

Contrôle prédictif d'une chaufferie collective multi-énergie : un cas d'étude

Julien Eynard¹, Stéphane Grieu² & Monique Polit³

¹ Doctorant (2007-2010), Laboratoire PROMES (ELIAUS), UPVD
Post-doctorant (2010-2011), Département Automatique, Supélec

² Maître de conférence HDR, Laboratoire PROMES (ELIAUS), UPVD

³ Professeur d'universités, Laboratoire PROMES (ELIAUS), UPVD

Présentation : Michaël Salvador, doctorant au Laboratoire PROMES (ELIAUS), UPVD

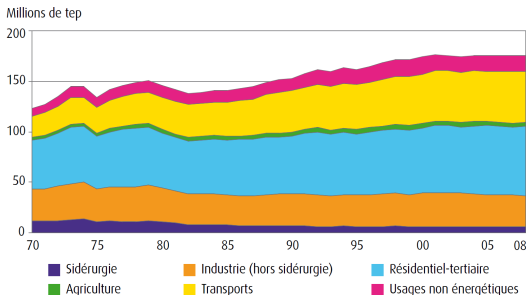
JD-JN-MACS & 9 juin 2011, Marseille

Sommaire

- 1 Contexte énergétique
- 2 Description du projet Opti-EnR
- 3 Modélisation et identification
- 4 Stockage énergétique
- 5 Prédiction des variables exogènes
- 6 Contrôle et optimisation

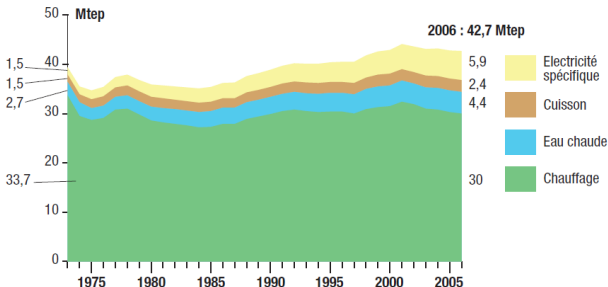
Le chauffage pour le bâtiment

- Le secteur du bâtiment : plus gros consommateur d'énergie en France avec 69 Mtep en 2008
- Le chauffage : 1er poste de consommation d'énergie dans le résidentiel (70 %)
- Énergies fossiles majoritairement utilisées pour le chauffage en 2006 : gaz (33 %) et pétrole (21 %)



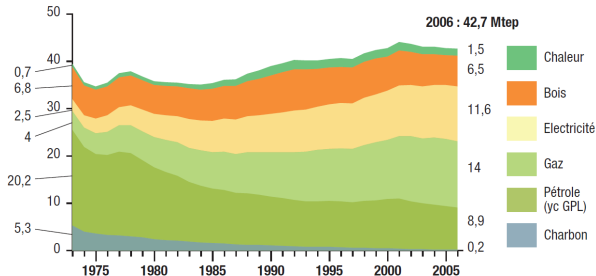
Le chauffage pour le bâtiment

- Le secteur du bâtiment : plus gros consommateur d'énergie en France avec 69 Mtep en 2008
- Le chauffage : 1er poste de consommation d'énergie dans le résidentiel (70 %)
- Énergies fossiles majoritairement utilisées pour le chauffage en 2006 : gaz (33 %) et pétrole (21 %)



Le chauffage pour le bâtiment

- Le secteur du bâtiment : plus gros consommateur d'énergie en France avec 69 Mtep en 2008
- Le chauffage : 1er poste de consommation d'énergie dans le résidentiel (70 %)
- Énergies fossiles majoritairement utilisées pour le chauffage en 2006 : gaz (33 %) et pétrole (21 %)



Caractéristiques de la chaufferie

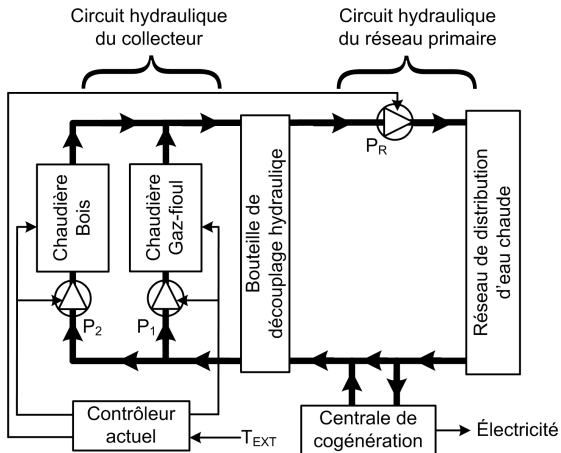
Éléments constitutifs de la chaufferie gérée par Cofely GDF-SUEZ

- Chaudière bois de 4,5 MW
- Chaudière gaz-fioul de 7 MW
- Centrale de cogénération de 2,5 MW
- Réseau de chaleur de 3000 m³
- Chauffage de 2700 logements
- Eau chaude sanitaire pour 800 logements
- Panneaux solaires thermiques de 1125 m² répartis sur le réseau de distribution



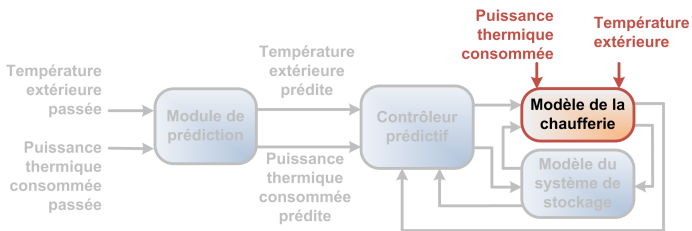
Élément	Taux de couverture
Chaudière bois	50 %
Centrale de cogénération	30 à 35 %
Chaudière gaz-fioul	15 à 20 %

Synoptique de la chaufferie



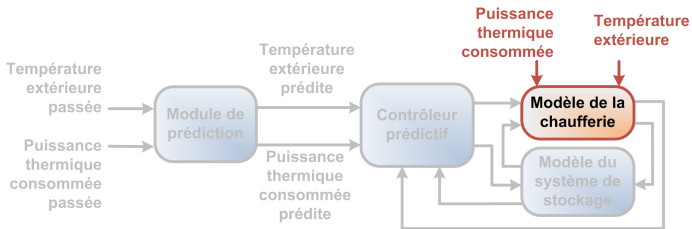
Description des différentes étapes

- Modélisation de la chaufferie (structure des équations)
- Identification des paramètres
- Développement d'un modèle de stockage énergétique
- Intégration du système de stockage
- Prédiction à court terme du comportement de la chaufferie
- Développement d'un contrôleur prédictif



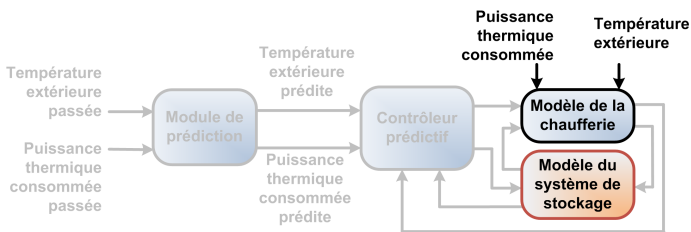
Description des différentes étapes

- Modélisation de la chaufferie (structure des équations)
- Identification des paramètres
- Développement d'un modèle de stockage énergétique
- Intégration du système de stockage
- Prédiction à court terme du comportement de la chaufferie
- Développement d'un contrôleur prédictif



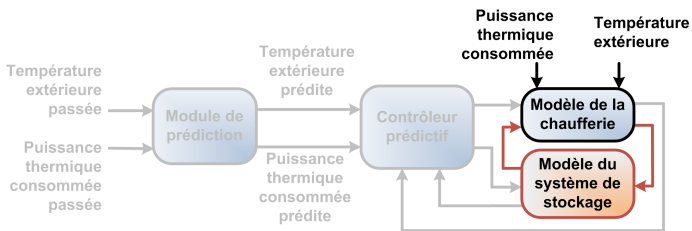
Description des différentes étapes

- Modélisation de la chaufferie (structure des équations)
- Identification des paramètres
- Développement d'un modèle de stockage énergétique
- Intégration du système de stockage
- Prédiction à court terme du comportement de la chaufferie
- Développement d'un contrôleur prédictif



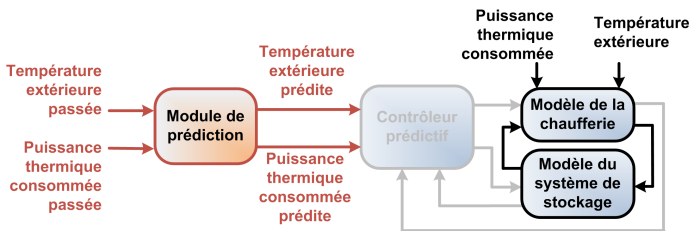
Description des différentes étapes

- Modélisation de la chaufferie (structure des équations)
- Identification des paramètres
- Développement d'un modèle de stockage énergétique
- Intégration du système de stockage
- Prédiction à court terme du comportement de la chaufferie
- Développement d'un contrôleur prédictif



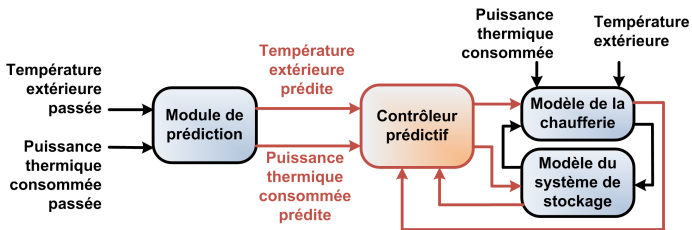
Description des différentes étapes

- Modélisation de la chaufferie (structure des équations)
- Identification des paramètres
- Développement d'un modèle de stockage énergétique
- Intégration du système de stockage
- Prédiction à court terme du comportement de la chaufferie
- Développement d'un contrôleur prédictif



Description des différentes étapes

- Modélisation de la chaufferie (structure des équations)
- Identification des paramètres
- Développement d'un modèle de stockage énergétique
- Intégration du système de stockage
- Prédiction à court terme du comportement de la chaufferie
- Développement d'un contrôleur prédictif



Méthodologie générale

- Modélisation (description des équations en fonction de la connaissances experte du processus et des données à disposition)
 - Modèles de connaissance
 - Modèles paramétriques
 - Modèles de Hammerstein-Wiener
 - ⇒ Une cinquantaine de variables physiques regroupés en sept modèles d'entités physiques (chaudière, bouteille, réseau...)
- Identification itérative des paramètres à partir de relevés expérimentaux
 - Temps d'échantillonnage : 5 minutes
 - Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
- Comparaison des réponses simulées et expérimentales
 - Calcul du FIT, de l'ERM, de l'EAM
- Réitération si besoin de la phase de modélisation

Méthodologie générale

- Modélisation (description des équations en fonction de la connaissances experte du processus et des données à disposition)
 - Modèles de connaissance
 - Modèles paramétriques
 - Modèles de Hammerstein-Wiener
 - ⇒ Une cinquantaine de variables physiques regroupés en sept modèles d'entités physiques (chaudière, bouteille, réseau...)
- Identification itérative des paramètres à partir de relevés expérimentaux
 - Temps d'échantillonnage : 5 minutes
 - Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
- Comparaison des réponses simulées et expérimentales
 - Calcul du FIT, de l'ERM, de l'EAM
- Réitération si besoin de la phase de modélisation

Méthodologie générale

- Modélisation (description des équations en fonction de la connaissances experte du processus et des données à disposition)
 - Modèles de connaissance
 - Modèles paramétriques
 - Modèles de Hammerstein-Wiener
 - ⇒ Une cinquantaine de variables physiques regroupés en sept modèles d'entités physiques (chaudière, bouteille, réseau...)
- Identification itérative des paramètres à partir de relevés expérimentaux
 - Temps d'échantillonnage : 5 minutes
 - Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
- Comparaison des réponses simulées et expérimentales
 - Calcul du FIT, de l'ERM, de l'EAM
- Réitération si besoin de la phase de modélisation

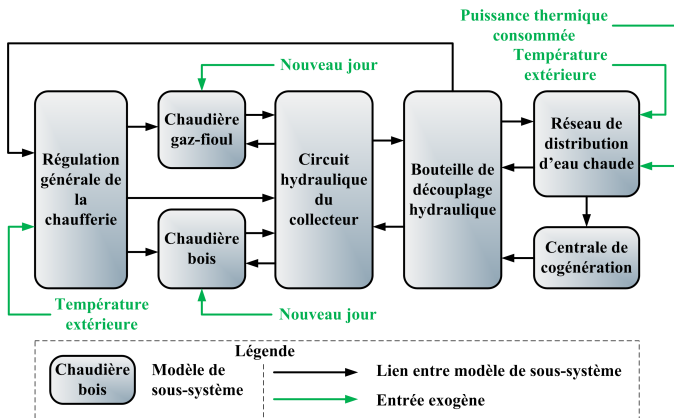
Méthodologie générale

- Modélisation (description des équations en fonction de la connaissances experte du processus et des données à disposition)
 - Modèles de connaissance
 - Modèles paramétriques
 - Modèles de Hammerstein-Wiener
 - ⇒ Une cinquantaine de variables physiques regroupés en sept modèles d'entités physiques (chaudière, bouteille, réseau...)
- Identification itérative des paramètres à partir de relevés expérimentaux
 - Temps d'échantillonnage : 5 minutes
 - Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
- Comparaison des réponses simulées et expérimentales
 - Calcul du FIT, de l'ERM, de l'EAM
- Réitération si besoin de la phase de modélisation

Méthodologie générale

- Modélisation (description des équations en fonction de la connaissances experte du processus et des données à disposition)
 - Modèles de connaissance
 - Modèles paramétriques
 - Modèles de Hammerstein-Wiener
 - ⇒ Une cinquantaine de variables physiques regroupés en sept modèles d'entités physiques (chaudière, bouteille, réseau...)
- Identification itérative des paramètres à partir de relevés expérimentaux
 - Temps d'échantillonnage : 5 minutes
 - Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
- Comparaison des réponses simulées et expérimentales
 - Calcul du FIT, de l'ERM, de l'EAM
- Réitération si besoin de la phase de modélisation

Modèle global de la chaufferie ¹



1. J. Eynard, S. Grieu & M. Polit (2011) Modular approach for modelling a multi-energy district boiler. Applied Mathematical Modelling. In Press, Corrected Proof.

Caractéristiques principales du système de stockage

- **Énergie stockée : 80 MW·h**
- Volume : $V_{tot} = 2000 \text{ m}^3$
- Delta de température : 35 °C
- Forme cylindrique verticale : $V_{tot} = h \cdot \pi \cdot r^2$, $P = 2 \cdot \pi \cdot r$
- Minimisation de la surface extérieure :

$$\min_r (S_{tot}) = \min_r \left(\frac{2 \cdot V_{tot}}{r} + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \right) \Rightarrow r = 6,8 \text{ m}, h = 13,7 \text{ m}$$
- Enfouissement du stockage : ($T_{amb} \approx 10 \text{ °C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

Caractéristiques principales du système de stockage

- Énergie stockée : 80 MW·h
- Volume : $V_{tot} = 2000 \text{ m}^3$
- Delta de température : 35 °C
- Forme cylindrique verticale : $V_{tot} = h \cdot \pi \cdot r^2$, $P = 2 \cdot \pi \cdot r$
- Minimisation de la surface extérieure :

$$\min_r (S_{tot}) = \min_r \left(\frac{2 \cdot V_{tot}}{r} + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \right) \Rightarrow r = 6,8 \text{ m}, h = 13,7 \text{ m}$$
- Enfouissement du stockage : ($T_{amb} \approx 10 \text{ °C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

Caractéristiques principales du système de stockage

- Énergie stockée : 80 MW·h
- Volume : $V_{tot} = 2000 \text{ m}^3$
- Delta de température : 35 °C
- Forme cylindrique verticale : $V_{tot} = h \cdot \pi \cdot r^2$, $P = 2 \cdot \pi \cdot r$
- Minimisation de la surface extérieure :

$$\min_r (S_{tot}) = \min_r \left(\frac{2 \cdot V_{tot}}{r} + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \right) \Rightarrow r = 6,8 \text{ m}, h = 13,7 \text{ m}$$
- Enfouissement du stockage : ($T_{amb} \approx 10 \text{ °C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

Caractéristiques principales du système de stockage

- Énergie stockée : 80 MW·h
- Volume : $V_{tot} = 2000 \text{ m}^3$
- Delta de température : 35 °C
- Forme cylindrique verticale : $V_{tot} = h \cdot \pi \cdot r^2$, $P = 2 \cdot \pi \cdot r$
- Minimisation de la surface extérieure :

$$\min_r (S_{tot}) = \min_r \left(\frac{2 \cdot V_{tot}}{r} + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \right) \Rightarrow r = 6,8 \text{ m}, h = 13,7 \text{ m}$$
- Enfouissement du stockage : ($T_{amb} \approx 10 \text{ °C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

Caractéristiques principales du système de stockage

- Énergie stockée : 80 MW·h
- Volume : $V_{tot} = 2000 \text{ m}^3$
- Delta de température : 35 °C
- Forme cylindrique verticale : $V_{tot} = h \cdot \pi \cdot r^2$, $P = 2 \cdot \pi \cdot r$
- Minimisation de la surface extérieure :

$$\min_r(S_{tot}) = \min_r\left(\frac{2 \cdot V_{tot}}{r} + 2 \cdot \pi \cdot r^2\right) \Rightarrow r = 6,8 \text{ m}, h = 13,7 \text{ m}$$
- Enfouissement du stockage : ($T_{amb} \approx 10 \text{ °C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

Caractéristiques principales du système de stockage

- Énergie stockée : 80 MW·h
- Volume : $V_{tot} = 2000 \text{ m}^3$
- Delta de température : 35 °C
- Forme cylindrique verticale : $V_{tot} = h \cdot \pi \cdot r^2$, $P = 2 \cdot \pi \cdot r$
- Minimisation de la surface extérieure :

$$\min_r (S_{tot}) = \min_r \left(\frac{2 \cdot V_{tot}}{r} + 2 \cdot \pi \cdot r^2 \right) \Rightarrow r = 6,8 \text{ m}, h = 13,7 \text{ m}$$
- Enfouissement du stockage : ($T_{amb} \approx 10 \text{ °C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

Caractéristiques principales du système de stockage

- Énergie stockée : 80 MW·h
- Volume : $V_{tot} = 2000 \text{ m}^3$
- Delta de température : 35 °C
- Forme cylindrique verticale : $V_{tot} = h \cdot \pi \cdot r^2$, $P = 2 \cdot \pi \cdot r$
- Minimisation de la surface extérieure :

$$\min_r(S_{tot}) = \min_r\left(\frac{2 \cdot V_{tot}}{r} + 2 \cdot \pi \cdot r^2\right) \Rightarrow r = 6,8 \text{ m}, h = 13,7 \text{ m}$$
- Enfouissement du stockage : ($T_{amb} \approx 10 \text{ °C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

Modèle adapté du "Turbulent Mixing-Model" ¹

● Paramètres

$$\left\{ \begin{array}{l} k : \text{Nombre de couches (20), } i \in \llbracket 1, k \rrbracket \\ m : \text{zone d'influence de l'entrée (2)} \\ V = V_{tot}/k \\ \alpha_{2(i)} = [U_L \cdot P / (C_{P(i)} \cdot \rho(i))] \cdot \Delta \cdot \Delta z \\ \alpha_i = V + \alpha_{2(i)} \end{array} \right.$$

● Mode stockage

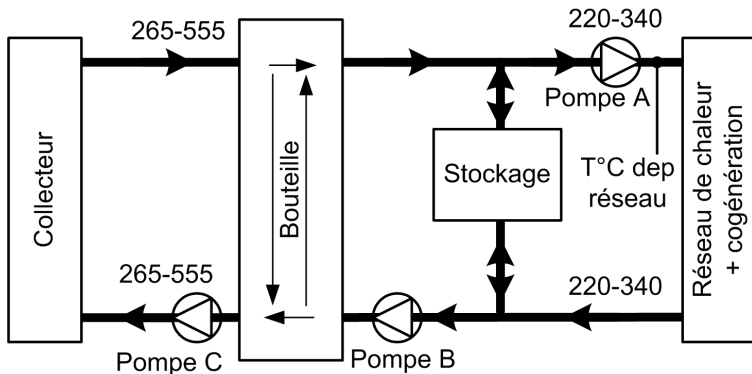
$$\left\{ \begin{array}{l} T_{(i,n)} = \{ [V - (\Delta V/m)] \cdot T_{(i,n-1)} + (\Delta V/m) \cdot T_{dep-bout} + \alpha_{2(i)} \cdot T_{ext} \} / \alpha_{(i)}, \quad (i > k - m) \\ T_{(i,n)} = \{ [V - \Delta V] \cdot T_{(i,n-1)} + \Delta V \cdot T_{(i+1,n-1)} + \alpha_{2(i)} \cdot T_{ext} \} / \alpha_{(i)}, \quad (i \leq k - m) \end{array} \right.$$

● Mode déstockage

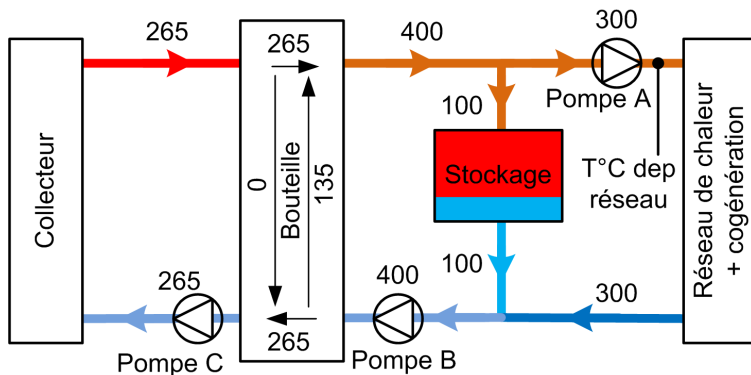
$$\left\{ \begin{array}{l} T_{(i,n)} = \{ [V - (\Delta V/m)] \cdot T_{(i,n-1)} + (\Delta V/m) \cdot T_{ret-res-cog} + \alpha_{2(i)} \cdot T_{ext} \} / \alpha_{(i)}, \quad (i \leq m) \\ T_{(i,n)} = \{ [V - \Delta V] \cdot T_{(i,n-1)} + \Delta V \cdot T_{(i-1,n-1)} + \alpha_{2(i)} \cdot T_{ext} \} / \alpha_{(i)}, \quad (i > m) \end{array} \right.$$

1. S. Alizadeh. An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage tank. Solar Energy. 66 (1999) 409-21.

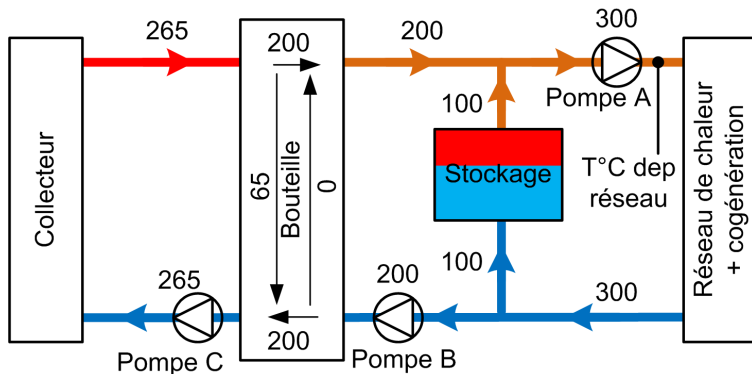
Schéma général



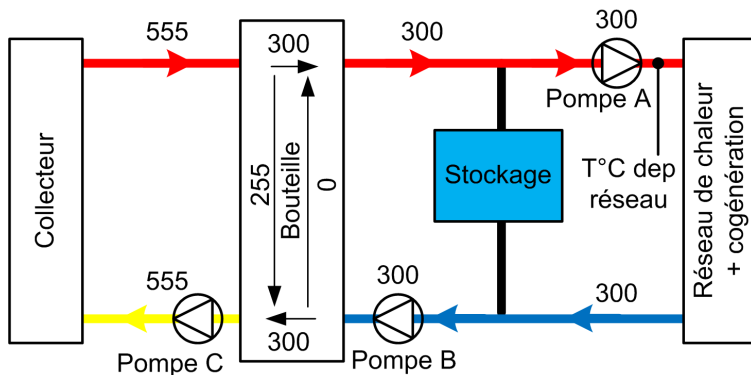
Mode stockage



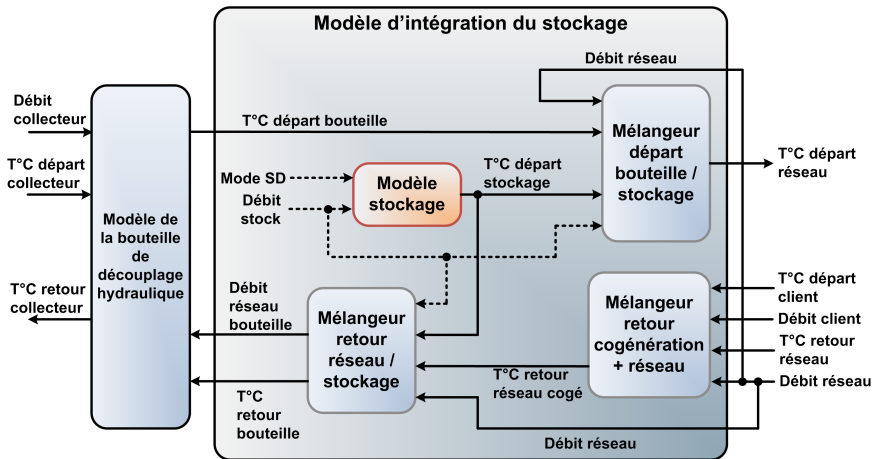
Mode déstockage



Mode déconnecté




Intégration dans le modèle de la chaufferie




Modèle de prédiction par séries temporelles¹

- Prédiction de la température extérieure et de la puissance consommée par le réseau de chaleur
- Découpage du signal à prédire en séquences de 4h30 (durée de prédiction)
- M séquences passées de 4h30 utilisées comme entrées du modèle et complétées par :
 - le jour de l'année,
 - la minute du jour.
 - ⇒ Intérêt : aide le modèle à se repérer dans le temps
- Sortie du modèle :
 - une séquence prédite de 4h30

1. J. Eynard, S. Grieu & M. Polit (2011) Wavelet-based multi-resolution analysis and artificial neural networks for forecasting temperature and thermal power consumption. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 24(3), avril 2011, 501-516. 


Modèle de prédiction par séries temporelles ¹

- Prédiction de la température extérieure et de la puissance consommée par le réseau de chaleur
- Découpage du signal à prédire en séquences de 4h30 (durée de prédiction)
- M séquences passées de 4h30 utilisées comme entrées du modèle et complétées par :
 - le jour de l'année,
 - la minute du jour.
 - ⇒ Intérêt : aide le modèle à se repérer dans le temps
- Sortie du modèle :
 - une séquence prédite de 4h30

1. J. Eynard, S. Grieu & M. Polit (2011) Wavelet-based multi-resolution analysis and artificial neural networks for forecasting temperature and thermal power consumption. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 24(3), avril 2011, 501-516. 


Modèle de prédiction par séries temporelles¹

- Prédiction de la température extérieure et de la puissance consommée par le réseau de chaleur
- Découpage du signal à prédire en séquences de 4h30 (durée de prédiction)
- M séquences passées de 4h30 utilisées comme entrées du modèle et complétées par :
 - le jour de l'année,
 - la minute du jour.
 - ⇒ Intérêt : aide le modèle à se repérer dans le temps
- Sortie du modèle :
 - une séquence prédite de 4h30

1. J. Eynard, S. Grieu & M. Polit (2011) Wavelet-based multi-resolution analysis and artificial neural networks for forecasting temperature and thermal power consumption. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 24(3), avril 2011, 501-516. 

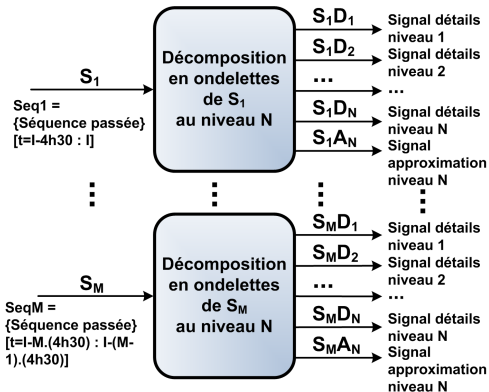
Modèle de prédiction par séries temporelles ¹

- Prédiction de la température extérieure et de la puissance consommée par le réseau de chaleur
- Découpage du signal à prédire en séquences de 4h30 (durée de prédiction)
- M séquences passées de 4h30 utilisées comme entrées du modèle et complétées par :
 - le jour de l'année,
 - la minute du jour.
 - ⇒ Intérêt : aide le modèle à se repérer dans le temps
- Sortie du modèle :
 - une séquence prédite de 4h30

1. J. Eynard, S. Grieu & M. Polit (2011) Wavelet-based multi-resolution analysis and artificial neural networks for forecasting temperature and thermal power consumption. Engineering Applications of Artificial Intelligence. 24(3), avril 2011, 501-516. 

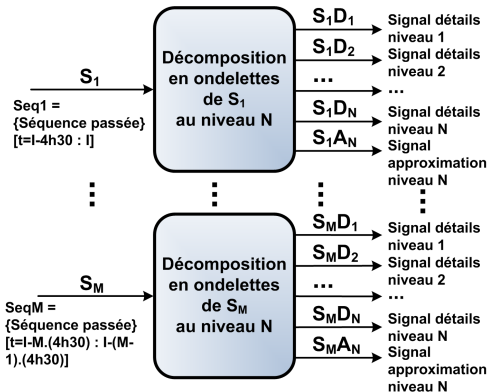
Décomposition en ondelettes

- Composantes basses fréquences (coefficients d'approximation)
 - Tendances saisonnières
 - Pseudo-périodes journalières
- Composantes hautes fréquences (coefficients de détails)
 - Perturbations climatiques aléatoires



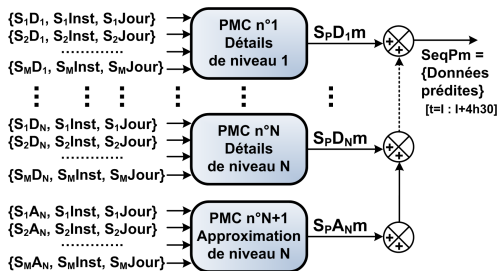
Décomposition en ondelettes

- Composantes basses fréquences (coefficients d'approximation)
 - Tendances saisonnières
 - Pseudo-périodes journalières
- Composantes hautes fréquences (coefficients de détails)
 - Perturbations climatiques aléatoires



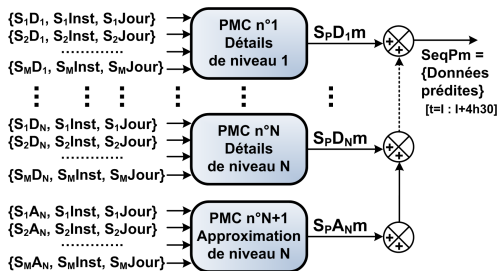
Prédiction et recombinaison

- Prédiction par Perceptrons multi-couches
- N+1 PMC pour une décomposition de niveau N
- Sommation des sous-signaux prédits
- ⇒ Séquence prédite



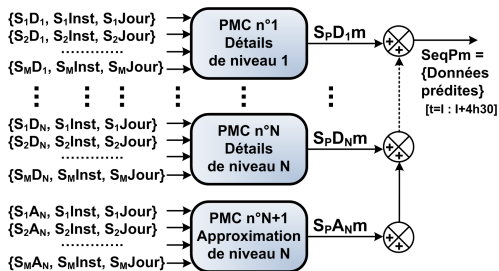
Prédiction et recombposition

- Prédiction par Perceptrons multi-couches
- N+1 PMC pour une décomposition de niveau N
- Sommation des sous-signaux prédits
- ⇒ Séquence prédite



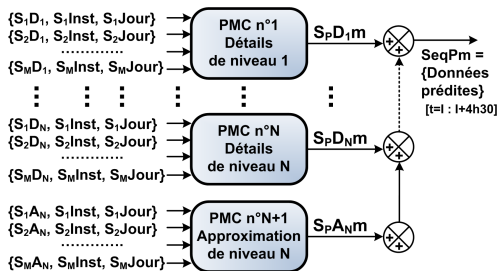
Prédiction et recombposition

- Prédiction par Perceptrons multi-couches
- N+1 PMC pour une décomposition de niveau N
- Sommation des sous-signaux prédits
- ⇒ Séquence prédite



Prédiction et recombinaison

- Prédiction par Perceptrons multi-couches
- N+1 PMC pour une décomposition de niveau N
- Sommation des sous-signaux prédits
- ⇒ Séquence prédite



Optimisation des paramètres

- Configuration optimale pour T_{ext} et P_{res}

Paramètre	Symbole	Valeur optimale
Ordre de l'ondelette	R	4
Niveau de décomposition	N	5
Nombre de neurones cachés par réseau	F	5
Nombre de séquences passées	M	4
Période d'échantillonnage	T_E	30 mn

- Résultats de la prédiction

Variable	FIT [%]	ERM [%]	EAM
T_{ext}^{4h30}	59,8	4,2	1,2 °C
P_{res}^{hyb}	46,9	5,85	639,1 kWh

Optimisation des paramètres

- Configuration optimale pour T_{ext} et P_{res}

Paramètre	Symbole	Valeur optimale
Ordre de l'ondelette	R	4
Niveau de décomposition	N	5
Nombre de neurones cachés par réseau	F	5
Nombre de séquences passées	M	4
Période d'échantillonnage	T_E	30 mn

- Résultats de la prédiction

Variable	FIT [%]	ERM [%]	EAM
T_{ext}^{4h30}	59,8	4,2	1,2 °C
P_{res}^{hyb}	46,9	5,85	639,1 kWh

Caractéristiques des combustibles

Critère	Unité	Bois	Gaz	Fioul (FOD)
Énergie volumique	kWh·m ⁻³	900	10,5	9760
Coût financier	€·kWh ⁻¹	14	36	41
ACV du CO ₂	gCO ₂ ·kWh ⁻¹	13	234	270

Caractéristiques des combustibles

Critère	Unité	Bois	Gaz	Fioul (FOD)
Énergie volumique	kWh·m ⁻³	900	10,5	9760
Coût financier	€·kWh ⁻¹	14	36	41
ACV du CO ₂	gCO ₂ ·kWh ⁻¹	13	234	270

Caractéristiques des combustibles

Critère	Unité	Bois	Gaz	Fioul (FOD)
Énergie volumique	kWh·m ⁻³	900	10,5	9760
Coût financier	€·kWh ⁻¹	14	36	41
ACV du CO ₂	gCO ₂ ·kWh ⁻¹	13	234	270

Définitions de critères

- Critère économique : coût financier

$$J_1 = PU_{Bois} \times NbCP + PU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + PU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère technique : erreur de poursuite

$$J_2 = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{k=1}^N (|T_{consi-dep-res}(k) - T_{dep-res}(k)| - (T_{dep-res}(k) - T_{consi-dep-res}(k)))$$

- Critère énergétique A : énergie totale consommée

$$J_3 = EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère énergétique B : taux de couverture fossile

$$J_4 = \frac{EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}{EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}$$

- Critère environnemental : rejets de CO₂

$$J_5 = ACVU_{CO2-Bois} \times NbCP + ACVU_{CO2-Gaz} \times V_{gaz-cumul} + ACVU_{CO2-FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère mixte

$$J_6 = \frac{1}{5} \times \sum_{n=1}^5 100 \times \frac{J_n(\text{avec stockage})}{J_n(\text{sans stockage})}$$

Définitions de critères

- Critère économique : coût financier

$$J_1 = PU_{Bois} \times NbCP + PU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + PU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère technique : erreur de poursuite

$$J_2 = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{k=1}^N (|T_{consi-dep-res}(k) - T_{dep-res}(k)| - (T_{dep-res}(k) - T_{consi-dep-res}(k)))$$

- Critère énergétique A : énergie totale consommée

$$J_3 = EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère énergétique B : taux de couverture fossile

$$J_4 = \frac{EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}{EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}$$

- Critère environnemental : rejets de CO₂

$$J_5 = ACVU_{CO2-Bois} \times NbCP + ACVU_{CO2-Gaz} \times V_{gaz-cumul} + ACVU_{CO2-FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère mixte

$$J_6 = \frac{1}{5} \times \sum_{n=1}^5 100 \times \frac{J_n(\text{avec stockage})}{J_n(\text{sans stockage})}$$

Définitions de critères

- Critère économique : coût financier

$$J_1 = PU_{Bois} \times NbCP + PU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + PU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère technique : erreur de poursuite

$$J_2 = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{k=1}^N (|T_{consi-dep-res}(k) - T_{dep-res}(k)| - (T_{dep-res}(k) - T_{consi-dep-res}(k)))$$

- Critère énergétique A : énergie totale consommée

$$J_3 = EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère énergétique B : taux de couverture fossile

$$J_4 = \frac{EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}{EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}$$

- Critère environnemental : rejets de CO₂

$$J_5 = ACVU_{CO2-Bois} \times NbCP + ACVU_{CO2-Gaz} \times V_{gaz-cumul} + ACVU_{CO2-FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère mixte

$$J_6 = \frac{1}{5} \times \sum_{n=1}^5 100 \times \frac{J_n(\text{avec stockage})}{J_n(\text{sans stockage})}$$

Définitions de critères

- Critère économique : coût financier

$$J_1 = PU_{Bois} \times NbCP + PU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + PU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère technique : erreur de poursuite

$$J_2 = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{k=1}^N (|T_{consi-dep-res}(k) - T_{dep-res}(k)| - (T_{dep-res}(k) - T_{consi-dep-res}(k)))$$

- Critère énergétique A : énergie totale consommée

$$J_3 = EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère énergétique B : taux de couverture fossile

$$J_4 = \frac{EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}{EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}$$

- Critère environnemental : rejets de CO₂

$$J_5 = ACVU_{CO2-Bois} \times NbCP + ACVU_{CO2-Gaz} \times V_{gaz-cumul} + ACVU_{CO2-FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère mixte

$$J_6 = \frac{1}{5} \times \sum_{n=1}^5 100 \times \frac{J_n(\text{avec stockage})}{J_n(\text{sans stockage})}$$

Définitions de critères

- Critère économique : coût financier

$$J_1 = PU_{Bois} \times NbCP + PU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + PU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère technique : erreur de poursuite

$$J_2 = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{k=1}^N (|T_{consi-dep-res}(k) - T_{dep-res}(k)| - (T_{dep-res}(k) - T_{consi-dep-res}(k)))$$

- Critère énergétique A : énergie totale consommée

$$J_3 = EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère énergétique B : taux de couverture fossile

$$J_4 = \frac{EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}{EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}$$

- Critère environnemental : rejets de CO₂

$$J_5 = ACVU_{CO_2-Bois} \times NbCP + ACVU_{CO_2-Gaz} \times V_{gaz-cumul} + ACVU_{CO_2-FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère mixte

$$J_6 = \frac{1}{5} \times \sum_{n=1}^5 100 \times \frac{J_n(\text{avec stockage})}{J_n(\text{sans stockage})}$$

Définitions de critères

- Critère économique : coût financier

$$J_1 = PU_{Bois} \times NbCP + PU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + PU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère technique : erreur de poursuite

$$J_2 = \frac{1}{2 \cdot N} \cdot \sum_{k=1}^N (|T_{consi-dep-res}(k) - T_{dep-res}(k)| - (T_{dep-res}(k) - T_{consi-dep-res}(k)))$$

- Critère énergétique A : énergie totale consommée

$$J_3 = EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère énergétique B : taux de couverture fossile

$$J_4 = \frac{EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}{EU_{Bois} \times NbCP + EU_{Gaz} \times V_{gaz-cumul} + EU_{FOD} \times V_{FOD-cumul}}$$

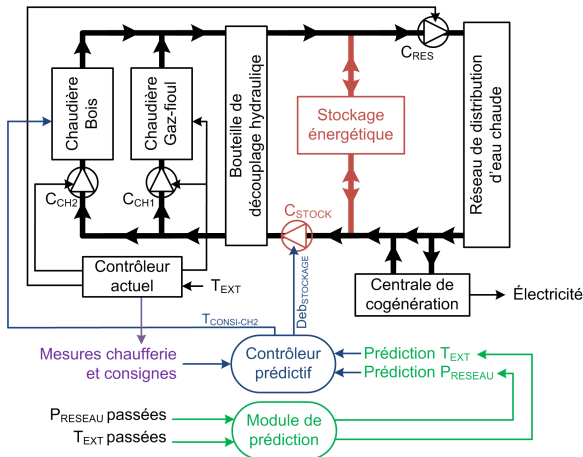
- Critère environnemental : rejets de CO₂

$$J_5 = ACVU_{CO_2-Bois} \times NbCP + ACVU_{CO_2-Gaz} \times V_{gaz-cumul} + ACVU_{CO_2-FOD} \times V_{FOD-cumul}$$

- Critère mixte

$$J_6 = \frac{1}{5} \times \sum_{n=1}^5 100 \times \frac{J_n(\text{avec stockage})}{J_n(\text{sans stockage})}$$

Synoptique de fonctionnement



Formulation du problème d'optimisation

- Fonction objectif à minimiser

$$\min (J_1 = PU_{Bois} \times NbCP + PU_{Gaz} \times V_{gaz} + PU_{FOD} \times V_{FOD})$$

- Paramètres à optimiser

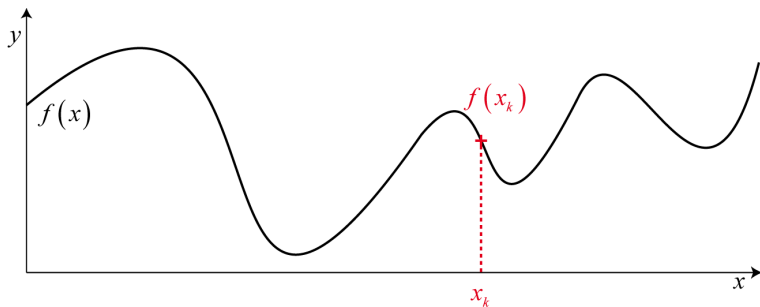
$$\left(\Delta Deb_{Stock}(k/k), \dots, \Delta Deb_{Stock}(k+c-1/k) \right) \\ \left(\Delta T_{consi-CH2}(k/k), \dots, \Delta T_{consi-CH2}(k+c-1/k) \right)$$

- Contraintes liées au problème à respecter

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Modèle de la chaufferie avec } T_{ext-pred} \text{ et } P_{res-pred} \text{ comme entrées} \\ 0 \leq Deb_{Stock}(k+i/k) \leq Deb_{Stock-max} = Deb_{res} - 10 \quad \forall i \in \llbracket 0, \dots, p-1 \rrbracket \\ (Enc_{CH1}(k+i/k) = 1) \vee (T_{dep-bout}(k+i/k) \leq T_{sup-stock}(k+i/k)) \\ \Rightarrow Deb_{Stock}(k+i/k) \leq 0 \quad \forall i \in \llbracket 0, \dots, p-1 \rrbracket \\ 90^\circ\text{C} \leq T_{consi-CH2} \leq 97^\circ\text{C} \quad \forall i \in \llbracket 0, \dots, p-1 \rrbracket \\ \Delta Deb_{Stock}(k+h) = 0 \quad \forall h \in \llbracket c, \dots, p-1 \rrbracket \\ \Delta T_{consi-CH2}(k+h) = 0 \quad \forall h \in \llbracket c, \dots, p-1 \rrbracket \\ p = 54 : \text{horizon de prédiction} = 4\text{h}30 \\ c = 36 : \text{horizon de contrôle} = 3\text{h} \end{array} \right.$$

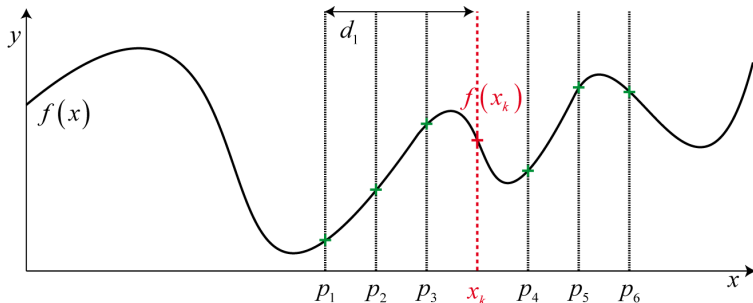
Algorithme d'optimisation

- Algorithme de "recherche directe" par "motifs généralisés"
 - Optimisation globale
 - Minimisation non-linéaire
 - Gradient de la fonction inconnu



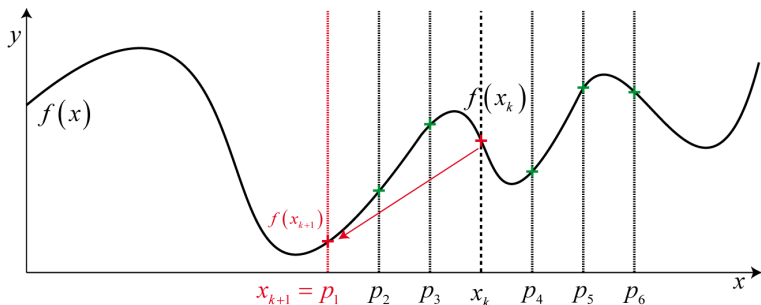
Algorithme d'optimisation

- Algorithme de "recherche directe" par "motifs généralisés"
 - Optimisation globale
 - Minimisation non-linéaire
 - Gradient de la fonction inconnu



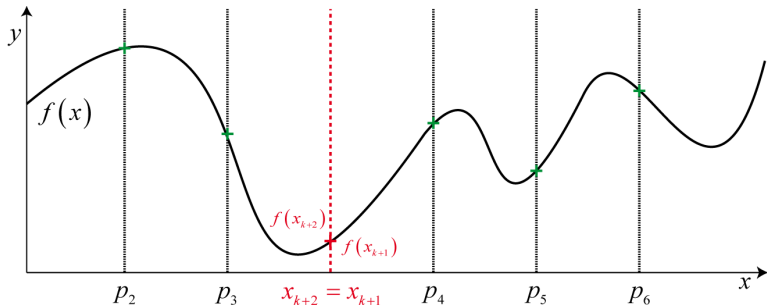
Algorithme d'optimisation

- Algorithme de "recherche directe" par "motifs généralisés"
 - Optimisation globale
 - Minimisation non-linéaire
 - Gradient de la fonction inconnu



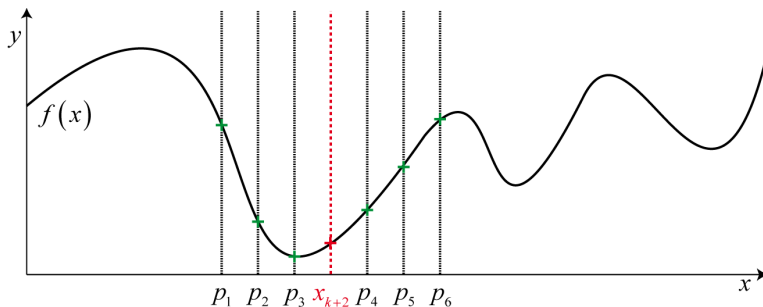
Algorithme d'optimisation

- Algorithme de "recherche directe" par "motifs généralisés"
 - Optimisation globale
 - Minimisation non-linéaire
 - Gradient de la fonction inconnu



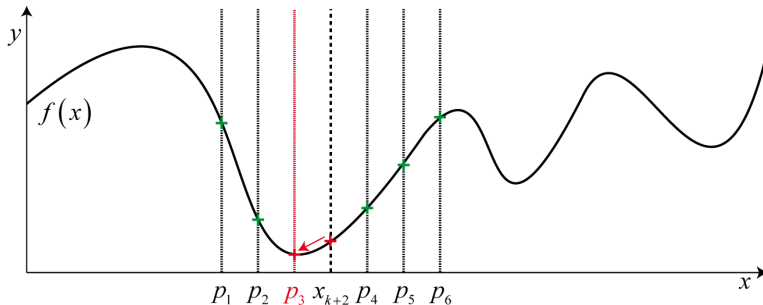
Algorithme d'optimisation

- Algorithme de "recherche directe" par "motifs généralisés"
 - Optimisation globale
 - Minimisation non-linéaire
 - Gradient de la fonction inconnu

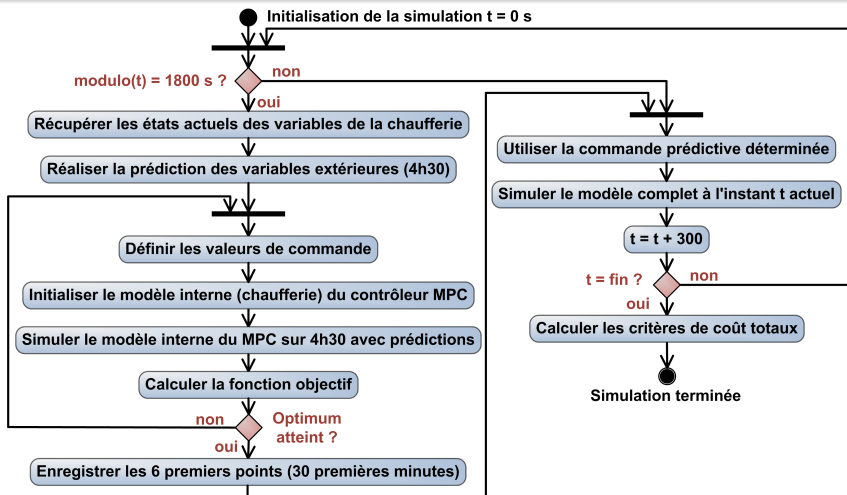


Algorithme d'optimisation

- Algorithme de "recherche directe" par "motifs généralisés"
 - Optimisation globale
 - Minimisation non-linéaire
 - Gradient de la fonction inconnu



Séquence de fonctionnement du contrôleur



Résultats remarquables

Période considérée : du 16 janvier au 2 mars 2009

Critères		Configurations			
Nom	Unité	Référence	MPC_1	MPC_2	MPC_3
V_{tot}	m ³	0	1000	1500	4000
$NbCP$	-	24 635	21 260	21 203	21 482
V_{gaz}	m ³	38 001	17 553	17 533	17 207
V_{FOD}	l	3287	2043	2244	2436
J_1	k€	61,62	47,10	47,07	47,54
J_2	°C	0,56	0,247	0,252	0,272
J_3	MW·h	3712	3036	3030	3066
J_4	%	11,6	6,73	6,80	6,67
J_5	tCO ₂	139,1	82,9	83,3	83,6
J_6	%	100	64,0	64,3	65,2

Conclusions et Perspectives

● Conclusion

- Modélisation de la chaufferie à partir de relevés expérimentaux
- Intégration d'un modèle de système de stockage énergétique
- Prédiction des variables exogènes du modèle
- Optimisation du fonctionnement par un contrôleur prédictif

● Perspectives

- Utilisation d'autres systèmes de stockage
- Test avec d'autres systèmes de contrôle
- Implantation sur site

Conclusions et Perspectives

- Conclusion
 - Modélisation de la chaufferie à partir de relevés expérimentaux
 - Intégration d'un modèle de système de stockage énergétique
 - Prédiction des variables exogènes du modèle
 - Optimisation du fonctionnement par un contrôleur prédictif
- Perspectives
 - Utilisation d'autres systèmes de stockage
 - Test avec d'autres systèmes de contrôle
 - Implantation sur site

Publications associées



Julien Eynard, Stéphane Grieu & Monique Polit.

Wavelet-based multi-resolution analysis and artificial neural networks for forecasting temperature and thermal power consumption

Engineering Applications of Artificial Intelligence, 24(3), avril 2011, 501-516,
ISSN 0952-1976, DOI : 10.1016/j.engappai.2010.09.003



Julien Eynard, Stéphane Grieu & Monique Polit.

Modular approach for modelling a multi-energy district boiler

Applied Mathematical Modeling, Elsevier, In Press, Corrected Proof
ISSN 0307-904X, DOI : 10.1016/j.apm.2011.02.006



Julien Eynard, Stéphane Grieu & Monique Polit

Optimal control of a multi-energy district boiler : a case study

IFAC WC 2010, 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control, 28 août – 2 septembre 2011, Milan, Italie

Merci pour votre attention