_{r,1}$ ,  $T_{r,2}$  et  $T_{r,3}$ . Les températures de l'air ambiant sont également mesurées pour chacun des groupes, elles sont repérées par  $T_{in,1}$ ,  $T_{in,2}$  et  $T_{in,3}$ . Les températures extérieures nord et sud sont elles-aussi mesurées, elles sont repérées par  $T_{ext,n}$  et  $T_{ext,s}$ . L'ensoleillement global est mesuré sur le plan des capteurs solaires (30 °C) et repéré par  $I_T$ .

La pompe de recyclage repérée par  $P_r$  et la vanne trois voies  $V_r$  permettent de réinjecter dans la chaudière tout ou une partie du liquide qui en sort.

Il est à noter que toutes les pompes sont enclenchées en tout ou rien, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de faire varier de façon continue le débit dans la conduite correspondante. La pompe de la boucle collecteur est alimentée par une cellule photovoltaïque en passant par des batteries. Le début mesuré lorsque cette pompe est enclenchée est égal à environ 7-8 l/m (litres/minute).

## 2.2 Bilan des grandeurs en présence

Cette section a pour but de présenter les différentes grandeurs qui influencent le comportement de l'installation. Parmi ces grandeurs, on distingue celles qui sont manipulées, c'est-à-dire celles pour lesquelles il est possible de modifier la gestion dans le but d'améliorer le fonctionnement du système. Ces grandeurs sont souvent appelées "entrées". Elles sont associées à des actuateurs. Certaines grandeurs non manipulées ont également une influence significative sur ce fonctionnement. Elles sont appelées "perturbations" dans le jargon du réglage automatique.

Toutes ces grandeurs ont la particularité d'être variables dans le temps. Elles sont donc à dissocier des "paramètres" de l'installation tels que les volumes des cuves, les coefficients

de pertes, etc.

### 2.2.1 Entrées

|               |   |
|---------------|---|
| $s_{ch}$      | Enclenchement de la chaudière au fioul (repérée par $E_{ch}$ )                    |
| $s_{ch,p}$    | Enclenchement de la pompe principale de chauffage                                 |
| $U_r$         | Tension aux bornes de la vanne trois voies de recyclage $V_r$                     |
| $s_{g,1,2,3}$ | Enclenchement des pompes des groupes 1,2 et 3                                     |
| $U_{g,1,2,3}$ | Tensions aux bornes des vannes trois voies des groupes 1,2 et 3 ( $V_{g,1,2,3}$ ) |
| $s_{g,ecs,p}$ | Enclenchement de la pompe du circuit primaire<br>eau chaude sanitaire             |
| $s_{g,ecs,s}$ | Enclenchement de la pompe du circuit secondaire<br>eau chaude sanitaire           |
| $s_{s,p}$     | Enclenchement de la pompe du circuit primaire solaire                             |
| $s_{s,s}$     | Enclenchement de la pompe du circuit secondaire solaire                           |
| $s_b$         | Enclenchement de la pompe de brassage   |

La variable booléenne  $s$  a été choisie pour représenter l'état des actuateurs tout ou rien. Elle peut prendre deux valeurs 1 ou 0 pour représenter respectivement l'état enclenché ou déclenché de l'actuateur correspondant. Les tensions  $U$  peuvent prendre n'importe quelles valeurs comprises dans l'intervale [0; +10]V.

### 2.2.2 Perturbations

Les perturbations sont classées en deux grandes catégories, les perturbations d'ordre météorologique et celles qui sont propres au comportement des utilisateurs.

- Ensoleillement
- Température extérieure
- Besoins en eau chaude sanitaire
- Besoins en chauffage

# Chapitre 3

## Stratégie de commande actuelle

La présente section s'attache à décrire les stratégies de commande actuelles des grandeurs manipulées présentées à la section précédente. Cette stratégie est celle utilisée pour l'installation présentée à la section précédente. Il s'avère néanmoins que des stratégies similaires sont utilisées pour quasiment toutes les installations gérées par les SIL. Cette section est divisée en trois sections traitant respectivement les cas du bloc chaudière, des groupes de chauffage et de la partie solaire. Elle va permettre de dresser un état de l'art de stratégies actuellement utilisées en soulignant les points faibles.

### 3.1 Bloc chaudière

Par bloc chaudière, il faut comprendre l'ensemble chaudière, le circuit de recyclage de cette dernière ainsi que la pompe principale de chauffage.

#### 3.1.1 Grandeurs manipulées

Les grandeurs manipulées qui influencent le comportement de l'ensemble chaudière sont les suivantes.

|            |  |
|------------|--|
| $s_{ch}$   | Enclenchement de la chaudière au fioul (repérée par $E_{ch}$ ) |
| $s_{ch,p}$ | Enclenchement de la pompe principale de chauffage              |
| $U_r$      | Tension aux bornes de la vanne trois voies de recyclage $V_r$  |
| $s_{rc}$   | Enclenchement de la pompe de recyclage de la chaudière         |

#### 3.1.2 Mesures

Les mesures suivantes sont utilisées pour la gestion de la chaudière.

|            |   |
|------------|---|
| $T_{ch}$   | Température dans la chaudière   |
| $T_{d,ch}$ | Température départ de chauffage (après la vanne trois voies de recyclage) |

### 3.1.3 Paramètres

Les paramètres qui interviennent dans la stratégie de commande du bloc chaudière sont les suivants. Des valeurs typiques pour ces paramètres sont également données.

|                          |      |
|--------------------------|------|
| <i>brassage</i>          |      |
| <i>ECS</i>               |      |
| <i>TCG<sub>max</sub></i> |      |
| $T_{SurplusBatterie}$    | 10.0 |
| $T_{SurplusChaudiere}$   | 5.0  |
| $T_{ch,min}$             | 50.0 |
| $T_{ch,max}$             | 80.0 |

### 3.1.4 Logique

La stratégie de commande des actuateurs  $s_{ch}$ ,  $s_{ch,p}$ ,  $U_r$  et  $s_{rc}$  est présentée dans ce qui suit sous forme d'un métalangage aisément compréhensible.

Si  $brassage = TRUE$

Si  $ECS = TRUE$

$$T_\alpha = \max(70.0, TCG_{max})$$

Sinon

$$T_\alpha = \max(0.0, TCG_{max})$$

Fin

Sinon

$$T_\alpha = 0.0$$

Fin

Si  $T_\alpha > 0$

$$T_\beta = T_\alpha + T_{SurplusBatterie}$$

Sinon

$$T_\beta = T_\alpha$$

Fin

Si  $T_\beta >= 0$  (Demande)

$$s_{ch,p} = 1$$

```

Si  $T_{ch} < T_{ch,min}$ 
   $s_{ch} = 1$ 
   $s_{rc} = 1$ 
   $U_r = 0$ 
Sinon si  $T_{ch} > T_{ch,max}$ 
   $s_{ch} = 0$ 
   $s_{rc} = 0$ 
   $U_r = 9.95$ 
Sinon
  Si  $T_{ch} < T_\beta$ 
     $s_{ch} = 1$ 
  Sinon si  $T_{ch} > T_\beta + T_{SurplusChaudiere}$ 
     $s_{ch} = 0$ 
  Sinon
     $s_{ch} = -1$ 
  Fin
  Si  $T_{d,ch} < T_{ch,min}$ 
     $s_{rc} = 1$ 
     $U_r = U_r - 0.25$ 
  Sinon si  $T_{d,ch} > T_{SurplusChaudiere}$ 
     $s_{rc} = 0$ 
     $U_r = U_r + 0.25$ 
  Sinon
     $s_r = -1$ 
     $U_r = U_r$ 
  Fin
  Fin
Sinon      ( $T_\beta < 0$  Pas de demande)
  Si  $T_{ch} < T_{ch,min}$ 
    Si brassage = TRUE
       $s_{ch} = 0$ 
       $s_{rc} = 0$ 
    sinon
       $s_{ch} = 1$ 
       $s_{rc} = 1$ 
    Fin
  Sinon si  $T_{ch} > T_{ch,min} + T_{SurplusChaudiere}$ 
     $s_{ch} = 0$ 
     $s_{rc} = 0$ 
  Fin
Fin

```

### 3.1.5 Commentaires

## 3.2 Groupe chauffage

Les groupes de chauffage sont au nombre de trois. Les stratégies de commande pour ces groupes sont exactement identiques.

### 3.2.1 Grandeurs manipulées

Les grandeurs manipulées qui influencent le comportement des groupes sont les suivantes.

- $s_{g,1,2,3}$  Enclenchement des pompes des groupe 1,2 et 3
- $U_{g,1,2,3}$  Tensions aux bornes des vannes trois voies des groupes 1,2 et 3 ( $V_{g,1,2,3}$ )

### 3.2.2 Mesures

Les mesures suivantes sont utilisées pour la gestion des groupes.

- $T_{d,1,2,3}$  Température à l'entrée des chauffages
- $T_{r,1,2,3}$  Température à la sortie des chauffages
- $T_{in,1,2,3}$  Température à l'intérieur des groupes
- $T_{ext,1,2,3}$  Température à l'extérieur des groupes

### 3.2.3 Paramètres

Les paramètres qui interviennent dans la stratégie de commande des groupes sont les suivants. Des valeurs typiques pour ces paramètres sont également données.

|                             |                              |           |      |
|-----------------------------|------------------------------|-----------|------|
| $T_{d,+10}$                 | Température de départ à +10° | 60.0      | [°C] |
| $T_{d,-10}$                 | Température de départ à -10° | 60.0      | [°C] |
| $T_{ext,jour,stop}$         |                              | 15.0      | [°C] |
| $T_{int,jour,stop}$         |                              | 25.0      | [°C] |
| $T_{ext,nuit,stop}$         |                              | 10.0      | [°C] |
| $T_{int,nuit,stop}$         |                              | 30.0      | [°C] |
| $\delta T_{abaissement}$    |                              | 10.0      | [°C] |
| $\delta T_{relance}$        |                              | 5.0       | [°C] |
| $t_{debut,abaissement,sem}$ |                              | 22 * 3600 | [s]  |
| $t_{debut,abaissement,we}$  |                              | 0 * 3600  | [s]  |
| $t_{fin,abaissement,sem}$   |                              | 6*3600    | [s]  |

|                          |  |                |
|--------------------------|--|----------------|
| $t_{fin,abaissement,we}$ | 0*3600                                       | [s]            |
| $\delta t_{relance,sem}$ | 30*60  | [s]            |
| $\delta t_{relance,we}$  | 0*60   | [s]            |
| $\alpha_{min}$           | Ouverture minimale<br>des vannes trois voies | [ $^{\circ}$ ] |

### 3.2.4 Logique

La stratégie de commande des actuateurs  $s_{g,1,2,3}$  et  $U_{g,1,2,3}$  est présentée dans ce qui suit sous forme d'un métalanguage aisément compréhensible.

%  $t$  représente en secondes le temps écoulé depuis minuit.

Si Week-End

$$\begin{aligned} t_{fin,relance} &= t_{fin,abaissement,we} \\ \delta t_{relance} &= \delta t_{relance,we} \\ t_{depart,relance} &= t_{fin,relance} - \delta t_{relance} \end{aligned}$$

Sinon

$$\begin{aligned} t_{fin,relance} &= t_{fin,abaissement,sem} \\ \delta t_{relance} &= \delta t_{relance,sem} \\ t_{depart,relance} &= t_{fin,relance} - \delta t_{relance} \end{aligned}$$

Fin

Si  $t < t_{depart,relance}$

$$zone = 1$$

Sinon si  $t \Rightarrow t_{fin,relance}$

$$zone = 0$$

Sinon

$$zone = 2$$

Fin

$$T_{cin,i} = \frac{T_{d,+10} - T_{d,-10}}{20} T_{ext,i} + \frac{T_{d,+10} - T_{d,-10}}{2}$$

Si  $zone = 0$

$$T_{cout,i} = T_{cin,i}$$

Sinon si  $zone = 1$

$$T_{cout,i} = T_{cin,i} - \delta T_{abaissement}$$

Sinon si  $zone = 2$

$$T_{cout,i} = T_{cin,i} - \delta T_{relance}$$

Fin

Si  $zone = 0$

$$T_{comp,ext} = T_{ext,jour,stop}$$

$$T_{comp,int} = T_{int,jour,stop}$$

Sinon si  $zone = 1$

$$T_{comp,ext} = T_{ext,nuit,stop}$$

$$T_{comp,int} = T_{int,nuit,stop}$$

Fin

Si  $(T_{ext,i} + 1 > T_{comp,ext})$  OU  $(T_{int,i} > T_{comp,int})$

$$T_{cout,2} = 0$$

Sinon

$$T_{cout,2} = T_{cout}$$

Fin

Si  $T_{cout,2} > 0$

$$s_{g,i} = 1$$

$$U_{g,i} = \frac{25(T_{cout,2} - T_{d,i}) + 1000U_{g,i}}{1000}$$

Sinon

$$s_{g,i} = 0$$

$$U_{g,i} = 0.0$$

Fin

Si  $U_{g,i} < \frac{\alpha_{min}}{10.0}$

$$U_{g,i} = \frac{\alpha_{min}}{10.0}$$

Sinon si  $U_{g,i} > 10.0$

$$U_{g,i} = 10.0$$

Fin

### 3.2.5 Commentaires

# Chapitre 4

## Principe de la stratégie de commande

Comme déjà mentionné, cette stratégie s'inspire essentiellement de celle décrite dans [3]. Son principe est rappelé brièvement dans la présente section. La section 4.1 rappelle le principe de la stratégie de commande optimale avec utilisation de prévisions météorologiques. La section 4.2 motive et décrit la stratégie d'implantation robuste.

### 4.1 Commande optimale

la figure 4.1 donne une vue d'ensemble simplifiée de la stratégie de commande optimale. Le modèle dynamique qui apparaît sur cette figure est celui d'un groupe de chauffage. En effet, cette stratégie est utilisée pour chacun des groupes de chauffage (donc 3 dans le cas de l'installation avenue de Morges 33 à Lausanne).

Ce modèle couplé à des prévisions météorologiques et un profil de puissance dissipée dans le bâtiment permet d'estimer l'évolution future de la température dans ce même bâtiment. La qualité de l'estimation va dépendre de la qualité du modèle et de la qualité des prévisions météorologiques.

Les prévisions météorologiques sont fournies en ligne plusieurs fois par jour par l'Institut Suisse de Météorologie. Un modèle très complexe des différents processus atmosphériques calcule l'évolution de plusieurs milliers de variables d'état. De nombreuses stations de mesures sont utilisées pour recaller à intervalles réguliers le modèle sur une évolution météorologique réelle mesurée. Concrètement, la température extérieure et l'ensoleillement horizontal global sont nécessaires.

Un modèle dynamique est un ensemble d'équations différentielles. Les entrées de ce modèle sont de deux types, non manipulées, typiquement les prévisions météorologiques et le comportement utilisateur et manipulées, typiquement dans ce cas la puissance dissipée dans le bâtiment. Les paramètres qui décrivent de façon unique ces équations différentielles

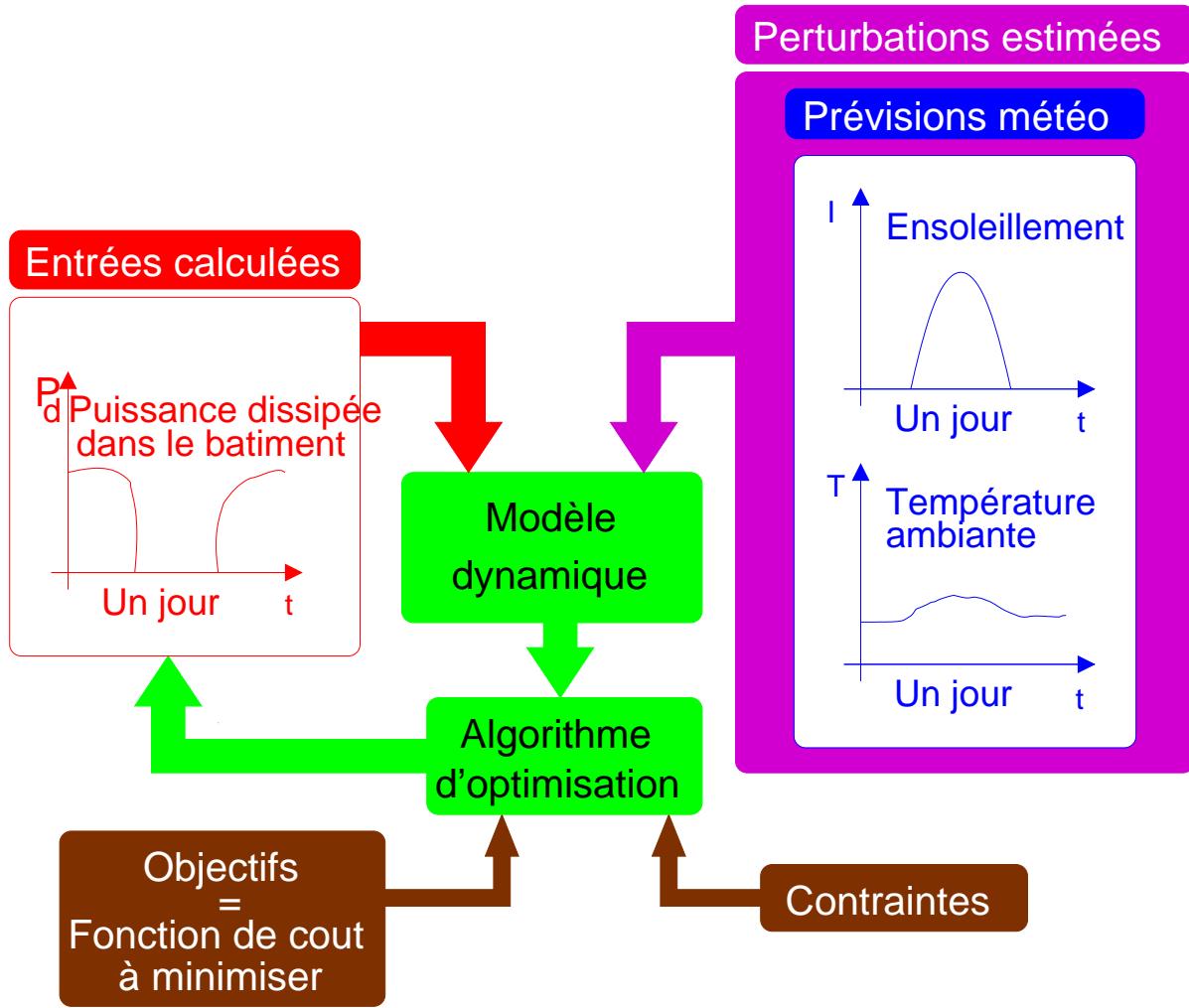


FIG. 4.1 – Stratégie de commande optimale

vont être différents pour chaque groupe et il n'est pas permis d'effectuer des campagnes de mesure dédiées uniquement au calcul de ces paramètres. C'est la raison pour laquelle il a été nécessaire de coupler cette stratégie de commande optimale à une stratégie d'identification automatique des paramètres du bâtiment. Cette stratégie d'identification automatique est décrit à la section 4.3.

La stratégie de commande optimale va donc modifier de façon itérative le profil de puissance à dissiper dans chacun des groupes de façon à obtenir un comportement optimal. Ce comportement optimal se traduit mathématiquement par le choix d'une fonction de cout qui est minimisée par un algorithme d'optimisation. L'algorithme d'optimisation est l'outil indispensable à la réalisation sur ordinateur d'une stratégie de commande optimale. L'horizon de calcul choisi pour le calcul de ce profil et la minimisation de la fonction de cout est d'une journée. Cet horizon doit être choisi en fonction de l'importance des inerties en jeu (typiquement l'inertie des groupes de chauffage).

## 4.2 Implantation robuste

La stratégie de commande optimale présentée à la section précédente permet donc de calculer pour la journée à venir le profil de puissance à dissiper dans chacun des groupes de chauffage. Cependant, ce profil est calculé sur la base de prévisions météorologiques couplé à une modèle dynamique des groupes de chauffage. Il s'avère cependant que les prévisions tout comme le modèle ne sont pas parfaits. Il est donc préférable d'adapter cette puissance calculée en temps réel à l'aide de mesures effectuées sur l'installation.

Sur la base de ces observations, la stratégie d'implantation robuste est celle présentée à la figure 4.2.

Pour mieux comprendre cette stratégie, il faut avoir à l'esprit que la stratégie de commande optimale calcule non seulement la puissance à dissiper dans chaque groupe de chauffage mais également les profils de température correspondant. Ainsi, tout au long de la journée, il est facile de comparer la température calculée avec celle mesurée (pour cela un capteur de température doit bien entendu être installé dans le groupe). La différence entre ces deux températures est l'entrée d'un premier régulateur PID qui va calculer une puissance à dissiper. Dans ce schéma, la puissance à dissiper calculée par la stratégie de commande optimale apparaît donc comme une commande a priori ("feedforward").

Un deuxième régulateur PID calcule une température de consigne à du liquide à l'entrée des radiateurs du groupe. Pour cela, il compare la puissance calculée par le premier régulateur PID avec la puissance mesurée. A ce stade, il convient de noter que pour pouvoir calculer cette puissance dissipée dans le groupe de chauffage il est nécessaire que non seulement deux capteurs soient montés à l'entrée et la sortie des radiateurs mais également que le débit dans le circuit de chauffage du groupe et la capacité calorifique du liquide caloporteur soient connues. Un troisième régulateur PID calcule la tension aux bornes de la vanne trois voies en comparant la température du liquide caloporteur à

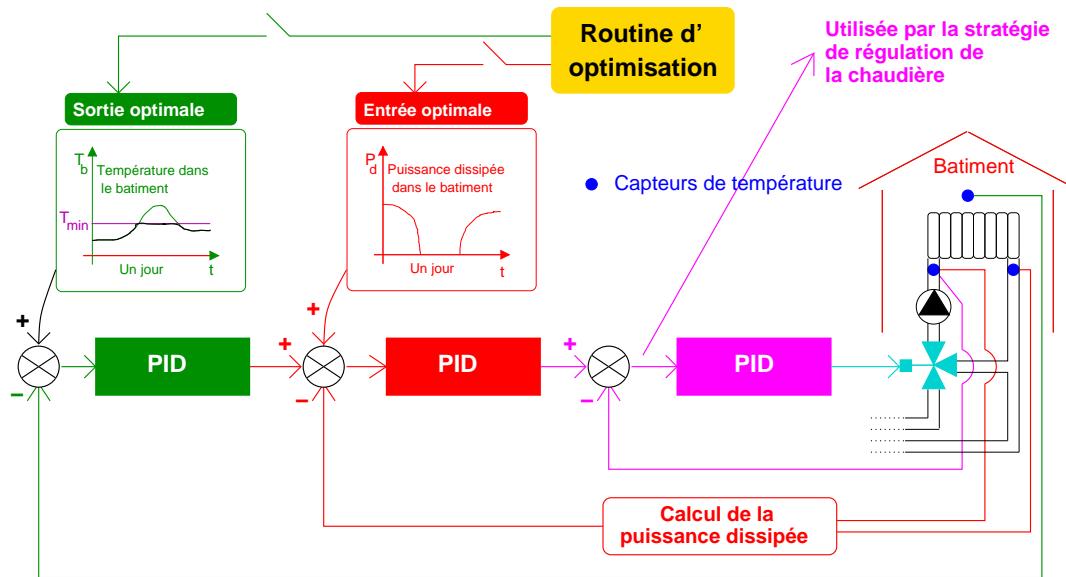


FIG. 4.2 – Régulation de la puissance dissipée pour chacun des groupes

l'entrée des radiateurs calculée par les deux premiers PID avec celle mesurée.

Il convient également ici de souligner une petite subtilité. En effet, il y a un cas particulier qui pourrait poser problème si la stratégie était uniquement celle décrite précédemment. Il peut arriver que les prévisions météorologiques prévoient un ensoleillement plus important que l'ensoleillement réel. Dans ce cas, la température optimale calculée pour les groupes de chauffage pourra être plus élevée que la température désirée à cause de gains passifs estimés trop importants. Il serait donc stupide de suivre cette température calculée s'il s'avère que les gains passifs réels sont largement inférieurs à ceux prédicts. Une solution simple consiste à suivre non pas directement la température optimale calculée mais le maximum à chaque instant de la température optimale et la température désirée. Cette technique fonctionnera bien pour l'essentiel des systèmes de chauffage. En revanche, pour un système de chauffage au sol il est possible qu'il intéressant d'un point de vue énergétique de surchauffer volontairement pendant la journée pour stocker de l'énergie dans la dalle pour la soirée et la nuit. Il serait souhaitable dans ce cas de prévoir une stratégie plus "intelligente" (grossièrement, il suffirait de regarder la valeur de la puissance optimale calculée pendant la période de surchauffe, si elle est non nulle alors on suit la température optimale calculée même si elle est supérieure à celle de consigne).

### 4.3 Identification automatique des paramètres

Comme déjà mentionné, le modèle dynamique de chacun des groupes est un élément central de la stratégie. Il sert à calculer la puissance à dissiper optimale ainsi que la température dans le groupe correspondante. Il s'avère cependant que ce modèle sera différent pour chacun des groupes rencontré. L'inertie des murs, l'isolation, le système de chauffage, l'orientation, le comportement des utilisateurs sont autant de facteurs qui influencent de façon significative la relation entre la puissance dissipée et la température. Il est important de souligner ici que le but recherché pour le modèle du groupe utilisé est modeste. Il ne s'agit de loin pas d'un modèle de simulation précis reproduisant l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu. Au contraire, le but est d'identifier un comportement de type entrée/sortie entre la puissance dissipée (valeur calculée par l'algorithme d'optimisation appelée aussi variable manipulée) et la température dans le groupe. Il serait de toute façon impossible d'espérer identifier tous les paramètres d'un véritable modèle de simulation. Un tel modèle comporte un très grand nombre de paramètres avec des sensibilités très différentes. De plus, l'excitation est très faible puisque les paramètres sont identifiés dans des conditions normales de fonctionnement. En effet, pour identifier des paramètres de façon précise, quand c'est possible, une série d'expérience désirée est pensée pour minimiser l'influence de certains paramètres par rapport à d'autres.

Il y aura donc une structure figée unique pour modéliser tous les groupes et un jeu de paramètres qui seront calculés automatiquement à l'aide des mesures effectuées sur l'installation. Ce modèle est composé de deux équations différentielles et sept paramètres. Pour résumer, tous les noeuds correspondant aux quatre murs, au toit, au sol et aux fenêtre 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 4.3.

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 (4.1).

$$\theta_5 \frac{\delta T_{m,eq}}{\delta t} = \theta_1(T_{amb,ex} - T_b) + \theta_2(T_b - T_{m,eq}) + \theta_3 I_{T,H} \quad (4.1)$$

L'équation régissant le comportement de la température du milieu ambiant est donné

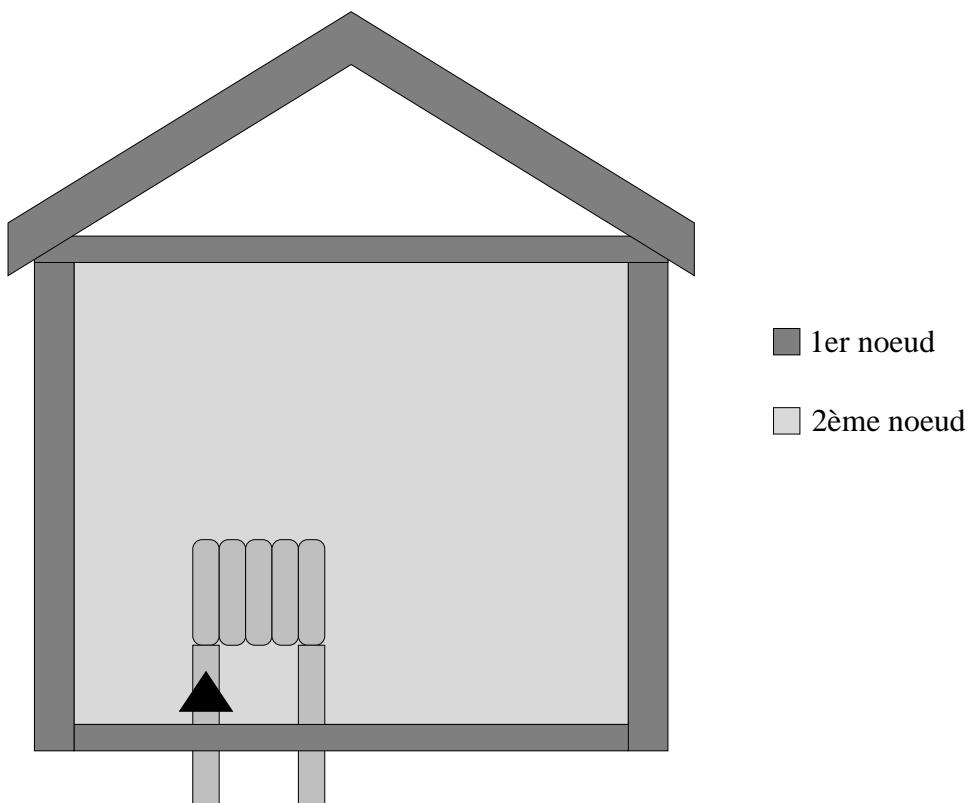


FIG. 4.3 – Modélisation du bâtiment.

par (4.2)

$$\theta_6 \frac{\delta T_b}{\delta t} = P_{dissip} + \theta_2(T_{m,eq} - T_b) + \theta_7(T_{amb,ex} - T_b) + \theta_4 I_{T,H} \quad (4.2)$$

$T_{m,eq}$  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.

|            |  |                   |
|------------|--|-------------------|
| $\theta_1$ | influence de la température extérieur sur le mur équivalent              | [kW/K]            |
| $\theta_2$ | coefficent 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. Comme déjà indiqué, la stratégie d'implantation robuste prévient les éventuelles erreurs entre le modèle et la réalité.

# Chapitre 5

## Description logiciel

Cette section est destinée à présenter le logiciel qui réalise la stratégie de commande décrite dans le chapitre précédent. Le programme principal est réalisé à travers une application LabVIEW. Une application LabVIEW est en général appelée VI (Virtual Instrument). Différents SubVIs ont également été créés de façon à rendre l'application aussi modulaire que possible. Un certain nombre de librairies dynamiques (Dlls) réalisent différentes tâches de haut niveau telles que l'optimisation, l'identification automatique des paramètres du bâtiment, les régulateurs PID, etc.

La première section 5.1 présente le programme principal et en particulier les différents paramètres relatifs à différentes parties de l'installation. La section 5.2 décrit le PID cascade utilisé pour régler la puissance dissipée dans les groupes de chauffage. La section 5.6 présente l'algorithme d'optimisation. Enfin, la section 5.5 détaille la stratégie d'identification automatique des paramètres des modèles dynamiques des groupes.

### 5.1 Programme principal

La copie d'écran à la figure 5.1 présente la page des paramètres généraux de l'application.

Le terme paramètres généraux n'est peut-être pas le mieux adapté. En effet, la majorité de ces paramètres sont en rapport avec l'identification. Tous ces paramètres sont décrits dans ce qui suit.

1. Période d'échantillonnage [ms] : Il s'agit de la période à laquelle les mesures sont effectuées. Il s'agit également de la période d'exécution des différents algorithmes de réglage (PIPs et autres stratégies adhoc). Elle doit être choisie en fonction de la constante de temps du système le plus rapide à régler. Une valeur de 5 secondes (5000 millisecondes) convient parfaitement pour des systèmes classique de chauffage.
2. Capacité calorifique du liquide dans le circuit de chauffage [kJ/kg/K] : Cette grandeur est nécessaire pour calculer la puissance réellement dissipée dans le groupe.



FIG. 5.1 – Paramètres généraux de l'application

Elle est unique pour tous les groupes. En effet, il est supposé que le même liquide caloporteur circule dans chacun d'entre eux.

3. Nombre d'échantillons sauvés par fichier [-] : Le programme livré par défaut sauve en mémoire vive (RAM) quasiment toutes les données dignes d'intérêt pour faciliter le débogage et améliorer certains paramètres. Ces données sont sauveées à chaque période d'échantillonnage et sont sérialisées dans des fichiers séparés chaque  $N$  périodes d'échantillonnage où  $N$  correspond à ce paramètre.
4. Paramètres de l'identification :
  - (a) Nombre maximum de données [-] : Ce paramètre détermine la taille maximale du buffer sauvegardant les données pour l'identification. Pour chaque groupe, il convient de sauver la température extérieure (mesurée si elle l'est estimée sinon), l'ensoleillement horizontal global (mesuré s'il l'est estimé sinon), la puissance dissipée dans le groupe (on mesure la température du liquide caloporteur à l'entrée et à la sortie du groupe, on utilise ces deux grandeurs pour calculer cette puissance dissipée), la température mesurée dans le groupe et la température estimée du noeud du modèle correspondant au mur équivalent. Cette estimation est fournie par une observateur d'état linéaire présenté dans une prochaine section. Pour résumer, cinq valeurs sont sauvegardées. Il est donc possible d'estimer les besoins en RAM pour la sauvegarde des données nécessaires pour l'identification de chacun des groupes. La valeur programmée par défaut pour ce paramètre est 2000. Pour cinq valeurs stockées au format "double" (8 bytes), cela correspond à un espace mémoire de 80 kbytes.
  - (b) Nombre de périodes entre chaque donnée [-] : Les cinq données nécessaires à l'identification ne seront pas sauvegardées à chaque période d'échantillonnage, en effet cette période est choisie de façon à assurer des bonnes performances en régulation des phénomènes rapides. Il est évident qu'elle est trop petite pour les besoins de l'identification où les constantes de temps mises en jeu sont beaucoup plus grandes. Il est donc possible de choisir la fréquence à laquelle ces cinq données sont sauvegardées en spécifiant un multiple de la période d'échantillonnage. Il convient encore d'ajouter qu'il n'y a pas de risques à sauver plus de données, il s'agit ici simplement d'éviter un gaspillage trop important de RAM. La valeur choisie par défaut est 50, ce qui avec une période de 5 secondes, correspond à une sauvegarde chaque 250 secondes (4 minutes et 10 secondes). Avec une valeur par défaut de 2000 pour le paramètre précédent, on obtient un historique de 5 jours 18 heures 53 minutes et 20 secondes.
  - (c) Nombre minimal de données pour l'identification [-] : Il est possible d'identifier convenablement les paramètres du modèle d'un groupe seulement si un nombre suffisant de données a été récolté. Ce nombre minimal de données correspond à ce paramètre. Une valeur par défaut choisie égale à 1000 correspond à une durée de 2 jours 21 heures 26 minutes et 40 secondes.

- (d) Nombre maximal d'itérations [-] : L'algorithme calculant les paramètres du bâtiment est en fait un algorithme d'optimisation qui minimise une fonction de coût. Cette fonction est en fait l'intégrale du carré de la différence entre la température mesurée dans le bâtiment et celle calculée par le modèle. En général, l'identification s'arrête lorsque la fonction de coût ne diminue presque plus d'une itération à l'autre. Cependant, pour contrôler le temps pris par l'identification, on choisit d'arrêter les calculs au bout d'un certain nombre de paramètres. Une valeur par défaut de 100 a été choisie. Elle représente un bon compromis entre la convergence de l'algorithme et le temps nécessaire aux calculs sur une plateforme de type FieldPoint.

## 5.2 PID groupes

Il a déjà été mentionné que l'implantation robuste était réalisé à l'aide de trois PIDs dans le cadre d'une architecture en cascade. Les paramètres de réglage de ces trois PIDs apparaissent à la page du logiciel copiée à la figure ??.

## 5.3 Optimisation

Une vue schématique de ces trois PID est donnée à la figure ?? . Cette vue va permettre de mieux comprendre l'expliquer des paramètres donnée dans ce qui suit.

## 5.4 Optimisation

Une vue schématique de ces trois PID est donnée à la figure ?? . Cette vue va permettre de mieux comprendre l'expliquer des paramètres donnée dans ce qui suit.

## 5.5 Identification

## 5.6 Optimisation

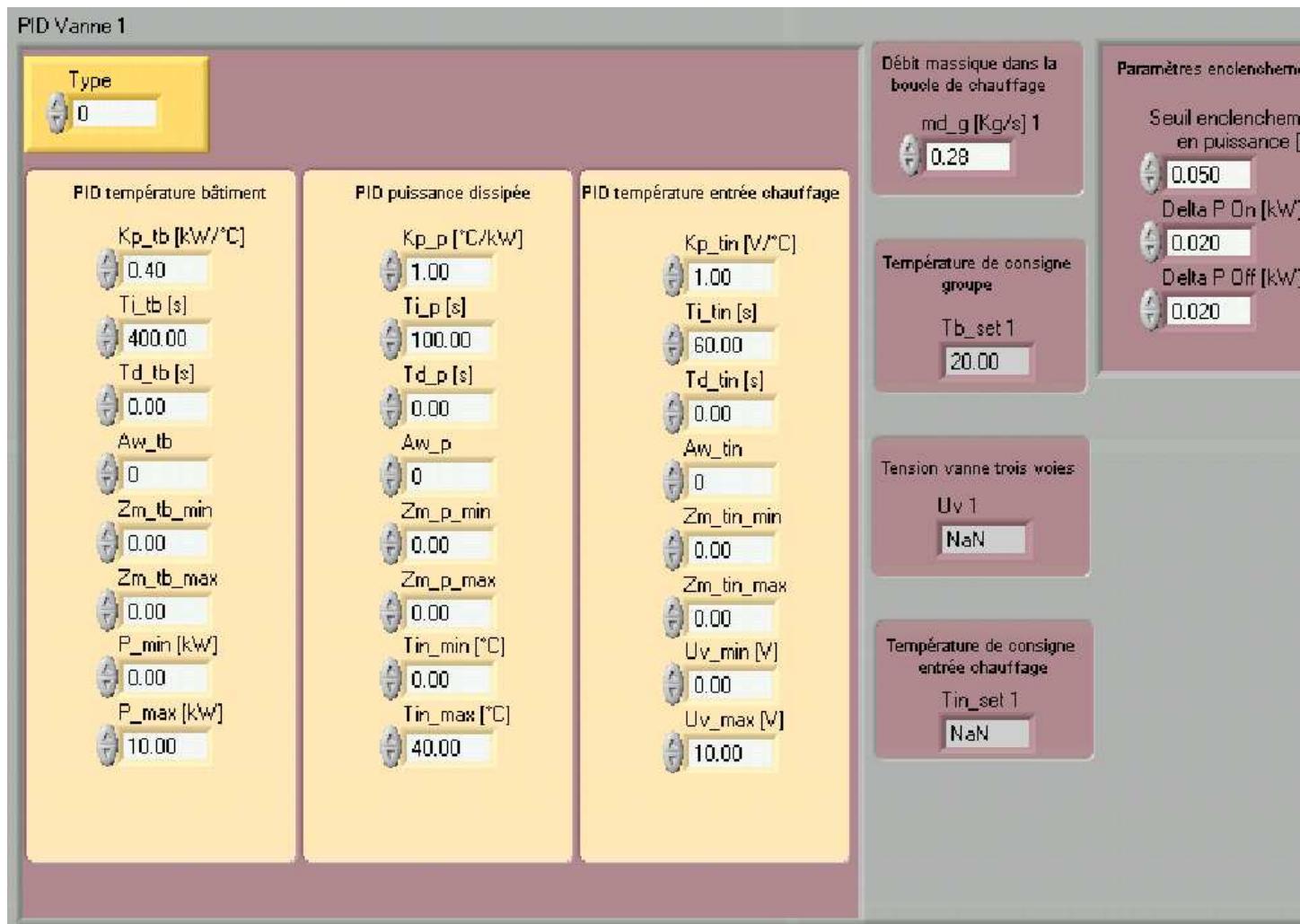


FIG. 5.2 – PID cascade de l'implantation robuste

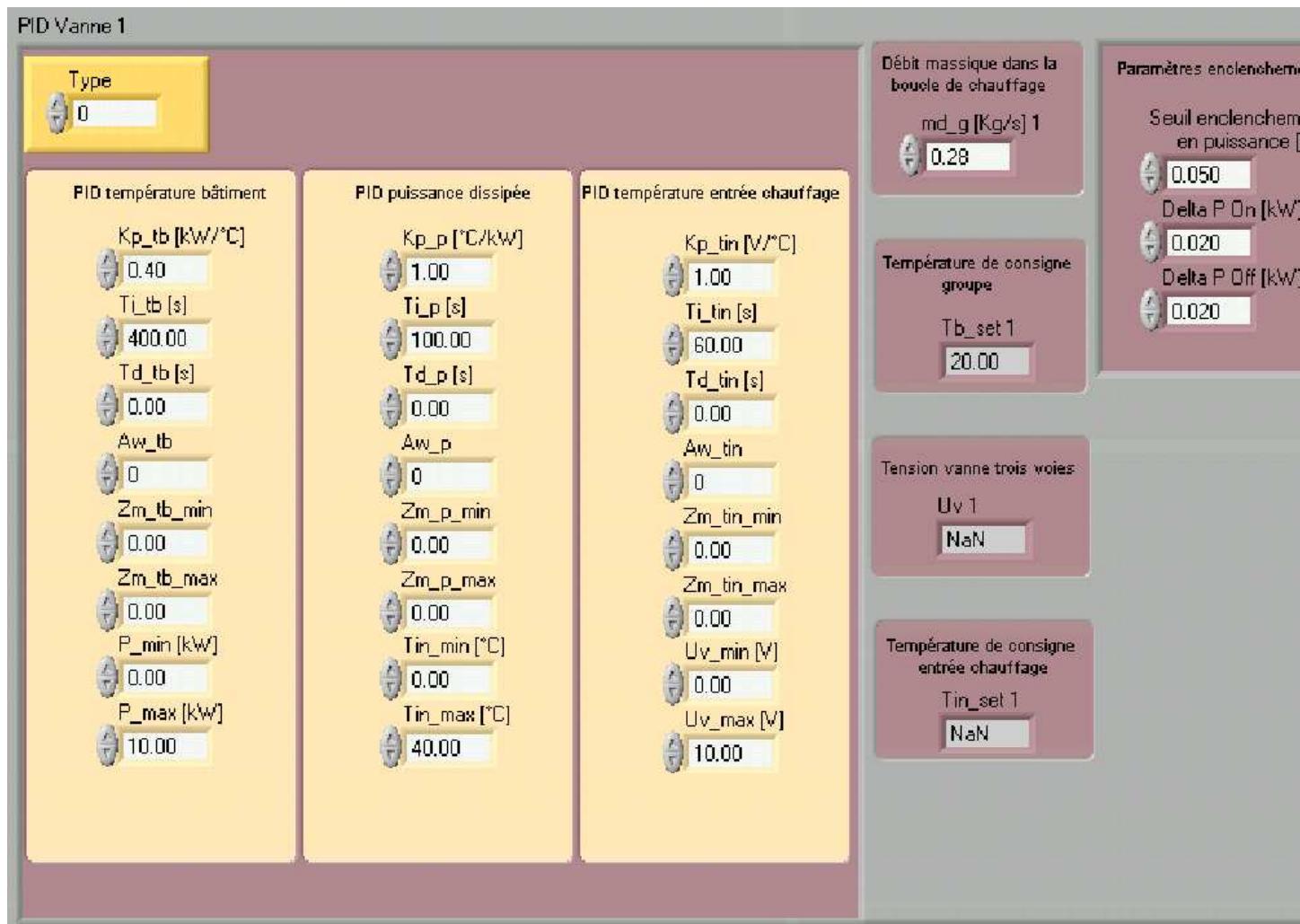


FIG. 5.3 – PID cascade de l'implantation robuste

| Paramètres identifiés du modèle | Valeurs minimales | Valeurs maximales |  |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|--|
| 0.001720                        | 0.000100          | 1.000000          | <i>Influence de la température extérieure sur les murs</i> [kW]      |
| 1.778200                        | 0.100000          | 10.000000         | <i>Coefficient d'échange entre les murs et ambient</i> [kW]          |
| 3.600000                        | 0.500000          | 15.000000         | <i>Influence de l'ensoleillement sur les murs</i> [·]                |
| 17.230000                       | 1.000000          | 20.000000         | <i>Influence de l'ensoleillement sur l'air ambiant</i> [·]           |
| 59987.00000                     | 10000.00000       | 300000.0000       | <i>Inertie des murs</i> [kJ]   |
| 9310.000000                     | 2000.000000       | 100000.0000       | <i>Inertie du milieu ambiant</i> [kJ]                                |
| 0.004430                        | 0.001000          | 1.000000          | <i>Influence de la température extérieure sur l'air ambiant</i> [kW] |

|                                      |          |
|--------------------------------------|----------|
| Fin d'abaissement nocturne [s]       | 21600.00 |
| Début d'abaissement nocturne [s]     | 79200.00 |
| Consigne de température la nuit [°C] | 16.00    |
| Consigne de température le jour [°C] | 20.00    |

FIG. 5.4 – Paramètres de l'identification

# Bibliographie

- [1] T. Prud'homme and D. Gillet. Advanced control strategy for solar domestic hot water systems. *Energy and Building*, 33(5) :463–475, 2001.
- [2] T. Prud'homme and D. Gillet. Advanced control strategy for solar combisystems. In *ISES Solar World Congress*, Göteborg, Sweden, 2003.
- [3] T. Prud'homme and D. Gillet. Rapport final à l'attention de l'office fédéral de l'energie. commande optimale de systèmes solaires combinés. Technical report, Laboratoire d'automatique, EPFL, 2003.