

UN SYSTÈME AVANCÉ POUR LA GESTION DE L'ÉNERGIE DANS LE BÂTIMENT POUR COORDONNER CONSOMMATION ET PRODUCTION

**Présenté par
Duy Long HA**

Sous l'encadrement de
Mme Mireille Jacomino
Mr Stéphane Ploix et
Mr Eric Zamaï

Soutenance de thèse 19 Septembre 2007



Plan

1 Contexte et enjeux

- Contexte énergétique actuel
- Enjeux énergétiques dans le secteur du bâtiment
- Verrous scientifiques

2 Analyse du problème

- Différentes activités énergétiques dans le bâtiment
- Modèles comportementaux

3 Formulation et approches de résolution

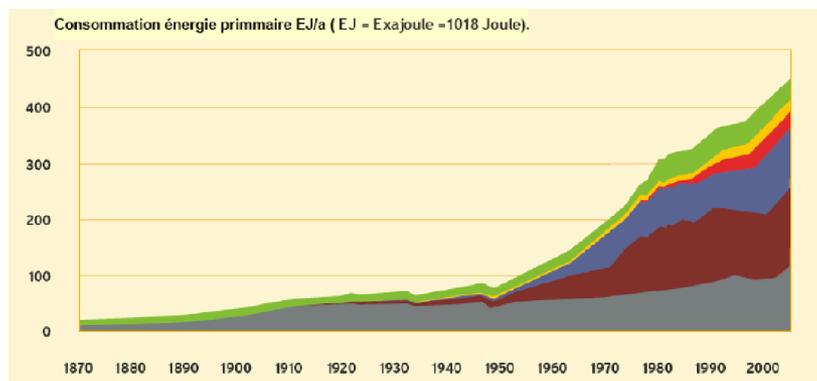
- Formulation générale
- Résolution de la couche anticipation
- Prise en compte des incertitudes dans la couche anticipation

4 Applications

- Gestion des flux énergétiques dans le bâtiment photovoltaïque
- Contribution à la prévention du blackout

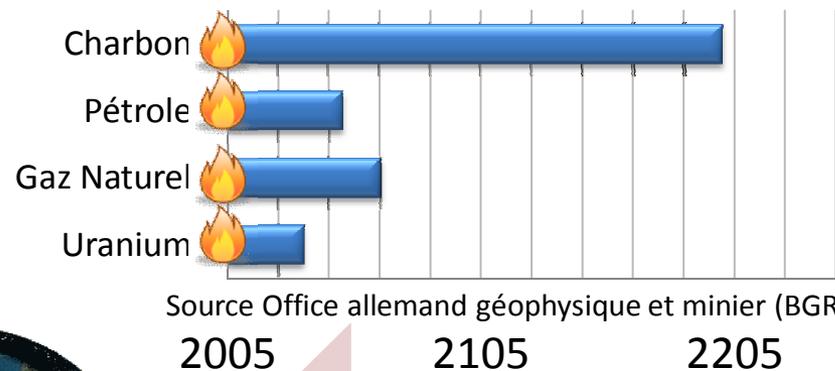
5 Conclusion et perspectives

Contexte

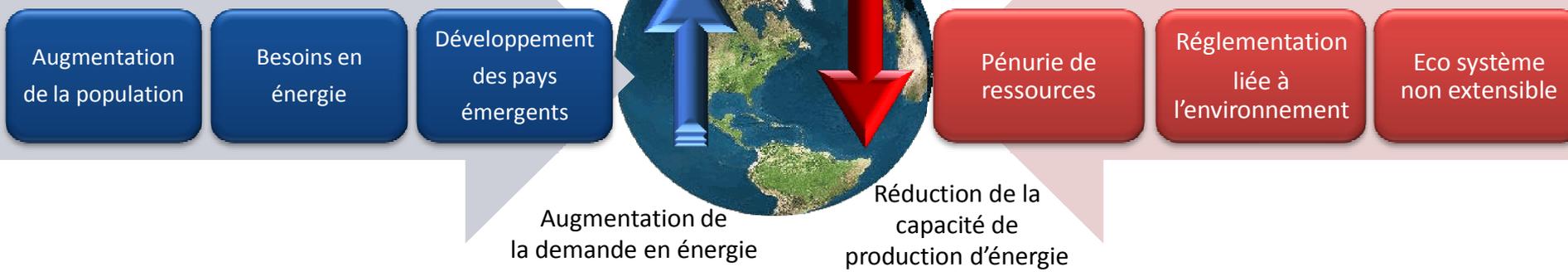


Consommation énergétique mondiale depuis 1870 (source IEA)

Combien de temps dureront encore les énergies fossiles



Source Office allemand géophysique et minier (BGR)

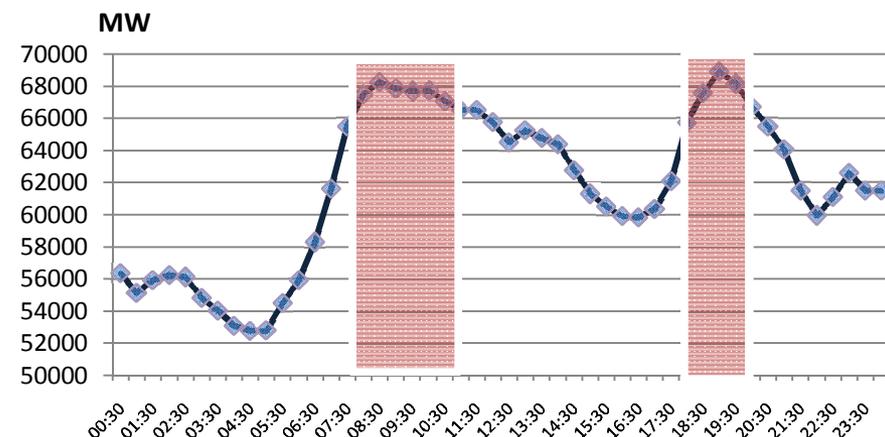
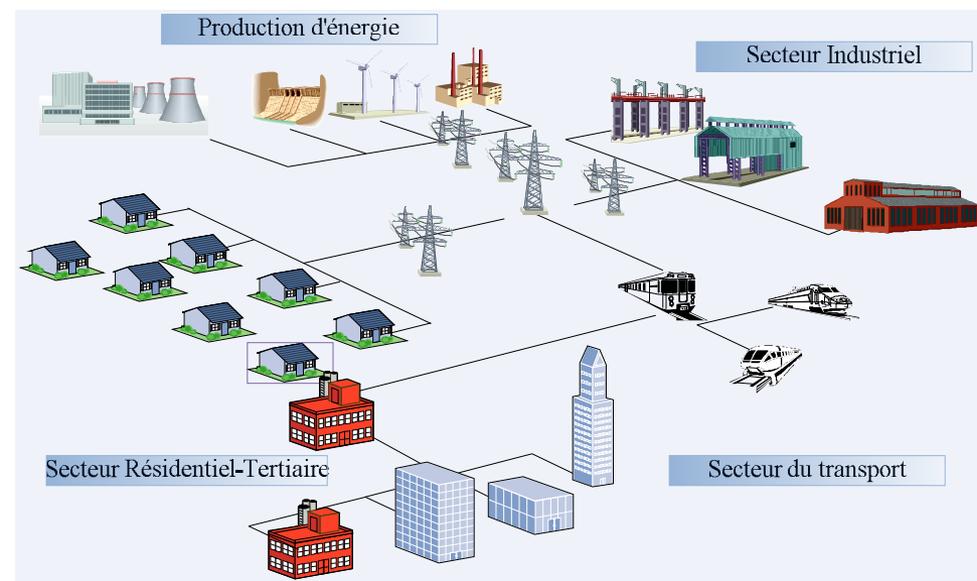


Questions fondamentales pour le futur



- Comment améliorer notre manière de consommer ?
- Comment mettre en place un développement durable en prenant en compte les aspects environnementaux ?

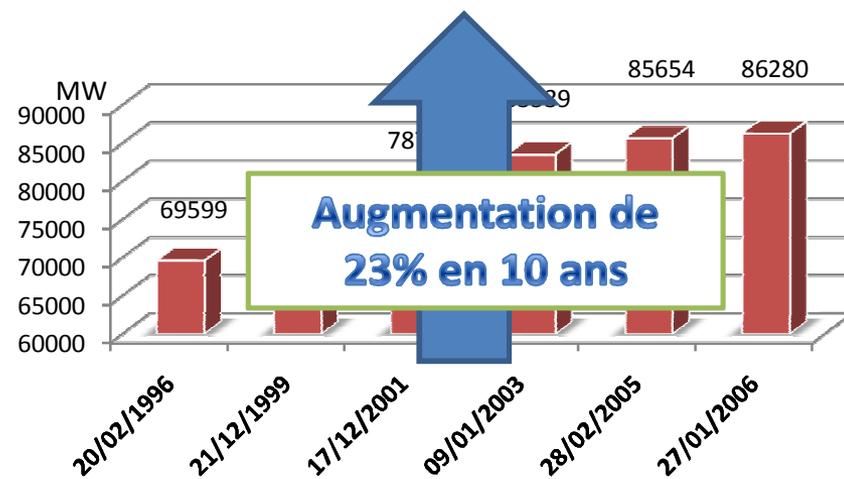
Problématique de conduite et d'exploitation du réseau électrique actuel



La courbe de consommation d'une journée en France source RTE [1]

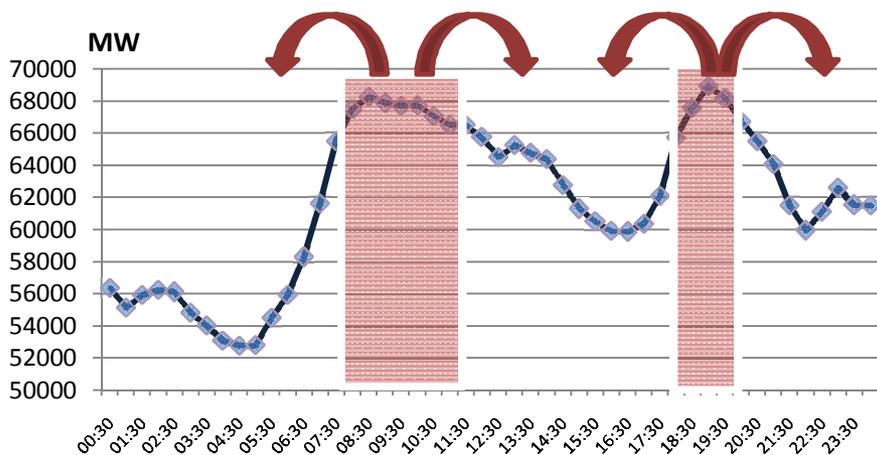
Problématique liée au pic de consommation

- Prise en charge des pics de consommation par des sources d'énergie polluantes et coûteuses
- Demande d'augmentation de la capacité de production
- Impact sur les réseaux (blackout)



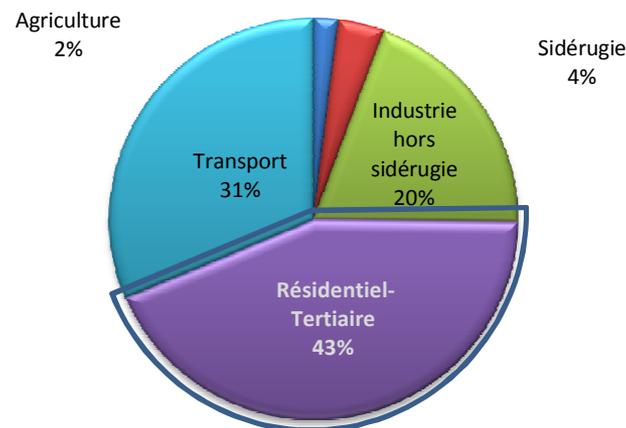
Les records de pic de consommation en France pendant 10 ans (1996-2006) source RTE [1]

Enjeux liés au secteur du bâtiment



La courbe de consommation dans une journée en France source RTE [1]

Proportion de la consommation d'énergie par secteur en France(2002)

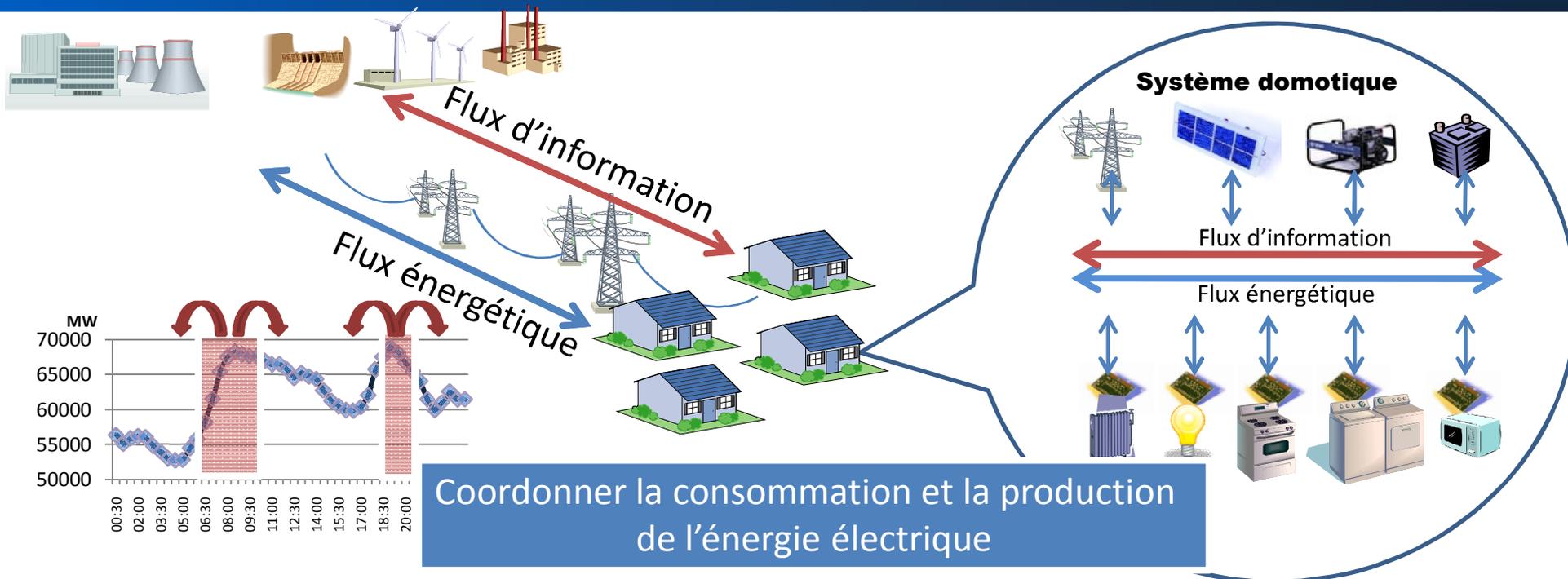


Réduction de la consommation en période de pic en tenant compte du critère de confort de l'utilisateur

Changement de comportement et de technologie

- Le secteur du bâtiment représente à lui seul 43% de l'énergie consommée en France et 23% des émissions de gaz à effet de serre
- Le changement de comportement des usagers et de la technologie est nécessaire

Systeme de gestion de l'énergie dans le bâtiment



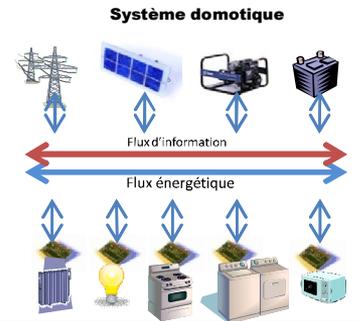
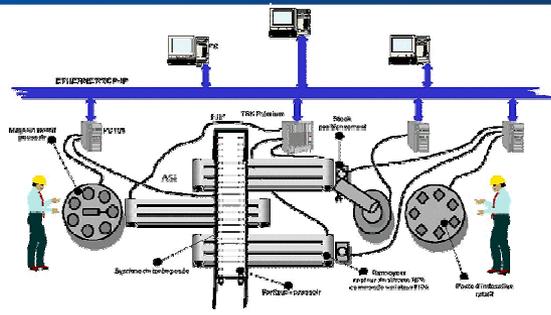
Enjeux pour le fournisseur d'énergie

- Réduire le pic de consommation et réduire l'impact environnemental et le coût de production d'énergie
- Optimiser le plan de production d'énergie en anticipant les demandes des consommateurs

Enjeux pour le consommateur

- Assurer son confort en prenant en compte les contraintes de ressources et d'environnement
- Mieux maîtriser sa consommation et sa production d'énergie locale

Analogie entre système de production et système de gestion d'énergie



Notation	Système de production	Système de gestion d'énergie dans le bâtiment
Ressource		<p>Ressource énergétique</p> <p>Equipements</p>
Flux physique	<p>Matières premières</p> <p>→</p> <p>Système de production</p> <p>→</p> <p>Produit final à date</p> <p>clients</p>	<p>Flux énergétiques</p> <p>→</p> <p>Bâtiment</p> <p>→</p> <p>Services</p> <p>Usager</p>
Stock		<p>Stockage électrique</p> <p>Stockage thermique</p>
Performance	<ul style="list-style-type: none"> • Délai • Coût • Impact environnemental 	<ul style="list-style-type: none"> • Confort • Coût • Impact environnemental



Verrous scientifiques

Formulation du problème

Vers un problème d'ordonnancement

Vers un problème de commande prédictive



Difficultés

- modèles continus & hybrides
- incertitudes prépondérantes
- événements se produisant à des échelles de temps différentes



Difficultés

- modèle à événements discrets
- contraintes fortes à satisfaire
- incertitudes prépondérantes
- événements se produisant à des échelles de temps différentes

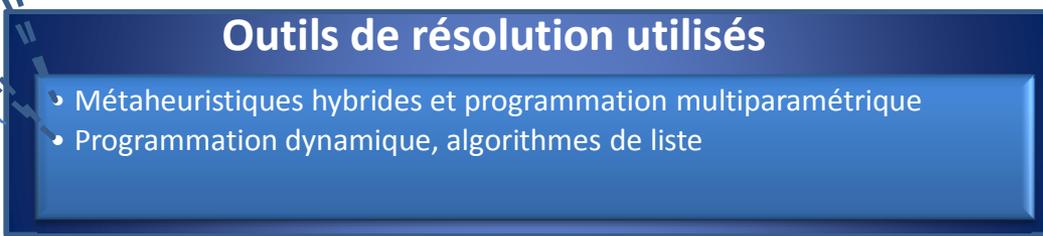
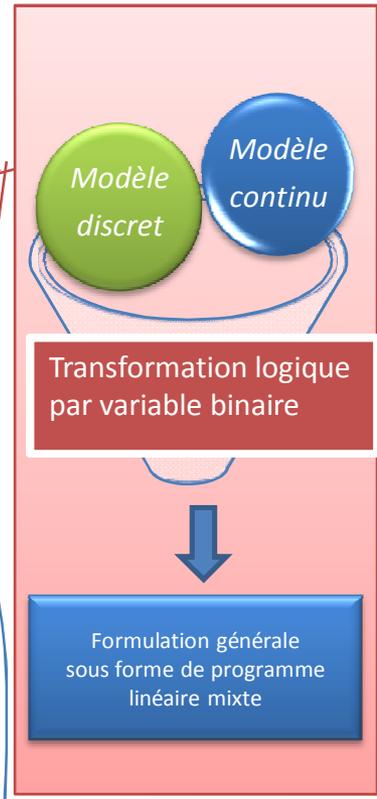
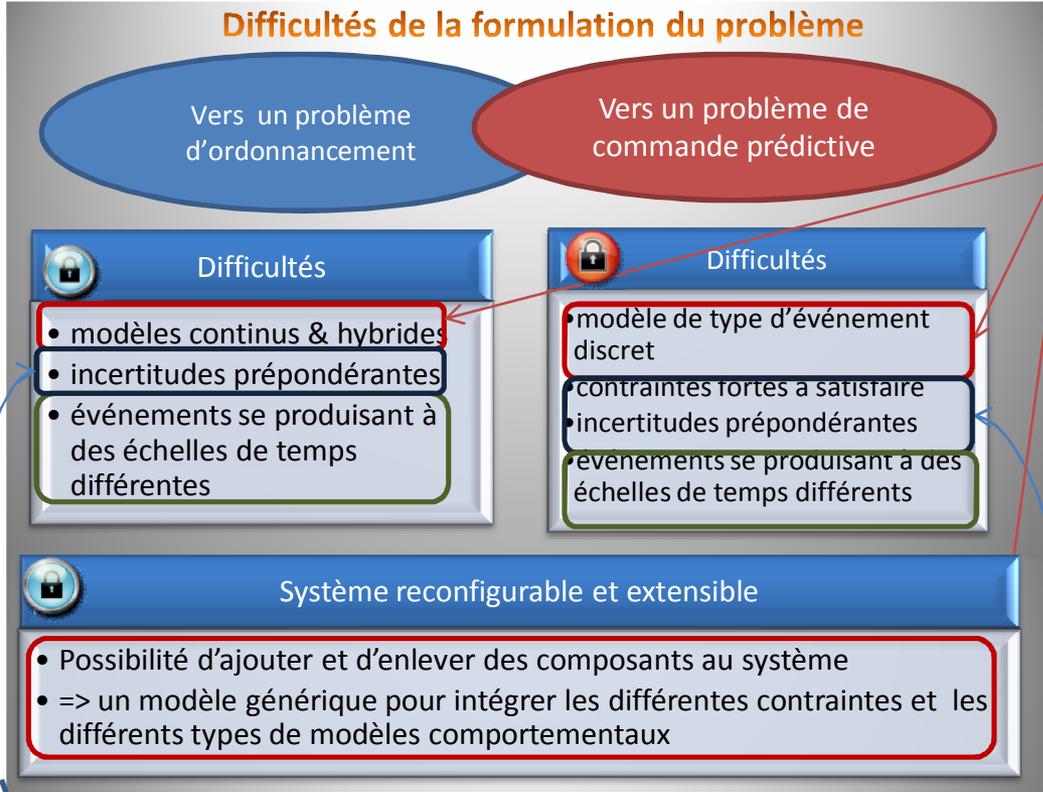
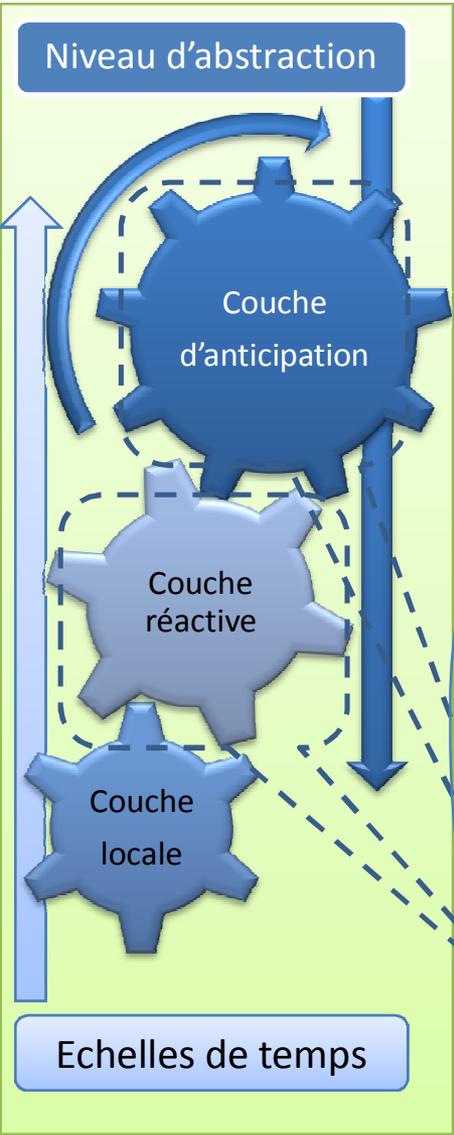


Système reconfigurable et extensible

- Possibilité d'ajouter et d'enlever des composants au système
- => un modèle générique pour intégrer les différentes contraintes et les différents types de modèles comportementaux



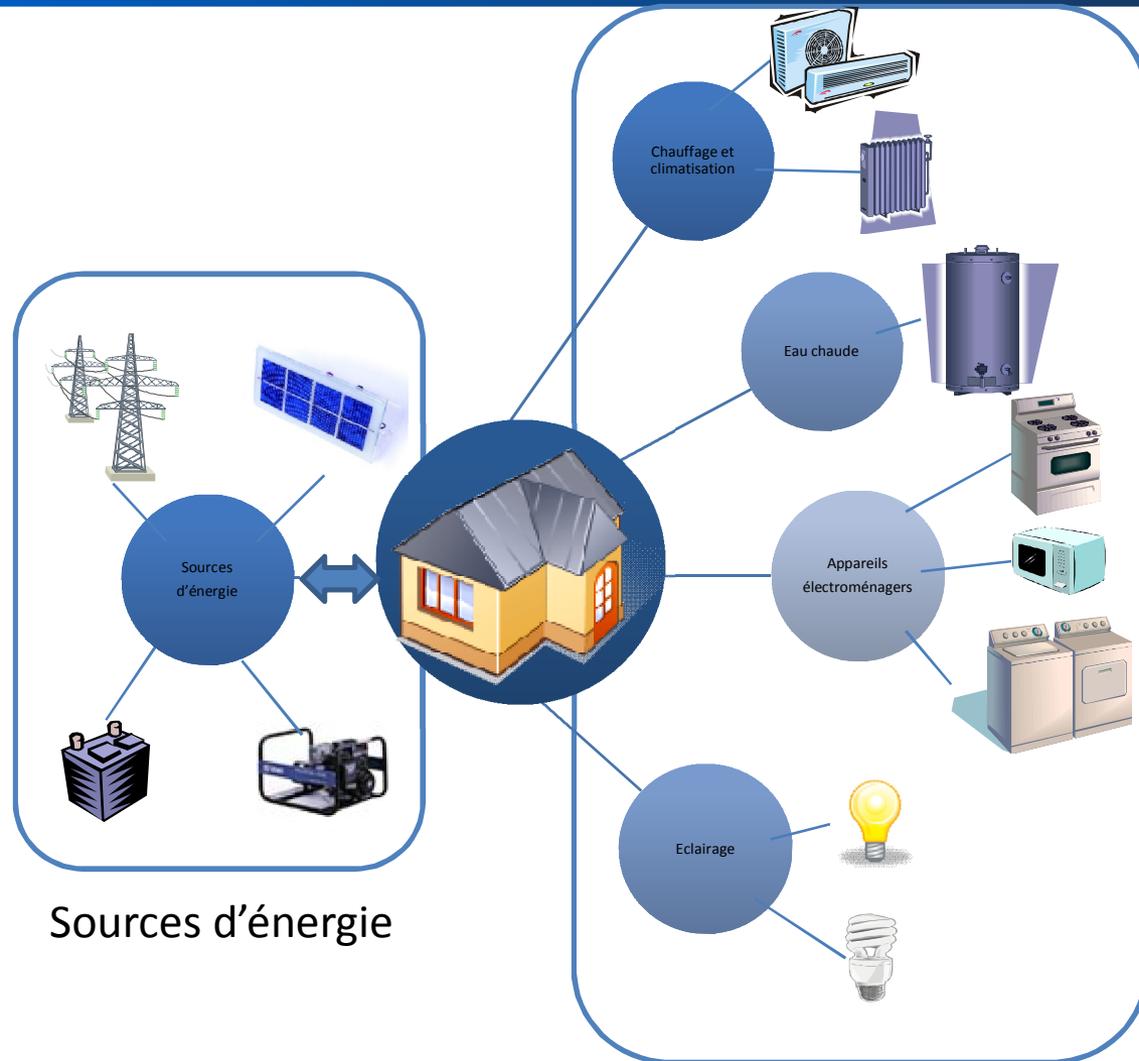
Méthodologies proposées



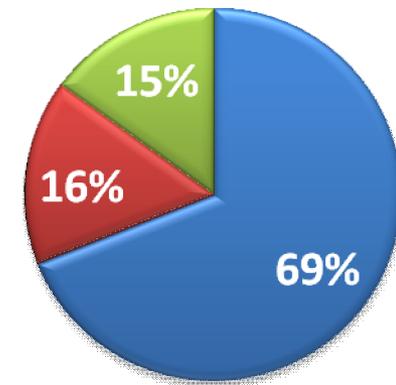
2 Analyse du problème

- Différentes activités énergétiques dans le bâtiment
- Modèles comportementaux

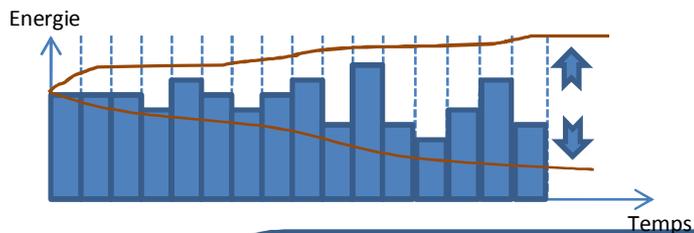
Différentes fonctions énergétiques dans le bâtiment



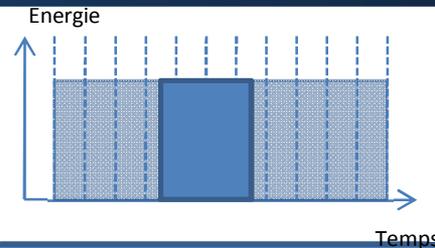
- Chauffage, climatisation, ventilation
- Eclairage, appareils électroménagers
- Eau chaude sanitaire



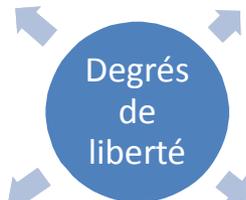
Classification des services



Modulable

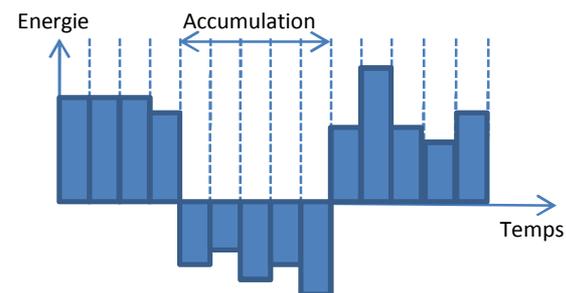
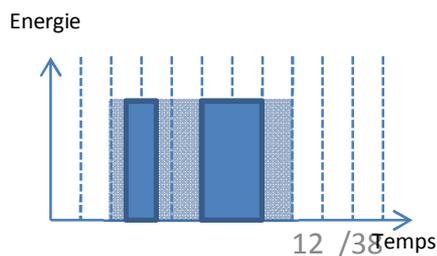
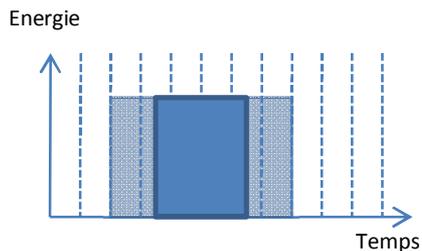


Décalable

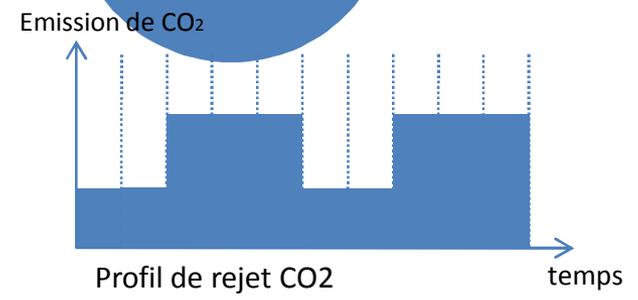
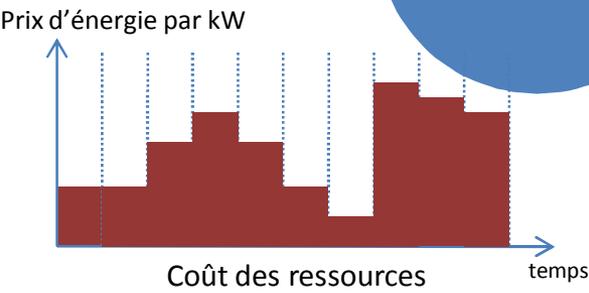
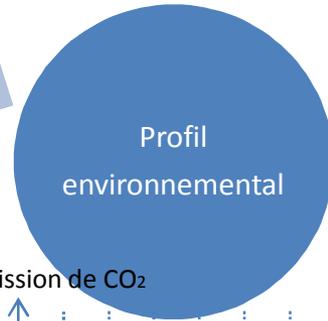
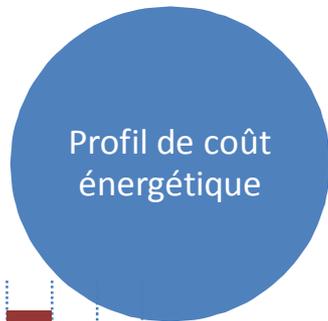
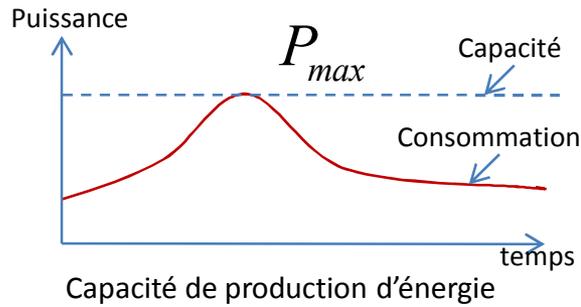


Interruptible

Accumulable

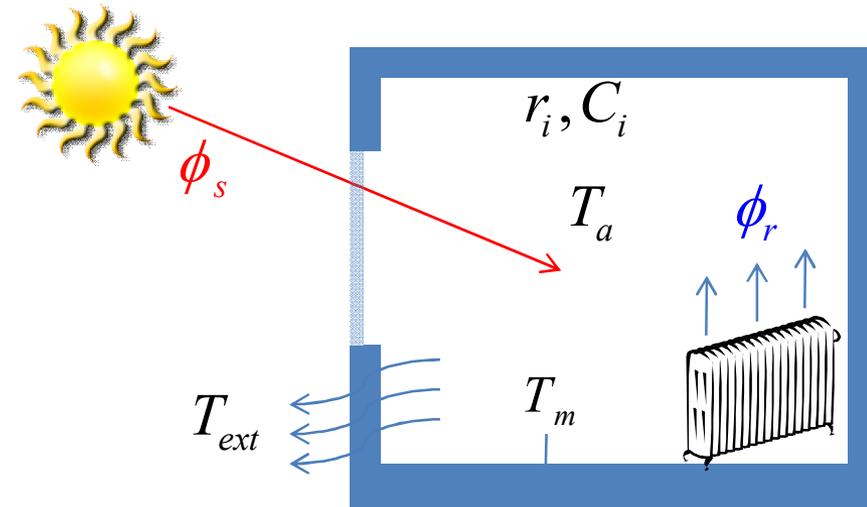


Caractéristiques des sources



Modèle continu

$$\begin{bmatrix} \frac{dT_a}{dt} \\ \frac{dT_m}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{r_i C_e} & \frac{1}{r_i C_e} \\ \frac{1}{r_i C_i} & -\frac{1}{r_a C_i} - \frac{1}{r_i C_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a \\ T_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r_a C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{W}{C_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext} \\ \phi_r \\ \phi_s \end{bmatrix}$$



- T_a Température ambiante
- T_m Température de l'enveloppe
- T_{ext} Température extérieure

Modèle dynamique

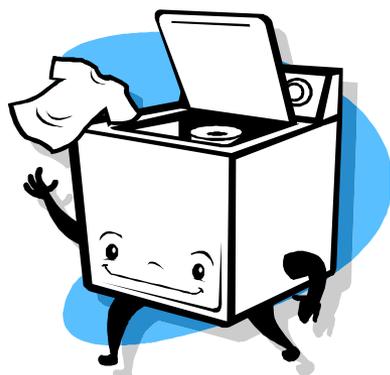
- Modèle thermique d'une pièce sous la forme de deux constantes de temps permettant de décrire le changement de température ambiante

Modèle automate à états finis

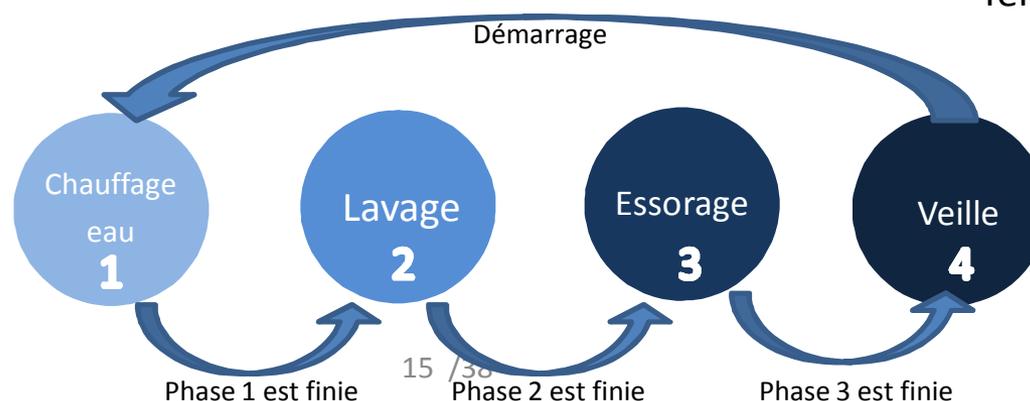
Modèle automate à états finis

- Modèle à états finis composé d'un ensemble d'états et de transitions avec des conditions de transition
- Chaque état correspond à une phase de fonctionnement, la transition représente le changement de phase de fonctionnement

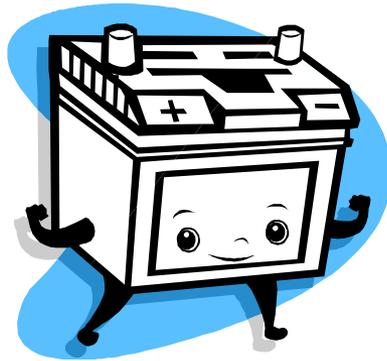
Puissance consommée



Service de lave-linge



Modèle hybride



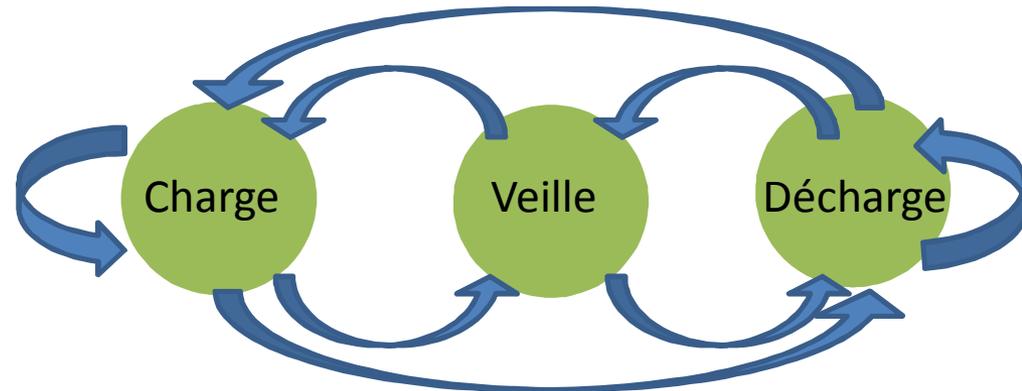
Service de stockage

$$\frac{dC}{dt} = C(t) + u(t)$$

$C(t)$ énergie stockée dans la batterie à l'instant t

$u(t)$ vecteur de contrôle/commande à l'instant t

- $u(k) > 0$: batterie dans l'état charge
- $u(k) = 0$: batterie dans l'état veille
- $u(k) < 0$: batterie dans l'état décharge



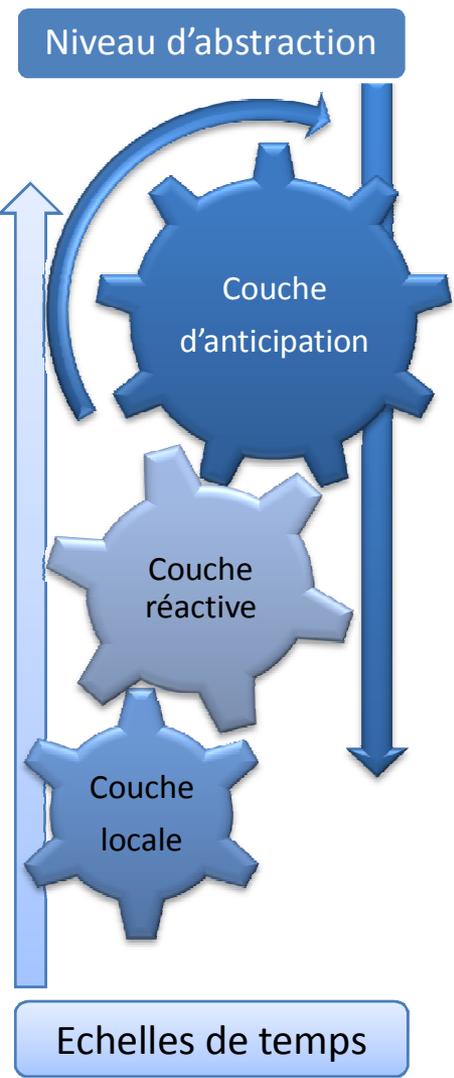
Caractéristiques de ce type de modèle

- L'évolution des variables physiques est exprimée par le modèle continu
- Les conditions de transition d'états sont représentées par des conditions logiques

3 Formulation et approches de résolution

- Formulation générale
- Résolution de la couche anticipation
- Prise en compte des incertitudes dans la couche anticipation

Mécanisme de pilotage de multi-échelle



Couche d'anticipation

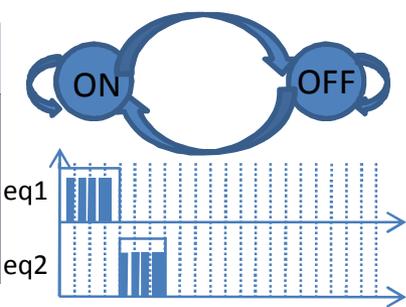
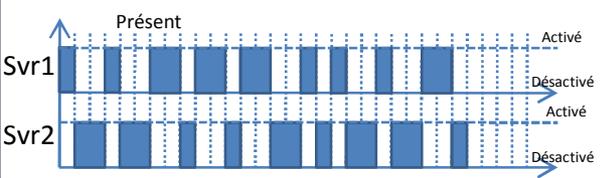
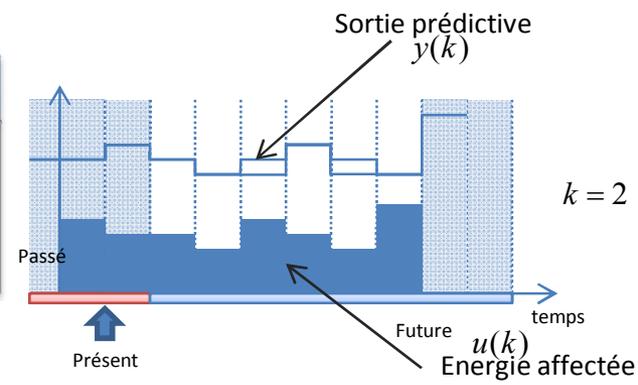
- Objectif: générer le plan d'affectation des ressources en fonction des prédictions disponibles
- Flexibilité: Basée sur les degrés de liberté offerts par l'utilisateur
- Contrainte: l'énergie affectée moyenne

Couche réactive

- Objectif: adapter le plan d'affectation des ressources pour faire face aux événements imprévus
- Flexibilité: Basée sur les degrés de liberté offerts par le fonctionnement des équipements
- Contrainte: puissance consommée maximale

Couche locale

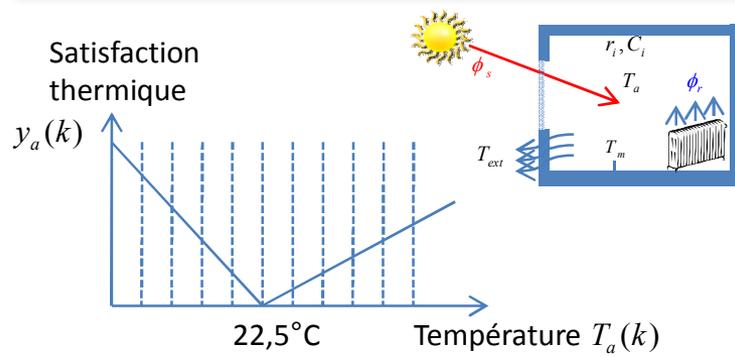
- Objectif: suivre la consigne de la couche d'anticipation et de la couche réactive en utilisant le contrôle embarqué
- Flexibilité: Régulation locale
- Contrainte: capacité de l'équipement



Problèmes traités dans la couche d'anticipation

Problème de gestion des services

Sous problème N1: Calcul de la séquence optimale des services modulables



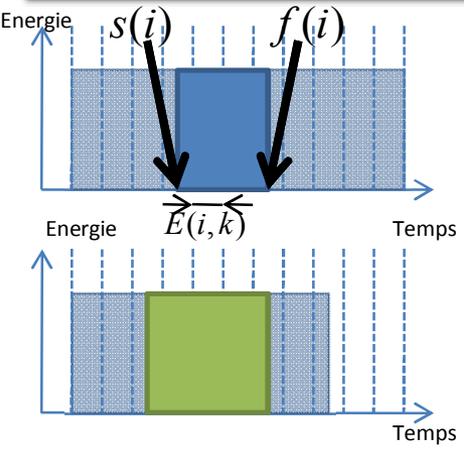
Chercher $T_a(i, k), E_c(i, k)$

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} T_a(i, k+1) \\ T_m(i, k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ r_i C_e & r_i C_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a(i, k) \\ T_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{r_a C_i} & \frac{1}{C_i} & \frac{W}{C_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext}(k) \\ E_c(k) \\ \phi_s(k) \end{bmatrix} \\ y_a(k) = \begin{cases} a_1 T_a(i, k) + b_1 & \text{Si } T_a(i, k) \leq T_{opt} \\ a_2 T_a(i, k) + b_2 & \text{Si } T_a(i, k) > T_{opt} \end{cases} \end{cases}$$

Fonction de satisfaction thermique sous forme linéaire par morceaux (ISO7730)

$$y(i) = \sum_{k=1}^K y_a(i, k) \quad \leftarrow \text{Critère de confort}$$

Sous problème N2: Calcul de la date de début des services décalables



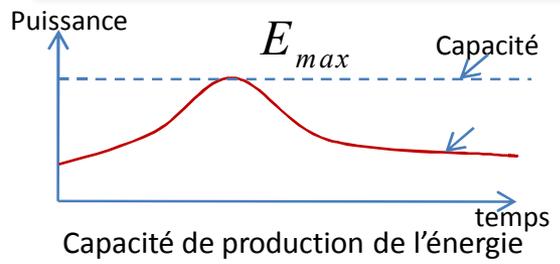
Chercher $s(i), f(i), E_c(i, k)$

$$\begin{cases} E_c(i, k) = \begin{cases} E'(i, k) = (\text{Min}[f(i), (k+1)\Delta] - \text{Max}[s(i), k\Delta]) P(i) & \text{Si } E'(i, k) > 0 \\ 0 & \text{Si } E'(i, k) \leq 0 \end{cases} \\ y_a(i) = \begin{cases} a_3 f(i) + b_3 & \text{Si } f(i) \leq f_{opt} \\ a_4 f(i) + b_4 & \text{Si } f(i) > f_{opt} \end{cases} \end{cases} \quad \leftarrow \text{Critère de confort}$$

Problèmes traités dans la couche d'anticipation

Problème de gestion des sources

Sous problème N3: Calcul de l'énergie produite par chaque source

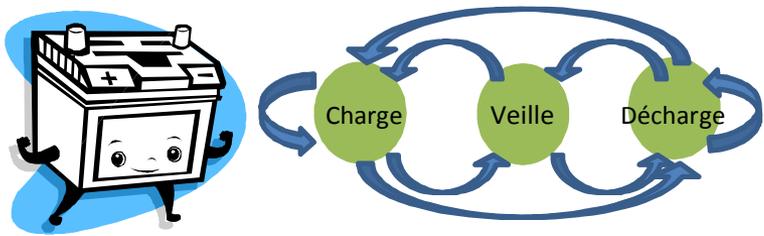


Chercher $E(i, k)$ Critère de coût Critère d'émission de CO₂

$\{ E(i, k) \leq E_{max}$

$J_3^C = C(i, k) \times E(i, k), J_3^e = \tau_{CO_2}(i, k) \times E(i, k)$

Sous problème N4: Calcul de la séquence de contrôle du stockage

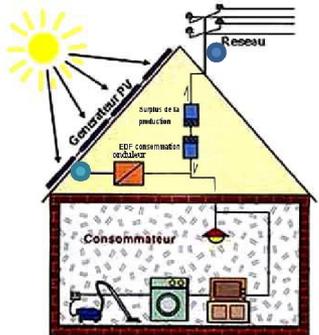


$u(k) > 0$: batterie dans l'état charge

$u(k) = 0$: batterie dans l'état veille

$u(k) < 0$: batterie dans l'état décharge

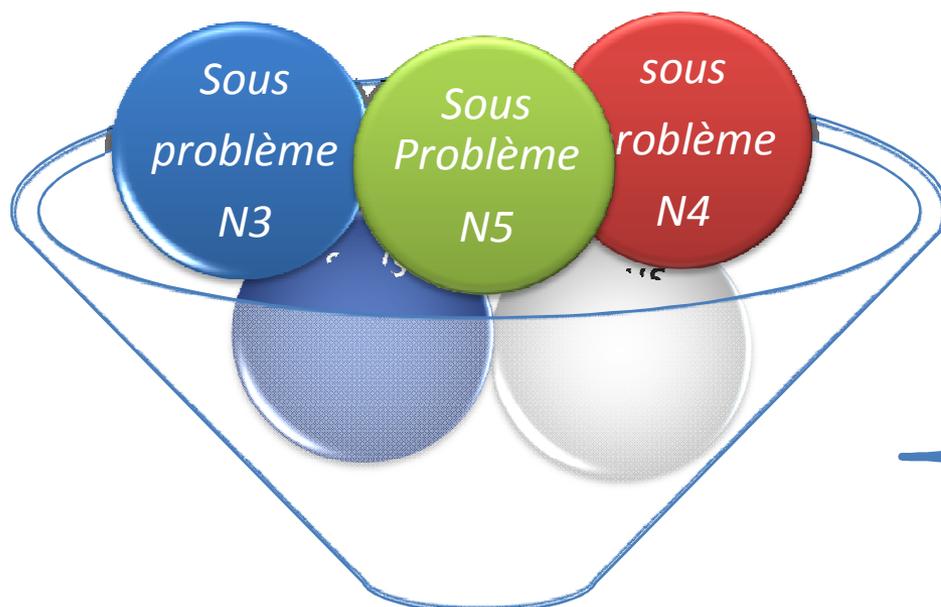
Sous problème N5: Gérer le service de revente de l'énergie produite localement



Mode import Si $E_{pro}(k) \leq E_{con}$

Mode export Si $E_{pro}(k) > E_{con}(k)$

Formulation générale



$$[ax - b \leq 0] \Leftrightarrow [\delta = 1]$$

Si et seulement si
 x et δ satisfont les deux
contraintes suivantes

$$\begin{cases} ax - b \leq M(1 - \delta) \\ ax - b \geq \epsilon + (m - \epsilon)\delta \end{cases} \quad (1)$$

(Bemporad et Morari, 1998)

Standardisation des modèles Formulation générale

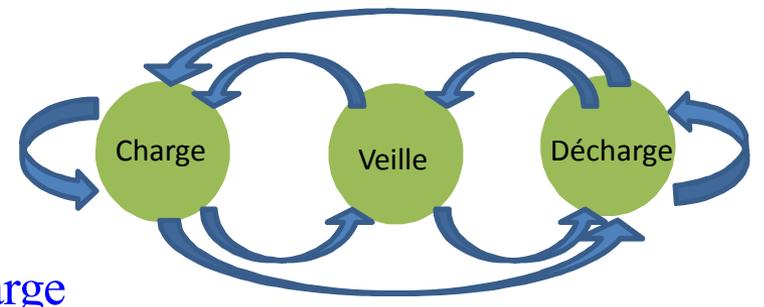
Exemple de la batterie



$$C(k + 1) = C(k) + u(k)$$

$\eta < 1$: le rendement de la batterie

- $u(k) > 0$: la batterie dans l'état charge
- $u(k) = 0$: la batterie dans l'état veille
- $u(k) < 0$: la batterie dans l'état décharge



Ajouter la variable binaire $\delta(k)$ pour distinguer les états
 $[\delta(k) = 1] \Leftrightarrow [u(k) \leq 0]$ selon la transformation (1)

$$\begin{cases} u(k) \leq M(1 - \delta(k)) \\ u(k) \geq \epsilon + (m - \epsilon)\delta(k) \end{cases}$$

$$C(k + 1) = C(k) + \eta \times \delta(k) \times u(k) + \frac{1}{\eta} \times (1 - \delta(k)) \times u(k) \equiv z(k)$$

Variable auxiliaire

$$\begin{cases} z(k) \leq M \times \delta(k) \\ z(k) \geq m \times \delta(k) \\ z(k) \leq u(k) - m(1 - \delta(k)) \\ z(k) \geq u(k) - M(1 - \delta(k)) \end{cases}$$

Formulation sous forme mixte

$$\begin{aligned}
 & J_1 = \sum y(i) \quad \text{Critère de confort} \\
 & J_2 = \sum \tau_{CO_2}(i, k) \times E_s(i, k) \quad \text{Critère d'émission de CO}_2 \\
 & J_3 = \sum Co(i, k) \times E_s(i, k) \quad \text{Critère de coût} \\
 & \sum E_c(i, k) \leq \sum E_s \forall k \in \{1, \dots, K\}, i \in \{1, \dots, I_r\} \quad \text{Contrainte de capacité de ressource} \\
 & y(k+1) = F_1 x(k) + F_2 u(k) + F_3 \delta(k) + F_4 z(k) \quad \text{Évolution du système} \\
 & + F_5 \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 & E(i, k) = [1 - \delta(i, k)] \forall k \in \{1, \dots, K\}, i \in \{1, \dots, I_{sd}\} \quad \text{Service décalable} \\
 & E_{co}(k) + E_{ex}(k) = E_{pro}(k) + E_{im}(k) \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad \text{Equilibre de la production et de la consommation} \\
 & u(k) \leq M(1 - \delta(k)) \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 & u(k) \leq \epsilon + (m - \epsilon)\delta(k) \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 & z(k) \leq M \times \delta(k) \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 & z(k) \geq m \times \delta(k) \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 & z(k) \leq u(k) - m(1 - \delta(k)) \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 & z(k) \geq u(k) - M(1 - \delta(k)) \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}
 \end{aligned}$$

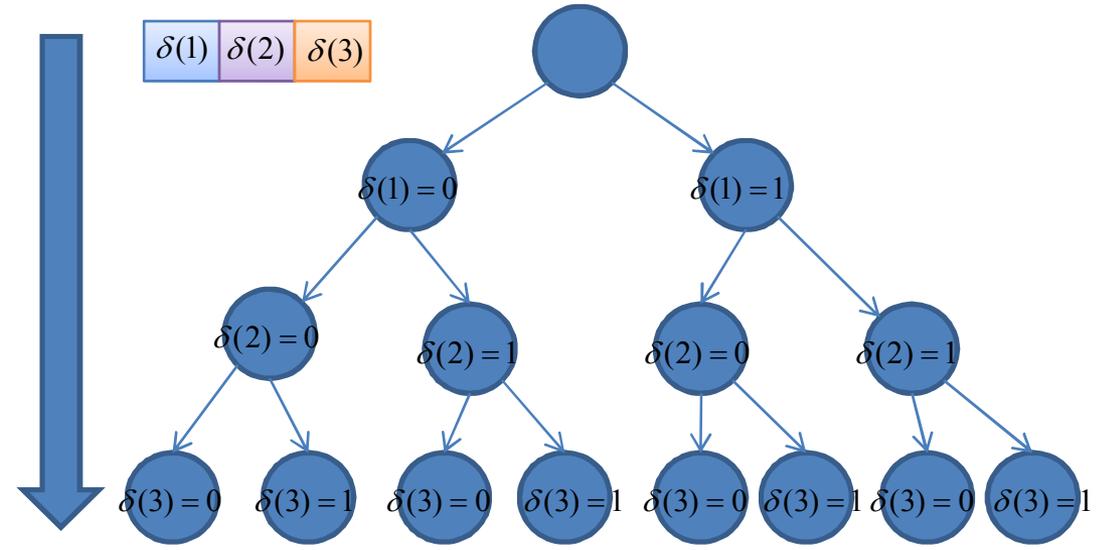
Approches multicritères	
<p>Approche d'aggrégation des critères</p> <p>La transformation équivalente de la partie logique</p> $J = a \times J_1 + b \times J_2 + c \times J_3$	<p>Approche ϵ-contrainte</p> $J = J_1$ $\begin{cases} J_2 \geq \underline{J_2} \\ J_3 \geq \underline{J_3} \end{cases}$

Résolution par programmation mixte

Programme linéaire mixte

$$\begin{cases}
 J_1 = \sum y(i) \\
 J_2 = \sum \tau_{CO_2}(i, k) \times E_s(i, k) \\
 J_3 = \sum Co(i, k) \times E_s(i, k) \\
 \sum E_c(i, k) \leq \sum E_s \forall k \in \{1, \dots, K\}, i \in \{1, \dots, I_r\} \\
 y(k+1) = F_1 x(k) + F_2 u(k) + F_3 \delta(k) + F_4 z(k) + F_5 \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 E(i, k) = [1 - \delta(i, k)] \forall k \in \{1, \dots, K\}, i \in \{1, \dots, I_{sd}\} \\
 E_{co}(k) + E_{ex}(k) = E_{pro}(k) + E_{im}(k) \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 u(k) \leq M(1 - \delta(k)) \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 u(k) \leq \epsilon + (m - \epsilon)\delta(k) \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 z(k) \leq M \times \delta(k) \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 z(k) \geq m \times \delta(k) \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 z(k) \leq u(k) - m(1 - \delta(k)) \forall k \in \{1, \dots, K\} \\
 z(k) \geq u(k) - M(1 - \delta(k)) \forall k \in \{1, \dots, K\}
 \end{cases}$$

Procédure par séparation et évaluation (B&B)



La complexité de l'algorithme est

$$2^N$$

Difficultés de résolution du problème

- Nombre important de variables binaires
- Solveurs ne répondant pas à la contrainte de temps de réponse

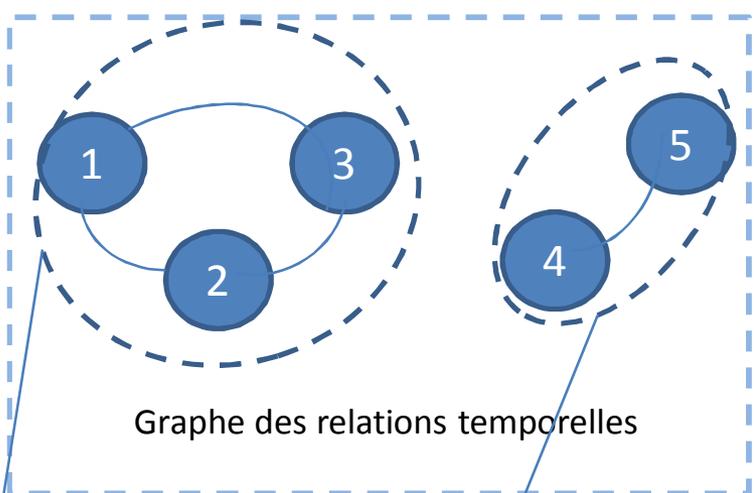
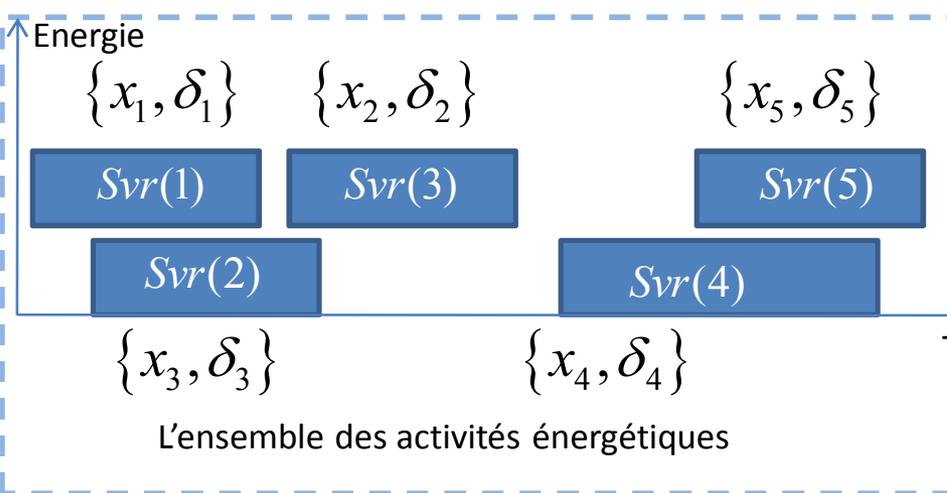
I Décomposer le problème en sous problèmes indépendants

II Métaheuristiques hybrides pour trouver une bonne solution en un temps fini

Décomposition du problème initial

Principe

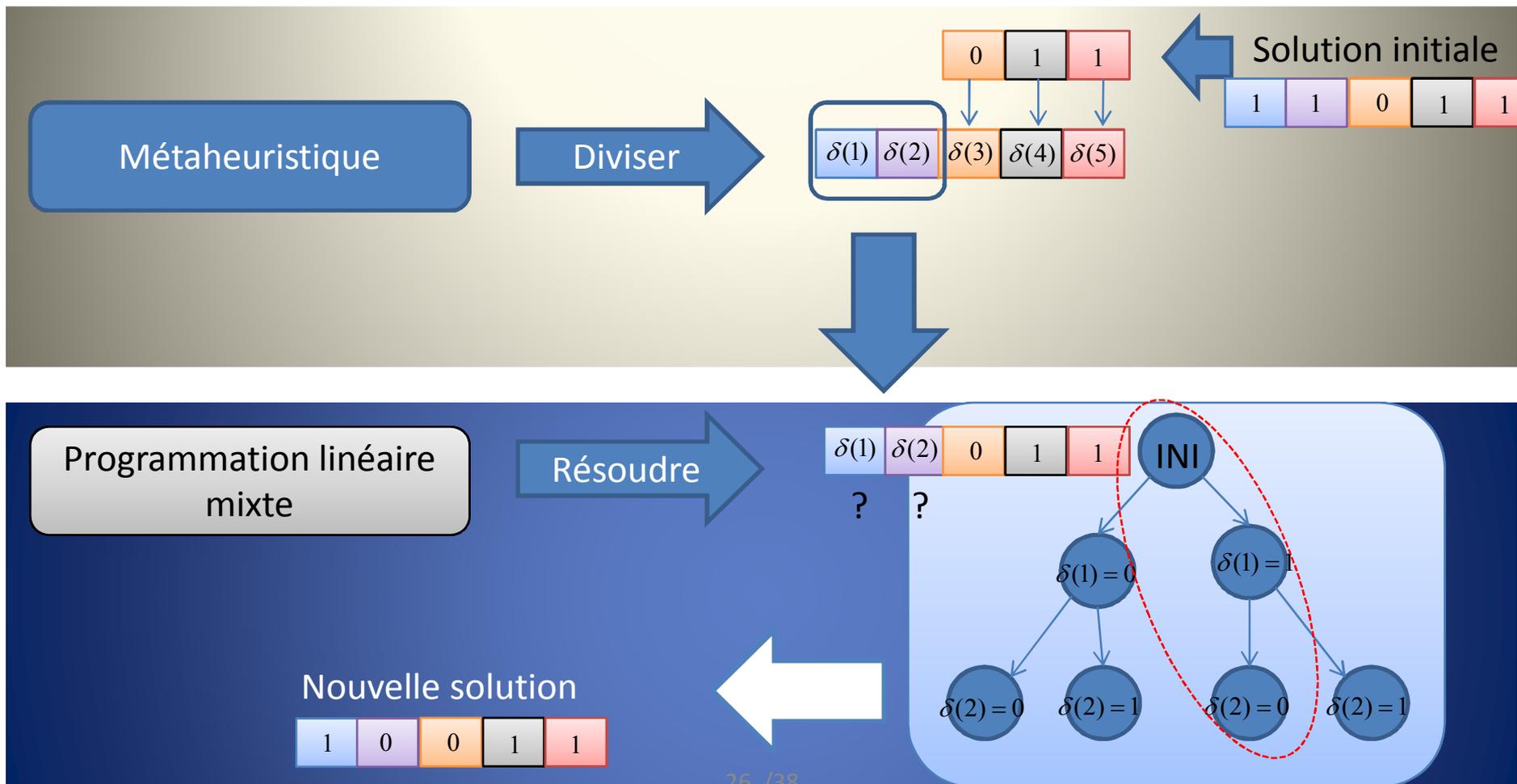
- Basé sur l'indépendance des services programmés
- Chaque service est représenté par un horizon temporel =>



Type de variables	Problème initial	Sous problème 1	Sous problème 2
Variables continues	$\{x_1 \cup x_2 \cup x_3 \cup x_4 \cup x_5\}$	$\{x_1 \cup x_2 \cup x_3\}$	$\{x_4 \cup x_5\}$
Variables binaires	$\{\delta_1 \cup \delta_2 \cup \delta_3 \cup \delta_4 \cup \delta_5\}$	$\{\delta_1 \cup \delta_2 \cup \delta_3\}$	$\{\delta_4 \cup \delta_5\}$

Structure de la méthode de résolution

Métaheuristique hybride



Implémentations

1 Programmation linéaire mixte (PNEM)

- Réalisation avec le solveur de GLPK
- Implémentation rapide
- Complexité exponentielle en fonction des variables binaires

2 Recherche Tabou hybride (RT)

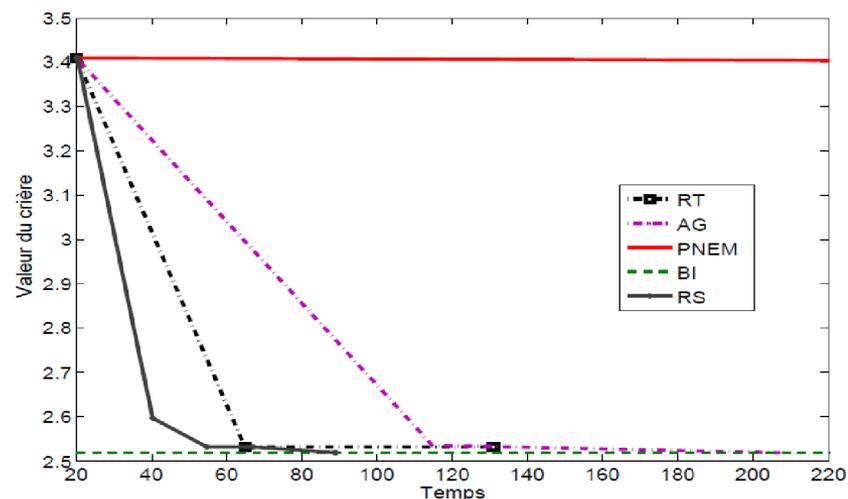
- Recherche locale inventée par Glover
- Vitesse de convergence rapide, mémoire consommée faible
- Piégeage de l'optimum locale

3 Recuit Simulé hybride (RS)

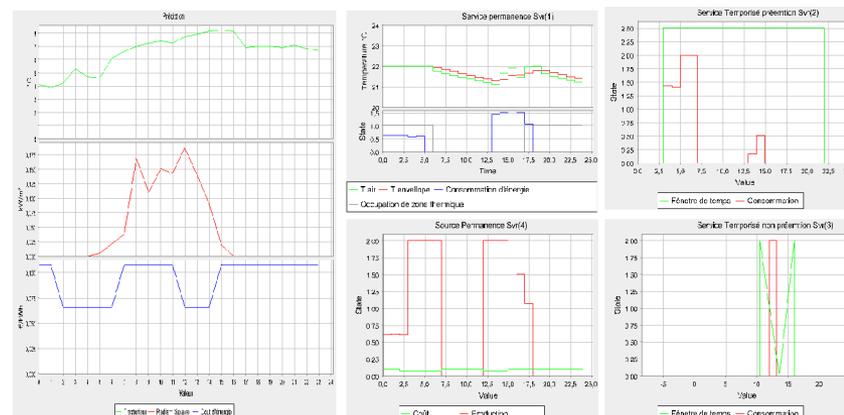
- Recherche locale inspirée de la procédure de recuit
- Vitesse de convergence très rapide

4 Algorithme Génétique hybride (AG)

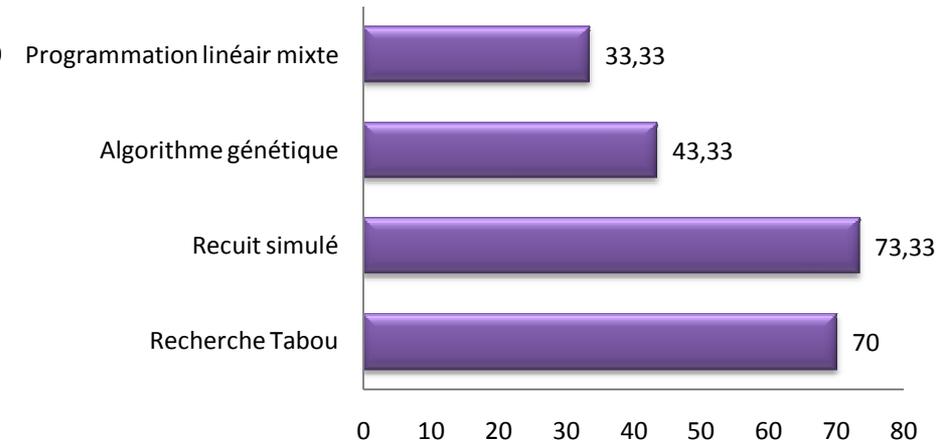
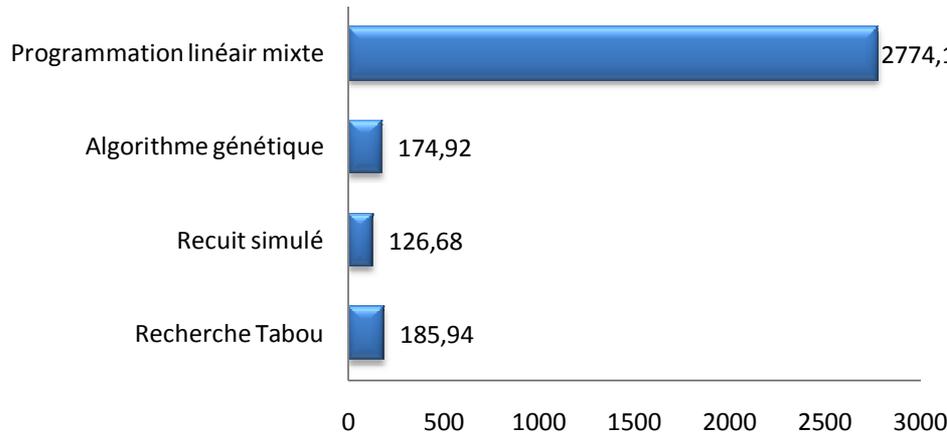
- Modèle de système adaptatif inventé par Holland



Exemple 1: **1721** variables
96 variables binaires, **1754** contraintes

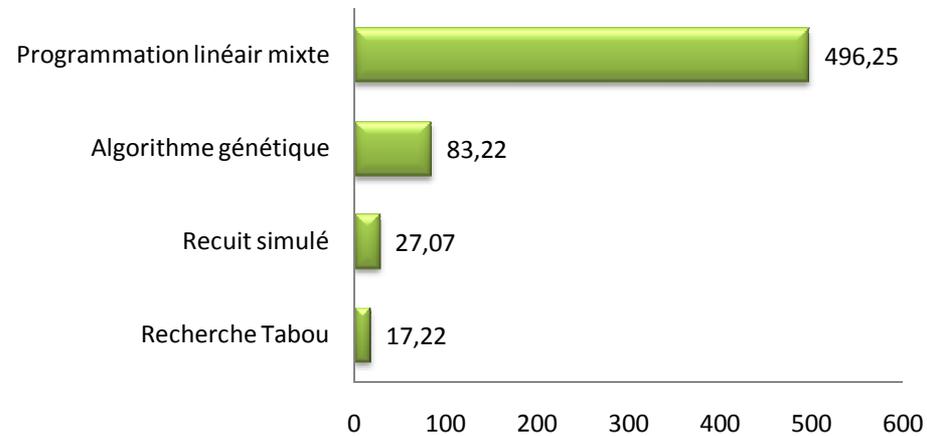
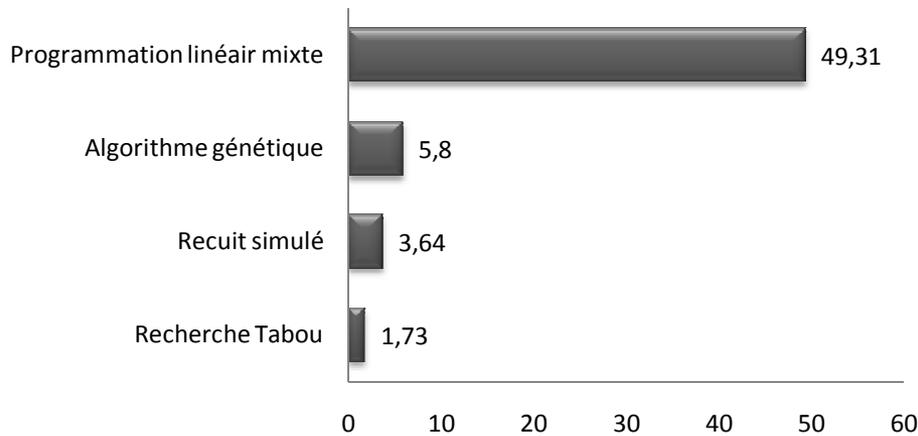


Résultats sur plusieurs exemples



■ Temps d'exécution (s)

■ Taux d'optimalité (%)



■ Déviatiion moyenne (%)

■ Déviatiion maximale (%)

Prise en compte des incertitudes

Caractéristiques de ce type de modèle

- Une perturbation peut conduire à la dégradation de la solution optimale calculée
- La prise en compte des perturbations permet d'améliorer la robustesse du système

Sources d'incertitudes	Incertitudes sur des variables	Changement de la structure du problème
Prédiction météorologique	X	
Coupure d'électricité		X
Données de capteur	X	
Service imprévu		X
Modification d'un service	X	
Incertitudes de modèle	X	

Méthode de prise en compte des incertitudes

Etape 0: Définir le problème statique

- Cette étape consiste à définir le problème dans lequel les paramètres sont fixés à leur valeur la plus vraisemblable
- Les critères d'optimisation sont déterminés
- Les incertitudes sont modélisées par des intervalles

Etape 1: Calcul d'une famille de solutions

- Calcul d'une famille de solutions en prenant en compte les incertitudes par programmation multi-paramétrique

Etape 2: Sélection d'une solution à appliquer

- Cette solution est trouvée parmi la famille de solutions

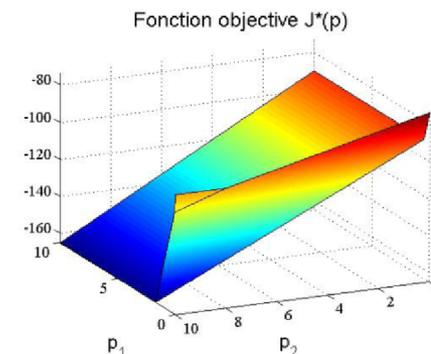
$$J = A'x + B'\theta$$

$$Ax \leq B + C\theta$$

x sont les variables à optimiser

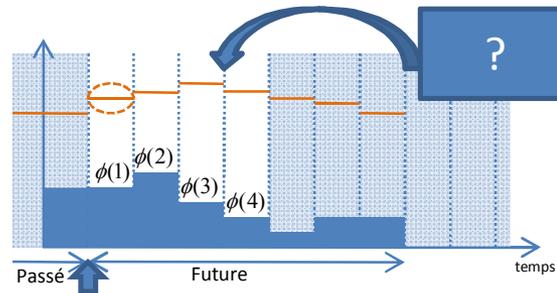
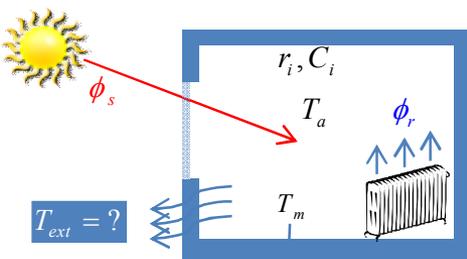
θ sont les incertitudes

$$\theta \in [Min(\theta), Max(\theta)]$$



$$x := f(\theta)$$

Prise en compte de perturbations multiples



$$E_{max} \in [0, 2]$$

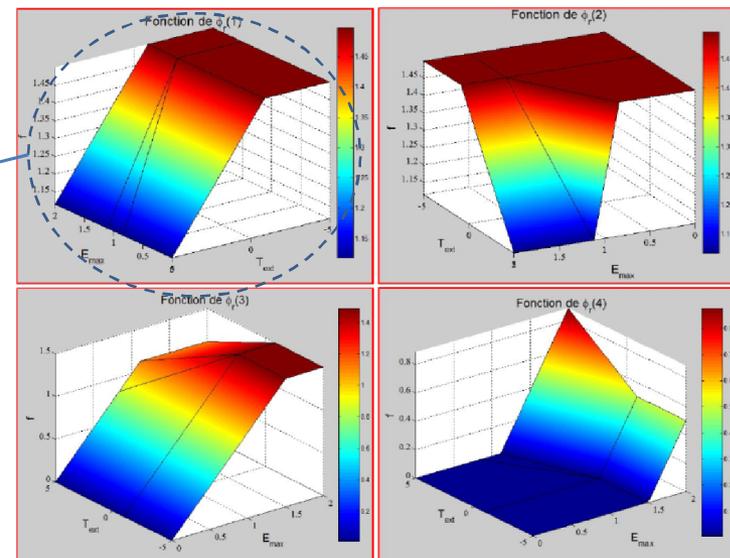
$$T_{ext} \in [-5^{\circ}\text{C}, +5^{\circ}\text{C}]$$

Modélisation des incertitudes

$$\begin{cases} T_a(k+1) \\ T_m(k+1) \end{cases} = \begin{bmatrix} 0,364 & 0,6055 \\ 0,359 & 0,625 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_a(k) \\ T_m(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,0275 & 1,1966 & 0,4193 \\ 0,016 & 0,7 & 0,2434 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext}(k) \\ \phi_s(k) \\ \phi_r(k) \end{bmatrix}$$

$$\phi_r(3) + \phi_r(4) \leq E_{max}$$

$$\phi_r(1) = \begin{cases} 1,5 & \text{Si } \begin{bmatrix} -5 \leq T_{ext} \leq -0,875 \\ 0 \leq E_{max} \leq 2 \end{bmatrix} \\ -0,097 \times T_{ext} + 1,415 & \text{Si } \begin{bmatrix} -0,875 < T_{ext} \leq 5 \\ 0 \leq E_{max} \leq 2 \end{bmatrix} \end{cases}$$



La famille de la solution calculée

4 Applications

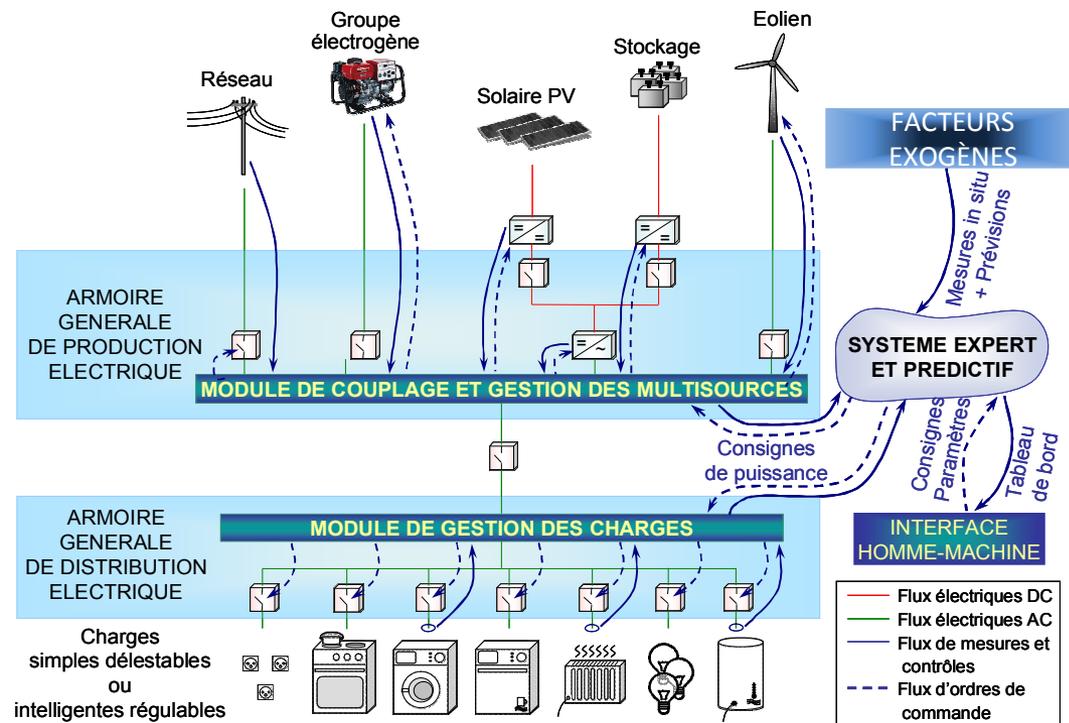
- Gestion des flux énergétiques dans le bâtiment photovoltaïque
- Contribution à la prévention du blackout

Application au projet ANR Multisol



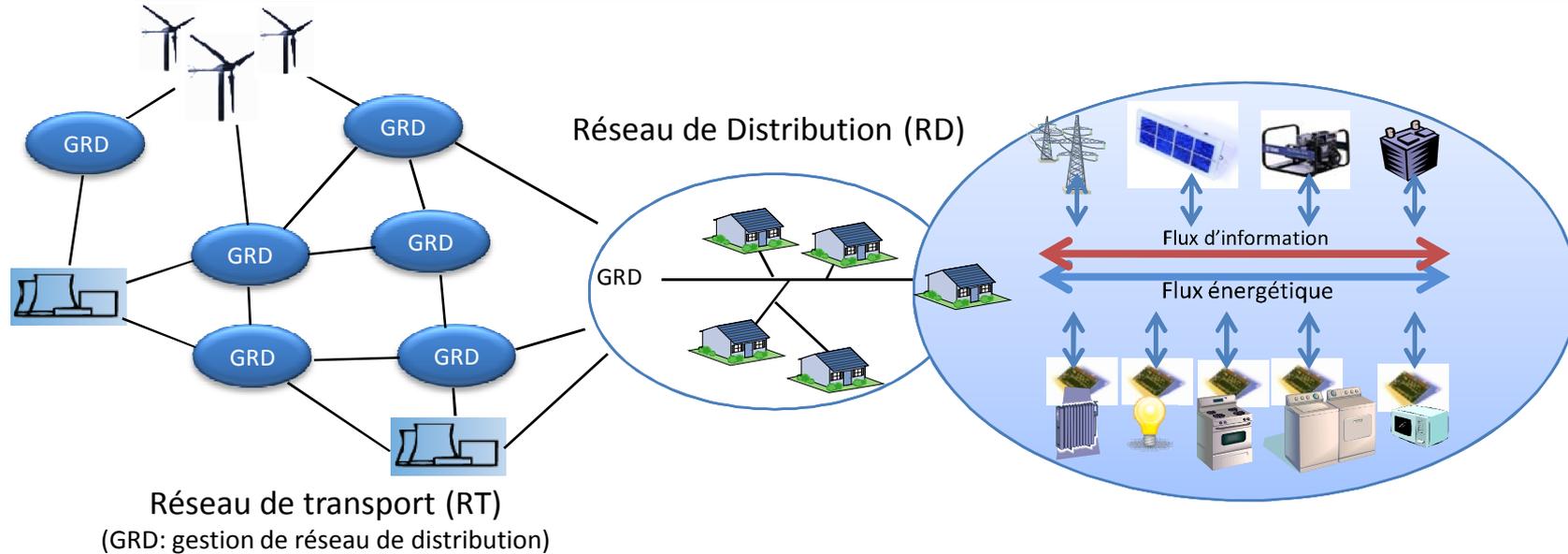
Objectif du projet

- Ce projet vise à la mise en place d'un système de gestion d'énergie dans le bâtiment pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire produite par des panneaux photovoltaïques



Architecture du système

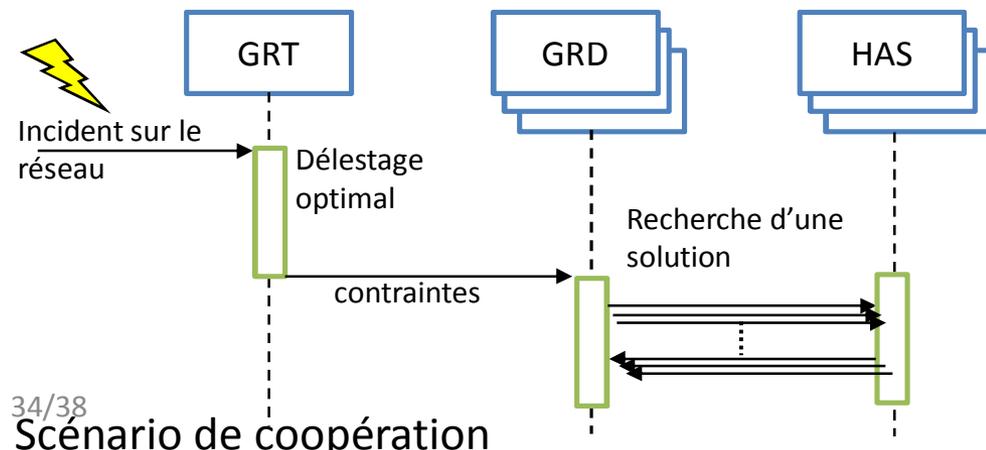
Du réseau de transport au consommateur



Blackout:

The timeline shows three stages: **Pré-condition** (green), **Propagation** (red), and **Restauration** (orange). The **Événements initiaux** (initial events) occur during the Propagation stage, and the **Etape finale** (final stage) occurs during the Restauration stage.

Objectif :
Améliorer la qualité du service à l'utilisateur en le faisant participer

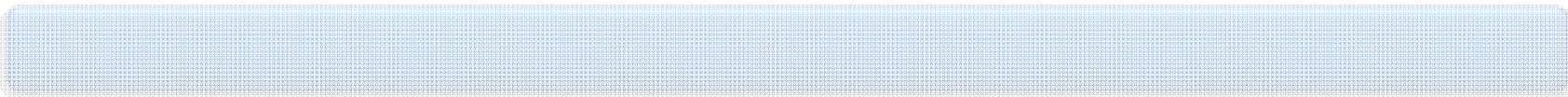
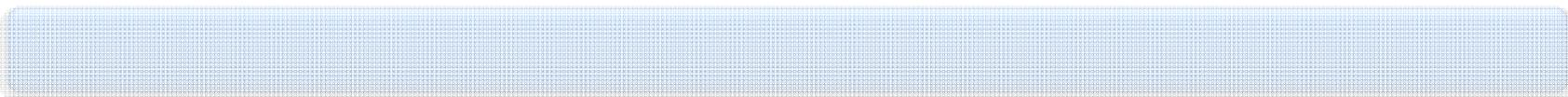


Fonctionnement du simulateur

The screenshot displays a MATLAB/Simulink simulation environment with several windows:

- GRD (Grid):** A plot of the Reactive Layer showing Power limit (red line) and Current power (green line) over time. A blue vertical box highlights a period labeled "Détection" (Detection) and "Restauration" (Restoration). The text "GRT / GRD" is overlaid at the bottom.
- House 1 to House 6:** Six sub-plots, each showing the Reactive Layer for a specific house. Each plot includes Power limit and Current power curves.
- Heater 1 and Heater 2:** Plots showing the state of heaters, including indoor temperature (green line) and threshold (red line) over time.
- Oven 1 to Oven 6:** Plots showing the state of ovens, including indoor temperature (green line) and threshold (red line) over time.
- Command Window:** Shows MATLAB commands such as `cmd.step(200)`, `a1.setCurrentPowerLimit(7)`, and `a2.setCurrentPowerLimit(4)`.
- Workspace:** Lists variables like `r3h1`, `r3h2`, `r3h3`, `r3o1`, etc.

At the bottom of the simulation windows, the text "HAS" and "Equipements" are visible, indicating the simulation's focus on household appliances and their impact on the grid.



5 Conclusion et perspectives

Conclusions et perspectives

Contribution à la gestion de la consommation dans le secteur du bâtiment

- Recherche d'une formulation adaptée au problème
- Formulation sous la forme d'un problème d'optimisation
- Standardisation des modèles comportementaux
- Mise au point d'un nouveau paradigme pour la consommation/production d'énergie

Définition d'une architecture de commande multi-échelles

- Proposition d'une structure de métaheuristique hybride tirant parti des spécificités du problème (indépendance de certains services programmés)
- Prise en compte des prévisions disponibles
- Absorption des incertitudes par une structuration en couches
- Prise en compte des incertitudes caractérisées dès la couche d'anticipation

Applications

- Gestion des bâtiments photovoltaïques
- Contribution à la prévention des blackouts

Perspectives

- Utilisation plus efficace des bornes inférieures calculées
- Extension à des incertitudes modélisées sous forme de variables stochastiques
- Mise au point de méthodes de co-construction de solutions
- Validation du système de conduite sur un appartement test (projet Multisol)
- Extension à un réseau global

Merci de votre attention