

Optimal control theory applied to a dwelling heating system

Alain Lebru

Groupement d'Etude et de Recherche IRCOSE  
A.F.M.E., ARMINES, C.S.T.B., G.d.F.

C.S.T.B. - Boîte Postale 21  
06562 VALBONNE CEDEX, FRANCE

KEY WORDS :

Bienergy Heating System, Comfort, Minimum Principle Application,  
Optimal Control

Summary :

Optimal control theory has been applied to the design of a controller to be implemented in a dwelling heating system. The system under consideration includes a floor basic heating system completed by additional electric convectors and is located near Paris. A simplified model has been derived, including solar inputs and significant user's comfort variables. The criterion to be minimized is the integral over a finite receding horizon of energetic costs plus a penalty quadratic function taking user's comfort into account. Minimum Principle application leads to the solution of a two point boundary problem which integrates atmospheric disturbances over the horizon. The derived control law yields a series of control actions for the closed-loop system. Detailed simulations of the thermal behavior of the building under optimal control have been performed to assess the efficiency of the method with regard to conventional controllers. The dwelling has been instrumented and the monitoring system implemented at the beginning of 1986, the main target of the measurement-campaign being to assess the on-site applicability of optimal controllers.

Application de la théorie du contrôle optimal à un système de chauffage dans le bâtiment

Alain Lebru

Groupement d'Etude et de Recherche IRCOSE  
A.F.M.E., ARMINES, C.S.T.B., G.d.F.

C.S.T.B. - Boîte Postale 21  
06562 VALBONNE CEDEX, FRANCE

MOTS CLES :

Application du principe du Minimum, Commande Optimale, Confort,  
Système bi-énergie

Sommaire :

La théorie du contrôle optimal a été appliquée à la conception d'un appareil de contrôle destiné à la gestion de l'énergie dans l'habitat. Le système de chauffage considéré est composé d'un plancher chauffant électrique en base et d'un appoint par des convecteurs électriques et est implanté sur un immeuble en Région Parisienne. Un modèle simplifié de l'ensemble bâtiment + système de chauffage a été établi prenant en compte les apports solaires et une caractérisation du confort des occupants. Le critère de minimisation est la somme des coûts énergétiques complétée par une fonction de coût quadratique rattachée au confort. L'application du Principe du Minimum est faite sur un horizon glissant avec comme hypothèse la persistance des perturbations météorologiques (mesure des données instantanées sans prédicteur associé). Les lois de commande élaborent en boucle fermée sur l'état, les actions sur les deux systèmes de chauffage. Des simulations détaillées du comportement thermique du bâtiment sous contrôle optimal ont été effectuées pour évaluer les gains par rapport à des méthodes plus conventionnelles de régulation. Un suivi expérimental a été mis en oeuvre début 1986 sur l'immeuble en question, dont l'objectif essentiel est de tester sur le terrain l'applicabilité d'une régulation sous Commande Optimale.

## 1. Contexte et objectif

Dans le domaine de la régulation des systèmes énergétiques du bâtiment (chauffage, climatisation, eau chaude sanitaire), une nouvelle génération de régulateurs est apparue depuis peu sur le marché ; ils font assez largement appel à la microinformatique et permettent une réduction substantielle des coûts d'exploitation, d'entretien, voire d'installation, tout en assurant une amélioration du confort par rapport aux régulateurs traditionnels.

L'"intelligence" introduite dans cette nouvelle génération de régulateurs qui a d'ores et déjà trouvé son marché peut être poussée encore plus avant en mettant en oeuvre la Théorie de la Commande Optimale dont l'application se développe dans le domaine des process industriels, mais n'a pratiquement pas encore touché le secteur du Bâtiment.

Un groupe de recherche (\*) a été créé en France en 1983 pour évaluer l'intérêt de l'approche Commande Optimale stricto sensu, la démarche retenue consistant à :

- (a) développer les algorithmes nécessaires à la mise en oeuvre d'une telle logique ;
- (b) en évaluer au plan théorique la pertinence sur des projets-pilotes ;
- (c) mettre en oeuvre des suivis expérimentaux sur des opérations en vraie grandeur.

Le présent article s'attache à faire le point sur l'état d'avancement des travaux du groupe de recherche et sur leur développement à court terme.

## 2. Approche préliminaire

Dans une première étape et sur la base d'une première approche des cibles potentielles pour l'application des logiques de Commande Optimale, un cas d'école a été retenu dont les caractéristiques se prêtaient bien au développement d'outils algorithmiques assez généraux (1).

La cas d'école portait sur la gestion d'un système de chauffage électrique mixte en collectif : plancher chauffant de base et convecteurs d'appoint. L'approche théorique du problème a permis d'élaborer deux logiques de Commande Optimale, l'une déterministe, l'autre stochastique et de comparer les bilans en consommations énergétiques, en coûts d'exploitation et en confort à ceux offerts par des principes de régulation plus traditionnels (1).

Les résultats s'étant révélés assez prometteurs, il a été décidé dans une seconde étape d'évaluer au plan théorique un projet-pilote (c'est-à-dire une opération en vraie grandeur) du même type, d'implanter ensuite sur site la commande et de réaliser une campagne de mesure.

(\*) Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie  
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris  
Centre Scientifique et Technique du Bâtiment  
Gaz de France  
Institut National de la Recherche en Informatique et en Automatique

## 3. Projet-Pilote

### 3.1. Description du projet

Il s'agit d'un immeuble situé en Région Parisienne (Saint-Maurice) ; le chauffage de base est fourni collectivement par des câbles chauffants noyés dans les planchers, sa facturation est collective. L'appoint est fourni par des convecteurs électriques et facturé individuellement pour chaque logement. Bien qu'une seule énergie soit utilisée, son coût dépend du système de chauffage et du temps.

### 3.2. Evaluation théorique (2)

L'algorithme de Commande Optimale déterministe destiné au pilotage de l'installation doit pouvoir être implanté sur un matériel informatique d'un coût raisonnable ; pour cela, il faut qu'il puisse se déterminer sur la base d'un modèle simplifié représentant convenablement la dynamique du système. Bien que le problème posé par un immeuble soit fondamentalement du type multizone, nous avons retenu un modèle d'ordre deux pour répondre à la contrainte sus-définie : il a été procédé à l'aggrégation au niveau de l'immeuble du sous-ensemble plancher et du sous-ensemble air cloisons plus enveloppe. On obtient ainsi une représentation du système dont l'état est constitué par la valeur moyenne de la température d'air et la valeur moyenne de la température de dalle.

Le système d'ordre deux ainsi défini peut s'écrire sous une représentation en vecteur d'état :

$$\dot{X} = AX + BU + CW \quad (1)$$

où X, U, W représentent respectivement l'état, les commandes et les perturbations ;

X étant le vecteur dérivée de l'état par rapport au temps ;  
X est défini par les deux températures (air-cloisons-enveloppe et dalle) ;  
U est composé des puissances cumulées des convecteurs en appoint, d'une part, et de la puissance totale injectée dans la dalle de l'immeuble, d'autre part ;  
W regroupe température extérieure et flux solaire récupérable.

L'identification des paramètres des matrices A, B et C a été menée sous contraintes (certaines valeurs de couplage pouvant être appréhendées a priori par un raisonnement physique) et sur la base de résultats de simulation obtenus à partir d'un modèle fin (logiciel CSTBât développé par le C.S.T.B. - Version multizone) ; l'algorithme d'identification retenu est fondé sur une méthode mixte reposant sur la méthode du gradient et celle des moindres carrés (1), (2).

Le critère de minimisation retenu est :

$$J = \int_{t_0}^{t_0+T} \left\{ \frac{1}{2} \mu (X - X_c)^T Q (X - X_c) + c^t U \right\} dt \quad (2)$$

c'est-à-dire que l'on cherche à chaque instant d'échantillonnage  $t_0$  (intervalle d'échantillonnage de l'ordre de 10 minutes) à minimiser sur un horizon glissant T de quelques heures (typiquement une dizaine) un coût purement énergétique  $C^U$  (C étant le vecteur des coûts de l'énergie) et un "coût" d'inconfort défini par une fonction de pénalité quadratique (Q : matrice de pénalité,  $X_c$  : état de confort optimal -  $\mu$  : paramètre arbitraire destiné à ajuster le poids du "coût" d'inconfort).

En raison du caractère distribué des convecteurs dans tout l'espace de l'immeuble, on ne peut envisager sur le terrain de piloter ceux-ci : la commande ne peut donc s'appliquer qu'au pilotage de la dalle, les convecteurs étant actionnés localement et laissés à la discrétion des occupants ; cependant au plan algorithmique, il est important de prendre en compte l'énergie consommée par les convecteurs (qui n'est pas gratuite) pour rechercher le minimum du critère J ; on s'est donc attaché à définir de manière agrégée leur comportement en fonction des variables d'état : en supposant que les points de consigne des thermostats des convecteurs sont distribués sur une certaine plage, on peut définir une loi de programmation de la puissance totale d'appoint en fonction de la température d'air agrégée du bâtiment. Pour la commodité des calculs, une loi de type tangente hyperbolique a été utilisée :

$$U(1) = \frac{1}{2} - UMX(1) \cdot \left( 1 - \text{th} \left( D \cdot (X(1) - X_c(1)) \right) \right) \quad (3)$$

où U(1) est la puissance globale des appoints appelée en moyenne sur le pas de temps d'échantillonnage, X(1) la température d'air agrégée du bâtiment,  $X_c(1)$  la valeur "optimale" de celle-ci au sens du confort, UMX(1) la puissance cumulée de tous les convecteurs de l'immeuble et D la dispersion des points de consigne des convecteurs de l'immeuble.

L'application du principe du minimum et la mise en oeuvre d'un algorithme de gradient adapté autorise alors le calcul à chaque instant de la valeur optimale de la commande sur la dalle.

Le Tab. I donne les résultats de simulation obtenus par une modélisation fine à l'aide du code CSTBât pour un ensemble de trois appartements situés en étage courant et pour une saison de chauffage complète (année météorologique-type de la Région Parisienne) ; les trois lois de régulation-commande envisagées sont :

- une régulation traditionnelle assurant une charge de la dalle proportionnelle à l'écart entre la température de base désirée et la température extérieure ;
- une régulation par intégration des bilans effectuant le cumul du déficit énergétique correspondant à l'effacement des heures de jour et compensation durant les heures creuses ;
- la Commande Optimale déterministe sus-définie.

Les résultats présentés correspondent aux jeux de simulation ayant permis d'obtenir le coût d'exploitation minimal pour un confort satisfaisant ( $PPD \leq 10\%$ ). Les écarts en coûts entre commande et régulation traditionnelle sont faibles et sensiblement inférieurs à ceux obtenus pour le cas d'école (cf. § 2.), d'une typologie semblable à ce projet-pilote : l'écart s'élevait à 13% pour ce cas d'école : deux raisons peuvent être avancées :

- a - base et appoint étaient pilotés sur le cas d'école ;
- b - l'inertie de la dalle du projet-pilote est très importante en regard de la puissance électrique installée dans celle-ci, ce qui n'était pas le cas pour le cas d'école.

### 3.3. Suivi Expérimental

Malgré ces résultats théoriques peu flatteurs pour la Commande Optimale, il a été décidé de mettre en oeuvre un suivi expérimental sur l'immeuble de Saint-Maurice, dont l'objectif essentiel est de vérifier sur le terrain en vraie grandeur l'applicabilité d'une régulation sous Commande Optimale, l'objectif secondaire étant de confirmer ou infirmer au plan des bilans (énergétique et financier) l'évaluation théorique.

La configuration du système implanté sur site est donnée Fig. 1.

La campagne de mesures a débuté début 1986 et devrait se poursuivre tout au long de la saison de chauffage en alternant les trois lois de régulation-commande sur des périodes d'une dizaine de jours.

### 4. Prolongements - Développements à court terme

Une étude de cibles est en cours destinée à sélectionner les créneaux a priori porteurs pour la Commande Optimale ou des régulateurs évolués qui pourraient profiter de certains développements réalisés ou en cours dans le cadre des travaux du Groupement (méthodes d'identification hors ligne et en ligne, prédicteurs météo, élaborations de stratégies sous-optimales à partir de simulations sous Commande Optimale pure). Le secteur tertiaire semble, à ce titre, plus porteur d'espérances que le secteur résidentiel (collectif et a fortiori individuel).

Nous allons donc sélectionner de nouveaux projets-pilotes qui seront évalués au plan théorique dans une première étape par le biais d'une analyse-système, puis feront l'objet d'un suivi expérimental dans la mesure où les résultats théoriques se révéleront intéressants.

Enfin, des contacts sont et seront pris avec des industriels de manière à les intéresser aux résultats de recherche du Groupement et à les inciter à en tirer des développements industriels.

### REFERENCES

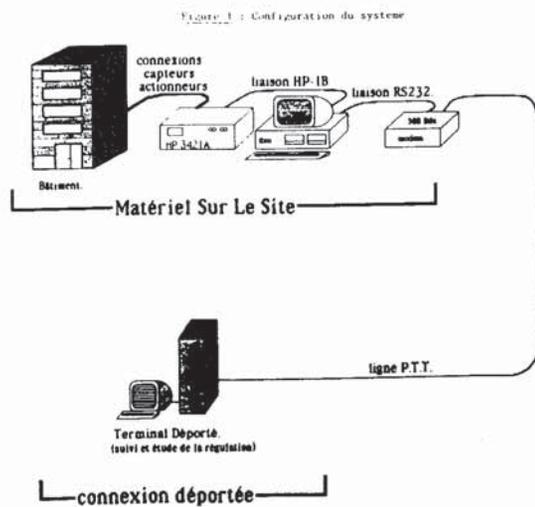
1. IRCOSE, "Rapport d'activités 1984", Rapport de synthèse des membres du Groupement d'Etude et de Recherche IRCOSE, (novembre 1984)
2. IRCOSE, "Rapport d'activités 1985", Rapport de synthèse des membres du Groupement d'Etude et de Recherche IRCOSE, (décembre 1985)

TABLEAU I. Résultats de simulation pour le projet-pilote

Lois de commande	EBASE kWh	ETOT kWh	EBASE E101	CBASE 1F	CTOT 1F	CBASE CTOT	CUNI F/kWh	TINT °C	TRS °C	PMV	PPD %
Régulation sur température extérieure	16,67	17009	9,7	-0,27	-6,77	862	0,261	19,5	19,8	-0,3	8,9
Intégration des bilans	14,986	16,176	9,17	0,27	4,365	882	0,270	18,8	19,0	-0,4	9,1
Commande optimale déterministe	15,21	16,500	9,17	1,924	4,89	872	0,270	19,0	19,2	-0,4	8,8

EDOT : Consommation électrique totale (kWh)  
 EBASE : Consommation électrique de la base (kWh)  
 CTOT : Coût d'exploitation total hors abonnement (Francs)  
 CBASE : Coût d'exploitation de la base hors abonnement (Francs)  
 CUNI : Coût unitaire, base + appoint confondus (Francs/kWh)  
 TINT : Température d'air (°C)  
 TRS : Température résultante sèche (°C)  
 PMV : Predicted Mean Vote  
 PPD : Predicted Percentage of Dissatisfied (%)

Tableau I : Résultats de simulation pour le projet-pilote



Le calculateur :

- IBM-PC (unité centrale, clavier, terminal)
- Coprocesseur mathématique 8087
- Carte d'interface IEEE-488 <-> PC
- Carte Quadram (Super Quadboard) :  
Port série, port parallèle, horloge calendrier, extension mémoire (384 Koctets)

La centrale d'acquisition :

- HP 3421A avec :  
2 modules multiplexeurs 10 voies  
1 module d'E/S numérique 8 bits  
1 interface HP1B

Le système d'exploitation : Unix-like sur PC

Figure 1 : Configuration du système

## The Smart House

David J. MacFadyen

NAHB Research Foundation, Inc.  
 627 Southlawn Lane  
 Rockville, MD 20850, USA

### KEY WORDS

Cooperative R&D, Electrical Safety, Home Function Control, Integrated Energy/Communication Wiring, New Product Opportunities

### ABSTRACT

The Smart House is a new approach to power and communications systems for buildings. It is a basic rethinking and redesign of power and communications systems within an integrated framework. The developers of the Smart House feel that this technology is the most significant innovation in power and communications systems in at least sixty years. The Smart House concept encompasses distribution of power, distribution of telephone and other communications and entertainment services, and intelligent control. Power circuits are centrally controlled and are energized only where the attached appliance is requesting power. A complete new line of compatible appliances is planned. The Smart House Venture was founded by NAHB Research Foundation, Inc., and now includes over thirty-five leading industrial firms manufacturing basic electrical wiring and devices, appliances, and electronic subsystems. Initial marketing of the complete system will begin in 1988.