

## Stratégies de contrôle pour la gestion énergétique d'un bâtiment

J. Eynard, B. Paris, S. Grieu & G. François

Mardi 17 mars 2009, 14h55-15h20, JD6

Commande des systèmes complexes et hybrides I

## Sommaire

- Introduction
- Modélisation d'un prototype de bâtiment
- Stratégies de contrôle
- Contrôle basé sur un régulateur PI-FF
- Contrôle basé sur un régulateur MPC-PI
- Résultats d'optimisation
- Conclusion

Introduction

Modélisation

Stratégies de  
contrôle

Régulateur  
PI-FF

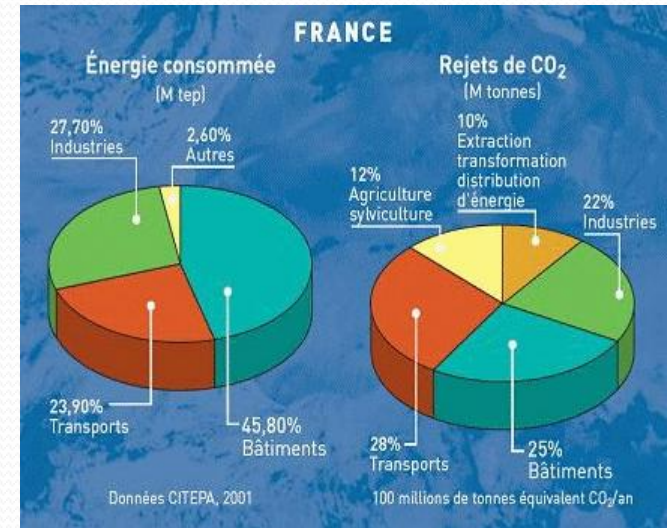
Régulateur  
MPC-PI

Résultats

Conclusion

## Introduction

- Bâtiments et énergie
  - 46% de l'énergie totale consommée en France
  - 25% des émissions de gaz à effet de serre
  - Nécessité d'économiser les énergies fossiles
    - → Développement de stratégies de contrôle plus efficaces



# JD-JN-MACS 2009

## Modélisation d'un prototype de bâtiment

Introduction

Modélisation

Stratégies de contrôle

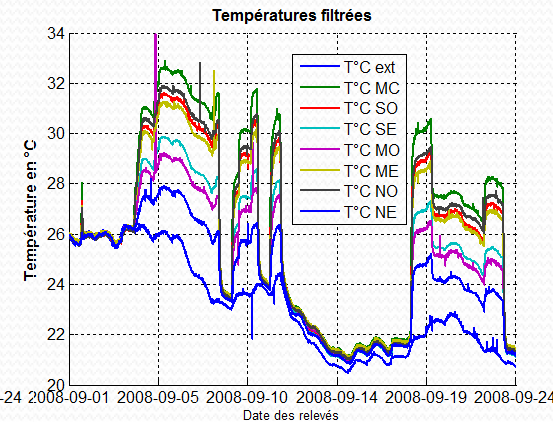
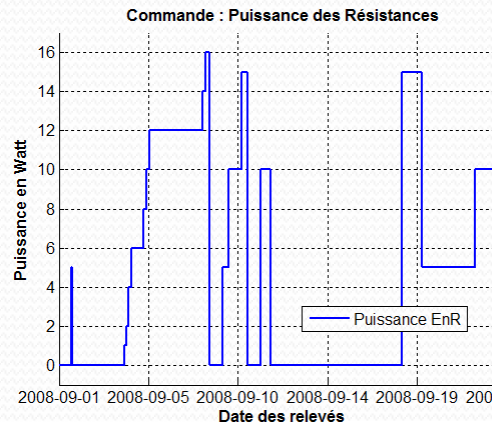
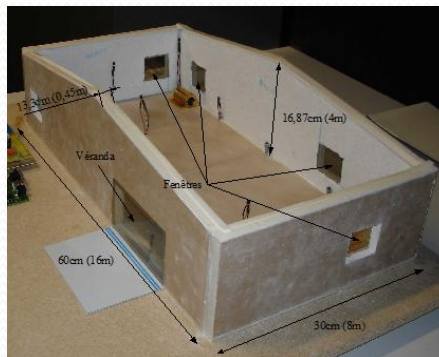
Régulateur PI-FF

Régulateur MPC-PI

Résultats

Conclusion

- Fabrication d'un prototype de bâtiment
  - Echelle : 1/24
  - Matériaux: Placoplatre, carrelage, polystyrène et polyane
  - Instrumentation complète et facile à installer
    - Développement d'un système de monitoring (ARM9, acquisition de données et contrôle)
  - 2 sources d'énergie utilisables pour le chauffage :
    - Energie renouvelable (source principale)
    - Energie fossile (source d'appoint)



## Modélisation d'un prototype de bâtiment

Introduction

Modélisation

Stratégies de contrôle

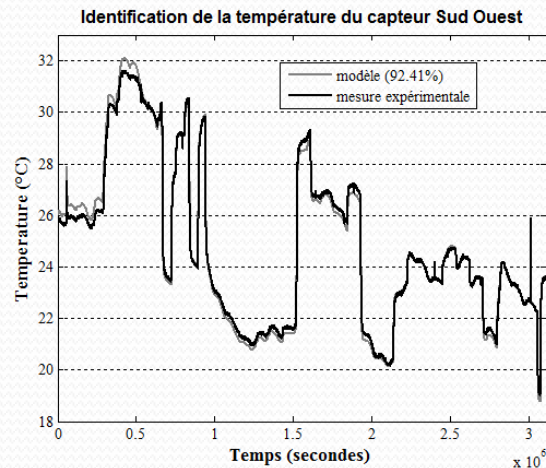
Régulateur PI-FF

Régulateur MPC-PI

Résultats

Conclusion

- Modélisation et identification
  - Choix d'une structure générale d'équation
  - Formalisation du problème d'identification (minimisation de l'erreur de prédiction)
  - Ajustement de courbes entre les données expérimentales et celles simulées par le modèle
  - ➔ Résultats cohérents : 90% de régression en moyenne



$$T_i(k+1) = \alpha_i T_i(k) + \beta_{1i} u_1^{\rho_{1i}}(k) + \beta_{2i} u_2^{\rho_{2i}}(k) + \gamma_i T_{out}(k)$$

$$\min_{\alpha, \beta_1, \beta_2, \rho_1, \rho_2, \gamma} \left[ J = \sum_{k=1}^N (T_{mes}(k) - T_{mod}(k))^2 \right]$$

$$s.a. \begin{cases} 7 \text{ équations de température} \\ -1 < \alpha < 1 \\ -10 < \beta_1 < 10 \\ -10 < \beta_2 < 10 \\ 0 < \rho_1 < 1 \\ 0 < \rho_2 < 1 \\ -10 < \gamma < 10 \end{cases}$$

$$fit = 100 \times \left( 1 - \frac{\|T_{mod} - T_{mes}\|}{\|T_{mes} - \langle T_{mes} \rangle\|} \right)$$

Variables modélisées	Regression [%]
T°C Sud Est	93.12
T°C Sud Ouest	92.41
T°C Nord Est	92.76
T°C Nord Ouest	92.59
T°C milieu Est	91.40
T°C milieu Ouest	88.07
T°C milieu plafond	92.00

Introduction

Modélisation

Stratégies de  
contrôle

Régulateur  
PI-FF

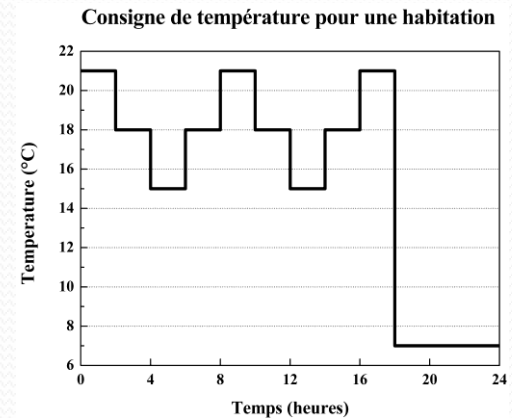
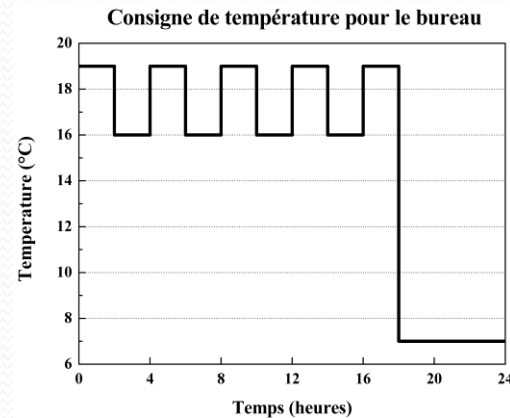
Régulateur  
MPC-PI

Résultats

Conclusion

## Stratégies de contrôle

- Spécifications des scénarii de consigne
  - Basés sur les scénarii d'occupation et les consignes de température (règles du Th-C-E 2005)
    - **Bureau** : temps d'occupation moyen et niveau de température moyen
    - **Habitation** : temps d'occupation long et haut niveau de température
    - 8 jours de consignes de température réduits sur 24h pour obtenir un ratio représentatif d'un bâtiment réel entre phases transitoires et stationnaires





Introduction

Modélisation

Stratégies de  
contrôle

Régulateur  
PI -FF

Régulateur  
MPC-PI

Résultats

Conclusion

## Stratégies de contrôle

- Spécifications des contraintes et des critères
  - Contraintes sur la puissance de chauffe
  - Critère de suivi de consigne
  - Critère de consommation d'énergie fossile
  - Critère de performance global
  - Objectifs
    - Maximiser le critère de performance
    - Respecter l'ensemble des contraintes

$$\begin{cases} U_{EnR} < U_{EnR\_max} & \text{tq } U_{EnR\_max} = 80 \text{ W} \\ U_{EnF} < U_{EnF\_max} & \text{tq } U_{EnF\_max} = 34 \text{ W} \\ U_{max} = U_{EnR\_max} + U_{EnF\_max} = 114 \text{ W} \end{cases}$$

$$I_C[\%] = 100 \times \left( 1 - \frac{\|T_{cons} - T_{int\_moy}\|}{\|T_{cons} - \langle T_{cons} \rangle\|} \right)$$

$$I_E[\%] = 100 \times \frac{E_{EnF}}{E_{Tot}}$$

$$I_P[\%] = (I_C - I_E)$$

Introduction

Modélisation

Stratégies de contrôle

Régulateur PI-FF

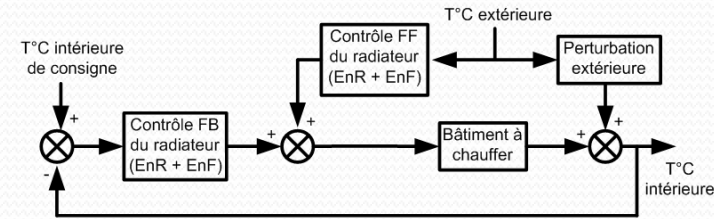
Régulateur MPC-PI

Résultats

Conclusion

## Régulateur PI-FF

- Un régulateur classique
- Répartition de la puissance de chauffe
- Régulateur PI-FF optimal
  - Optimisation des gains du PI
    - Maximisation du critère de performance
    - Respect des contraintes
      - Modèle du bâtiment
      - Équations du PI-FF
      - Contraintes sur la puissance



$$U_{EnR}(k) = u(k) \text{ et } U_{EnF}(k) = 0$$

$$\text{si } u(k) \geq U_{EnR\_max}$$

$$\text{alors } U_{EnR}(k) = U_{EnR\_max}$$

$$U_{EnF}(k) = u(k) - U_{EnR}(k)$$

$$\text{sinon si } U_{EnF}(k) \geq U_{EnF\_max}$$

$$\text{alors } U_{EnF}(k) = U_{EnF\_max}$$

$$\text{sinon si } u(k) \leq 0$$

$$\text{alors } U_{EnR}(k) = 0$$

$$U_{EnF}(k) = 0$$

fin

$$\max_{K_p, K_i} (I_p = I_C - I_E)$$

sous

contraintes

$$\begin{cases} \text{Equations du modèle thermique} \\ \text{Equations du régulateur PI-FF} \\ 200 < K_p < 0 \\ 1 < K_i < 0 \end{cases}$$



Introduction

Modélisation

Stratégies de contrôle

Régulateur PI-FF

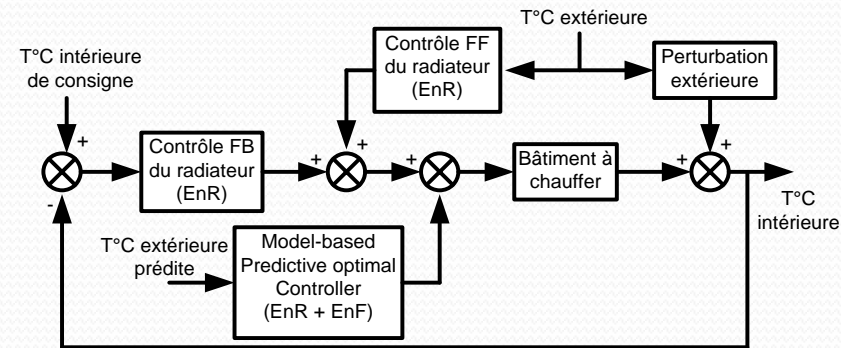
Régulateur MPC-PI

Résultats

Conclusion

## Régulateur MPC-PI

- Model Predictive Control
- Structure du contrôle simultané MPC-PI
- Optimal MPC-PI contrôleur
  - Optimisation du coefficient de pondération de la MPC
    - Maximisation du critère de performance
    - Respect des contraintes
      - Modèle du bâtiment
      - Équations du PI
      - Contraintes sur la puissance de chauffe



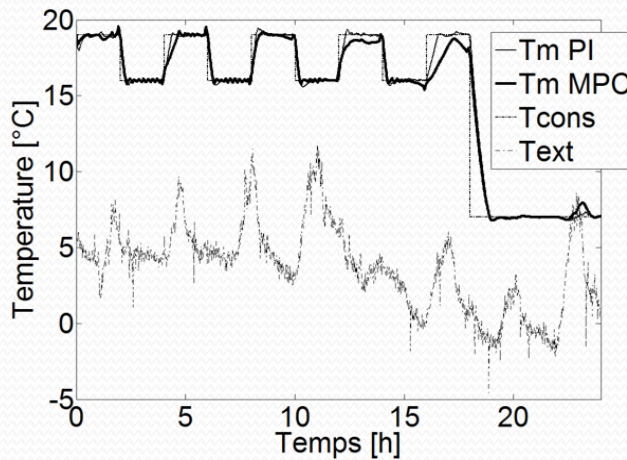
$$\min_{\Delta U(k/k), \dots, \Delta U(k+m-1/k)} \sum_{i=0}^{p-1} \left( \left| T_{m(k+i/k)} - T_{cons(k+i)} \right|^2 + \left| \omega \cdot U_{EnF(k+i/k)} \right|^2 \right)$$

sous  
contraintes

$$\begin{cases} \text{Equations du modèle thermique} \\ \text{Equation du régulateur PI-FF} \\ U_{EnR \min} \leq U_{EnR(k+i/k)} \leq U_{EnR \max} \\ U_{EnF \min} \leq U_{EnF(k+i/k)} \leq U_{EnF \max} \\ \Delta U(k+h) = 0, \quad h = \{m, \dots, p-1\} \end{cases}$$

## Résultats d'optimisation

- MPC-PI: suivi de consigne semblable mais 40% d'économie d'énergie fossile
- Principaux défauts de la MPC
  - Nécessite un modèle linéaire interne
  - Complexité d'implémentation
  - Nécessite un processeur puissant pour utiliser un algorithme d'optimisation



	PI-FF		Mixte MPC-PI-FF		
	$K_p$	$K_I$	$K_p$	$K_I$	$\Omega$
Bureau	100	0.09553	100	0.09553	0.050
Logement	100	0.1171	100	0.1171	0.031

		EnR	EnF	$E_{TOT}$	$I_E$	$I_C$	$I_p$
Bureau	PI	7402,5	<b>628,29</b>	8030,8	<b>7,82</b>	72,0	<b>64,1</b>
	MPC-PI	7339,2	<b>381,16</b>	7720,4	<b>4,94</b>	73,6	<b>68,7</b>
Logement	PI	7460,5	<b>886,86</b>	8347,3	<b>10,6</b>	69,8	<b>59,2</b>
	MPC-PI	7382,7	<b>530,28</b>	7913,0	<b>6,70</b>	71,2	<b>64,5</b>

Introduction

Modélisation

Stratégies de  
contrôle

Régulateur  
PI-FF

Régulateur  
MPC-PI

Résultats

Conclusion

## Conclusion

- Fabrication d'un prototype de bâtiment et d'une centrale de monitoring
- Détermination d'un modèle thermique de la maquette de bâtiment
- Définition de critères pour la stratégie de contrôle
- Comparaison des performances entre deux types de contrôleurs (PI-FF et MPC-PI)
- Résultats : 40% d'économie d'énergie fossile
- Limitations de la MPC (puissance de calcul, optimiseur)

## Stratégies de contrôle pour la gestion énergétique d'un bâtiment

- Merci de votre attention
- N'hésitez pas à poser vos questions