

Commande prédictive distribuée appliquée à la régulation thermique des bâtiments

Daniel MOROŞAN

Equipe ASH - IETR



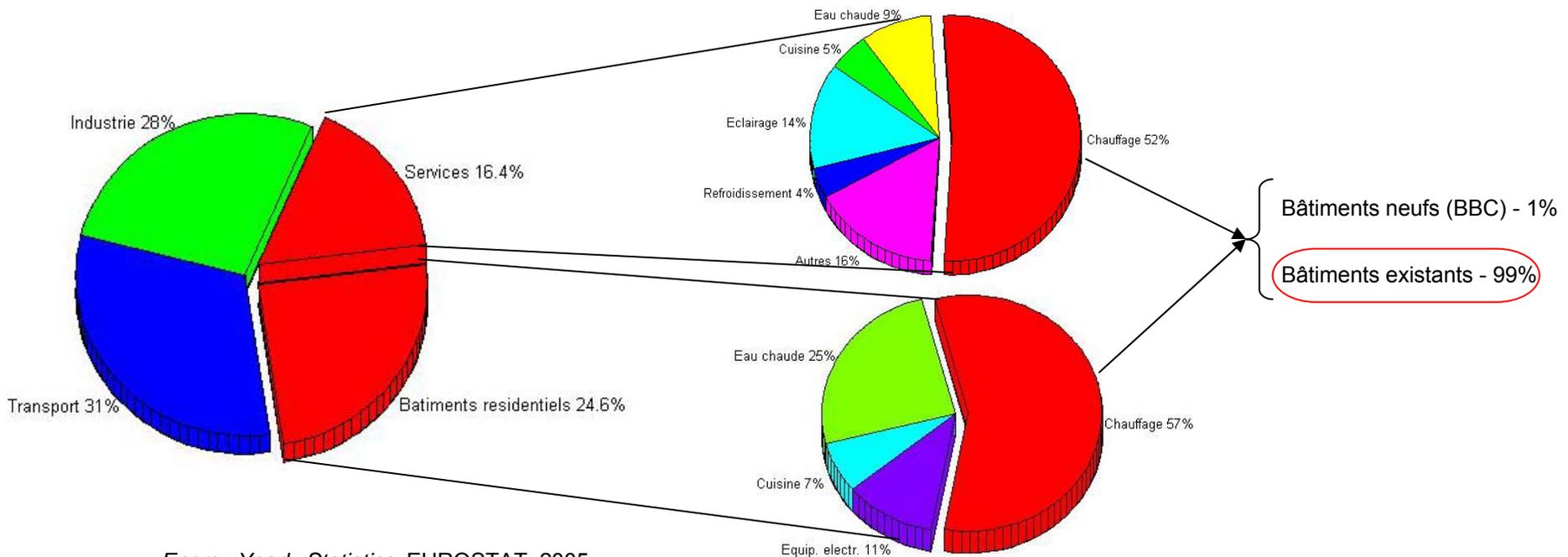
Romain BOURDAIS
Jean BUISSON
Didier DUMUR

Plan

- Positionnement
- Régulation pour une pièce
 - Commande prédictive à critère dynamique
- Généralisation multi-zone
 - Décentralisé
 - Centralisé
 - Distribué
- Conclusions

Contextes économique et social

Répartition de la consommation d'énergie

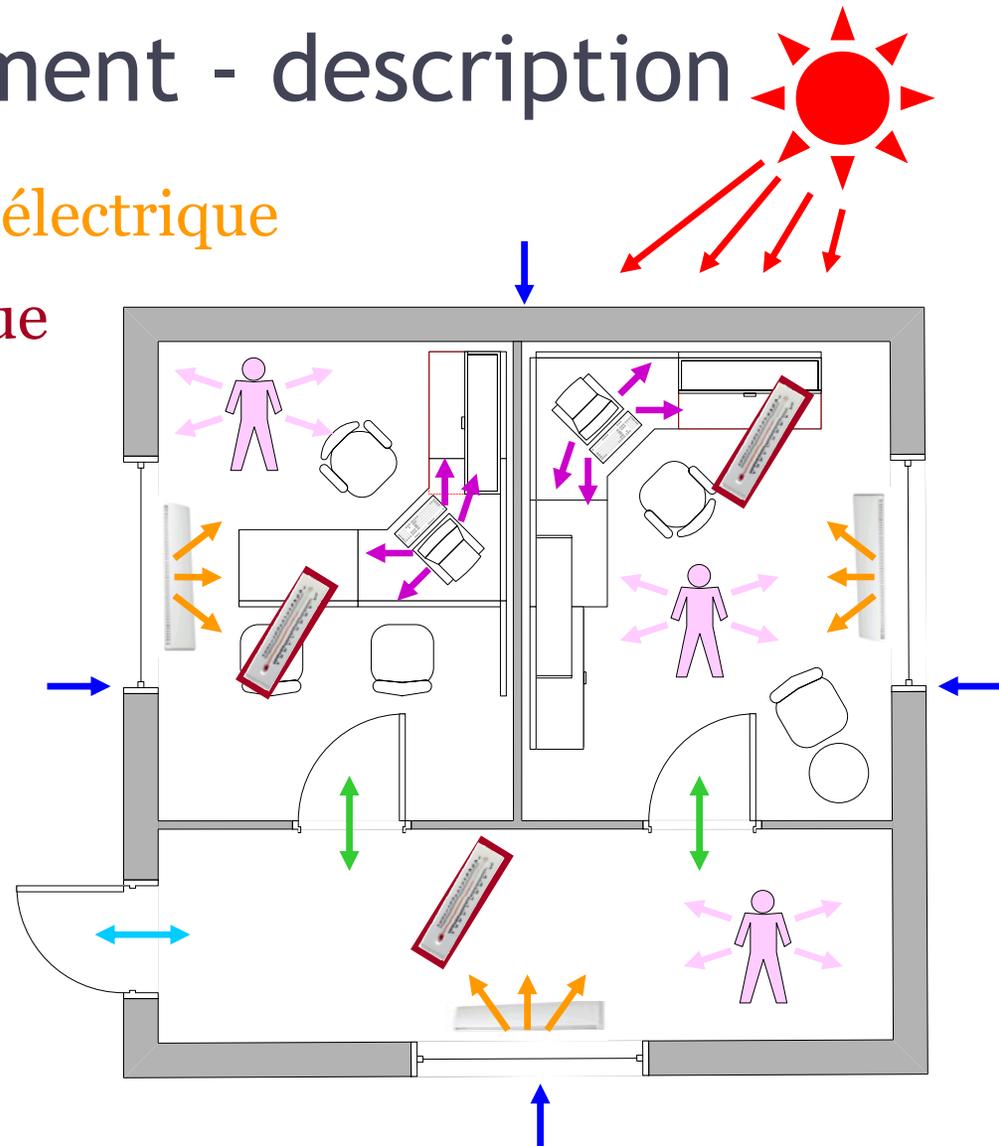


Energy Yearly Statistics, EUROSTAT, 2005

Towards Energy Efficient Buildings in Europe, EuroACE, 2004

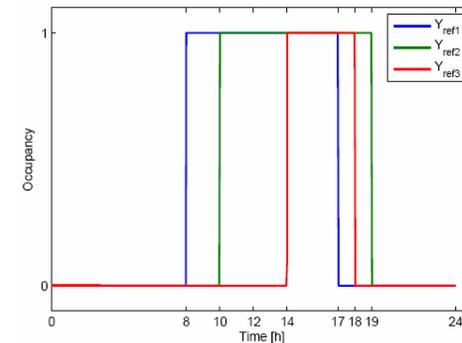
Chauffage du bâtiment - description

- Actionneur : **convecteur électrique**
- Capteur : **sonde thermique**
- Perturbations :
 - **Température extérieure**
 - **Radiation solaire**
 - **Apport des occupants**
 - **Apport des autres équipements électriques**
 - ~~Echange entre pièces~~
 - ~~Echange intérieur-extérieur~~



Objectif du contrôle

- Deux objectifs opposés :
 - Minimisation de l'énergie consommée
 - Maximiser le confort thermique
- Idées :
 - Utilisation de façon intermittente des pièces
 - Exploiter l'inertie thermique des immeubles
- Profils d'occupation :
 - Possibilité de les connaître en avance
 - Gestion de l'absence de consigne pendant les périodes d'inoccupation



Contrôle existant

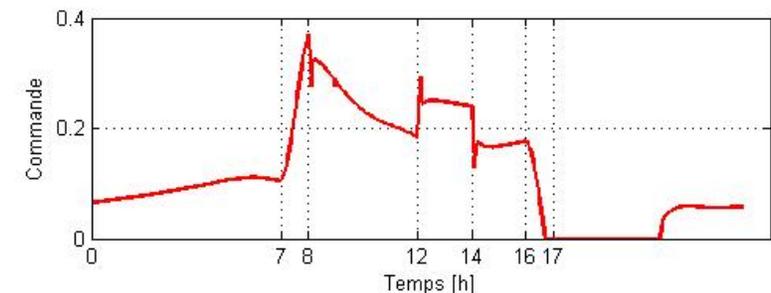
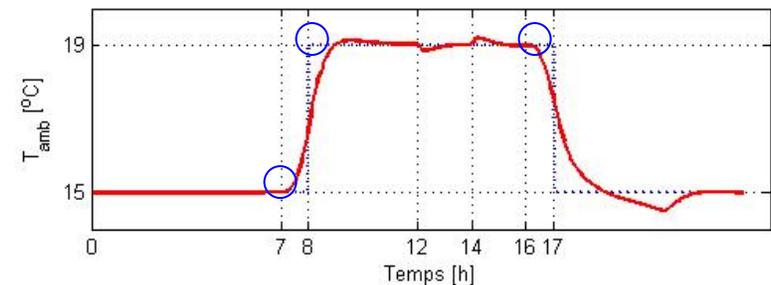
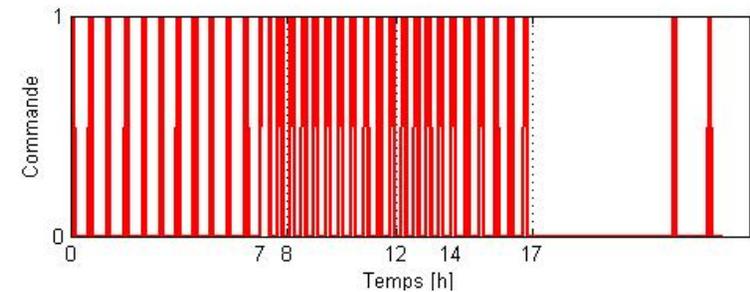
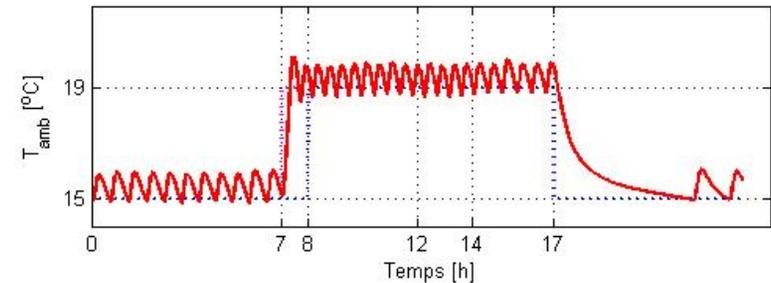
- TOR, P ou PI anticipé
 - Comment calculer le moment optimal pour déclencher le chauffage ?

• “Contrôle horaire”

- Horaires d’occupation connus à l’avance

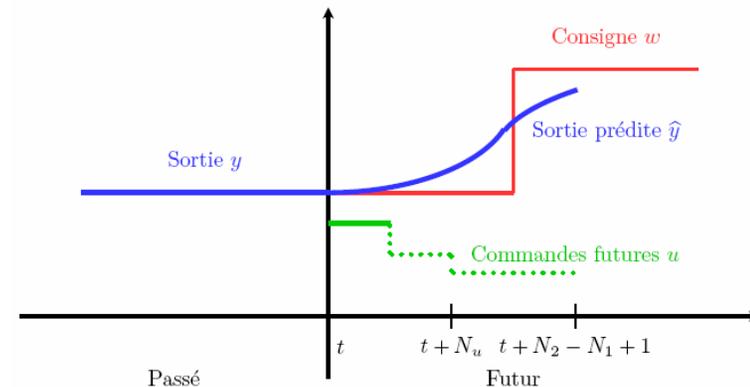
• Contrôle prédictif

- Profils d’occupation
- Solution optimale
- Prise en compte des contraintes



Principes de la commande prédictive

- Effet anticipatif : la connaissance sur l'évolution future de la trajectoire à suivre
 - Prédiction du comportement futur du système : modèle
- Optimalité : minimisation d'un critère à horizon fini
 - Prise en compte des contraintes
- Horizon fuyant : applique au système la première commande de la séquence optimisée en cours



Commande prédictive modifiée

- Le critère initial :
$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j)[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u^2(t+j-1)$$

- Les modifications :**
$$J_t = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta_t(j)[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_2-N_1+1} u^2(t+j-1)$$

- Motivation / objectifs :

- Température de confort pendant l'occupation

$$\delta_t(k) = \begin{cases} 1, & \text{pour } t+k \in \text{Occupation} \\ 0, & \text{pour } t+k \in \text{Inoccupation} \end{cases}$$

- Optimisation des transitions inoccupation-occupation supposant que l'horaire est connu

- Minimisation de la dépense énergétique

$$\sum_{j=1}^{N_u} u^2(t+j-1) + (N_2 - N_u)u^2(t+N_u-1)$$

Conséquences des modifications

- La forme matricielle de la fonction de coût :

$$\mathbf{J}_t = [\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{w}]^T \mathbf{D}_t [\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{w}] + \lambda \mathbf{u}^T \mathbf{L} \mathbf{u}$$

- En remplaçant $\hat{\mathbf{y}}$ par :

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{G} \mathbf{u} + \mathbf{F} \mathbf{y}(t) + \mathbf{H} \mathbf{u}(t - 1)$$

- La solution optimale est :

$$u_{opt}(t) = \mathbf{n}_t^1 (\mathbf{w} - \mathbf{F} \mathbf{y}(t) - \mathbf{H} \mathbf{u}(t - 1))$$

avec \mathbf{n}_t^1 la première ligne de $(\mathbf{G}^T \mathbf{D}_t \mathbf{G} + \lambda \mathbf{L})^{-1} \mathbf{G}^T \mathbf{D}_t$

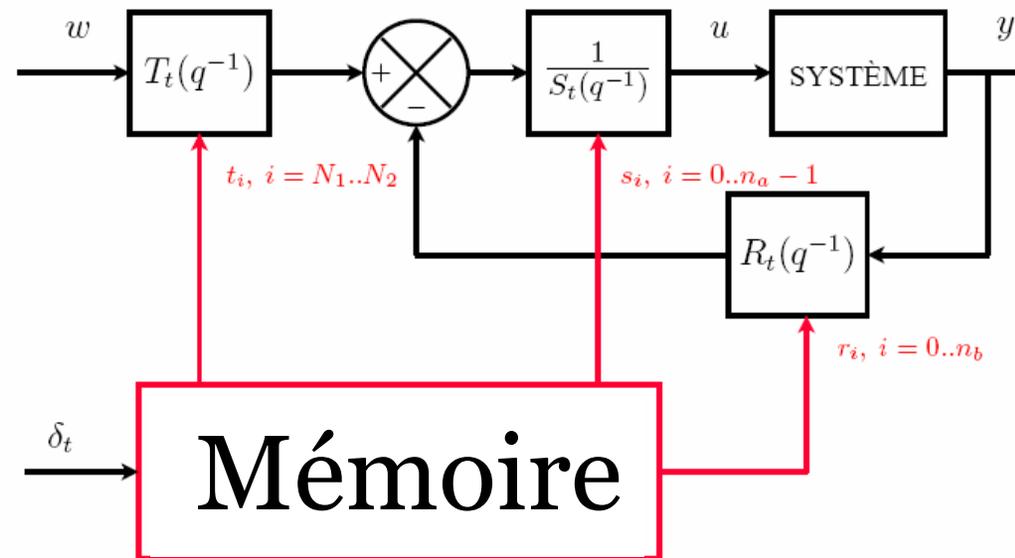
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & 1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & N_2 - N_u + 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \delta_t(N_1) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \delta_t(N_1 + 1) & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \delta_t(N_2) \end{bmatrix}$$

Mise en œuvre

• Solution analytique
de la minimisation
Contrôleur RST

• Critère dynamique
RST dynamique



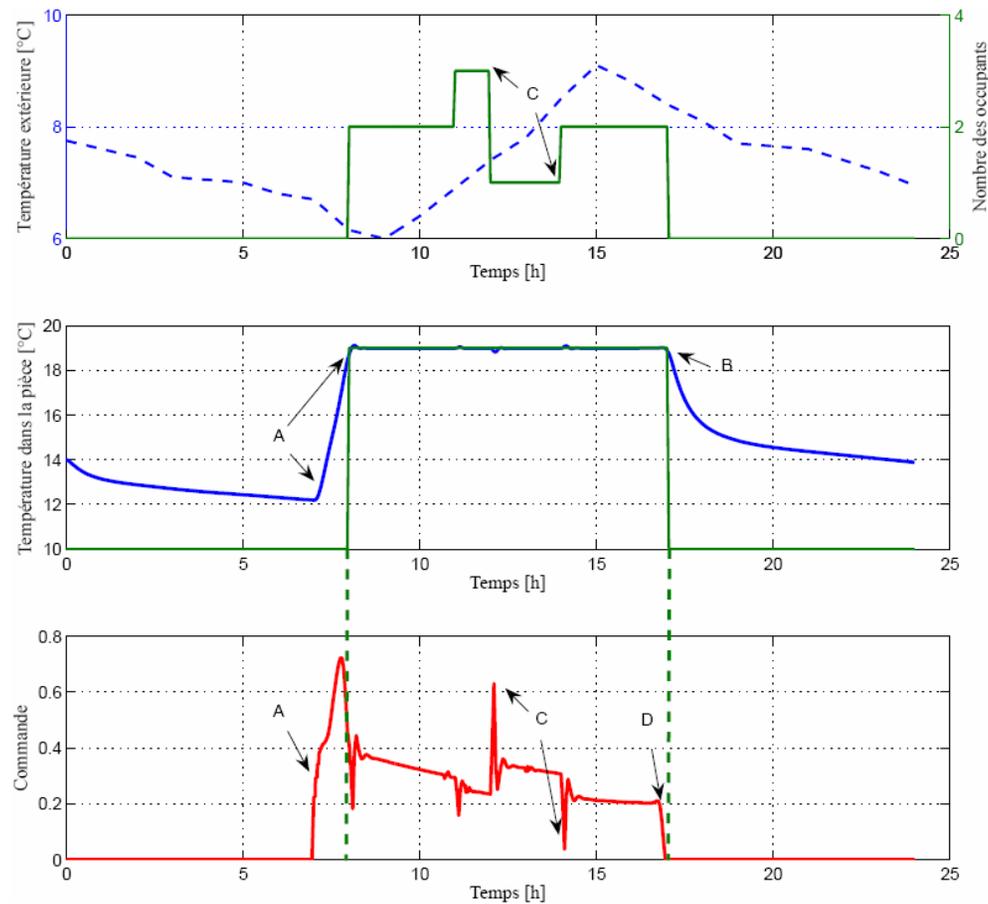
- Capacité de mémoire équivalente :

$$M = 2^{N_2 - N_1 + 1} (N_2 - N_1 + n_a + n_b + 2) s_{elem}$$

$$M' = 2(N_2 - N_1 + 2)(N_2 - N_1 + n_a + n_b + 2) s_{elem}$$

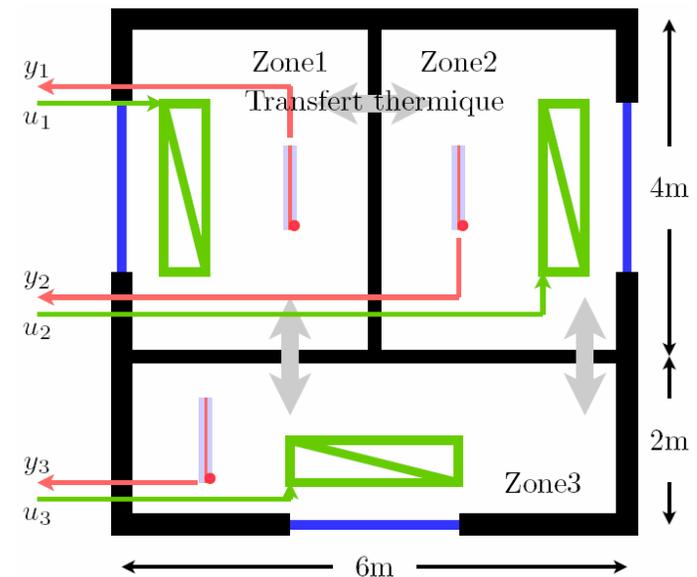
$$\begin{cases} N_1 = 1 \\ N_2 = 20 \\ n_a = n_b = 2 \\ s_{elem} = 8B \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M = 200MB \\ M' = 8.2KB \end{cases}$$

MPC modifié - simulation



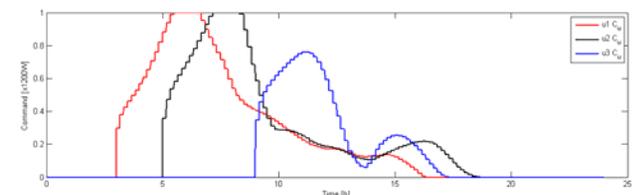
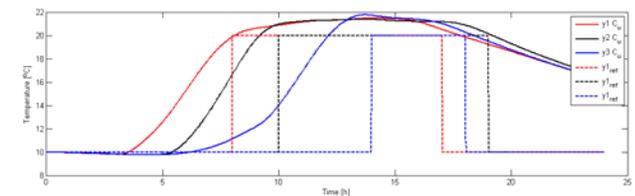
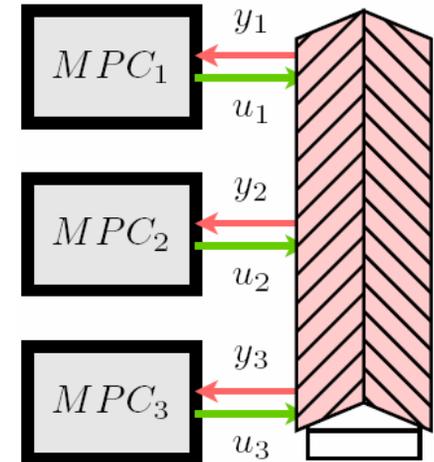
Généralisation multi-zone

- Couplage thermique important entre les pièces
- Quelles solutions ?



Généralisation multi-zone

- Solution de contrôle :
 - Décentralisé
- Couplage thermique pas modélisé
- Période de prédiction large – contrôleurs lents
- **Dépassement de consigne**



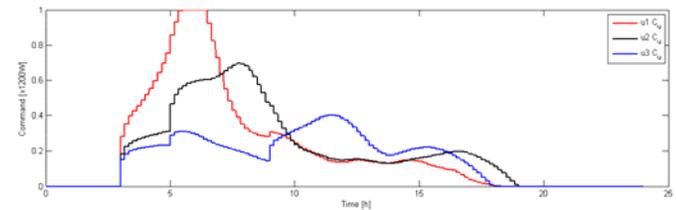
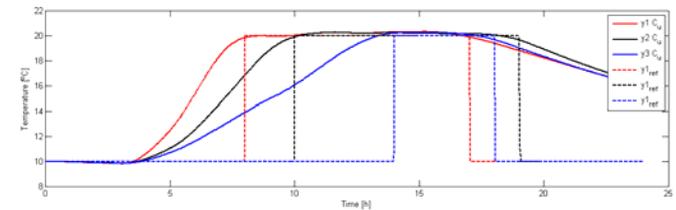
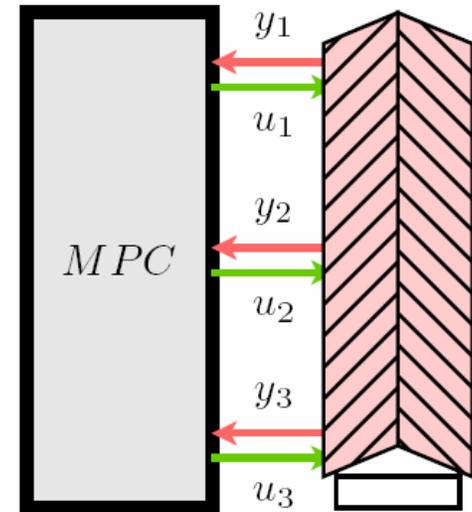
Généralisation multi-zone

- Solution de contrôle :

- Centralisé

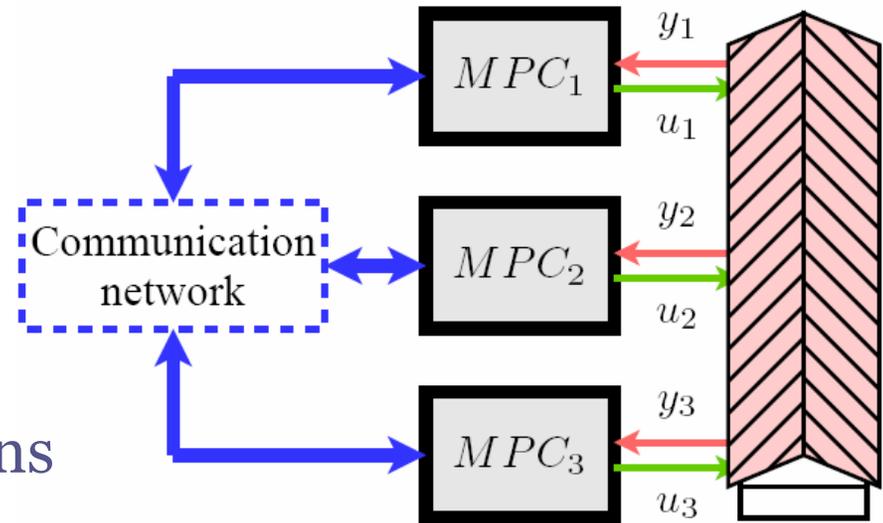
- Optimalité (couplages modélisés)

- Complexité - Effort de calcul



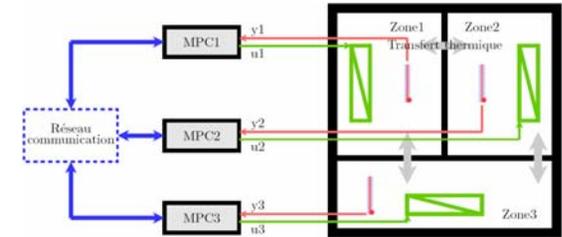
Généralisation multi-zone

- Solution de contrôle :
 - Distribué
 - Echange d'informations entre les contrôleurs.
 - Plusieurs discussions



-> convergence vers un consensus

MPC distribué



- Problème d'optimisation : $\min_{\mathbf{u}} J(k, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{x}, \mathbf{c})$

$$\mathbf{u} = [u_1 \quad \cdots \quad u_n] \quad \mathbf{x} = [x_1 \quad \cdots \quad x_n] \quad \mathbf{w} = [w_1 \quad \cdots \quad w_n] \quad \mathbf{c} = [c_1 \quad \cdots \quad c_n]$$

- Critère décomposable : $J(k, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{x}, \mathbf{c}) = \sum_{i=1}^n J_i(k, u_i, w_i, x_i, \mathbf{c})$

$$\min_{u_i} J_i(k, u_i, w_i, x_i, \mathbf{c})$$

- Seule la variable de couplage est échangée
- Convergence vers une solution Nash

Décentralisé

$$\min_{\mathbf{u}} J(k, \mathbf{u}, \mathbf{w}, \mathbf{x}, \mathbf{c})$$

- On échange toutes les variables
- Convergence vers l'optimum global

Centralisé

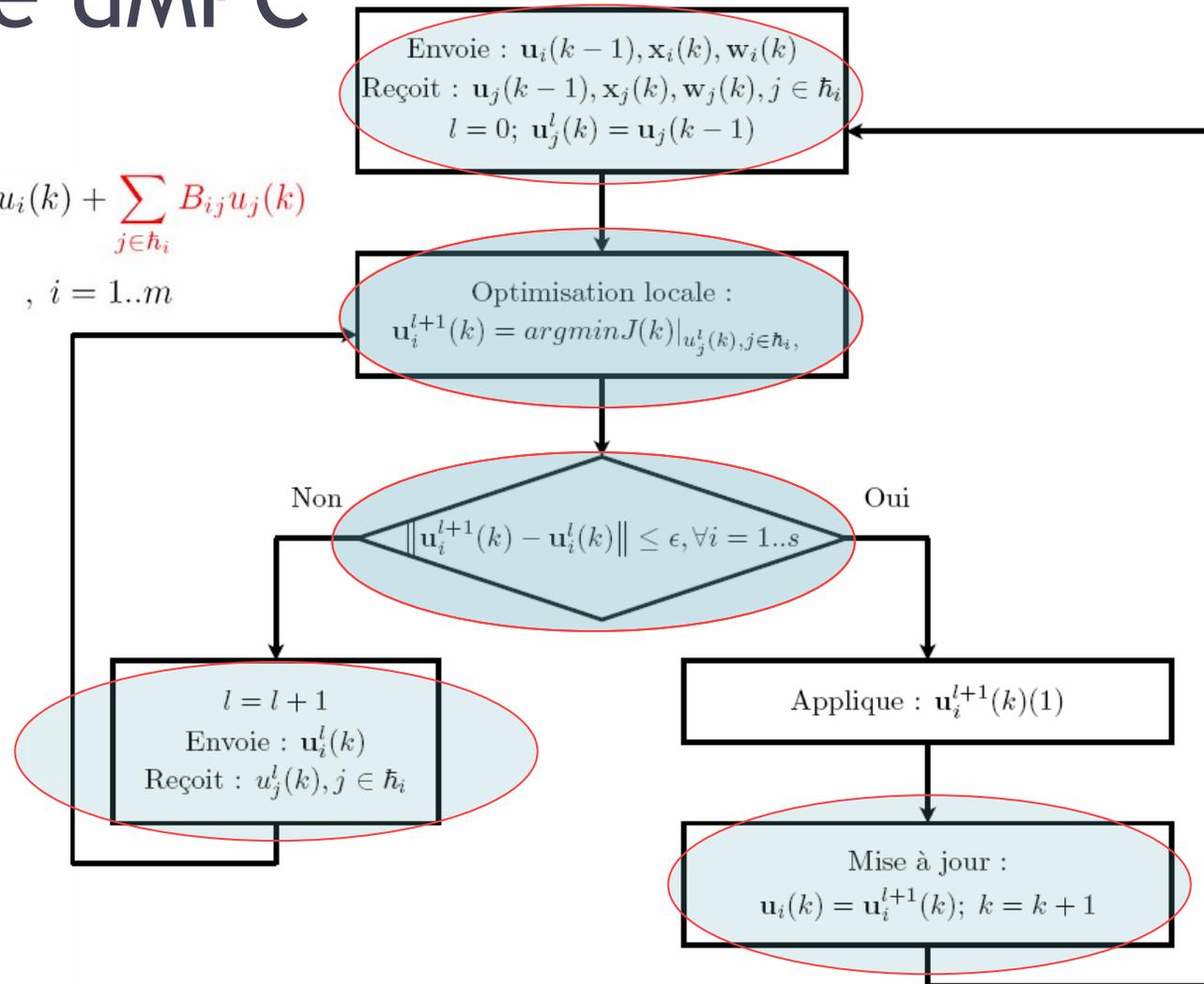
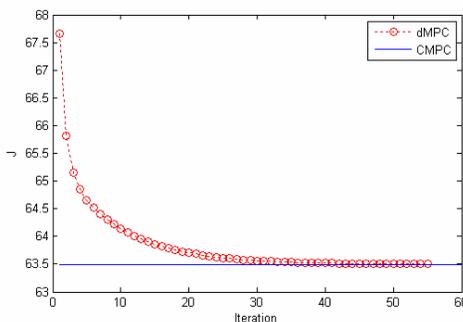
Optimalité

Algorithme dMPC

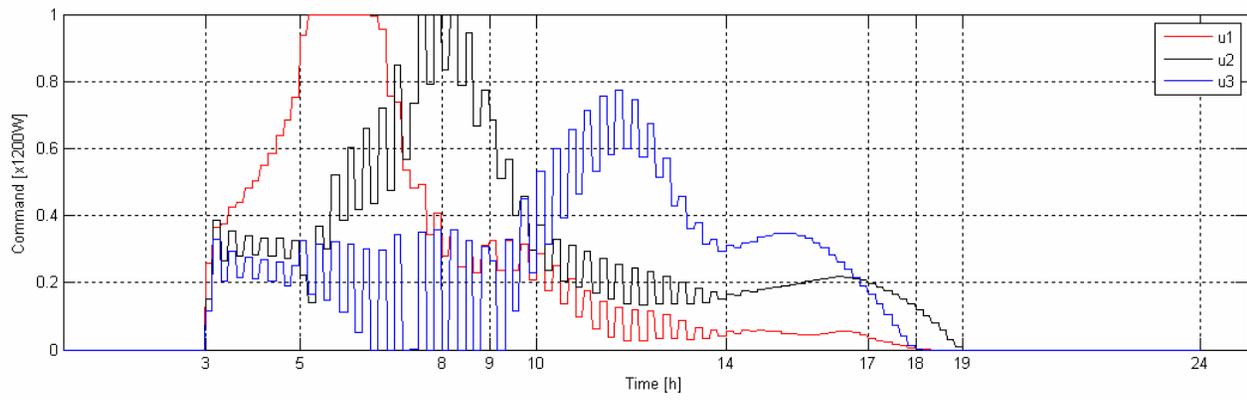
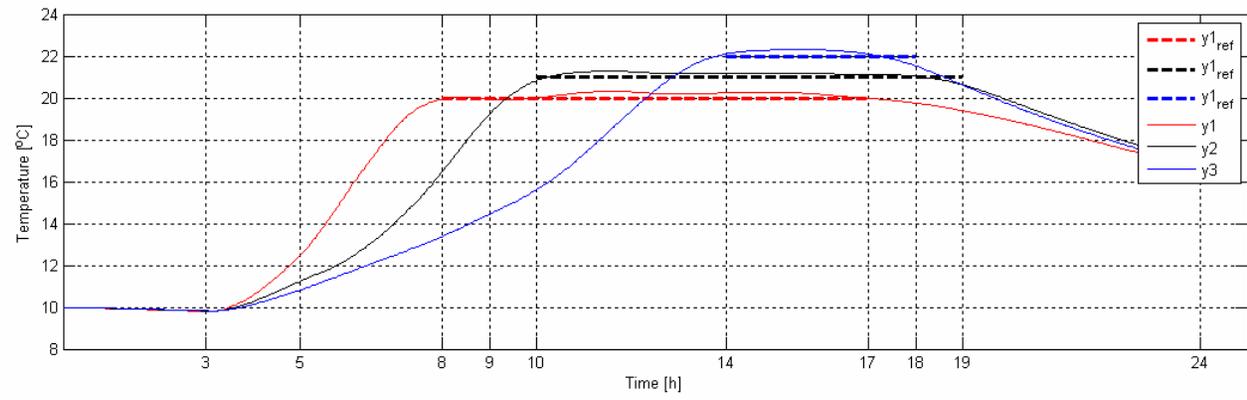
- Modèle local :

$$\begin{cases} x_i(k+1) = A_i x_i(k) + B_{ii} u_i(k) + \sum_{j \in \mathcal{H}_i} B_{ij} u_j(k) \\ y_i(k) = C_i x_i(k) \end{cases}, i = 1..m$$

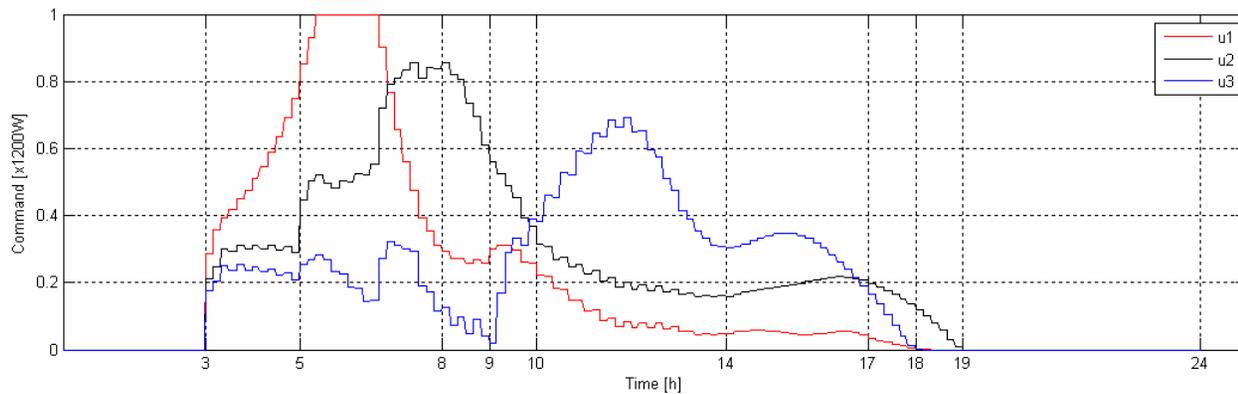
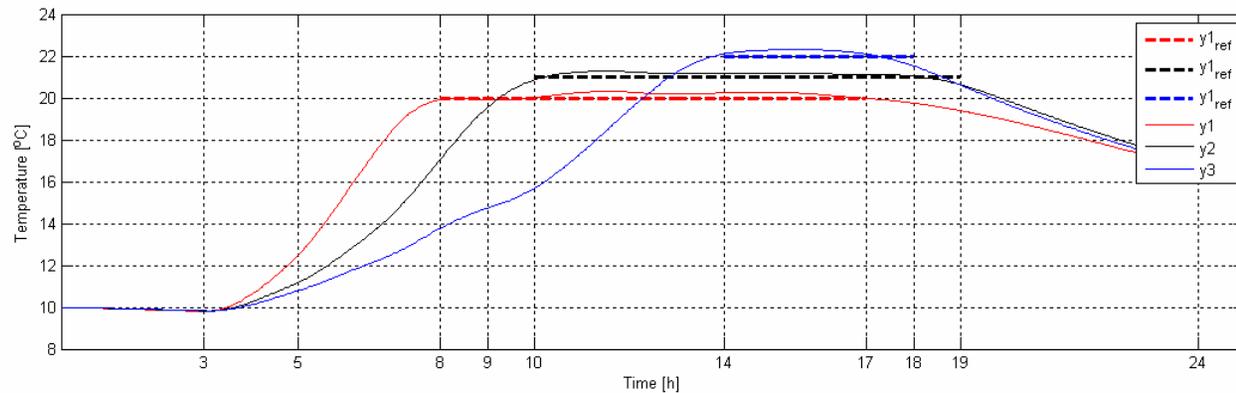
- Convergence :



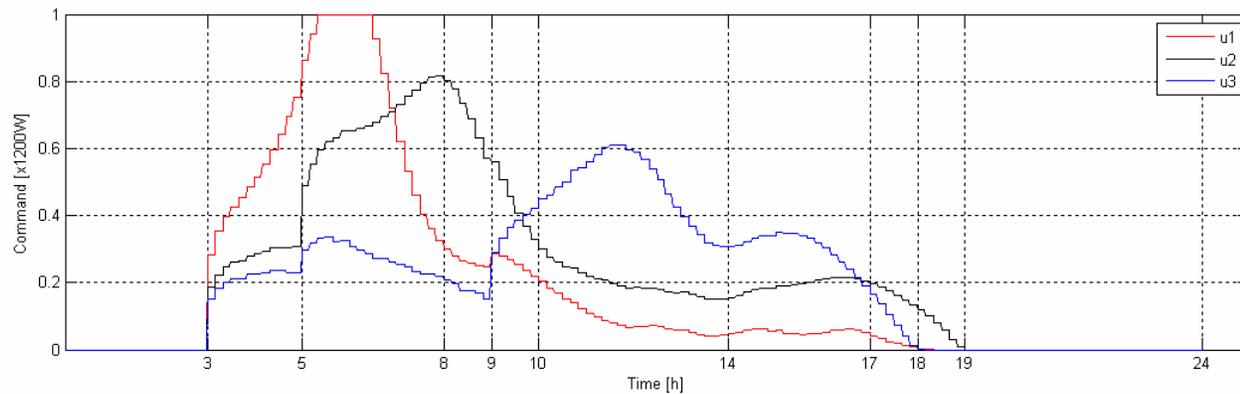
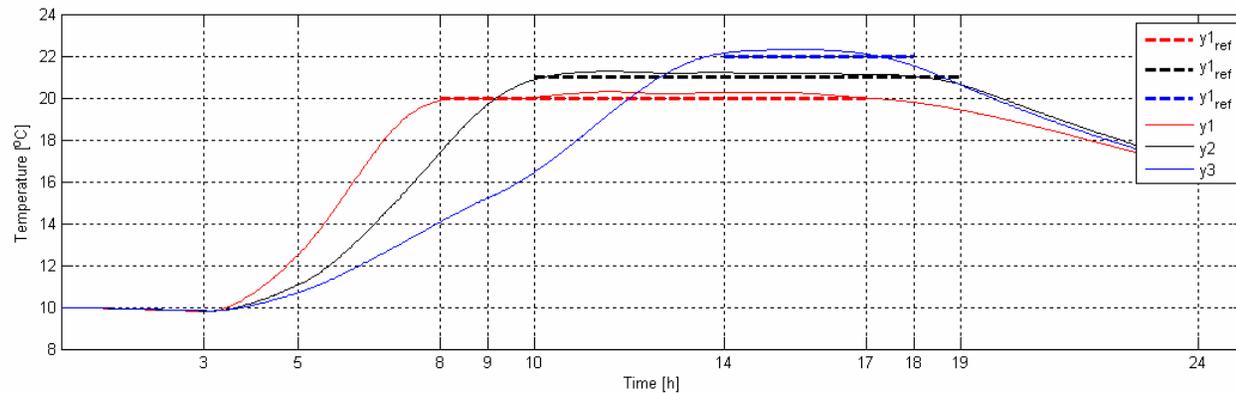
Simulation dMPC $\epsilon=0.5$



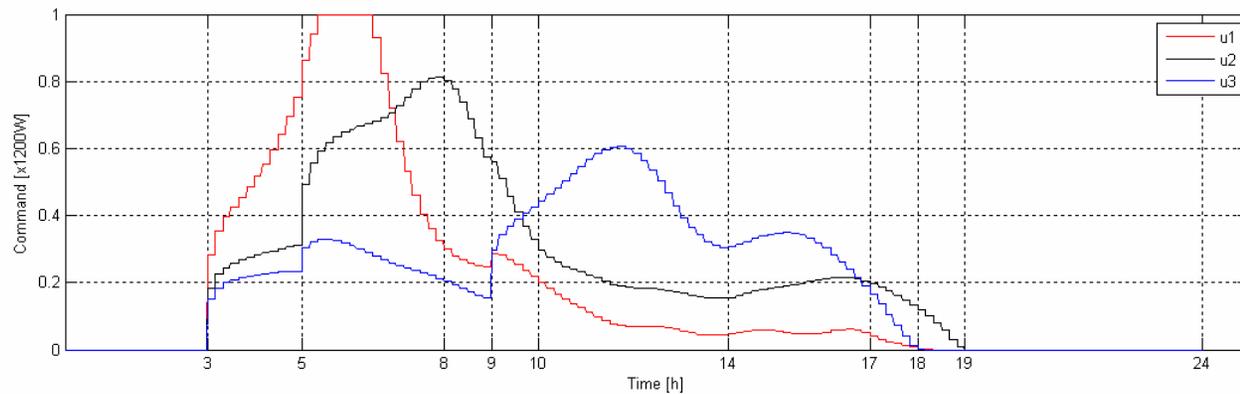
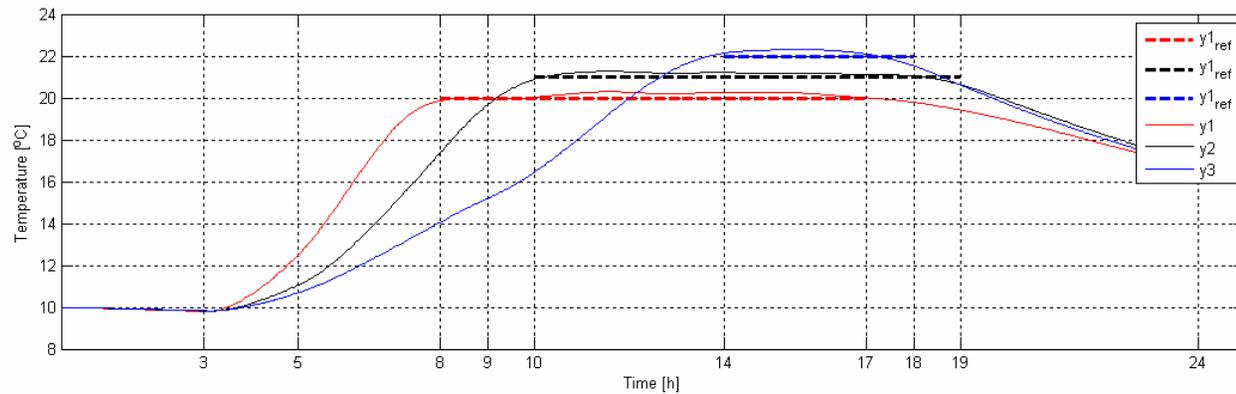
Simulation dMPC $\varepsilon=0.1$



Simulation dMPC $\varepsilon=0.01$



Simulation CMPC



Résultats numériques

Loi de commande	Consommation [kWh]	Pénalité erreur [Ch]	Effort de calcul
PI anticipation	16.83	3.32	$\sim m$
centrMPC	15.43	3.38	$\sim \exp(mN_u)$
décMPC	16.46	26.17	$\sim \exp(N_u)$
dMPC ($i_{\max}=1$)	15.92	4.08	$\sim i_{\max} \exp(N_u)$
dMPC ($\varepsilon=0.1$)	15.75	3.78	

Conclusions et travaux futurs

- MPC à critère dynamique
- Nécessité de distribuer la commande :
 - Compromis Complexité/Optimalité
- Solution générique
- Extension au cas multi-sources :
 - Facteur économique : prix variable
 - Introduction de non linéarités.

Merci de votre attention!