

Commande prédictive hybride distribuée pour la climatisation solaire.

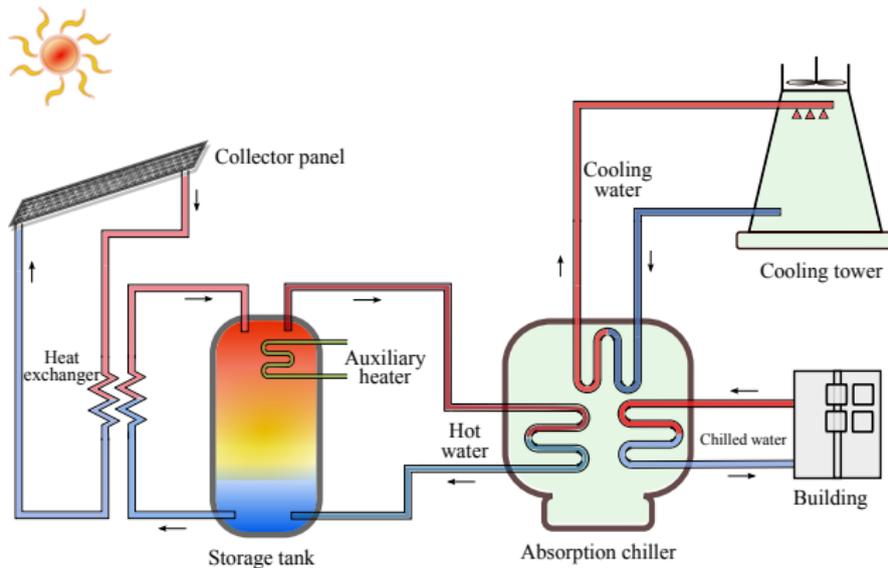
Eunice Herrera, Hervé Guéguen, Romain Bourdais

IETR, CentraleSupélec

11 juin 2015



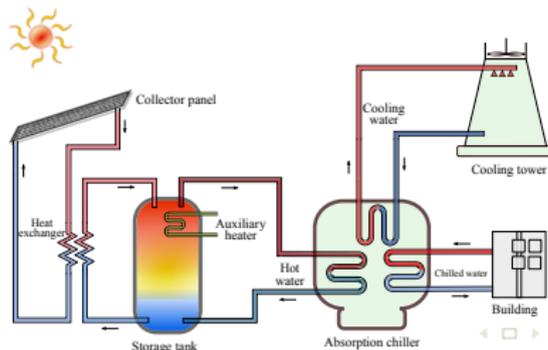
Intégration de climatisation solaire par absorption



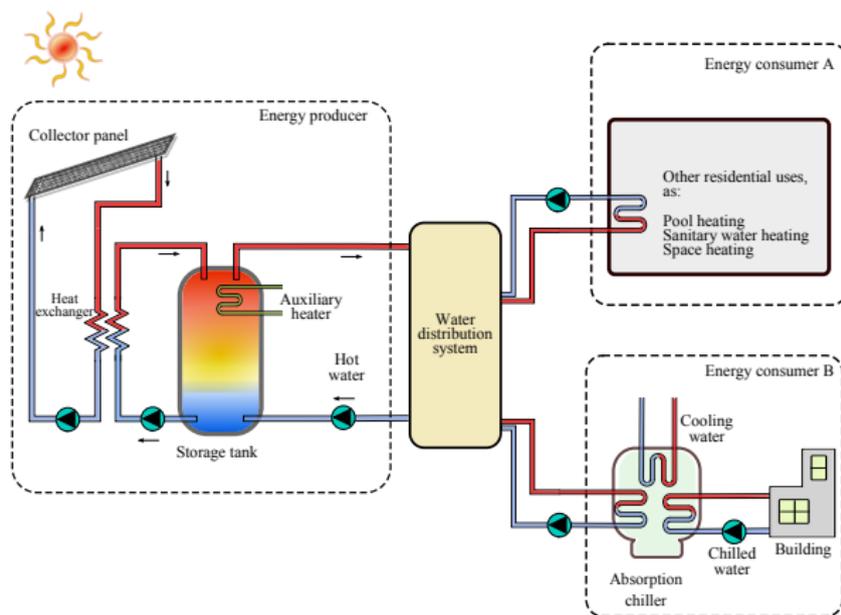
The solar absorption cooling system

Objectifs de commande

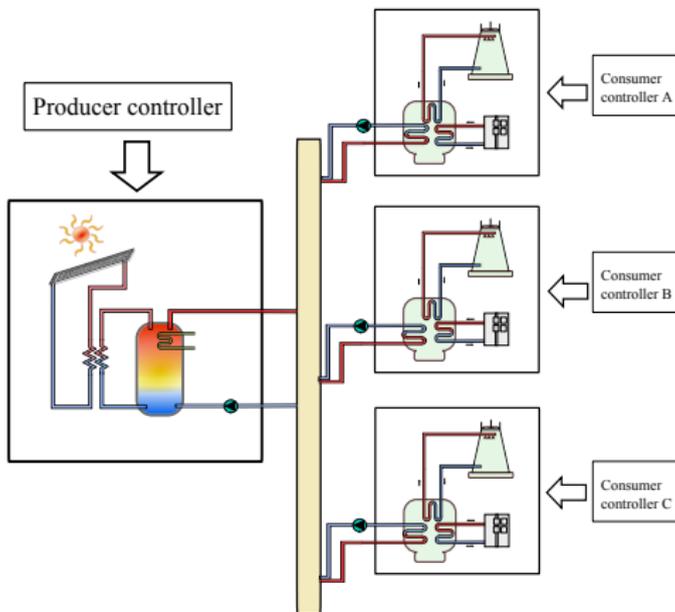
- Maintenir le confort thermique dans le bâtiment pendant les heures d'utilisation
- Assurer le bon fonctionnement de l'installation
 - Assurer le bon fonctionnement de la machine
 - Eau chaude doit être disponible dans les périodes de fonctionnement
 - Températures doivent restées dans les bornes admissibles
- Consommation d'électricité doit être minimisée



Producteur- Consommateurs d'énergie

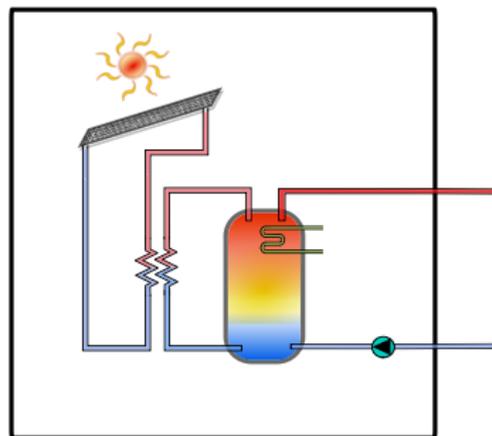


Cas d'étude



Producteur

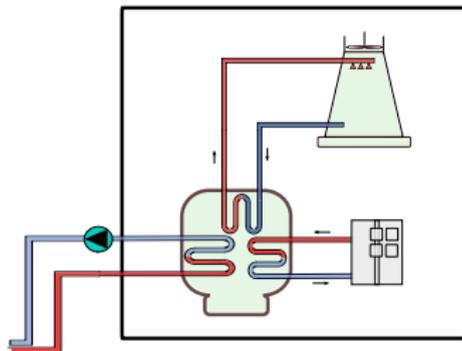
- **Objectif** : Fournir l'eau chaude en consommant le moins possible d'électricité
- **Commandes** : Débits d'eau et la puissance auxiliaire
- **Dynamique** : non-linéaire et hybride



Consommateur

- Bâtiment
- Machine de froid : point de fonctionnement nominal

- **Objectif** : Maintenir le confort thermique
- **Commande** : Marche et Arrêt de la machine à froid
- **Dynamique** : non-linéaire avec des commandes booléennes



Architecture de contrôle

Model predictive control (MPC)

- anticipation
- prise en compte des contraintes
- optimisation 'multi-objectif'
- dynamiques complexes

Commande centralisée

- manque de flexibilité et de modularité
- Optimisation complexe à résoudre

Commande distribuée

- demande de nombreux échanges
- cas hybride : convergence n'est pas garantie

Architecture de contrôle

Model predictive control (MPC)

- anticipation
- prise en compte des contraintes
- optimisation 'multi-objectif'
- dynamiques complexes

Commande centralisée

- manque de flexibilité et de modularité
- Optimisation complexe à résoudre

Commande distribuée

- demande de nombreux échanges
- cas hybride : convergence n'est pas garantie

Architecture de contrôle

Model predictive control (MPC)

- anticipation
- prise en compte des contraintes
- optimisation 'multi-objectif'
- dynamiques complexes

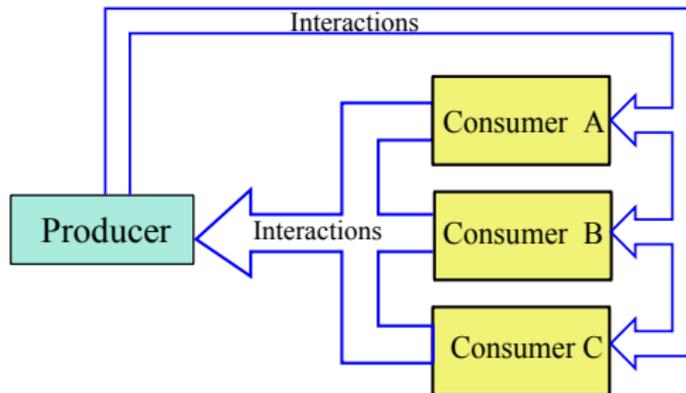
Commande centralisée

- manque de flexibilité et de modularité
- Optimisation complexe à résoudre

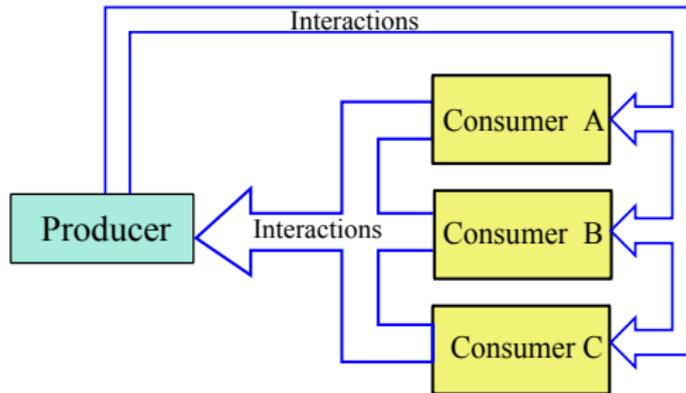
Commande distribuée

- demande de nombreux échanges
- cas hybride : convergence n'est pas garantie

Structuration du contrôle



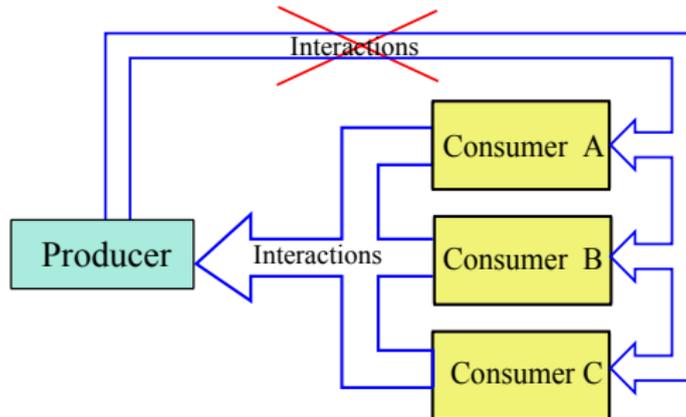
Structuration du contrôle



La machine à froid fonctionne à régime nominal :

- contrainte sur la température de l'eau du producteur

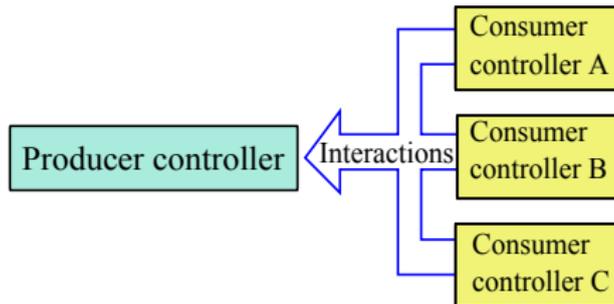
Structuration du contrôle



La machine à froid fonctionne à régime nominal :

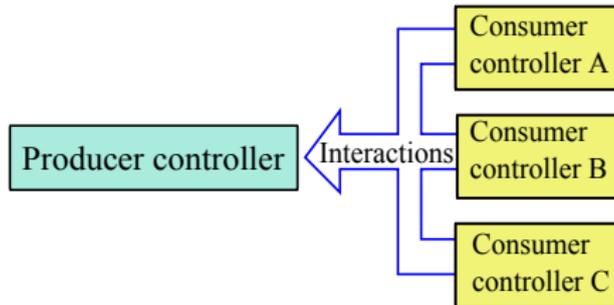
- contrainte sur la température de l'eau du producteur

Structuration du contrôle



La structure favorise les consommateurs.

Objectif



Structure de contrôle

- Commande prédictive distribuée,
- Limitation du nombre d'échange,
- Rééquilibre les relations producteur-consommateurs,

Overview

1 Introduction

2 Formalisation

- Modélisation
- Structure de Contrôle
- Contrôleurs MPC locaux

3 Tests

4 Application

5 Conclusion



Producteur

$$X_1(k+1) = f_{1\sigma(k)}(\bar{U}_1(k), W_{21}(k)) \quad (1)$$

$$\sigma(k) = \sigma(\bar{U}_1(k), W_{21}(k)) \quad (2)$$

$$H_{1\sigma(k)}(\bar{U}_1(k), W_{21}(k)) \leq \mathbf{0} \quad (3)$$

où $\bar{U}_1(k) = [X_1(k), U_1(k), D_1(k)]$

Consommateurs

Consommateur $S_2^{(i)}$:

$$X_2^{(i)}(k+1) = A^{(i)}X_2^{(i)}(k) + B^{(i)}\varphi_1 U_2^{(i)}(k) + F^{(i)}D_2(k) \quad (4)$$

$$Y_2^{(i)}(k) = C^{(i)}X_2^{(i)}(k) \quad (5)$$

$$W_{21}^{(i)}(k) = k_1 U_2^{(i)}(k) Y_2^{(i)}(k) - k_2 U_2^{(i)}(k) \quad (6)$$

$$Y_{2\min}^{(i)}(k) \leq Y_2^{(i)}(k) \leq Y_{2\max}^{(i)}(k) \quad (7)$$

$$U_2^{(i)}(k) \in \{0, 1\} \quad (8)$$

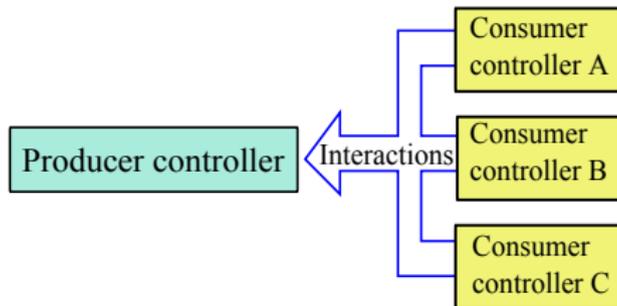
où $i = 1, \dots, m$ et m est le nombre de consommateurs.

Interactions

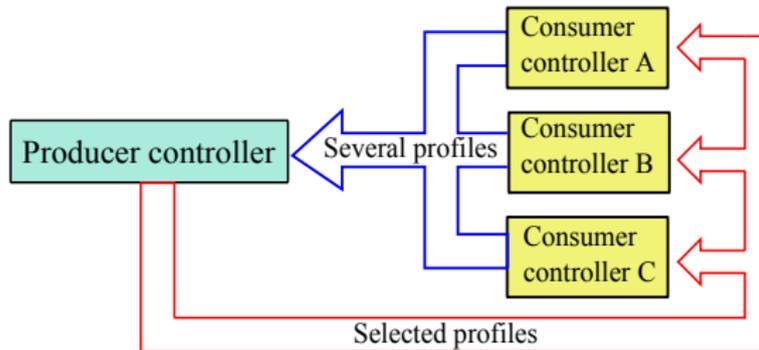
$$W_{21} = \sum_1^m W_{21}^{(i)} \quad (9)$$

où m est le nombre de consommateurs.

Structure



Structure



Contrôle des consommateurs

Objectif du MPC

$$J_{2(i)}^{(p)}(U_{2(i)}^{(p)}(\bar{k})) = \sum_{j=1}^{N_h} \left[Q_1^{(i)} \left\| \Delta U_{2(i)}^{(p)}(k+j-1) \right\|_d^d + Q_2^{(i)} \left\| U_{2(i)}^{(p)}(k+j-1) \right\|_d^d + Q_3^{(i)} \delta^{(i)}(k+j) \left\| Y_2^{(i)}(k+j) - Y_r^{(i)}(k+j) \right\|_d^d \right] \quad (10)$$

- $Q_1^{(i)}$, $Q_2^{(i)}$, $Q_3^{(i)}$, pondérations.
- $\|v(k)\|_d^d$, type norme.
- $\delta^{(i)}(k)$, occupation.

Le but est de trouver les b meilleures solutions.



Contrôle des consommateurs

Pour chaque consommateur :

- Calcul des b séquences de commandes, de leur coût et des interactions

$$\bar{U}_2^{(i)}(\bar{k}) = \begin{bmatrix} U_{2(1)}^{(i)}(\bar{k}) \\ \vdots \\ U_{2(p)}^{(i)}(\bar{k}) \\ \vdots \\ U_{2(b)}^{(i)}(\bar{k}) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\bar{J}_2^{(i)}(\bar{k}) = \begin{bmatrix} J_{2(1)}^{(i)}(\bar{k}) \\ \vdots \\ J_{2(p)}^{(i)}(\bar{k}) \\ \vdots \\ J_{2(b)}^{(i)}(\bar{k}) \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\bar{W}_{21}^{(i)}(\bar{k}) = \begin{bmatrix} W_{21(1)}^{(i)}(\bar{k}) \\ \vdots \\ W_{21(p)}^{(i)}(\bar{k}) \\ \vdots \\ W_{21(b)}^{(i)}(\bar{k}) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Consolidation des interactions

A partir des b solutions de chaque consommateur, on consolide les b^m profils de consommations et le coût associé.

- $\Pi - J_t(\bar{k})$

Exemple : $b = 2$ and $m = 2$

$$\Pi(\bar{k}) = \begin{bmatrix} W_{21(1)}^{(1)}(\bar{k}) + W_{21(1)}^{(2)}(\bar{k}) \\ W_{21(1)}^{(1)}(\bar{k}) + W_{21(2)}^{(2)}(\bar{k}) \\ W_{21(2)}^{(1)}(\bar{k}) + W_{21(1)}^{(2)}(\bar{k}) \\ W_{21(2)}^{(1)}(\bar{k}) + W_{21(2)}^{(2)}(\bar{k}) \end{bmatrix}$$

Les consolidations sont transmises au producteur.

Contrôle du producteur

Objectif du MPC

$$\min_{U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})} J_1(U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})) + J_{t_h}(\bar{k}) \quad (14)$$

$$s.t. \quad \forall j = 1, \dots, N_h, \quad \forall h = 1, \dots, b^m$$

$$H_{1\sigma(k+j-1)}(\bar{U}_1(k+j-1), \pi_h(k+j-1)) \leq \mathbf{0} \quad (15)$$
$$\pi_h(\bar{k}) \in \Pi(\bar{k})$$

Le contrôleur du producteur sélectionne :

- les séquences de commande du producteur
- le profil de consommation



Overview

- 1 Introduction
- 2 Formalisation
- 3 Tests**
 - Cas d'essais
 - Test 1
 - Test 2
 - Test 3
- 4 Application
- 5 Conclusion



Cas d'essais

Objectif

Evaluer la sous-optimalité de la solution proposée

Simplification

Modèle linéaire pour le producteur

$$X_1(k+1) = X_1(k) + \alpha(D_1(k) + U_1(k) - \sum_{i=1}^m W_{21}^{(i)}(k)) \quad (16)$$

- **Optimisation globale** : mixed integer linear problem.
- **Modélisation** : Les mêmes modèles sont utilisés en prédiction et simulation.

Test 1: Boucle Ouverte

- **Objectif du test:** Quantifier la sous-optimalité de l'optimisation défini par :

$$\%_{subopt}(k) = \frac{J_g(k) - J_g^{(opt)}(k)}{J_g^{(opt)}(k)} 100\% \quad (17)$$

où ,

$$J_g(k) = J_1^*(U_1^*(k), \pi_h(k)_{selected}) + J_{t_h}(k)_{selected} \quad (18)$$

- **Caracteristiques du test:**
 - Le nombre de profils varie de $b = 1$ à $b = 32$.
 - Horizon de prediction $N_h = 5$ (2.5 hours).
 - Trajectoire du système sur 72 heures : 144 problèmes d'optimisation.

Test 1: Boucle ouverte

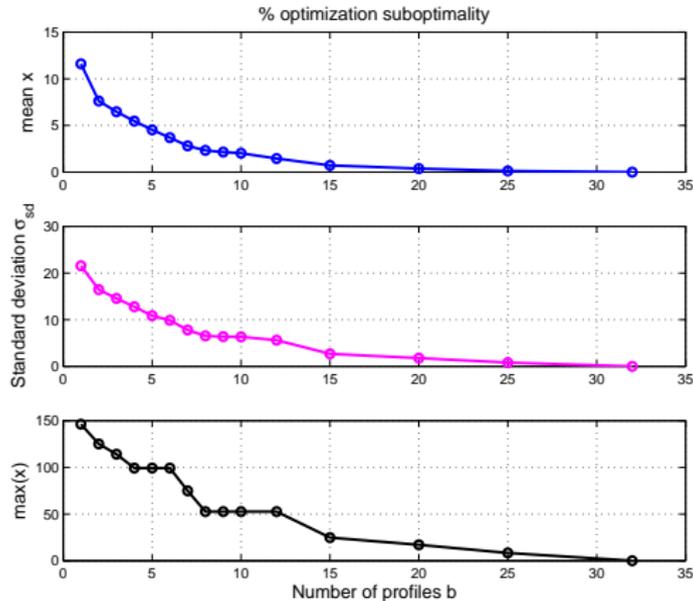
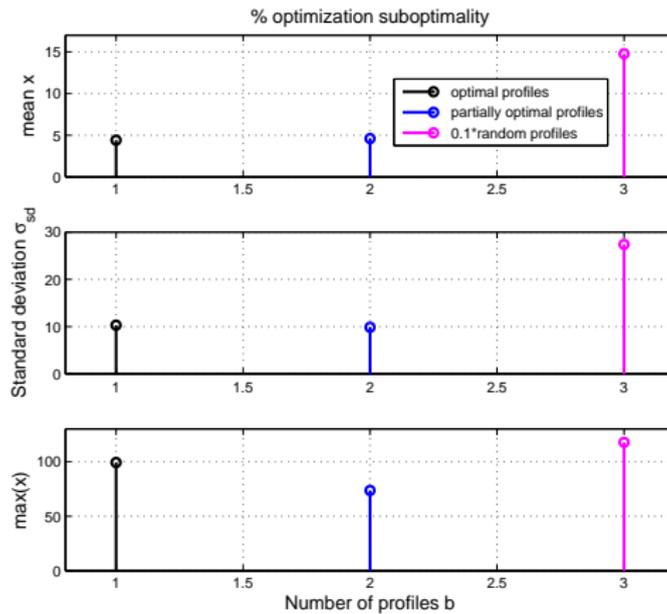


Figure: Pourcentage de sous-optimalité pour $b = 1$ à $b = 32$.

Test 2: Boucle Ouverte

- **Objectif du test:** Analyse de l'impact de la génération des profils
- On considère $b = 5$ and $N_h = 5$ et 144 problèmes.
- On considère 3 stratégies de génération :
 - **Profils optimaux**
 - **Profils partiellement optimaux:** dans l'ensemble des $b = 10$ optimaux on transmet : 2 optimaux + 3 sélectionnés aléatoirement parmi les 8 restants.
 - **Profils aléatoires:** choisis aléatoirement sans optimisation parmi les 2^{N_h} possibilités.

Test 2: boucle ouverte



Test 3: Boucle fermée

- **Objectif du test** : Analyse de la longueur de l'horizon de prédiction.
- **Caracteristiques du test**:
 - $m = 3$ consommateurs qui propose $b = 3$ profils de consommation.
 - L'horizon varie de $N_h = 2$ (1 heure) à $N_h = 20$ (10 heures).
 - Durée de simulation: 72 heures.

Test 3: boucle fermée

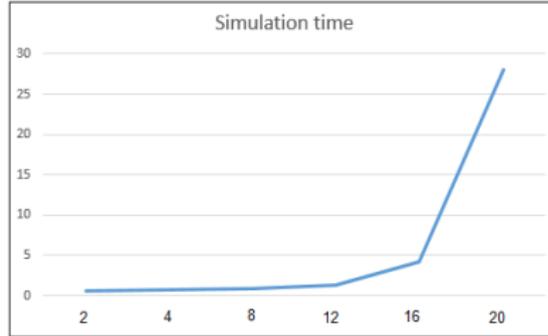
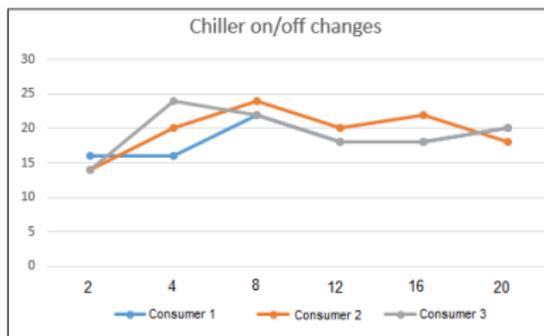
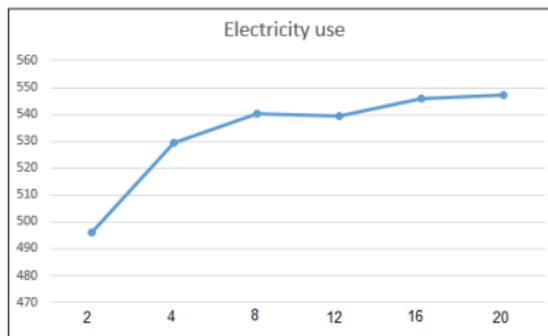
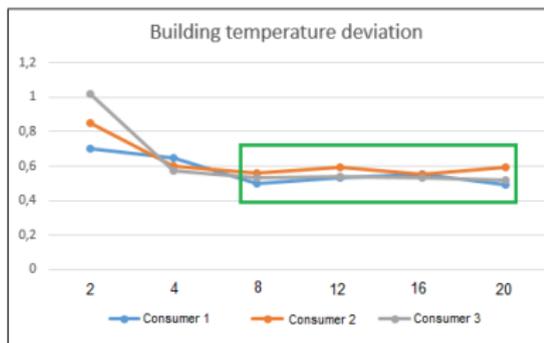


Figure: Prediction horizon impact

Test 3: Boucle fermée

Résultats pour $N_h = 8$.

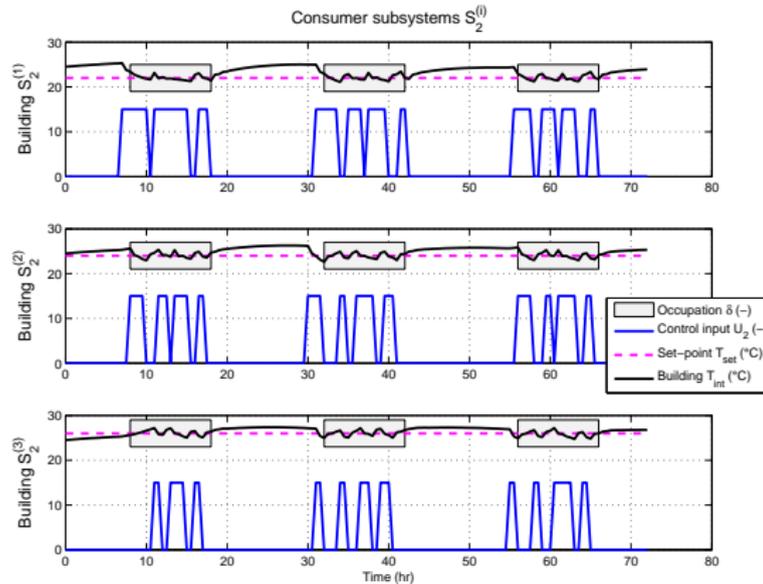


Figure: Consumer controllers behavior when $N_h = 8$ and $b = 3$.

Test 3: Boucle fermée

Resultats pour $N_h = 8$.

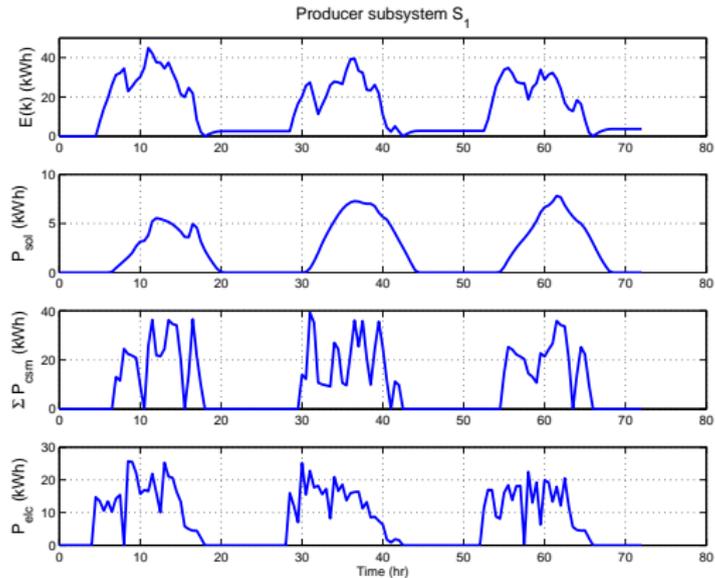


Figure: Producer controller behavior when $N_h = 8$ and $b = 3$.

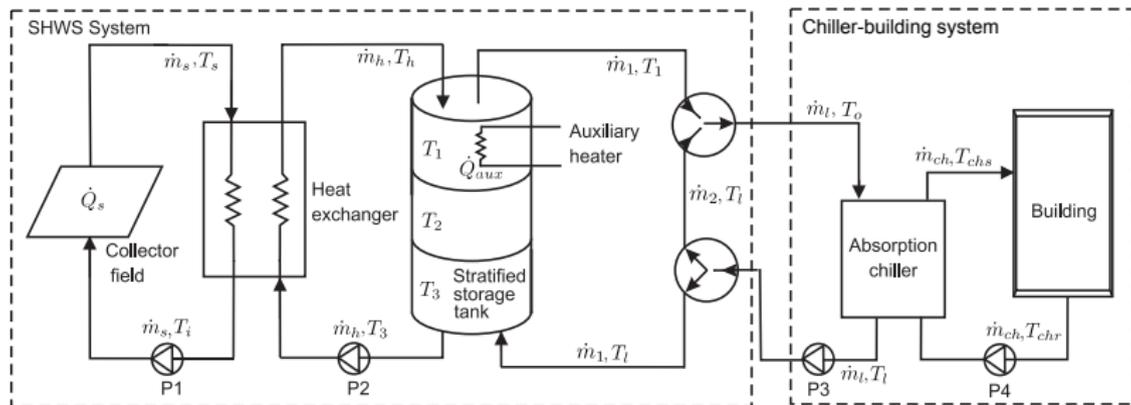
Overview

- 1 Introduction
- 2 Formalisation
- 3 Tests
- 4 Application**
 - Cas d'application
 - Contrôle du producteur
 - Résultats
- 5 Conclusion



Modèle TRNSYS

- **Modèles de prédiction** : Non linéaire et hybride (producteur) et linéaire à commande logique (consommateur).
- **Modèle de simulation** : Modèle dans TRNSYS.



Contrôle du producteur

$$\min_{U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})} J_1(U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})) + J_{t_h}(\bar{k}) \quad (19)$$

Contraintes :

$$T_1(k), T_2(k), T_3(k), T_h(k), T_s(k), T_i(k) \leq T_{wbp}(k) \quad (21)$$

$$T_1(k) \geq T_{set}(k) \quad \text{if} \quad \dot{m}_l(k) > 0 \quad (22)$$

$$\dot{Q}_{aux \min} \leq \dot{Q}_{aux}(k) \leq \dot{Q}_{aux \max} \quad (25)$$

avec,

$$J_1(U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})) = \|U_1(\bar{k})\|_2^2 \quad (26)$$



Contrôle du producteur

$$\min_{U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})} J_1(U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})) + J_{t_h}(\bar{k}) \quad (19)$$

Contraintes :

$$T_1(k), T_2(k), T_3(k), T_h(k), T_s(k), T_i(k) \leq T_{wbp}(k) \quad (21)$$

$$T_1(k) \geq T_{set}(k) \quad \text{if} \quad \dot{m}_l(k) > 0 \quad (23)$$

$$\dot{Q}_{aux \min} \leq \dot{Q}_{aux}(k) \leq \dot{Q}_{aux \max} \quad (25)$$

avec,

$$J_1(U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})) = \|U_1(\bar{k})\|_2^2 \quad (26)$$



Contrôle du producteur

$$\min_{U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})} J_1(U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})) + J_{t_h}(\bar{k}) + J_\lambda(\lambda(\bar{k})) \quad (20)$$

Contraintes :

$$T_1(k), T_2(k), T_3(k), T_h(k), T_s(k), T_i(k) \leq T_{wbp}(k) \quad (21)$$

$$T_1(k) \geq T_{set}(k) - \lambda(k) \quad \text{if } \dot{m}_l(k) > 0 \quad (24)$$

$$\dot{Q}_{aux \min} \leq \dot{Q}_{aux}(k) \leq \dot{Q}_{aux \max} \quad (25)$$

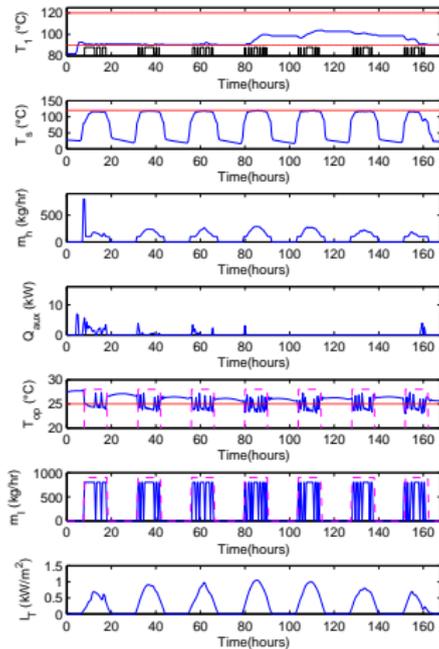
avec,

$$J_1(U_1(\bar{k}), \pi_h(\bar{k})) = \|U_1(\bar{k})\|_2^2 \quad (26)$$

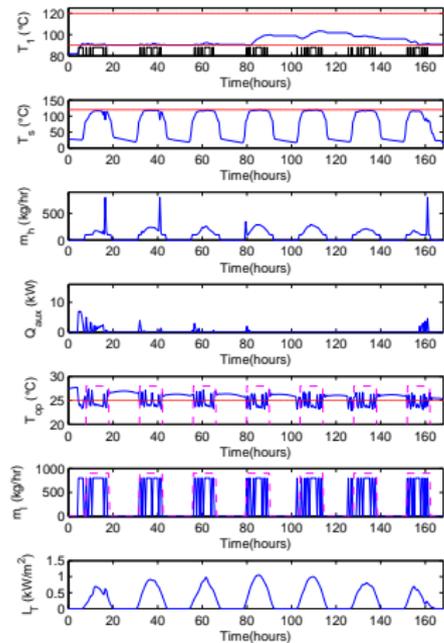


Résultats

$b = 3$



$b = 1$



Résultats

Table: Comparaison de stratégies

	LRBC	Mixed MPC-LRBC	MPC
Chiller on/off changes	124 😞	96	74 😊
Chiller use	92	103 😞	63 😊
Building temperature deviation	0.76 😊	1.16	1.18 😞
Electricity consumption	102 😞	68	43 😊
Collector temperature violation	211 😞	13	0.46 😊
Tank temperature violation	17 😞	0 😊	0.29

Overview

- 1 Introduction
- 2 Formalisation
- 3 Tests
- 4 Application
- 5 Conclusion**



Conclusions

Structure de contrôle :

- adaptée au cas de consommateurs à commandes booléennes
- qui permet la modularité de la commande
- qui concilie la performance et la complexité.

pour aller plus loin

Eunice HERRERA-SANTISBON, *Hybrid predictive control and energy efficiency of buildings*, CentraleSupélec, March 20, 2015