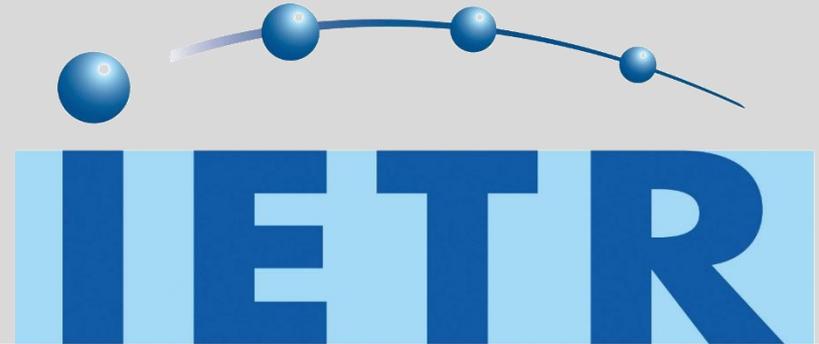




CentraleSupélec



Commande Prédictive pour la gestion optimale de l'énergie

Pierre Haessig, CentraleSupélec,
équipe d'automatique (ASH) de l'IETR

ENS Rennes 16 sept. 2016



PLAN

L'équipe de recherche

Commande prédictive (MPC)

*Thèse Delta Dore :
énergie & confort d'un habitat*

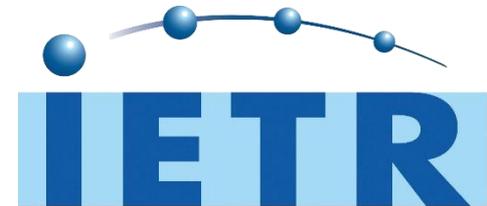
Conclusion / Questions

IETR : INSTITUT D'ÉLECTRONIQUE ET DE TÉLÉCOMMUNICATIONS DE RENNES

Un laboratoire (« UMR CNRS ») de ~400 personnes
(permanents et non permanents)

Rattachements principaux (tutelles) :

- CNRS (INSIS)
- Universités : Rennes 1, Nantes
- Écoles : INSA de Rennes, CentraleSupélec



Thématiques :

électronique (e.g. antennes, capteurs), **télécoms**,
mais aussi traitement d'image... et *automatique*.

Directeur 2017 : Ronan Sauleau (ex. prépa agreg GE Ker Lann)

L'ÉQUIPE D'AUTOMATIQUE (ASH)

7-8 ENSEIGNANTS-CHERCHEURS PERMANENTS

Enseignement :

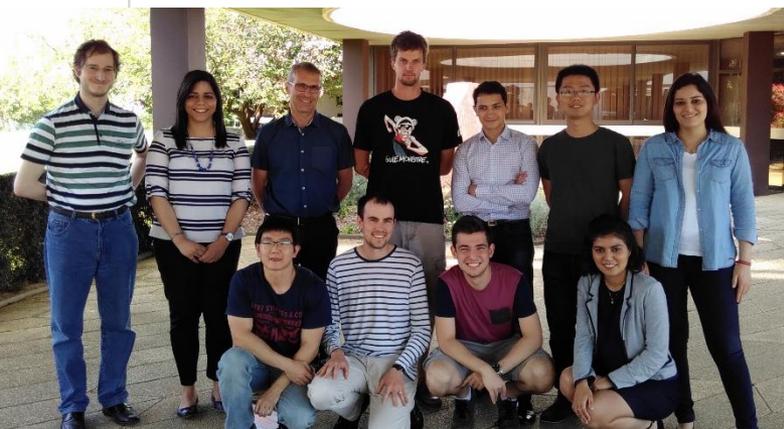
- tronc commun Supélec (1A, 2A)
- 3A « Ingénierie des Systèmes Automatisés »
- Double diplôme « Smart Grids » avec Xian Jiatong University
→ forte composante recherche (Master's thesis)

Accueil de stagiaires l'été (Master 1 & 2)



DOMAINES DE COMPÉTENCE EN RECHERCHE

- Modélisation et Identification de processus
- Contrôle-Commande des systèmes
 - Commande de **haut niveau** – **Optimisation**
 - Intégration du système dans son environnement
 - Intégration des contraintes de fonctionnement
- Intégration de la sûreté de fonctionnement
 - Tolérance aux fautes
 - Fiabilité et Commande sûre
- Applications **à l'énergie** (réseaux électriques, bâtiments)





PLAN

L'équipe de recherche

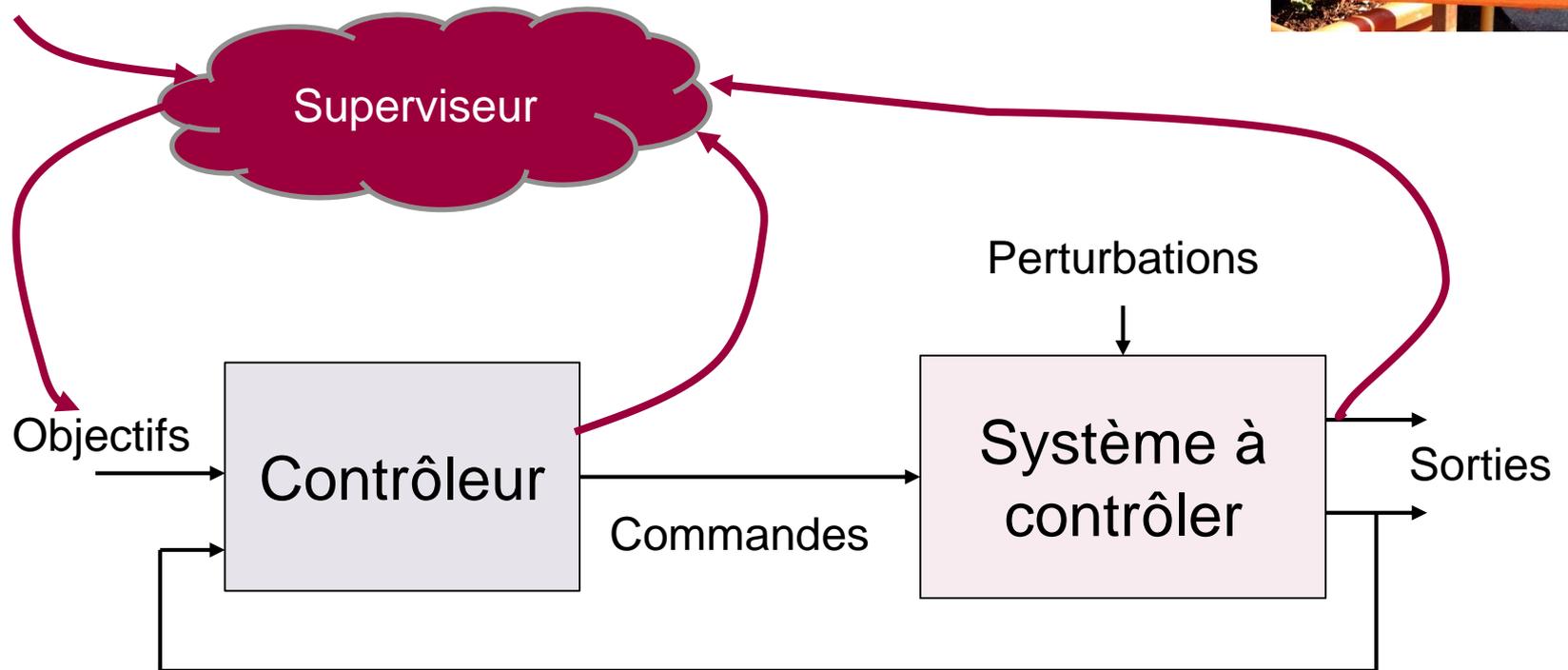
Commande prédictive (MPC)

*Thèse Delta Dore :
énergie & confort d'un habitat*

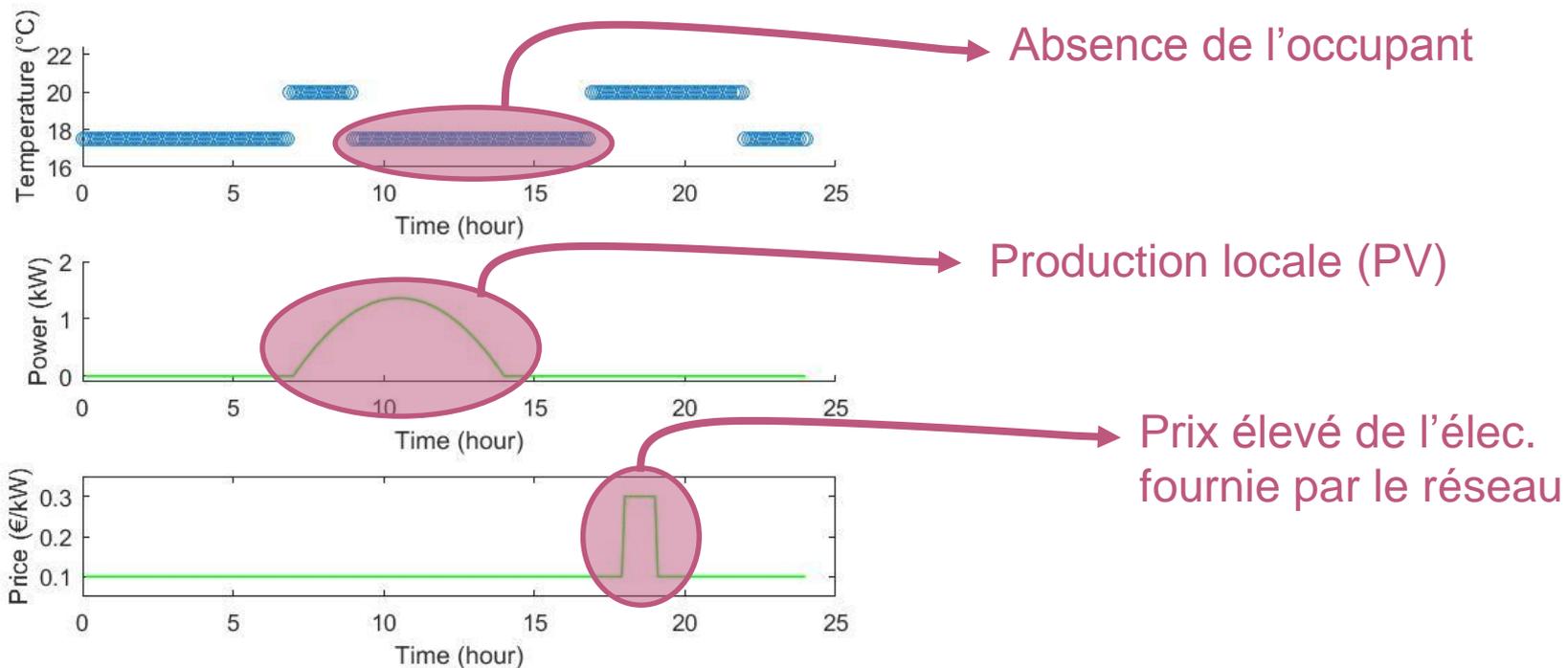
Conclusion / Questions



RAPPEL DU CONTEXTE : COMMANDE DES SYSTÈMES

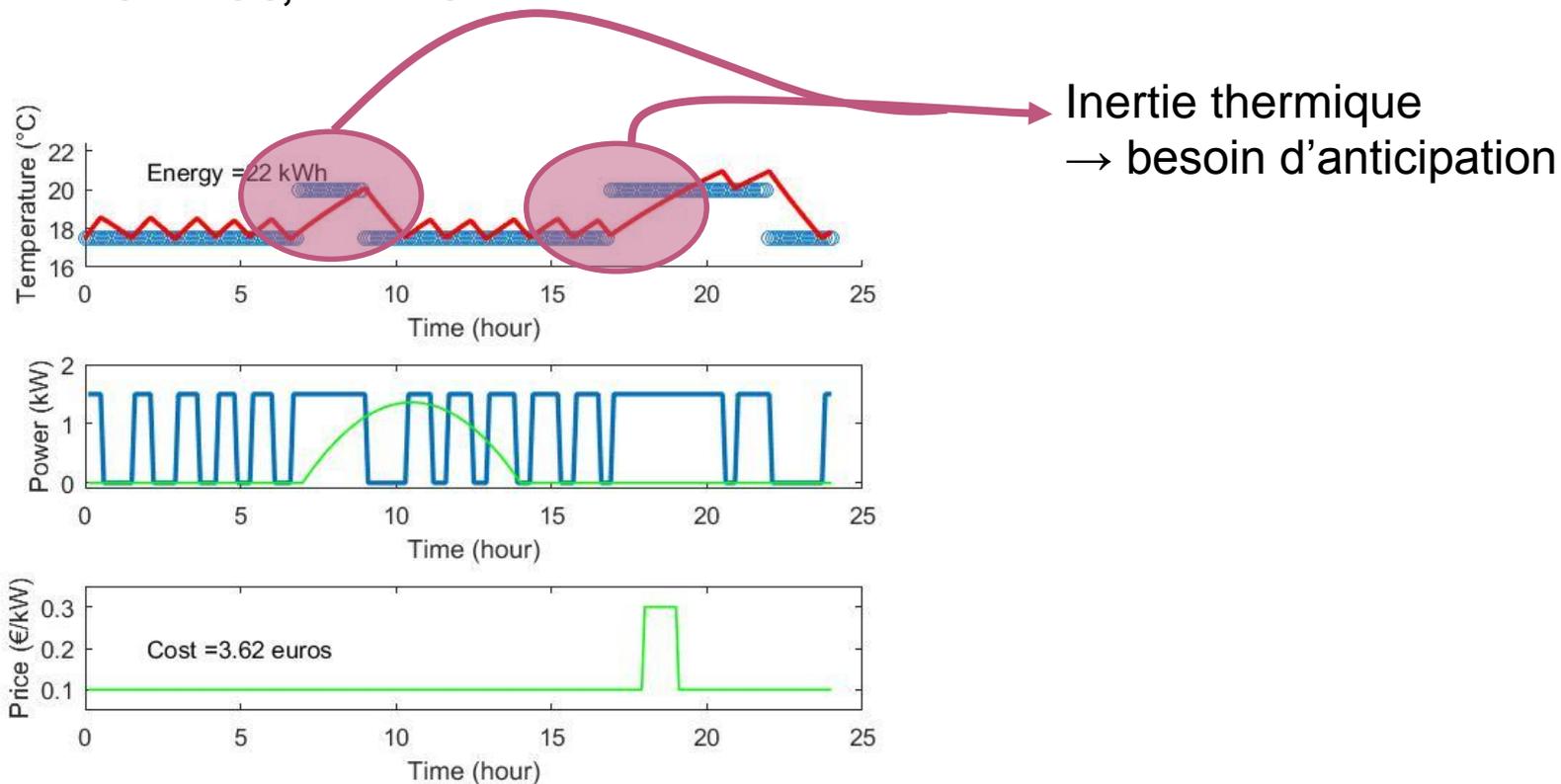


COMMANDE DU CHAUFFAGE D'UN BÂTIMENT



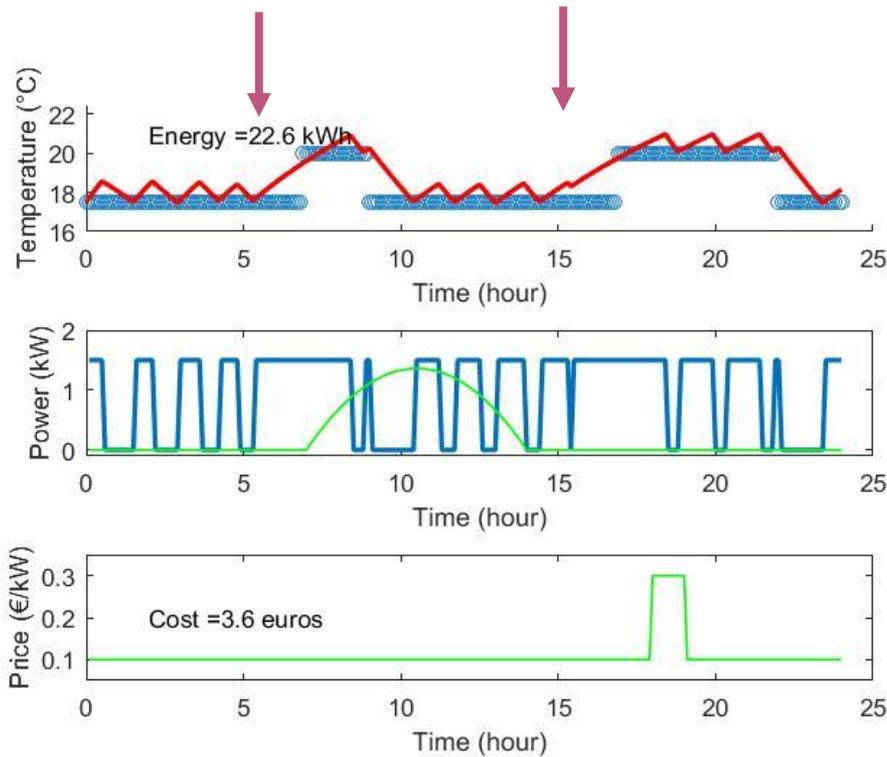
COMMANDE DU CHAUFFAGE D'UN BÂTIMENT

HYSTÉRÉSIS, MAL RÉGLÉ



COMMANDE DU CHAUFFAGE D'UN BÂTIMENT

HYSTÉRÉSIS, MIEUX RÉGLÉ (*consigne décalée à la main...*)

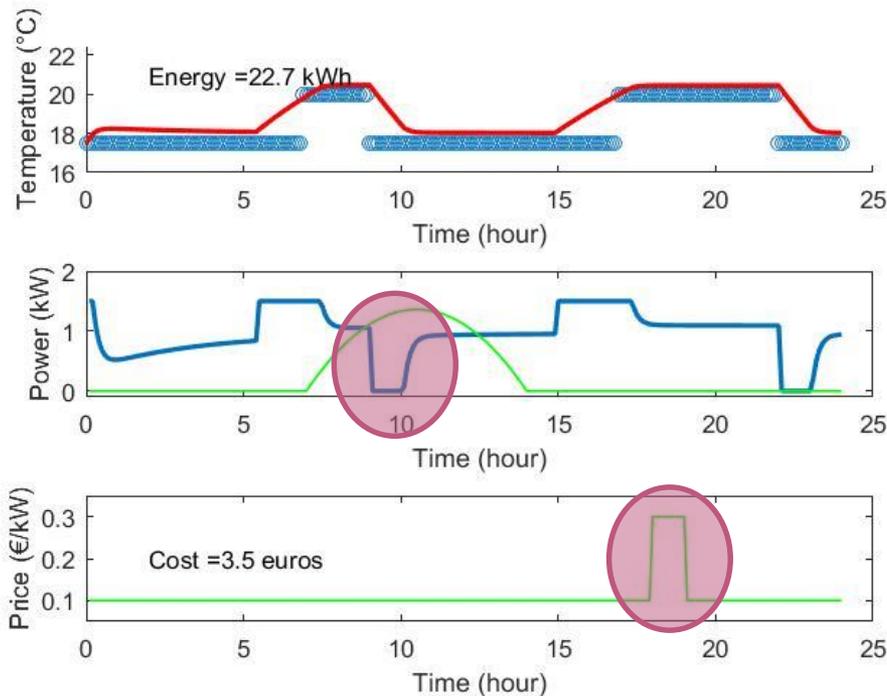


Question : à quel moment démarrer le chauffage ?

- Dépend du bâtiment
- Dépend de la météo

COMMANDE DU CHAUFFAGE D'UN BÂTIMENT

UN PID C'EST MIEUX ?



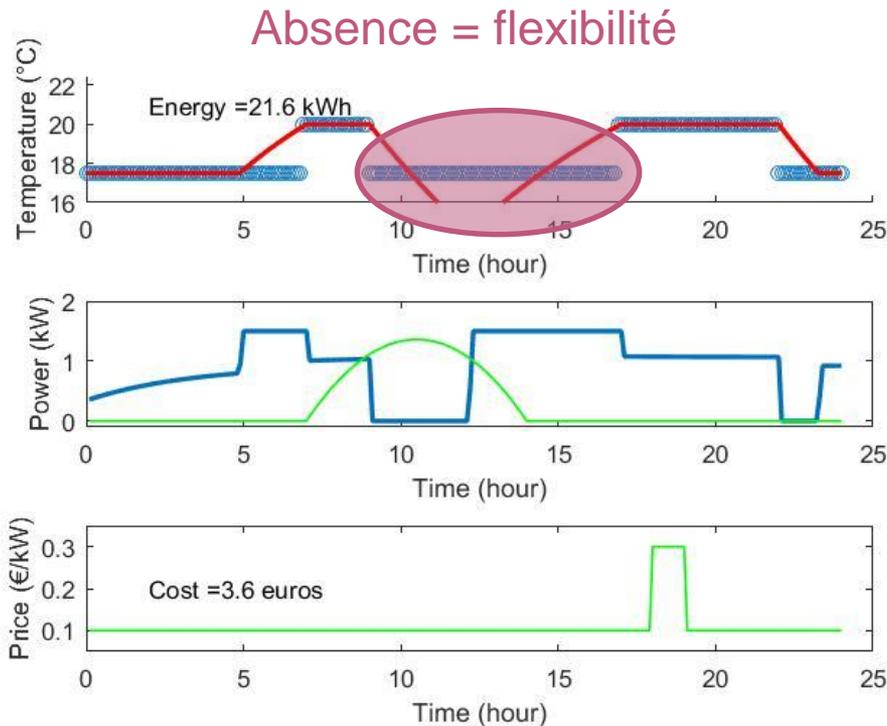
La question du démarrage optimal du chauffage n'est toujours pas réglée

Limite des « commande classiques » (PID, hystérésis) : non prise en compte de :

- Production locale
- Signal prix
- Périodes d'absence

COMMANDE DU CHAUFFAGE D'UN BÂTIMENT

COMMANDE PRÉDICTIVE (MPC) : CONFORT, ÉNERGIE & COÛT

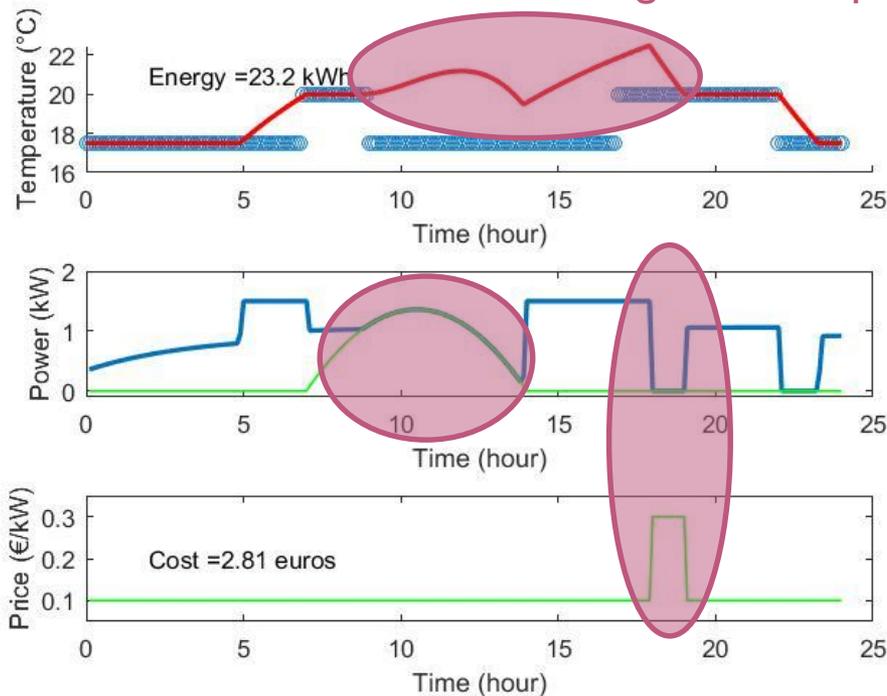


- Démarrage optimal
→ nécessite des **modèles**
 - Thermique du bâtiment
 - Météo
- Service attendu ?
 - Satisfaction de la température
(en présence d'occupants)
- Objectif à minimiser ?
 - **Énergie**
 - Coût d'achat de l'électricité

COMMANDE DU CHAUFFAGE D'UN BÂTIMENT

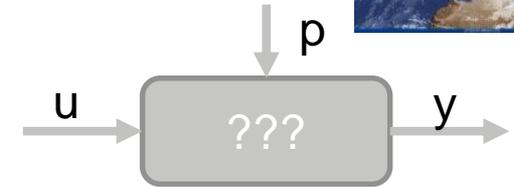
COMMANDE PRÉDICTIVE (MPC) : CONFORT, ÉNERGIE & COÛT

Flexibilité : stockage thermique



- Démarrage optimal
→ nécessite des **modèles**
 - Thermique du bâtiment
 - Météo
- Service attendu ?
 - Satisfaction de la température (en présence d'occupants)
- Objectif à minimiser ?
 - Énergie
 - Coût d'achat de l'électricité

MPC – LES INGRÉDIENTS



- « **Model Predictive Control** »
 - **Modèle** du système
 - Influence des entrées commandées (u)
 - Influence des perturbations (p)
 - **Horizon** de prévision
 - Que devra faire le système ?
 - Prévision des perturbations extérieures (météo) ?
- **Critère mathématique**
 - Traduire quantitativement les objectifs de contrôle
 - Souvent **multicritère** (confort, prix, énergie)
 - Réglage des pondérations ?
- **Résoudre le problème d'optimisation**
 - Quelle classe de problème (linéaire, convexe) ?
 - Quel solveur (rapidité, coût de licence) ?

$$J(U) = \sum_{i=1}^N u^2(k+i)$$

$$\begin{cases} \min_U J(U) \\ \text{s. l. c. } h(U) \leq 0 \end{cases}$$

Principe de mise en œuvre :

- à chaque pas, calcul d'une séquence optimale : commandes pour l'instant présent et les instants futurs
- seule la commande présente est effectivement appliquée au système
- au pas suivant, reprise du calcul sur l'horizon décalé (« horizon glissant »)

APARTÉ : PROGRAMMATION LINÉAIRE

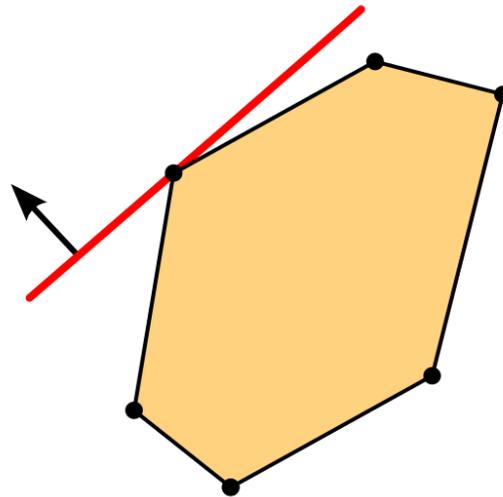
Constat : certaines **classes de problèmes** d'optimisations sont **plus simples** à résoudre (complexité algorithmique) que d'autres.

→ exemple : les problèmes linéaires

Bien pratique quand on doit résoudre un pb d'optimisation **à chaque pas de temps** du contrôleur.

Illustration
en dimension 2
 $x \in \mathbb{R}^2$

Objectif linéaire
 $\max c^T \cdot x$
c-à-d $\sum c_i x_i$



Sous contraintes linéaires
 $Ax \leq b, A \in \mathbb{R}^{6 \times 2}$
(cad 6 inégalités $a_i^T \cdot x \leq b_i$
→ polyhèdre)

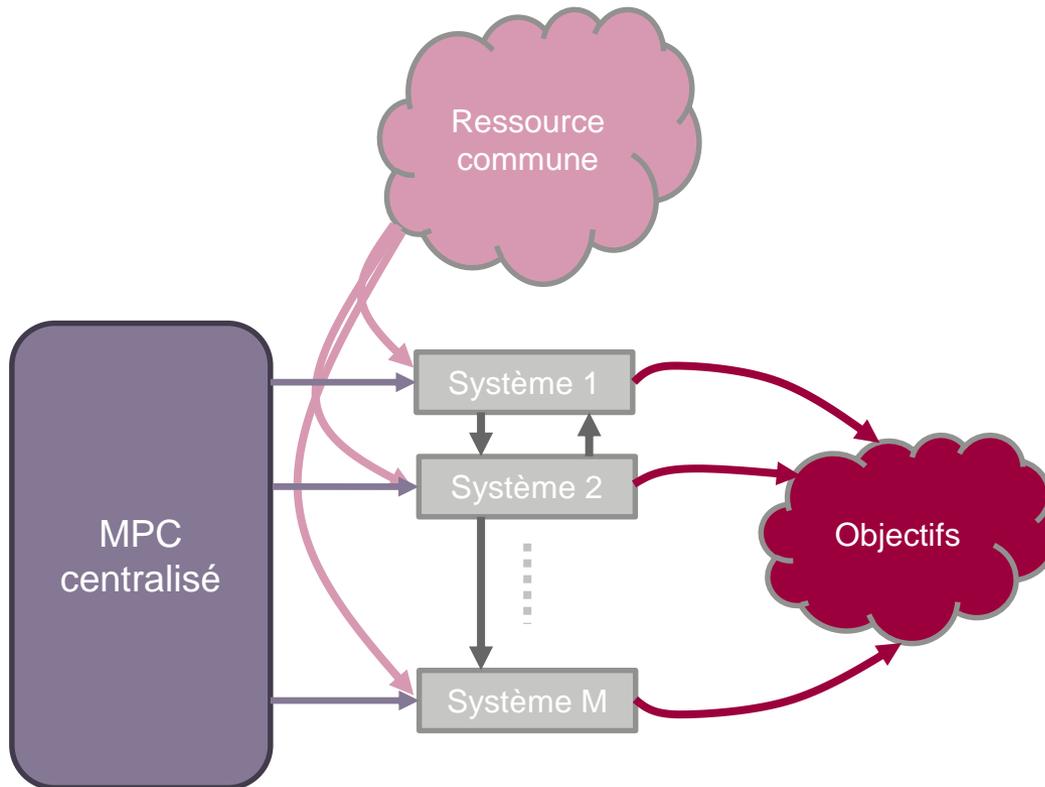


MPC : CENTRALISÉ VS. DISTRIBUÉ

*Enjeu : la commande des **grands systèmes***

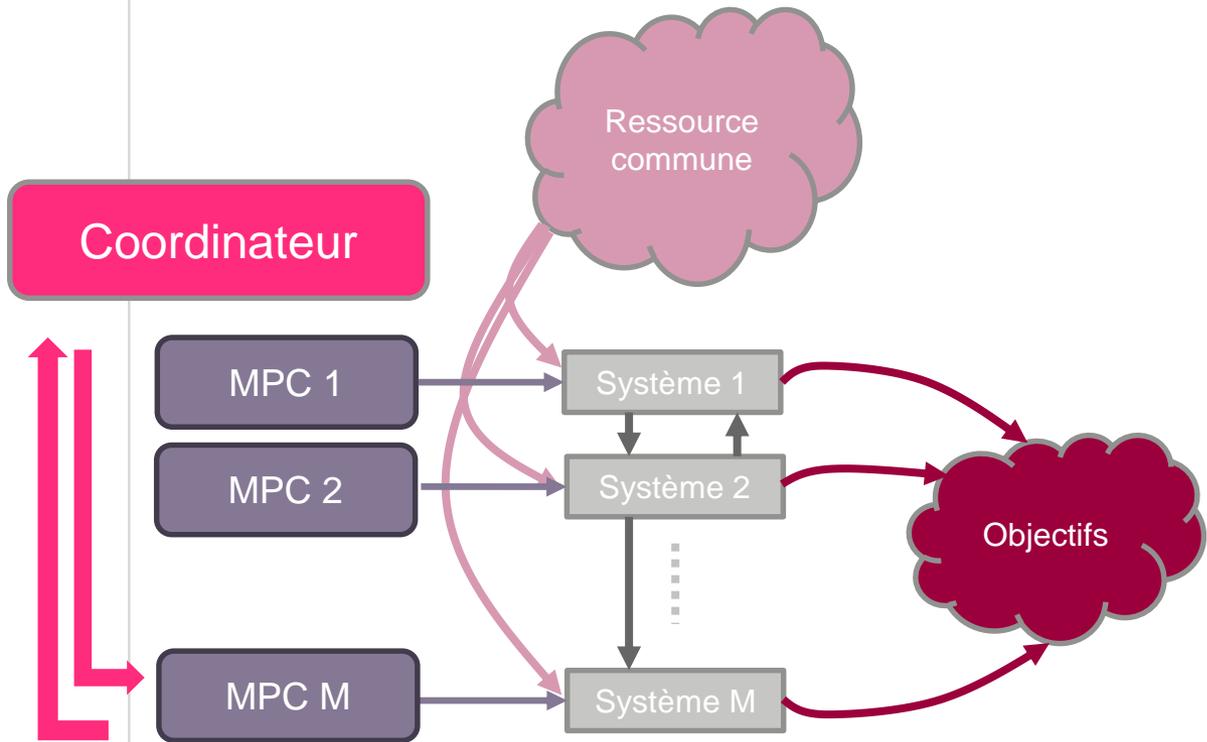
Exemple : les $N \gg 1$ pièces d'un bâtiment

MPC CENTRALISÉ



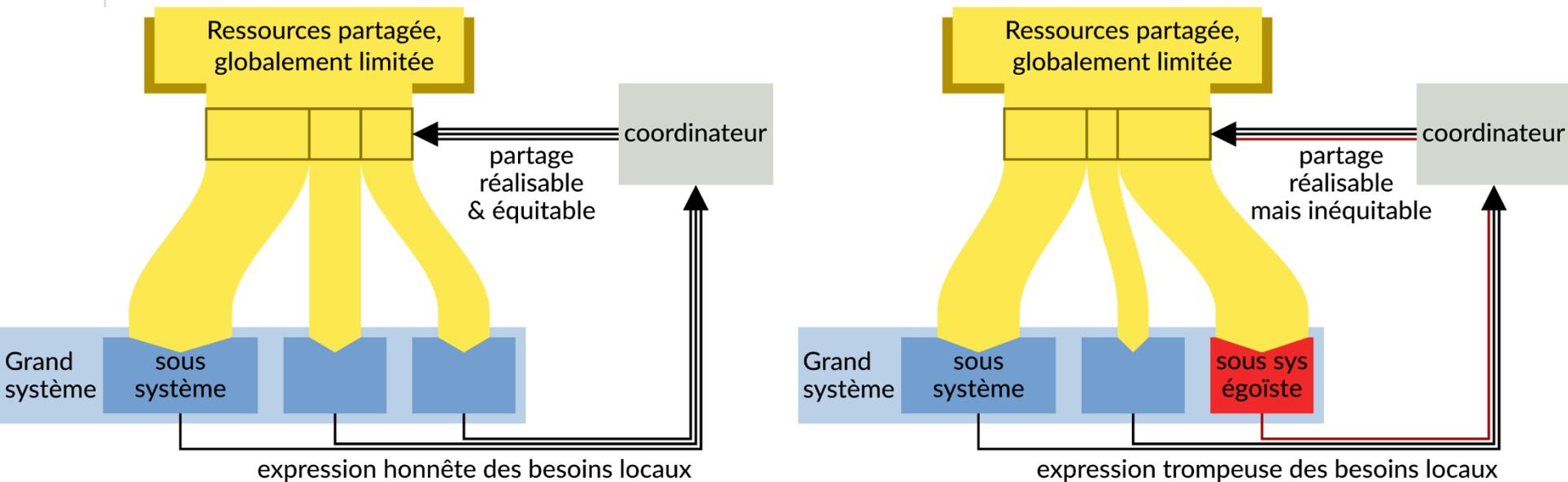
- Collection de M systèmes
- Interconnexion : ressource commune
- MPC Centralisé
 - *1 contrôleur pour tout gérer*
 - *C'est optimal mais...*
 - *Confidentialité ?*
 - *Puissance de calcul ?*
 - *Reconfigurabilité ?*

MPC DISTRIBUÉ : STRUCTURE



- Collection de M systèmes
 - 1 contrôleur par systèmes
- Chaque contrôleur :
 - *Objectifs locaux*
 - *Contraintes locales*
- Solution globale :
 - *Optimum global ?*
 - *Satisfaction contraintes globales ?*
- *Besoin de communication/coordination*
 - *Quel protocole/algorithmme ?*

MPC DISTRIBUÉ : SÉCURITÉ ?



*Stage été 2016 Sylvain Chatel (2A Supélec)
→ Projet de thèse pour septembre 2017 ?*



PLAN

L'équipe de recherche

Commande prédictive (MPC)

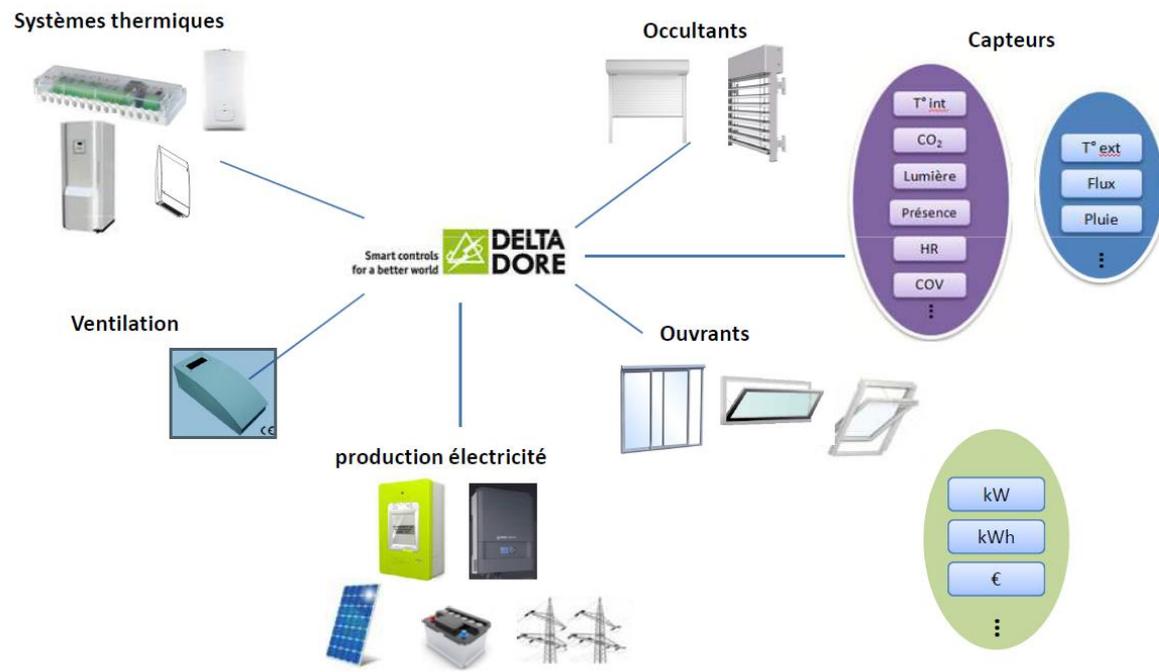
***Thèse Delta Dore :
énergie & confort d'un habitat***

Conclusion / Questions

**On saute directement
à la conclusion ?**

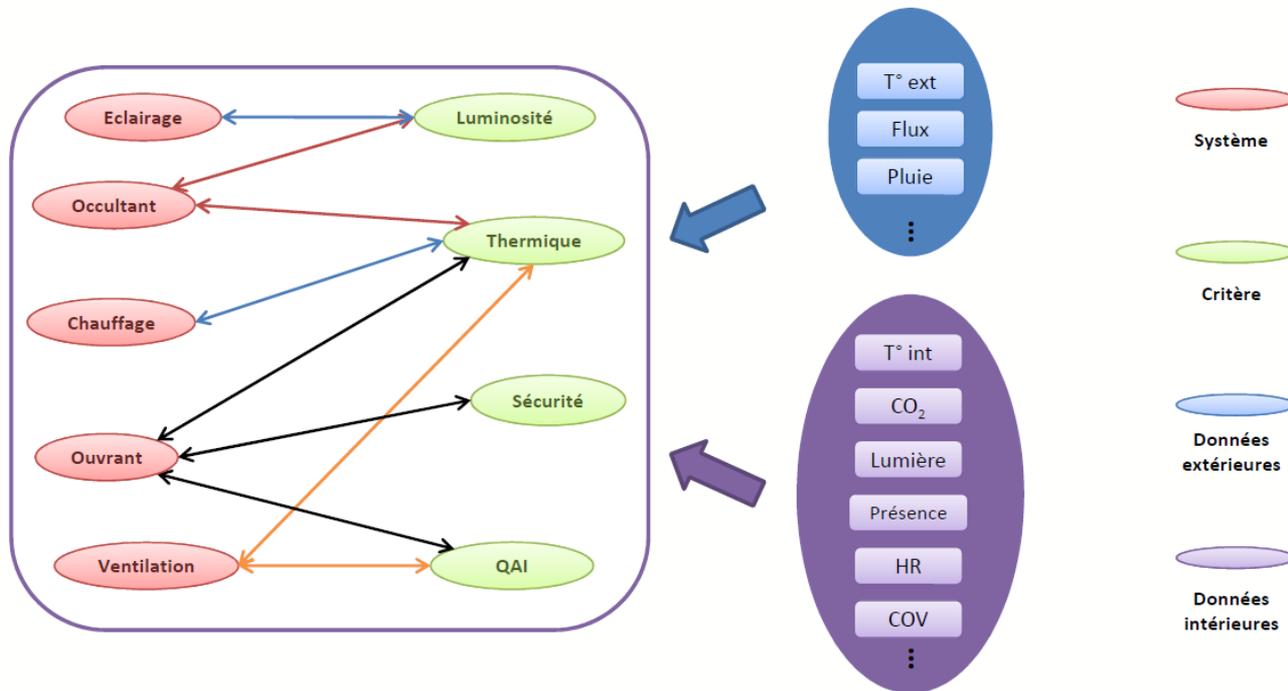
ENERGIE ET CONFORT DANS L'HABITAT

THÈSE DELTA DORE : LE BATIMENT COMME SYSTÈME COMPLEXE



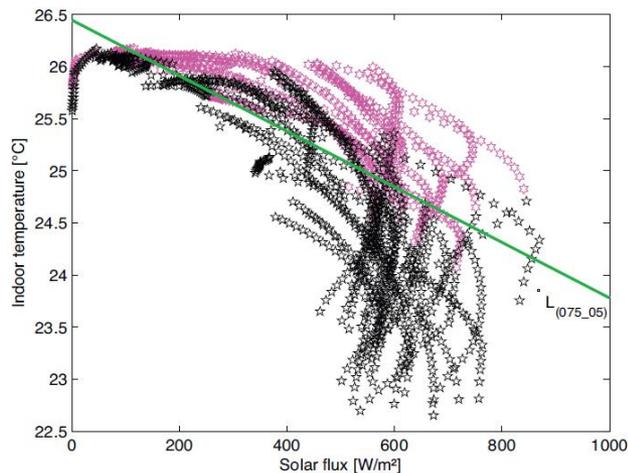
ENERGIE ET CONFORT DANS L'HABITAT

THÈSE DELTA DORE : LE BATIMENT COMME SYSTÈME COMPLEXE



ENERGIE ET CONFORT DANS L'HABITAT

THÈSE DELTA DORE : **VERS UNE SOLUTION SIMPLE**



- OPTIMISATION MIXTE
- ANALYSE DE DONNEES
- APPRENTISSAGE
 - SVM, AdaBoost
- Brevets + Produits industrialisés

Khang Le, Romain Bourdais, Hervé Guéguen.

« From hybrid model predictive control to logical control for shading system: A support vector machine approach. »
 Energy and Buildings, Elsevier, 2014, 84, pp.352-359. <[10.1016/j.enbuild.2014.07.084](https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.084)>



PLAN

L'équipe de recherche

Introduction Commande prédictive (MPC)

*Thèse Delta Dore :
énergie & confort d'un habitat*

Conclusion / Questions

MOTS CLÉS

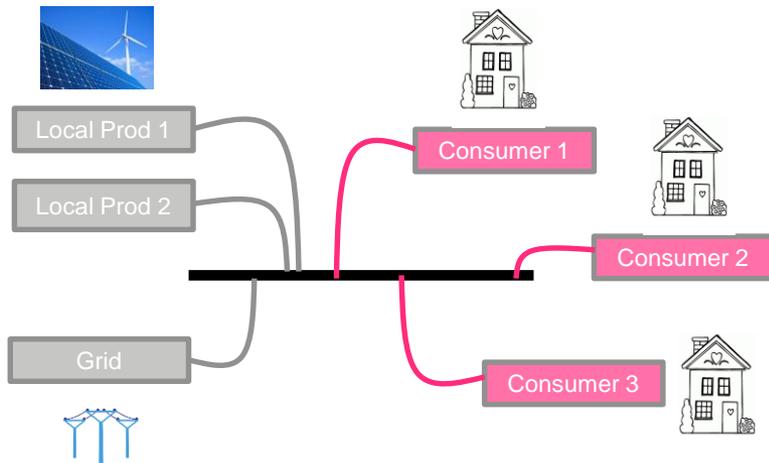
- Modélisation – Identification
- Optimisation (MPC)
 - *Convexe, Non convexe, Mixte,*
 - *Distribuée (grands systèmes)*
 - *Stochastique (météo, comportements humains)*
- Interactions entre contrôleurs de haut niveau
 - *Structuration*
 - *Respect vie privée/Confidentialité*

APPLICATIONS

- Gestion de l'énergie (bâtiments, réseaux électriques)



ANNEXE MPC DISTRIBUÉ



- What is the global objective ?

$$\min_{u_i, u_j} \left(\sum_i J_i(u_i) + \sum_j J_j(u_j) \right)$$

- Subject to local constraints :

$$\forall i, h_i(u_i) \leq 0, \forall j, h_j(u_j) \leq 0,$$

- Subject to global constraint (Power balance):

$$\sum_j u_j = u_{grid} + \sum_i u_i$$

$$\sum_j u_j \leq u_{max}$$

These constraints have to be relaxed !

ANNEXE MPC DISTRIBUÉ

EXAMPLE : PRICE DECOMPOSITION

- Global constraint :

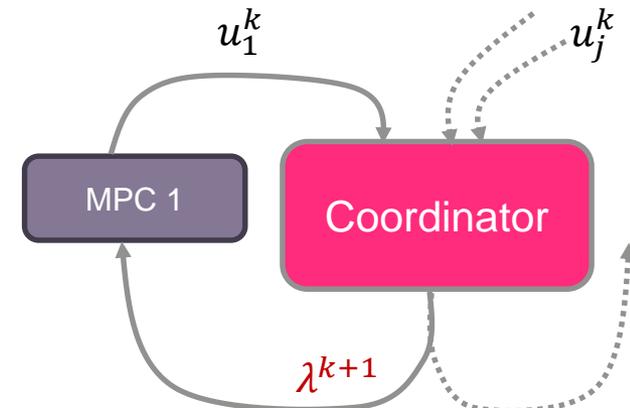
$$\sum_j u_j \leq u_{max}$$

- We relax this constraint:
 - « Ok, you can use power, but you have to pay »
 - The local problem becomes :

$$u_j^k = \arg \min_{u_j} (J_j(u_j) + \lambda^k u_j), \quad h_j(u_j) \leq 0$$

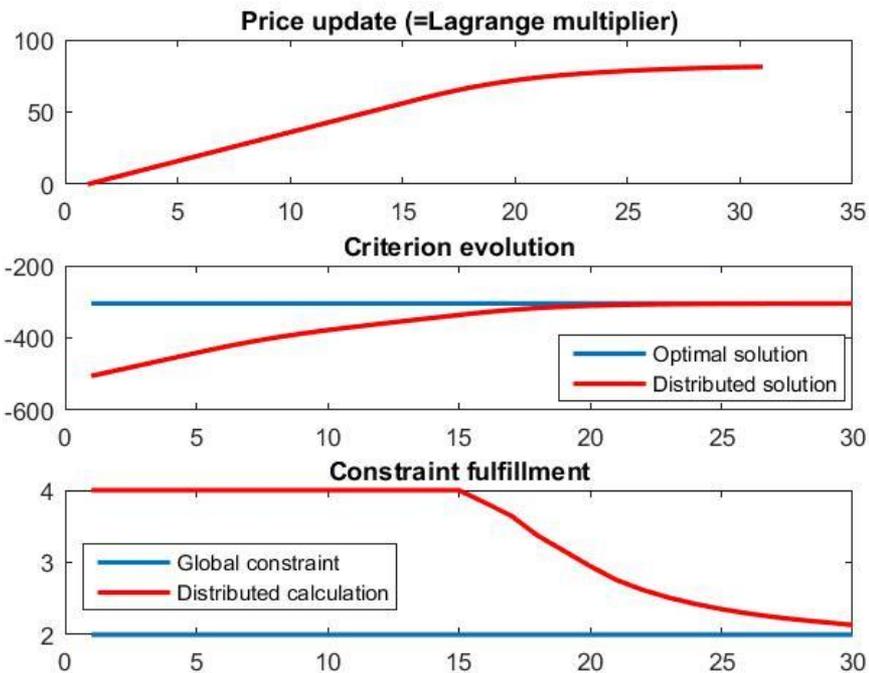
- Iteration mechanism to find the optimal price
 - Adapt supply and demand
 - Done by a coordinator

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k + step \left(\sum_j u_j^k - u_{max} \right)$$



ANNEXE MPC DISTRIBUÉ

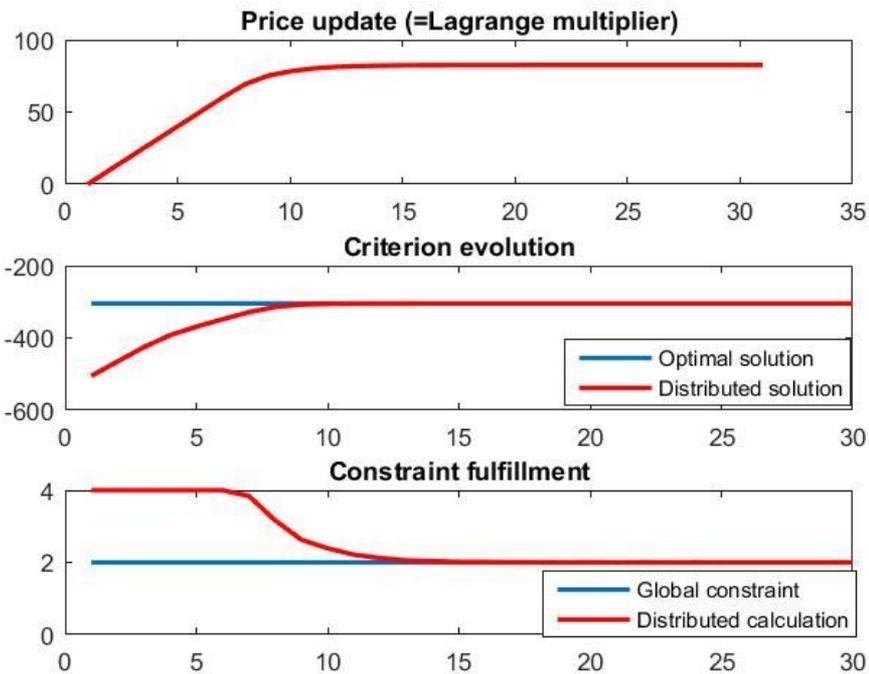
EXAMPLE : PRICE DECOMPOSITION



- It seems to work ...
 - But slow convergence
 - Requires many iterations !

ANNEXE MPC DISTRIBUÉ

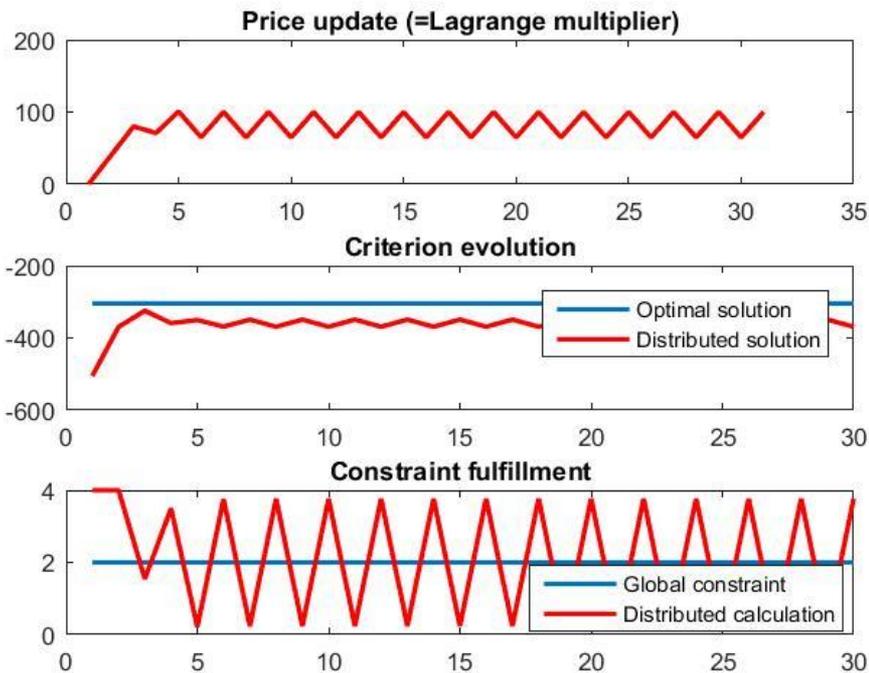
EXAMPLE : PRICE DECOMPOSITION



- Process can be optimized too
 - Improving the convergence

ANNEXE MPC DISTRIBUÉ

EXAMPLE : PRICE DECOMPOSITION



- But can also be badly tuned ...
 - It also can be unstable !
(Too much fluctuation on the price)