

# Gestion optimale de l'énergie dans un procédé multi-source pour le chauffage de bâtiments

Thèse ministérielle 2007-2010

Julien Eynard<sup>1</sup>

sous la direction de Monique Polit<sup>2</sup> et Stéphane Grieu<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Doctorant, Laboratoire ELIAUS, UPVD

<sup>2</sup> Directeur de thèse, PR, Laboratoire ELIAUS, UPVD

<sup>3</sup> Co-directeur de thèse, MCF HDR, Laboratoire ELIAUS, UPVD

Soutenance de thèse, Perpignan, 01 octobre 2010

# 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

# 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
- Problématique énergétique globale
  - Sélection d'un secteur à fort potentiel

# Considérations

- Augmentation de 1 °C de la température moyenne globale depuis 1850 (révolution industrielle)
- Augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
- Augmentation de la consommation d'énergie mondiale (+100% entre 1970 et 2000)
- Diminution de la quantité d'énergie fossile disponible
- Augmentation du coût des énergies fossiles
- ⇒ Objectifs pour l'UE en 2020 :
  - 20 % d'énergies renouvelables
  - -20 % de gaz à effet de serre
  - +20 % d'efficacité énergétique



# Considérations

- Augmentation de 1 °C de la température moyenne globale depuis 1850 (révolution industrielle)
- Augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
- Augmentation de la consommation d'énergie mondiale (+100% entre 1970 et 2000)
- Diminution de la quantité d'énergie fossile disponible
- Augmentation du coût des énergies fossiles
- ⇒ Objectifs pour l'UE en 2020 :
  - 20 % d'énergies renouvelables
  - -20 % de gaz à effet de serre
  - +20 % d'efficacité énergétique

# Considérations

- Augmentation de 1 °C de la température moyenne globale depuis 1850 (révolution industrielle)
- Augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
- Augmentation de la consommation d'énergie mondiale (+100% entre 1970 et 2000)
- Diminution de la quantité d'énergie fossile disponible
- Augmentation du coût des énergies fossiles
- ⇒ Objectifs pour l'UE en 2020 :
  - 20 % d'énergies renouvelables
  - -20 % de gaz à effet de serre
  - +20 % d'efficacité énergétique

# Considérations

- Augmentation de 1 °C de la température moyenne globale depuis 1850 (révolution industrielle)
- Augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
- Augmentation de la consommation d'énergie mondiale (+100% entre 1970 et 2000)
- Diminution de la quantité d'énergie fossile disponible
- Augmentation du coût des énergies fossiles
- ⇒ Objectifs pour l'UE en 2020 :
  - 20 % d'énergies renouvelables
  - -20 % de gaz à effet de serre
  - +20 % d'efficacité énergétique

# Considérations

- Augmentation de 1 °C de la température moyenne globale depuis 1850 (révolution industrielle)
- Augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
- Augmentation de la consommation d'énergie mondiale (+100% entre 1970 et 2000)
- Diminution de la quantité d'énergie fossile disponible
- Augmentation du coût des énergies fossiles
- ⇒ Objectifs pour l'UE en 2020 :
  - 20 % d'énergies renouvelables
  - -20 % de gaz à effet de serre
  - +20 % d'efficacité énergétique

# Considérations

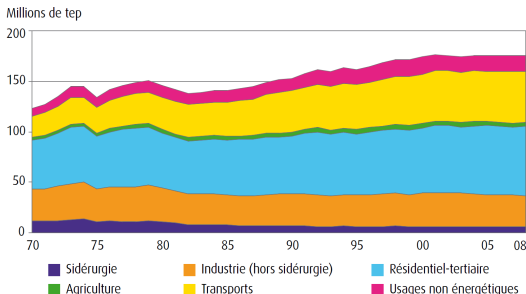
- Augmentation de 1 °C de la température moyenne globale depuis 1850 (révolution industrielle)
- Augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
- Augmentation de la consommation d'énergie mondiale (+100% entre 1970 et 2000)
- Diminution de la quantité d'énergie fossile disponible
- Augmentation du coût des énergies fossiles
- ⇒ Objectifs pour l'UE en 2020 :
  - 20 % d'énergies renouvelables
  - -20 % de gaz à effet de serre
  - +20 % d'efficacité énergétique

# 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
- Problématique énergétique globale
  - Sélection d'un secteur à fort potentiel

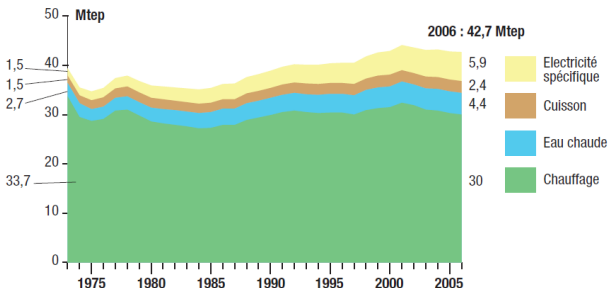
# Le chauffage pour le bâtiment

- 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

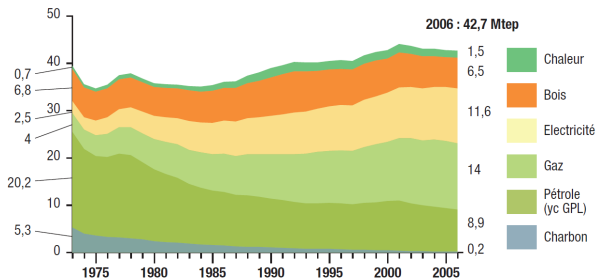
- Le secteur du bâtiment : plus gros consommateur d'énergie en France avec 69 Mtep en 2008
- Le chauffage : 1er poste de consommation d'énergie dans le résidentiel (70 %)
- Énergies fossiles majoritairement utilisées pour le chauffage en 2006 : gaz (33 %) et pétrole (21 %)





# 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 %)



# Sommaire

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

# Caractéristiques de la chaufferie

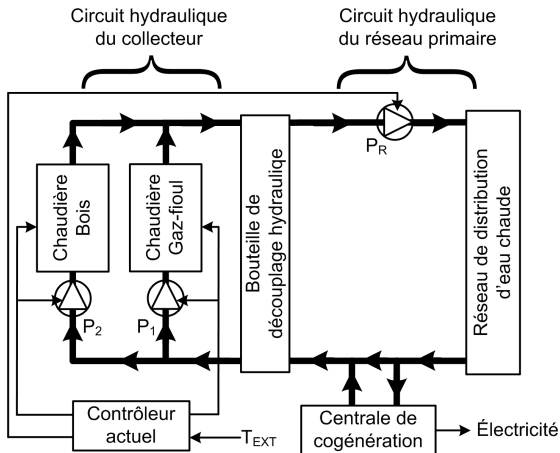
Éléments constitutifs de la chaufferie gérée par Cofely GDF-SUEZ

- Chaudière bois de 4,5 MW
- Chaudière gaz-fioul de 7 MW
- Centrale de cogénération de 2,5 MW
- Réseau de chaleur de 3000 m<sup>3</sup>
- Chauffage de 2700 logements
- Eau chaude sanitaire pour 800 logements
- Panneaux solaires thermiques de 1125 m<sup>2</sup> 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

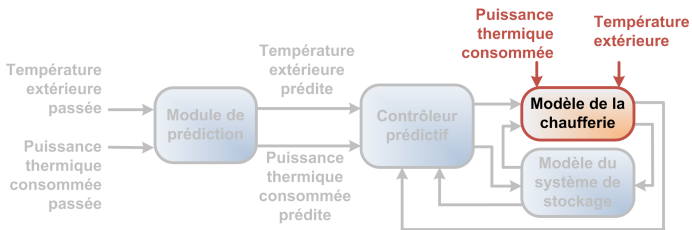


# Sommaire

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

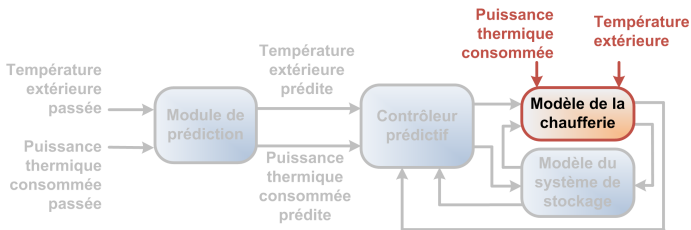
# Description des différentes étapes

- 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



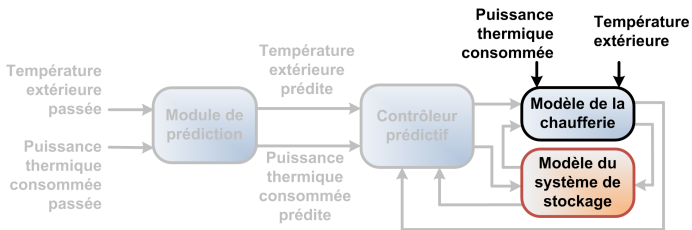
# Description des différentes étapes

- 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

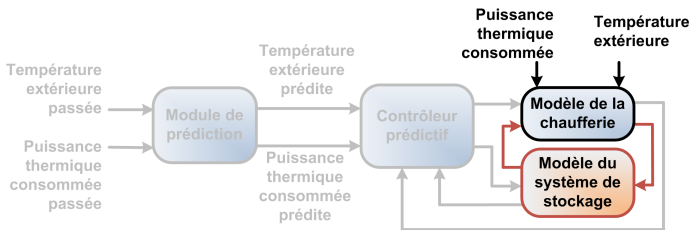
- Modélisation de la chaufferie (structure des équations)
- Identification des paramètres
- Développement d'un modèle de stockage énergétique
- Intégration du système de stockage
- Prédiction à court terme du comportement de la chaufferie
- Développement d'un contrôleur prédictif





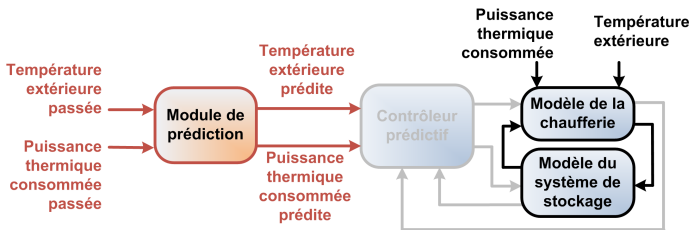
# Description des différentes étapes

- 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



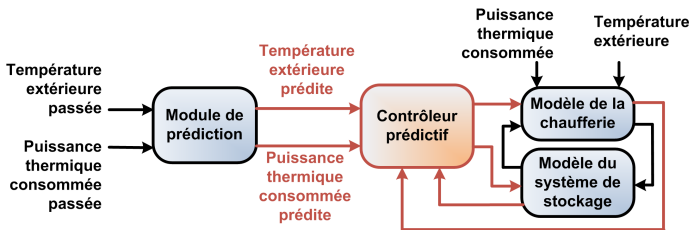
# Description des différentes étapes

- 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



# 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
- **Procédure utilisée**
  - Modélisation de la chaufferie

# Méthodologie

- **Modélisation**

- Définir la structure des équations

- Boîte blanche : modèle de connaissance
    - Boîte grise : modèle paramétrique
    - Boîte noire : modèle de type Hammerstein-Wiener

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \zeta_x) \\ y(t) = g(x(t), u(t), \zeta_y) \end{cases}$$

- **Identification**

- Optimiser les paramètres des modèles ( $\zeta_x, \zeta_y$ )

$$\left\{ \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{k=1}^{N_x} \left( \omega^j \cdot \sum_{k=1}^{N_E} |y_i^{exp}(k) - y_i^{sim}(k)|^2 \right) \right) \right\}$$

- Comparer les réponses simulées et expérimentales

$$\begin{cases} ERM = 100 \times \left( \frac{|V_{mod} - V_{exp}|}{|\max(V_{exp}) - \min(V_{exp})|} \right) \\ FIT = 100 \times \left( 1 - \frac{\|V_{mod} - V_{exp}\|_2}{\|V_{exp} - (V_{exp})\|_2} \right) \end{cases}$$

- Modifier si besoin la structure des équations

# Méthodologie

## ● Modélisation

### ● Définir la structure des équations

- Boîte blanche : modèle de connaissance
- Boîte grise : modèle paramétrique
- Boîte noire : modèle de type Hammerstein-Wiener

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \zeta_x) \\ y(t) = g(x(t), u(t), \zeta_y) \end{cases}$$

## ● Identification

- Optimiser les paramètres des modèles ( $\zeta_x, \zeta_y$ )

$$\left\{ \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{k=1}^{N_x} \left( \omega^j \cdot \sum_{k=1}^{N_E} |y_i^{exp}(k) - y_i^{sim}(k)|^2 \right) \right) \right.$$

- Comparer les réponses simulées et expérimentales

$$\begin{cases} ERM = 100 \times \left( \frac{|V_{mod} - V_{exp}|}{|\max(V_{exp}) - \min(V_{exp})|} \right) \\ FIT = 100 \times \left( 1 - \frac{\|V_{mod} - V_{exp}\|_2}{\|V_{exp} - (V_{exp})\|_2} \right) \end{cases}$$

- Modifier si besoin la structure des équations

# Méthodologie

## ● Modélisation

### ● Définir la structure des équations

- Boîte blanche : modèle de connaissance
- Boîte grise : modèle paramétrique
- Boîte noire : modèle de type Hammerstein-Wiener

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \zeta_x) \\ y(t) = g(x(t), u(t), \zeta_y) \end{cases}$$

## ● Identification

- Optimiser les paramètres des modèles  $(\zeta_x, \zeta_y)$

$$\left\{ \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{k=1}^{N_x} \left( u^k \cdot \sum_{k=1}^{N_y} |y_i^{exp}(k) - y_i^{sim}(k)|^2 \right) \right) \right.$$

- Comparer les réponses simulées et expérimentales

$$\begin{cases} ERM = 100 \times \left( \frac{|V_{mod} - V_{exp}|}{|\max(V_{exp}) - \min(V_{exp})|} \right) \\ FIT = 100 \times \left( 1 - \frac{\|V_{mod} - V_{exp}\|_2}{\|V_{exp} - (V_{exp})\|_2} \right) \end{cases}$$

- Modifier si besoin la structure des équations

# Méthodologie

## ● Modélisation

### ● Définir la structure des équations

- Boîte blanche : modèle de connaissance
- Boîte grise : modèle paramétrique
- Boîte noire : modèle de type Hammerstein-Wiener

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \zeta_x) \\ y(t) = g(x(t), u(t), \zeta_y) \end{cases}$$

## ● Identification

### ● Optimiser les paramètres des modèles ( $\zeta_x, \zeta_y$ )

$$\left\{ \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{i=1}^{n_y} \left( \omega^i \cdot \sum_{k=1}^{N_E} |y_i^{exp}(k) - y_i^{sim}(k)|^2 \right) \right) \right\}$$

### ● Comparer les réponses simulées et expérimentales

$$\begin{cases} ERM & = & 100 \times \left\{ \frac{|V_{mod} - V_{exp}|}{|\max(V_{exp}) - \min(V_{exp})|} \right\} \\ FIT & = & 100 \times \left( 1 - \frac{\|V_{mod} - V_{exp}\|_2}{\|V_{exp} - \langle V_{exp} \rangle\|_2} \right) \end{cases}$$

### ● Modifier si besoin la structure des équations



# Méthodologie

## ● Modélisation

### ● Définir la structure des équations

- Boîte blanche : modèle de connaissance
- Boîte grise : modèle paramétrique
- Boîte noire : modèle de type Hammerstein-Wiener

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \zeta_x) \\ y(t) = g(x(t), u(t), \zeta_y) \end{cases}$$

## ● Identification

### ● Optimiser les paramètres des modèles ( $\zeta_x, \zeta_y$ )

$$\left\{ \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{i=1}^{n_y} \left( \omega^i \cdot \sum_{k=1}^{N_E} |y_i^{exp}(k) - y_i^{sim}(k)|^2 \right) \right) \right\}$$

### ● Comparer les réponses simulées et expérimentales

$$\begin{cases} ERM & = & 100 \times \left\{ \frac{|V_{mod} - V_{exp}|}{|\max(V_{exp}) - \min(V_{exp})|} \right\} \\ FIT & = & 100 \times \left( 1 - \frac{\|V_{mod} - V_{exp}\|_2}{\|V_{exp} - \langle V_{exp} \rangle\|_2} \right) \end{cases}$$

### ● Modifier si besoin la structure des équations

# Méthodologie

## ● Modélisation

### ● Définir la structure des équations

- Boîte blanche : modèle de connaissance
- Boîte grise : modèle paramétrique
- Boîte noire : modèle de type Hammerstein-Wiener

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), \zeta_x) \\ y(t) = g(x(t), u(t), \zeta_y) \end{cases}$$

## ● Identification

### ● Optimiser les paramètres des modèles ( $\zeta_x, \zeta_y$ )

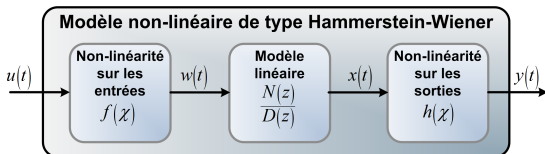
$$\left\{ \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{i=1}^{n_y} \left( \omega^i \cdot \sum_{k=1}^{N_E} |y_i^{exp}(k) - y_i^{sim}(k)|^2 \right) \right) \right\}$$

### ● Comparer les réponses simulées et expérimentales

$$\begin{cases} ERM & = & 100 \times \left\{ \frac{|V_{mod} - V_{exp}|}{|\max(V_{exp}) - \min(V_{exp})|} \right\} \\ FIT & = & 100 \times \left( 1 - \frac{\|V_{mod} - V_{exp}\|_2}{\|V_{exp} - \langle V_{exp} \rangle\|_2} \right) \end{cases}$$

### ● Modifier si besoin la structure des équations

# Modèle d'Hammerstein Wiener

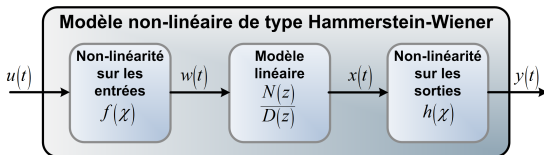


- Non-linéarités sur les entrées et les sorties
  - Fonctions affines par morceaux

$$\theta(\tau) = a_i \times \tau + b_i$$

- Partie centrale linéaire (fonctions de transfert)

# Modèle d'Hammerstein Wiener

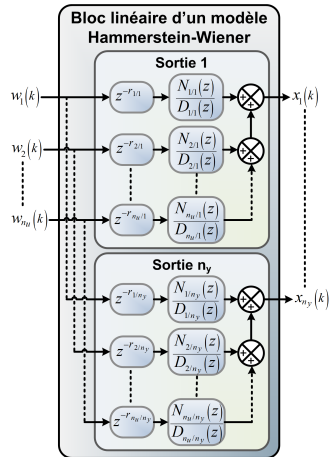


- Non-linéarités sur les entrées et les sorties
  - Fonctions affines par morceaux

$$\theta(\tau) = a_i \times \tau + b_i$$

- Partie centrale linéaire (fonctions de transfert)

$$X_j(z) = \sum_{i=1}^{n_u} \left( \frac{N_{jji}(z)}{D_{jji}(z)} \cdot z^{-r_{ij}} \cdot W_i(z) \right)$$



# Algorithme d'identification (1)

- Minimisation de l'erreur d'estimation

- Erreur à l'instant  $k$  :  $\epsilon_i(k) = y_{exp_i}(k) - y_{sim_i}(k)$

- Somme des erreurs quadratiques pour la variable  $y$  :  $e_i = \sum_{k=1}^N \epsilon_i^2(k)$

- Vecteur d'erreurs des  $n_y$  variables d'un modèle :  $E = \{e_1, \dots, e_{n_y}\}$

- Résolution du problème d'optimisation :

$$\min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \text{Tr} \left( E^T \cdot E \cdot W \right) \right) = \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{i=1}^{n_y} \left( \omega_i \cdot e_i^2 \right) \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n \end{pmatrix} \\ \omega_i = \frac{1}{|\max(y_{exp_i})|} \end{array} \right.$$

# Algorithme d'identification (1)

- Minimisation de l'erreur d'estimation

- Erreur à l'instant  $k$  :  $\epsilon_i(k) = y_{exp_i}(k) - y_{sim_i}(k)$

- Somme des erreurs quadratiques pour la variable  $y$  :  $e_i = \sum_{k=1}^N \epsilon_i^2(k)$

- Vecteur d'erreurs des  $n_y$  variables d'un modèle :  $E = \{e_1, \dots, e_{n_y}\}$

- Résolution du problème d'optimisation :

$$\min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \text{Tr} \left( E^T \cdot E \cdot W \right) \right) = \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{i=1}^{n_y} \left( \omega_i \cdot e_i^2 \right) \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n \end{pmatrix} \\ \omega_i = \frac{1}{|\max(y_{exp_i})|} \end{array} \right.$$

# Algorithme d'identification (1)

- Minimisation de l'erreur d'estimation

- Erreur à l'instant  $k$  :  $\epsilon_i(k) = y_{exp_i}(k) - y_{sim_i}(k)$

- Somme des erreurs quadratiques pour la variable  $y$  :  $e_i = \sum_{k=1}^N \epsilon_i^2(k)$

- Vecteur d'erreurs des  $n_y$  variables d'un modèle :  $E = \{e_1, \dots, e_{n_y}\}$

- Résolution du problème d'optimisation :

$$\min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \text{Tr} \left( E^T \cdot E \cdot W \right) \right) = \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{i=1}^{n_y} \left( \omega_i \cdot e_i^2 \right) \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n \end{pmatrix} \\ \omega_i = \frac{1}{|\max(y_{exp_i})|} \end{array} \right.$$

# Algorithme d'identification (1)

- Minimisation de l'erreur d'estimation

- Erreur à l'instant  $k$  :  $\epsilon_i(k) = y_{exp_i}(k) - y_{sim_i}(k)$

- Somme des erreurs quadratiques pour la variable  $y$  :  $e_i = \sum_{k=1}^N \epsilon_i^2(k)$

- Vecteur d'erreurs des  $n_y$  variables d'un modèle :  $E = \{e_1, \dots, e_{n_y}\}$

- Résolution du problème d'optimisation :

$$\min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \text{Tr} \left( E^T \cdot E \cdot W \right) \right) = \min_{\zeta_x, \zeta_y} \left( \sum_{i=1}^{n_y} \left( \omega_i \cdot e_i^2 \right) \right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W = \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n \end{pmatrix} \\ \omega_i = \frac{1}{|\max(y_{exp_i})|} \end{array} \right.$$

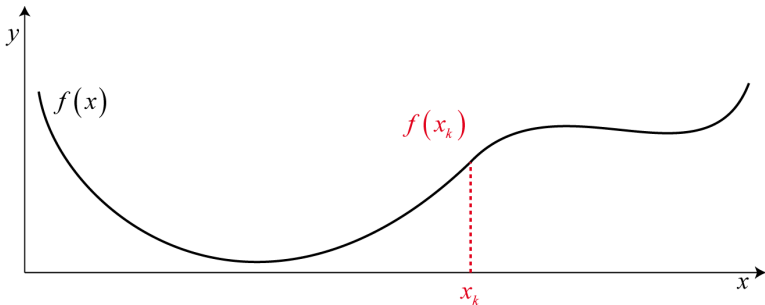


## Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
  - Minimisation itérative
  - Utilisation de la région de confiance
  - Résolution par la méthode de Gauss-Newton

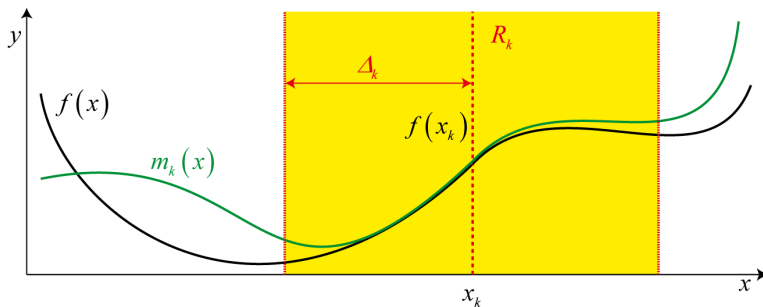
## Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
  - Minimisation itérative
  - Utilisation de la région de confiance
  - Résolution par la méthode de Gauss-Newton



## Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
  - Minimisation itérative
  - Utilisation de la région de confiance
  - Résolution par la méthode de Gauss-Newton

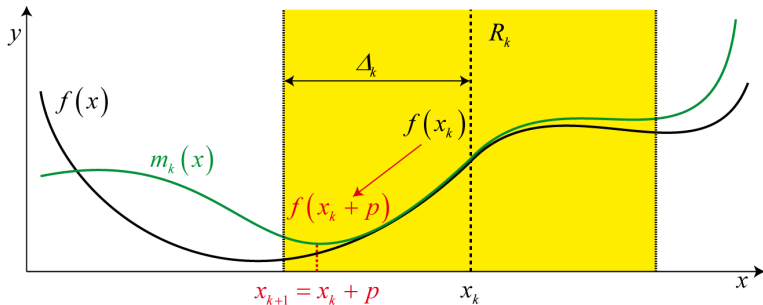


# Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton

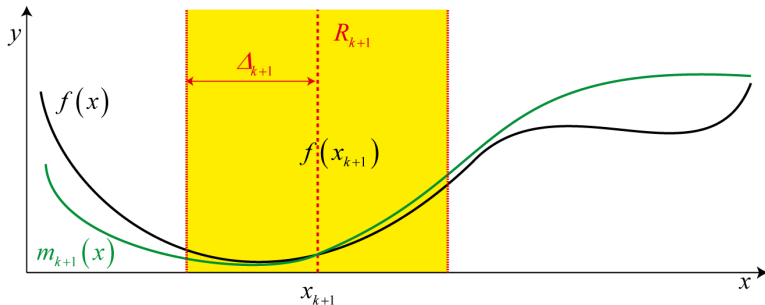
- Minimisation itérative
- Utilisation de la région de confiance
- Résolution par la méthode de Gauss-Newton

$$\begin{cases} \min_p (m(p)) \mid p \in R_k \\ R_k = \{x_k + r ; \|r\|_2 \leq \Delta\} \end{cases}$$



## Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
  - Minimisation itérative
  - Utilisation de la région de confiance
  - Résolution par la méthode de Gauss-Newton

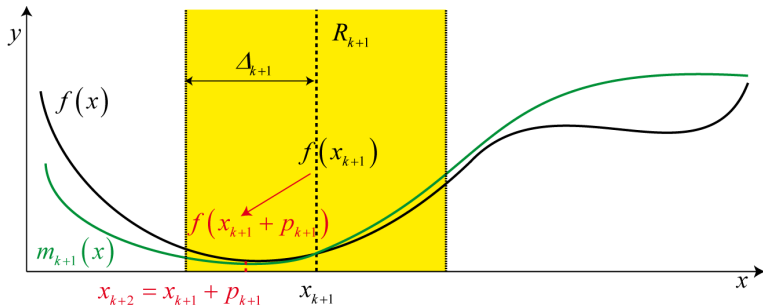


## Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton

- Minimisation itérative
- Utilisation de la région de confiance
- Résolution par la méthode de Gauss-Newton

$$\begin{cases} \min_p (m(p)) \mid p \in R_k \\ R_k = \{x_k + r \mid \|r\|_2 \leq \Delta\} \end{cases}$$



## Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
  - Minimisation itérative
  - Utilisation de la région de confiance
  - Résolution par la méthode de Gauss-Newton
    - Définition de  $m(x)$  par l'approximation de Taylor

$$\begin{cases} \min_p \left( \frac{1}{2} \cdot p^T \cdot H \cdot p + p^T \cdot \nabla f \right) \\ x_k + p; \|D \cdot p\|_2 \leq \Delta \end{cases}$$

- Calcul du Hessien approché  $H$  par la direction de Gauss-Newton

$$\min_s \|J \cdot s + f(s)\|_2^2$$

- Résolution par la méthode du gradient conjugué préconditionné

$$J^T \cdot J \cdot s = -J^T \cdot f(s)$$

## Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
  - Minimisation itérative
  - Utilisation de la région de confiance
  - Résolution par la méthode de Gauss-Newton
    - Définition de  $m(x)$  par l'approximation de Taylor

$$\begin{cases} \min_p \left( \frac{1}{2} \cdot p^T \cdot H \cdot p + p^T \cdot \nabla f \right) \\ x_k + p; \|D \cdot p\|_2 \leq \Delta \end{cases}$$

- Calcul du Hessien approché  $H$  par la direction de Gauss-Newton

$$\min_s \|J \cdot s + f(s)\|_2^2$$

- Résolution par la méthode du gradient conjugué préconditionné

$$J^T \cdot J \cdot s = -J^T \cdot f(s)$$



## Algorithme d'identification (2)

- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
  - Minimisation itérative
  - Utilisation de la région de confiance
  - Résolution par la méthode de Gauss-Newton
    - Définition de  $m(x)$  par l'approximation de Taylor

$$\begin{cases} \min_p \left( \frac{1}{2} \cdot p^T \cdot H \cdot p + p^T \cdot \nabla f \right) \\ x_k + p; \|D \cdot p\|_2 \leq \Delta \end{cases}$$

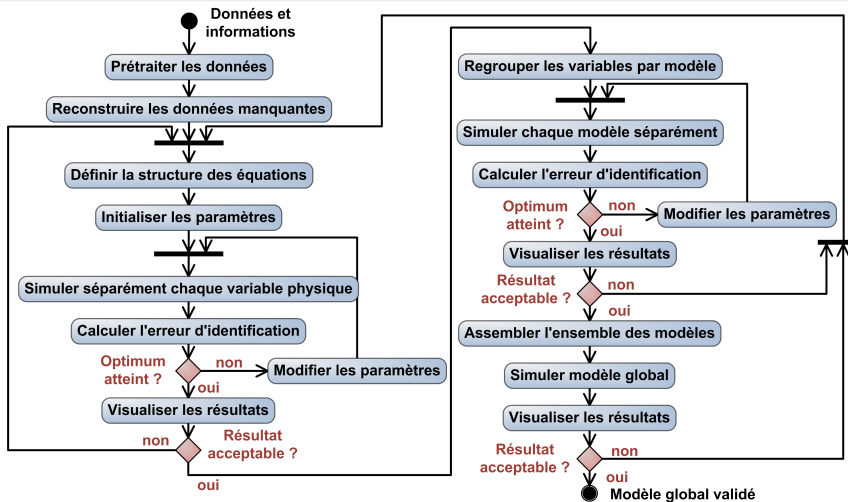
- Calcul du Hessien approché  $H$  par la direction de Gauss-Newton

$$\min_s \|J \cdot s + f(s)\|_2^2$$

- Résolution par la méthode du gradient conjugué préconditionné

$$J^T \cdot J \cdot s = -J^T \cdot f(s)$$

# Approche modulaire itérative

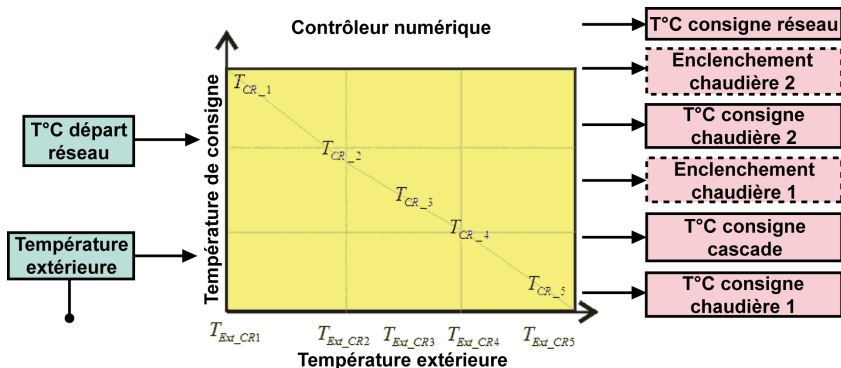


# Sommaire

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

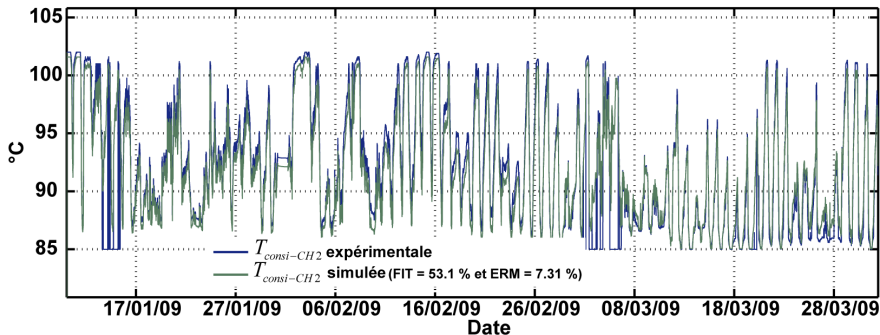
# Régulation générale (1)

- Description du fonctionnement



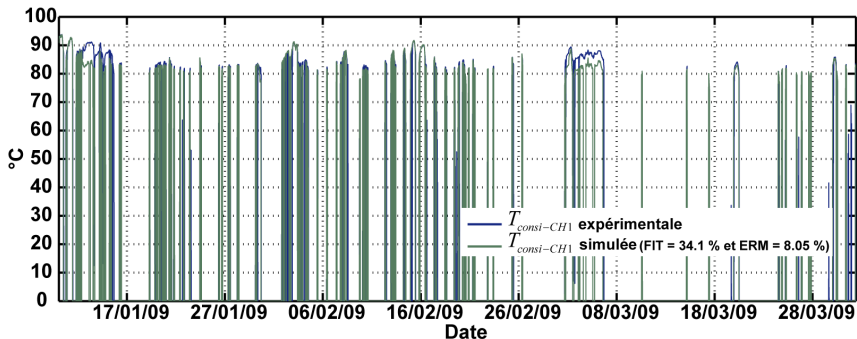
## Régulation générale (2)

- Consigne de température au départ de la chaudière bois  $T_{consi-CH2}$ 
  - Modèle paramétrique



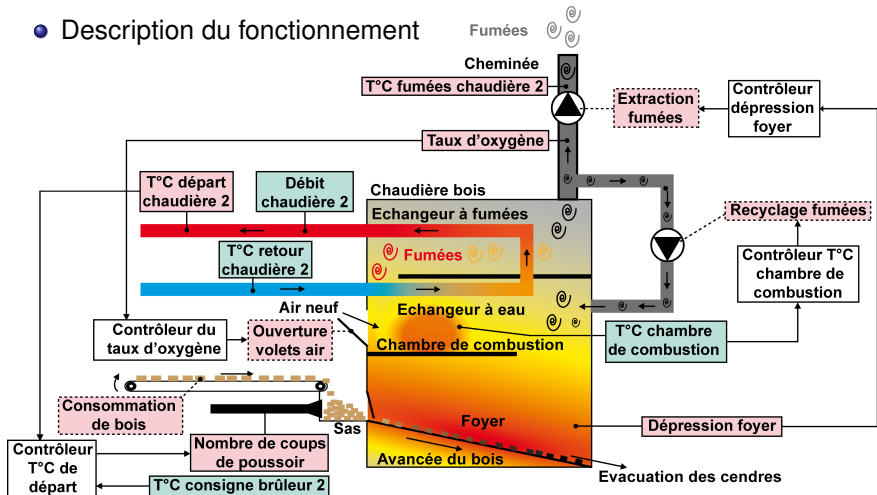
# Régulation générale (3)

- Consigne de température au départ de la chaudière gaz-fioul  $T_{consi-CH1}$ 
  - Modèle paramétrique



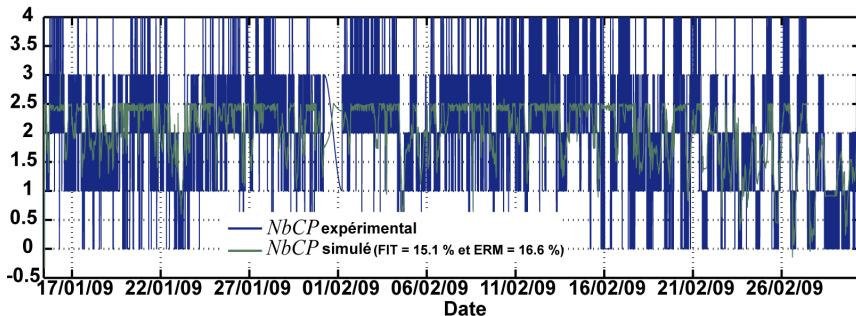
# Chaudière à bois (1)

## Description du fonctionnement



# Chaudière à bois (2)

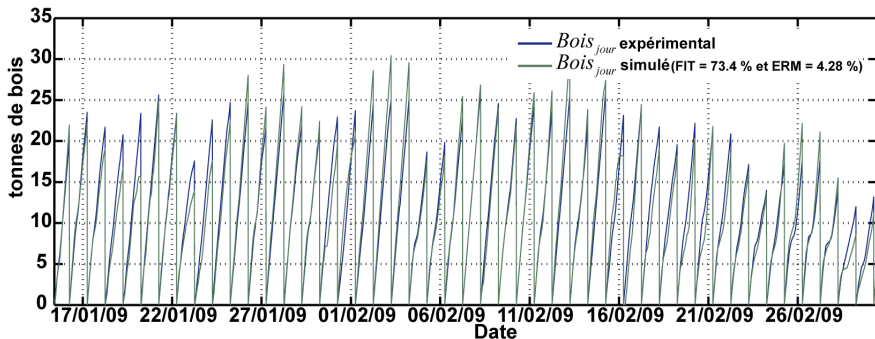
- Nombre de coups de pousoir  $NbCP$ 
  - Modèle de type Hammerstein-Wiener





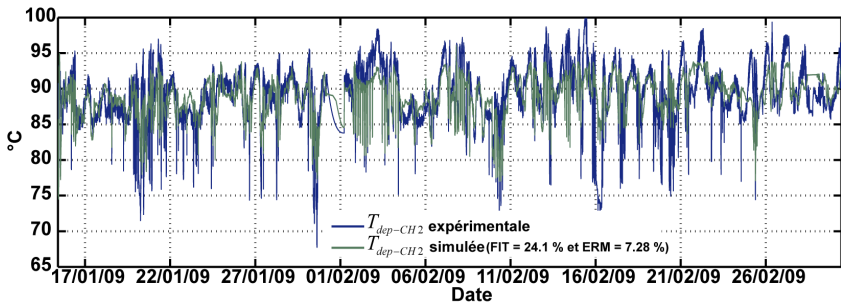
# Chaudière à bois (3)

- Consommation journalière de bois
  - Modèle de connaissance



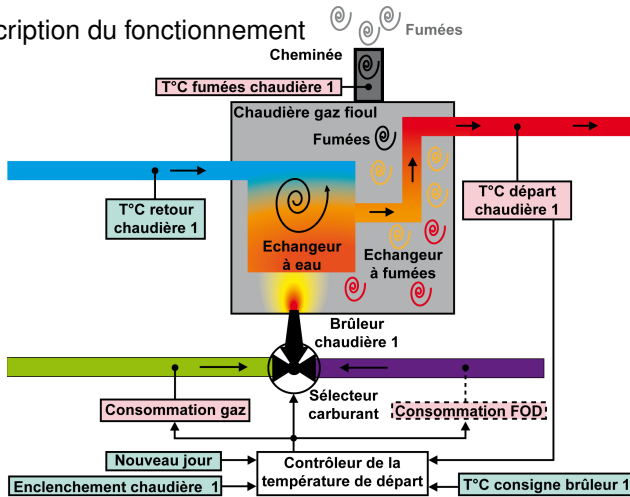
# Chaudière à bois (4)

- Température au départ de la chaudière bois  $T_{dep-CH2}$ 
  - Modèle de type Hammerstein-Wiener



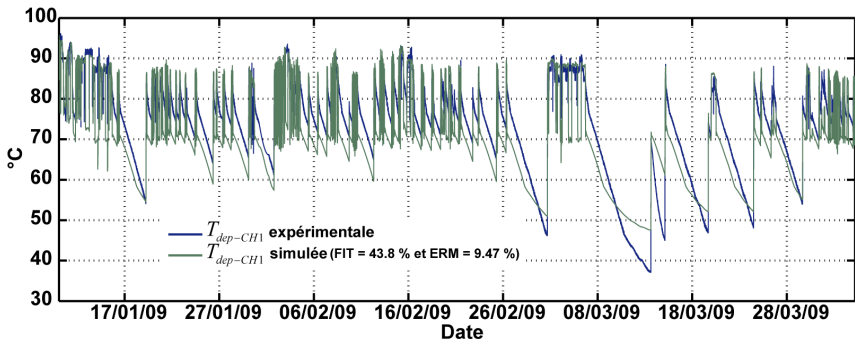
# Chaudière à gaz-fioul (1)

## Description du fonctionnement



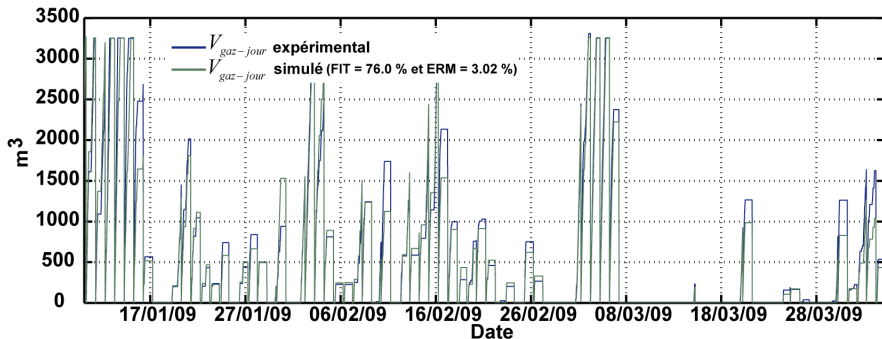
## Chaudière à gaz-fioul (2)

- Température au départ de la chaudière gaz-fioul  $T_{dep-CH1}$ 
  - Modèle paramétrique



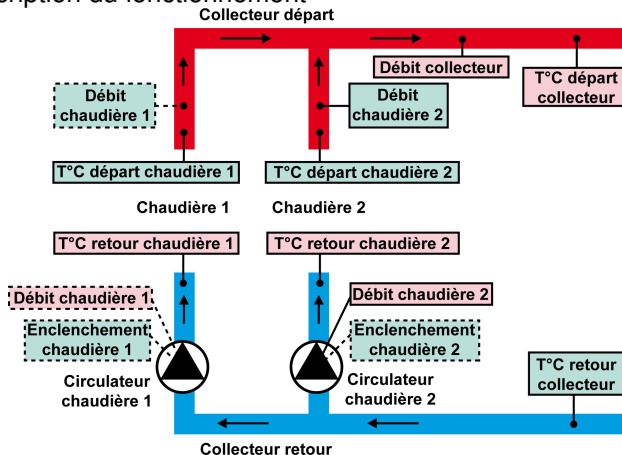
# Chaudière à gaz-fioul (3)

- Consommation journalière de gaz  $V_{\text{gaz-jour}}$ 
  - Modèle paramétrique



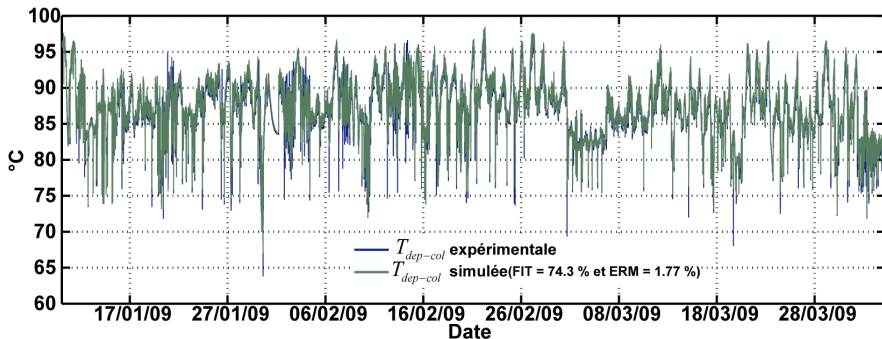
# Circuit collecteur (1)

- Description du fonctionnement



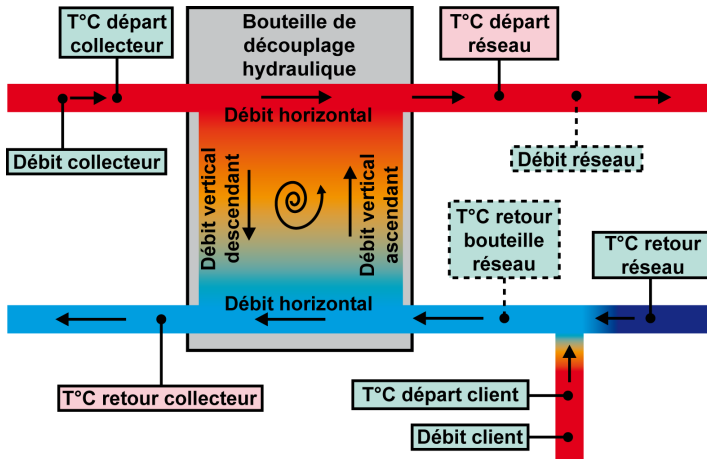
# Circuit collecteur (2)

- Température au départ du collecteur  $T_{dep-col}$ 
  - Modèle de connaissance



# Bouteille de découplage hydraulique (1)

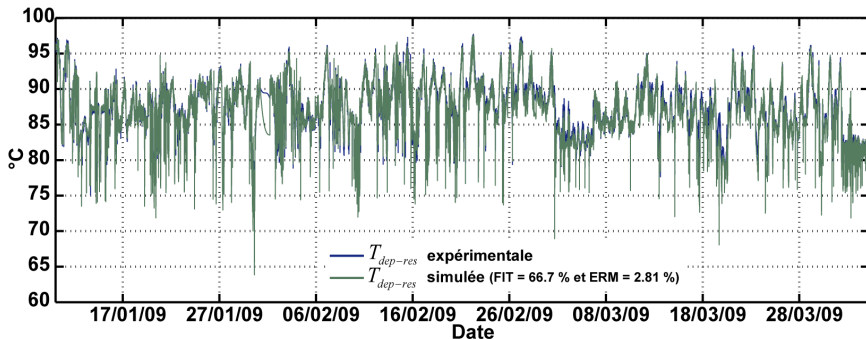
- Description du fonctionnement





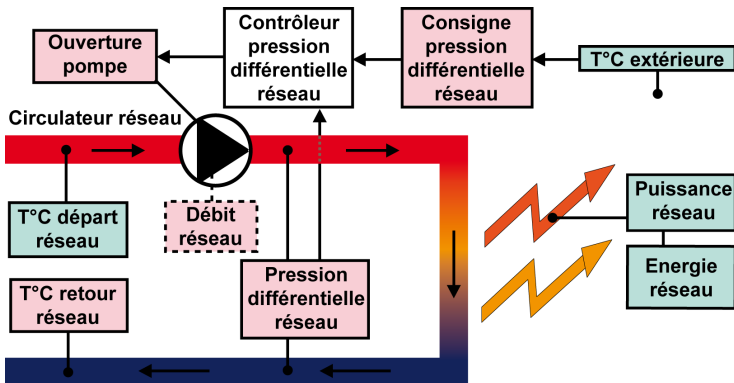
## Bouteille de découplage hydraulique (2)

- Température au départ du réseau  $T_{dep-res}$ 
  - Modèle de connaissance



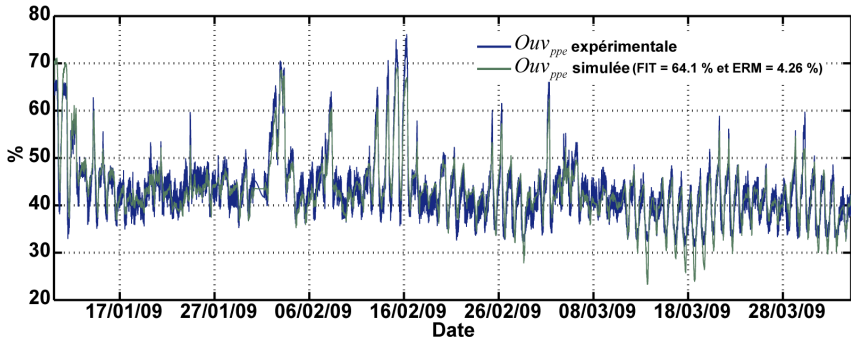
# Réseau de chaleur (1)

- Description du fonctionnement



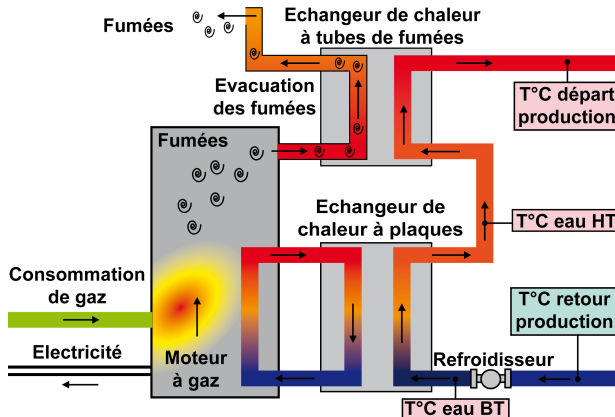
## Réseau de chaleur (2)

- Ouverture de la pompe réseau  $Ouv_{ppe}$ 
  - Modèle paramétrique



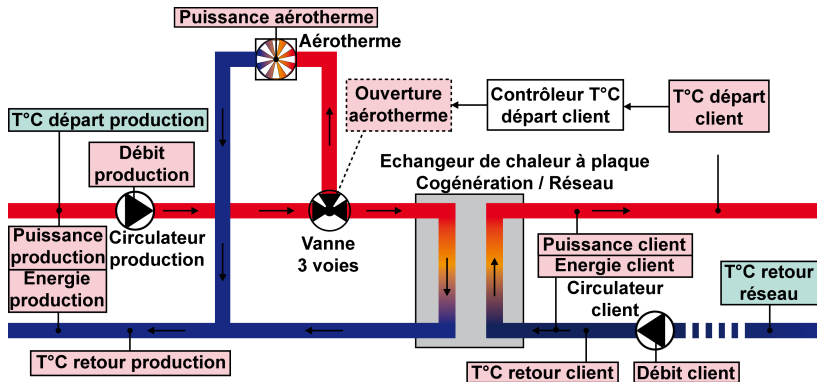
# Centrale de cogénération (1)

- Description du fonctionnement
- ## Moteur de la cogénération



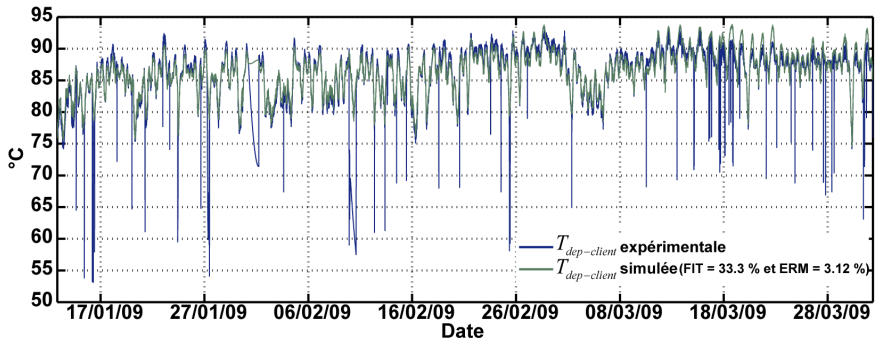
# Centrale de cogénération (1)

- Description du fonctionnement  
Echangeur cogénération / réseau



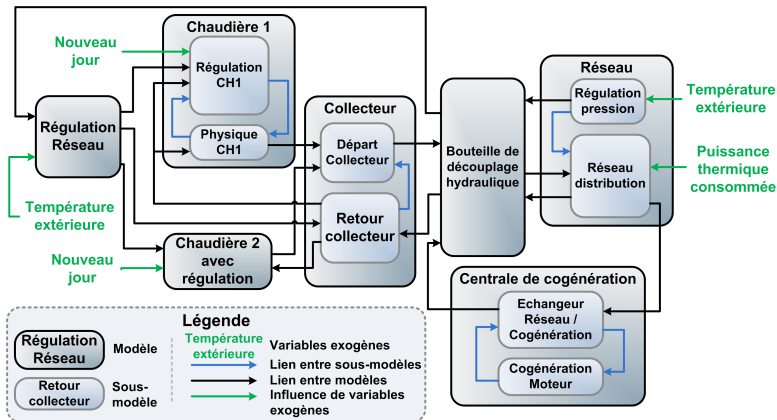
# Centrale de cogénération (2)

- Température départ client  $T_{dep-client}$ 
  - Modèle paramétrique



# Modèle global de la chaufferie

- Une cinquantaine de variables physiques
- Sept modèles d'entités physiques



# 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
- **Hypothèses**
  - Modélisation du système de stockage
  - Modification hydraulique pour l'intégration du système de stockage
  - Intégration du modèle au sein du modèle de la chaufferie



# Caractéristiques principales

- **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

- 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

- 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

- 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

- 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

- 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

- 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

# 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
- Hypothèses
  - **Modélisation du système de stockage**
  - Modification hydraulique pour l'intégration du système de stockage
  - Intégration du modèle au sein du modèle de la chaufferie



# Modèle adapté du "Turbulent Mixing-Model" <sup>1</sup>

## ● 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

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

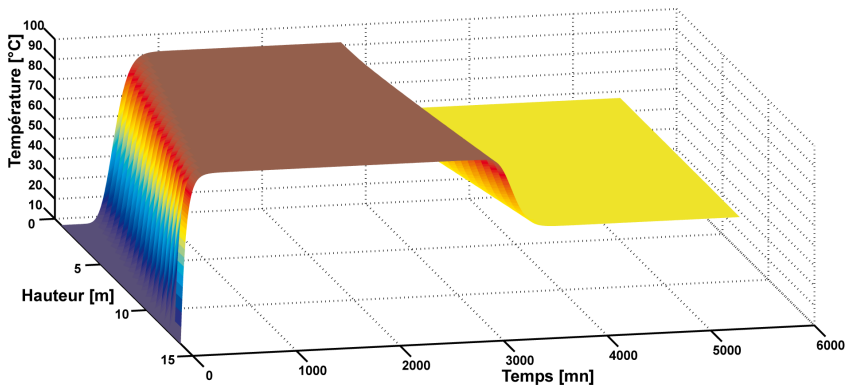
## ● Mode déstockage

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

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

# Réponse en simulation du modèle

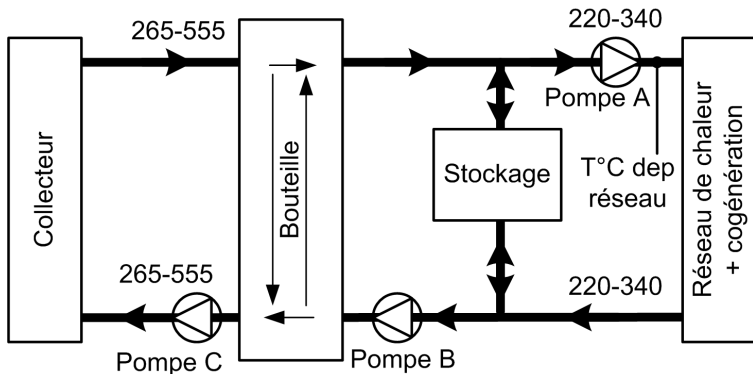
- Temps de réponse max : environ 210 mn pour un débit de  $230 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$



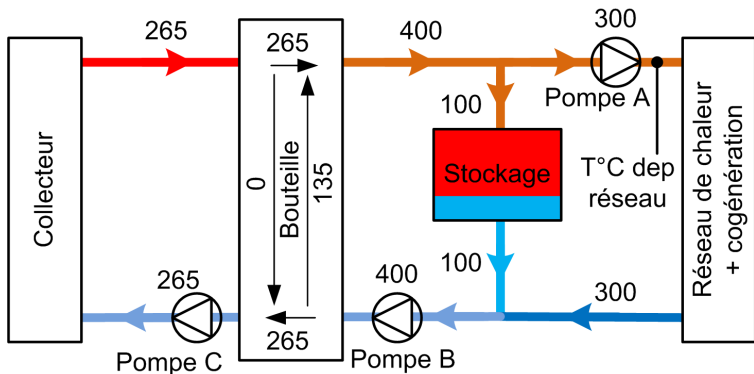
# Sommaire

- 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
- Hypothèses
  - Modélisation du système de stockage
  - **Modification hydraulique pour l'intégration du système de stockage**
  - Intégration du modèle au sein du modèle de la chaufferie

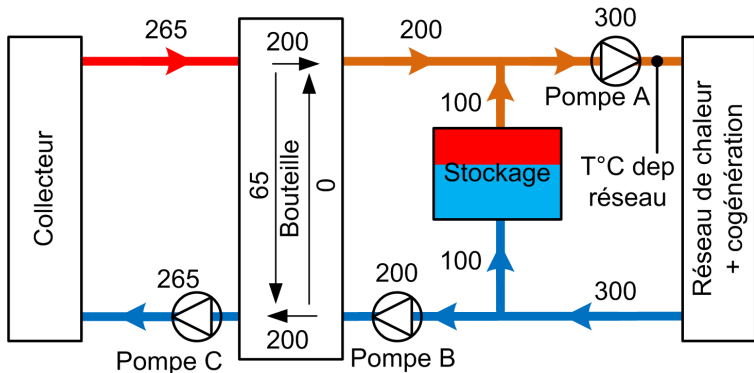
# Schéma général



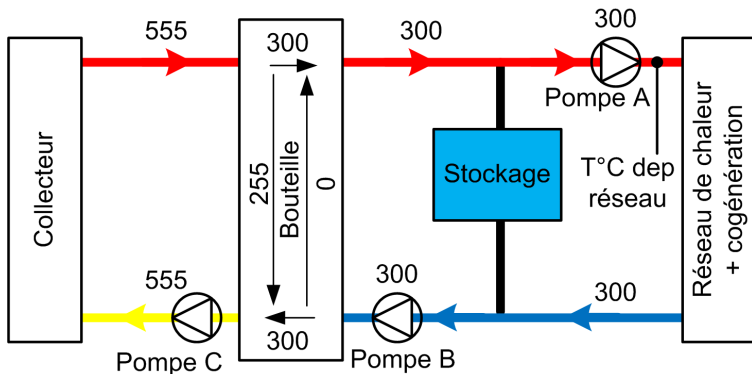
# Mode stockage



# Mode déstockage



## Mode déconnecté

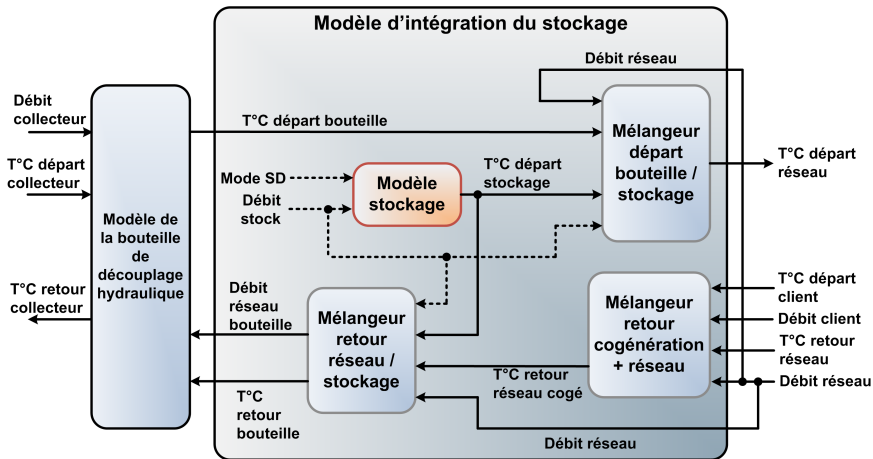


# Sommaire

- 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
- Hypothèses
  - Modélisation du système de stockage
  - Modification hydraulique pour l'intégration du système de stockage
  - **Intégration du modèle au sein du modèle de la chaufferie**



# Intégration dans le modèle de la chaufferie



# 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
- **Outils employés**
  - Méthodologie de la prédiction
  - Résultats de la prédiction

# La transformée en ondelettes

- Ondelettes
- Principe de la décomposition
- Décomposition en ondelettes discrète
- Analyse multi-résolution
- Recomposition par transformée inverse indirecte

$$\Psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \Psi\left(\frac{t}{b-a}\right) \text{ avec } a, b \in \mathbb{R} \text{ et } a \neq 0$$

$$C_{a,b} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \frac{1}{\sqrt{a}} \cdot \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

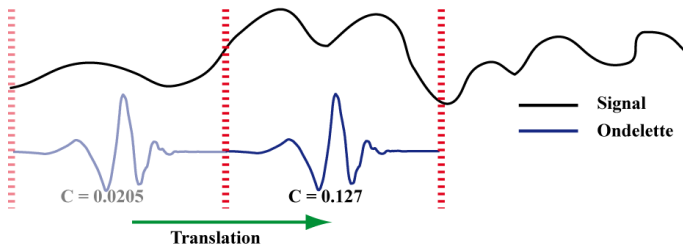
# La transformée en ondelettes

- Ondelettes
- Principe de la décomposition
  - Décomposition en ondelettes discrète
  - Analyse multi-résolution
  - Recomposition par transformée inverse indirecte



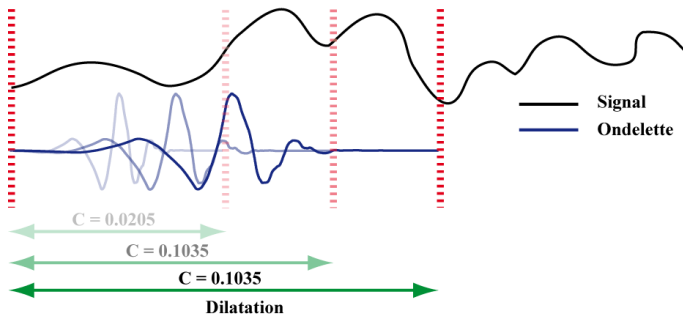
# La transformée en ondelettes

- Ondelettes
- Principe de la décomposition
  - Décomposition en ondelettes discrète
  - Analyse multi-résolution
  - Recomposition par transformée inverse indirecte



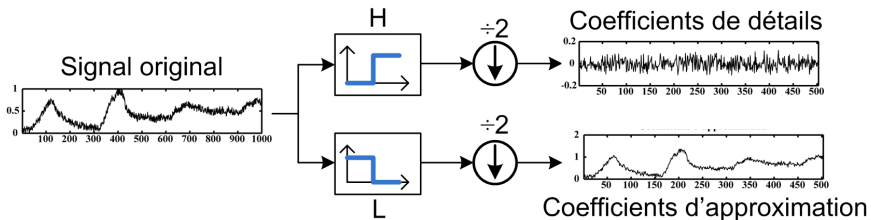
# La transformée en ondelettes

- Ondelettes
- Principe de la décomposition
  - Décomposition en ondelettes discrète
  - Analyse multi-résolution
  - Recomposition par transformée inverse indirecte



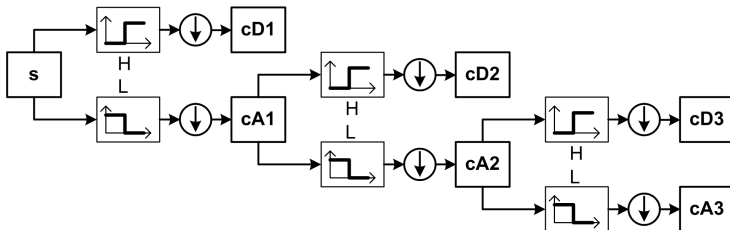
# La transformée en ondelettes

- Ondelettes
- Principe de la décomposition
- Décomposition en ondelettes discrète
- Analyse multi-résolution
- Recomposition par transformée inverse indirecte



# La transformée en ondelettes

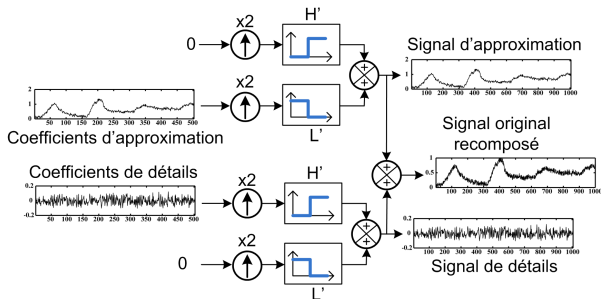
- Ondelettes
- Principe de la décomposition
- Décomposition en ondelettes discrète
- Analyse multi-résolution
- Recomposition par transformée inverse indirecte





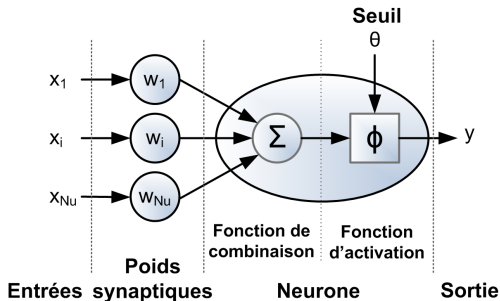
# La transformée en ondelettes

- Ondelettes
- Principe de la décomposition
- Décomposition en ondelettes discrète
- Analyse multi-résolution
- Reconstitution par transformée inverse indirecte



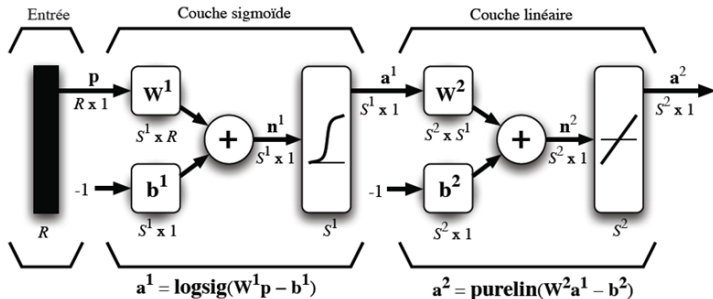
# Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

- **Modèle du neurone artificiel**
- Perceptron Multi-Couche (PMC)
- Apprentissage supervisé d'un PMC
- Algorithme d'apprentissage : méthode de Levenberg-Marquardt



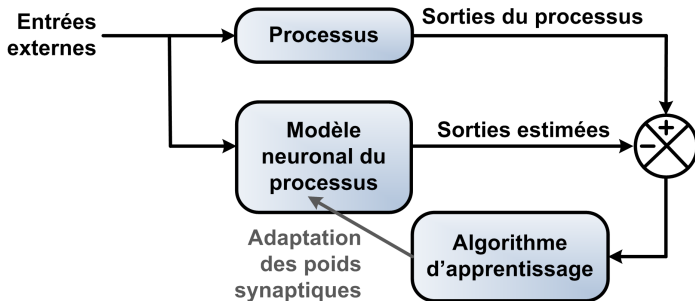
# Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

- Modèle du neurone artificiel
- Perceptron Multi-Couche (PMC)
- Apprentissage supervisé d'un PMC
- Algorithme d'apprentissage : méthode de Levenberg-Marquardt



# Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

- Modèle du neurone artificiel
- Perceptron Multi-Couche (PMC)
- Apprentissage supervisé d'un PMC
- Algorithme d'apprentissage : méthode de Levenberg-Marquardt



# Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

- Modèle du neurone artificiel
- Perceptron Multi-Couche (PMC)
- Apprentissage supervisé d'un PMC
- Algorithme d'apprentissage : méthode de Levenberg-Marquardt
  - Mise à jour des poids synaptiques par rétropropagation de l'erreur
  - Calcul du Hessien basé sur Gauss-Newton
  - Ajout d'une correction  $\beta$  pour éviter les problèmes d'inversion de matrices

$$W_{i+1} = W_i - \mu \cdot [H(W_i) + \beta \cdot I]^{-1} \nabla E(W_i)$$

- Simplification du problème par séparation de la matrice Jacobienne

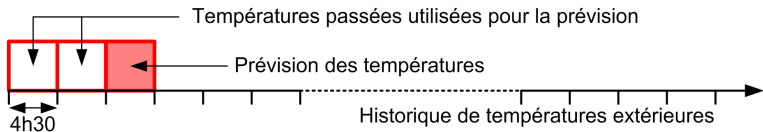
$$H = J^T \cdot J = [J_1^T J_2^T] \cdot [J_1 J_2]^T = J_1^T \cdot J_1 + J_2^T \cdot J_2$$

# Sommaire

- 1 Contexte énergétique
- 2 Description du projet Opti-EnR
  - Outils employés
  - **Méthodologie de la prédiction**
  - Résultats de la prédiction
- 3 Modélisation et identification
- 4 Stockage énergétique
- 5 **Prédiction des variables exogènes**
- 6 Contrôle et optimisation

# Séries temporelles

- Découpage du signal à prédire en séquences de 4h30
- Calcul des séquences futures à partir de séquences passées



# Séries temporelles

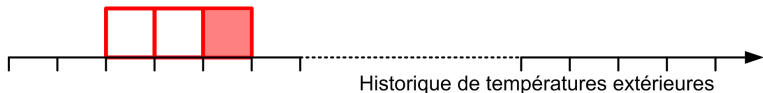
- Découpage du signal à prédire en séquences de 4h30
- Calcul des séquences futures à partir de séquences passées





# Séries temporelles

- Découpage du signal à prédire en séquences de 4h30
- Calcul des séquences futures à partir de séquences passées



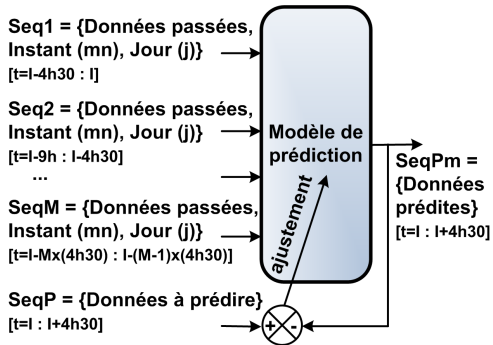
# Séries temporelles

- Découpage du signal à prédire en séquences de 4h30
- Calcul des séquences futures à partir de séquences passées



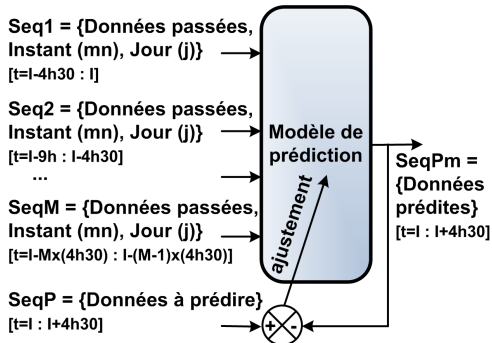
# Modèle de prédiction

- M séquences passées de 4h30 utilisées comme entrées du modèle et complétées par :
  - le jour de l'année,
  - la minute du jour.
  - $\Rightarrow$  Intérêt : aide le modèle à se repérer dans le temps
- Sortie du modèle :
  - une séquence prédite de 4h30



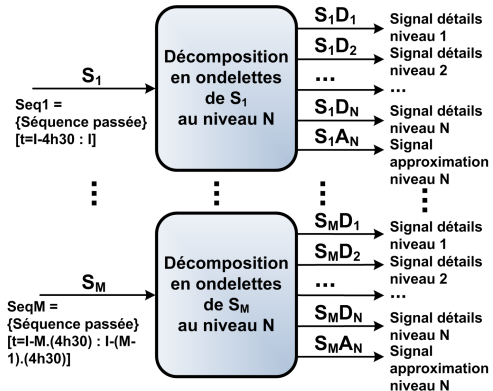
# Modèle de prédiction

- M séquences passées de 4h30 utilisées comme entrées du modèle et complétées par :
  - le jour de l'année,
  - la minute du jour.
  - $\Rightarrow$  Intérêt : aide le modèle à se repérer dans le temps
- Sortie du modèle :
  - une séquence prédite de 4h30



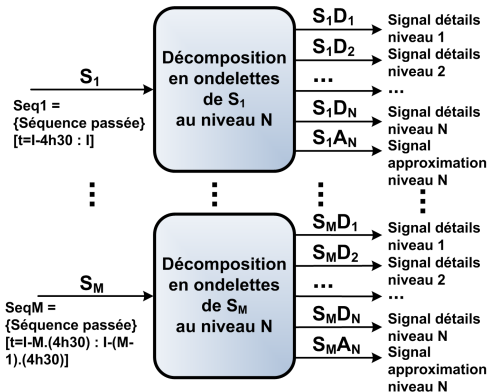
# Décomposition en ondelettes

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



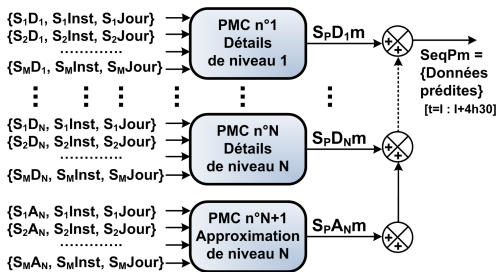
# Décomposition en ondelettes

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



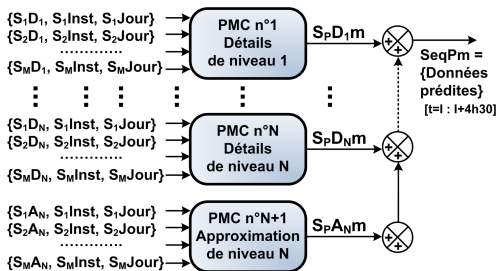
# Prédiction et recombinaison

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



# Prédiction et recombinaison

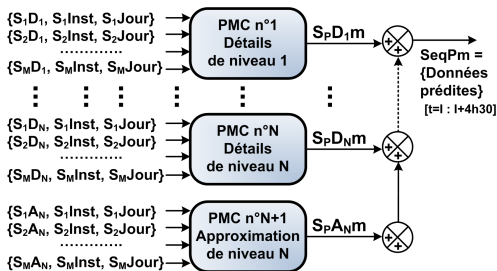
- Prédiction par Perceptrons multi-couches
- N+1 PMC pour une décomposition de niveau N
- Sommation des sous-signaux prédits
- ⇒ Séquence prédite





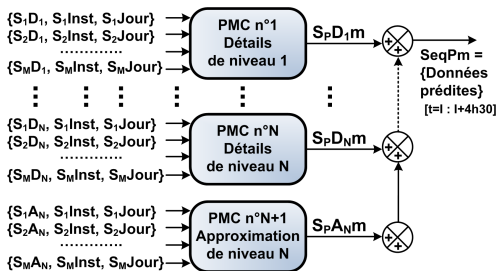
# Prédiction et recombinaison

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



# Prédiction et recombinaison

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



# Sommaire

- 1 Contexte énergétique
- 2 Description du projet Opti-EnR
  - Outils employés
  - Méthodologie de la prédiction
  - Résultats de la prédiction
- 3 Modélisation et identification
- 4 Stockage énergétique
- 5 Prédiction des variables exogènes
- 6 Contrôle et optimisation

# Optimisation des paramètres

- Prédire la température extérieure  $T_{ext}$  et la puissance consommée par le réseau de chaleur  $P_{res}$
- Minimiser l'écart entre la variable prédite  $V^{4h30}$  et la variable réelle  $V$

$$\min_{T_E, M, N, R, F, S} \left( ERM(V, V^{4h30}) \right)$$

- 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

# Optimisation des paramètres

- Prédire la température extérieure  $T_{ext}$  et la puissance consommée par le réseau de chaleur  $P_{res}$
- Minimiser l'écart entre la variable prédite  $V^{4h30}$  et la variable réelle  $V$

$$\min_{T_E, M, N, R, F, S} (ERM(V, V^{4h30}))$$

- 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

# Optimisation des paramètres

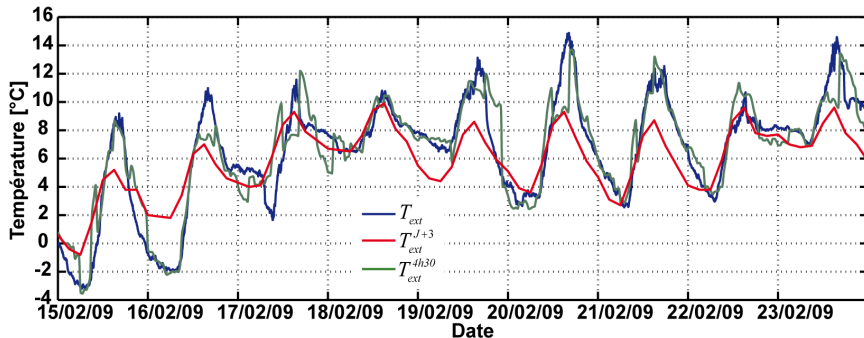
- Prédire la température extérieure  $T_{ext}$  et la puissance consommée par le réseau de chaleur  $P_{res}$
- Minimiser l'écart entre la variable prédite  $V^{4h30}$  et la variable réelle  $V$

$$\min_{T_E, M, N, R, F, S} \left( ERM(V, V^{4h30}) \right)$$

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

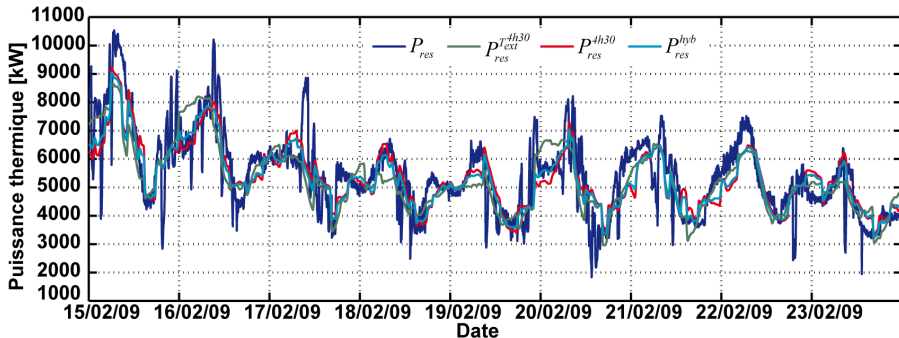
Paramètre	Symbole	Valeur optimale
Ordre de l'ondelette	R	4
Niveau de décomposition	N	5
Nombre de neurones cachés par réseau	F	5
Nombre de séquences passées	M	4
Période d'échantillonnage	$T_E$	30 mn

# Prédiction de la température extérieure



Variable	FIT [%]	ERM [%]	EAM [°C]
$T_{ext}^{J+3}$	42,6	6,3	1,7
$T_{ext}^{4h30}$	59,8	4,2	1,2

# Prédiction de la puissance thermique du réseau



Variable	FIT [%]	ERM [%]	EAM [kW]	Variable	FIT [%]	ERM [%]	EAM [kW]
$P_{res}^{T^{J+3}ext}$	37,6	6,97	761,9	$P_{res}^{T^{4h30}ext}$	38,4	6,94	758,3
$P_{res}^{4h30}$	44,7	6,07	663,6	$P_{res}^{hyb}$	46,9	5,85	639,1



# 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**
  - Critères d'optimisation
  - Contrôleur simple (CS)
  - Contrôleur prédictif (MPC)
  - Résultats

# Caractéristiques des combustibles

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

# Caractéristiques des combustibles

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

# Caractéristiques des combustibles

Critère	Unité	Bois	Gaz	Fioul (FOD)
Énergie volumique	kWh·m <sup>-3</sup>	900	10,5	9760
Coût financier	€·kWh <sup>-1</sup>	14	36	41
ACV du CO <sub>2</sub>	gCO <sub>2</sub> ·kWh <sup>-1</sup>	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 CO<sub>2</sub>

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

- 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 CO<sub>2</sub>

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

- 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 CO<sub>2</sub>

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

- 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 CO<sub>2</sub>

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

- 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 CO<sub>2</sub>

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

- 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 CO<sub>2</sub>

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

- Critère mixte

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

# Sommaire

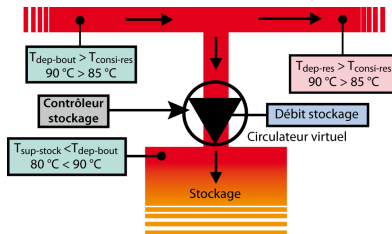
- 1 Contexte énergétique
- 2 Description du projet Opti-EnR
  - Critères d'optimisation
  - **Contrôleur simple (CS)**
  - Contrôleur prédictif (MPC)
  - Résultats
- 3 Modélisation et identification
- 4 Stockage énergétique
- 5 Prédiction des variables exogènes
- 6 **Contrôle et optimisation**

# Mode stockage

- **Hypothèses** :  $(Enc_{CH1} = 0) \wedge T_{dep-bout} > T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow 0 \geq Deb_{stock} \geq -Deb_{res} + 5 = Deb_{stock}^{max}$
- **Cas 1** :  $T_{sup-stock} \leq T_{dep-bout}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = K_{in} \cdot Deb_{stock}^{max} \cdot \frac{(T_{dep-bout} - T_{consi-res})}{T_{consi-res}}$
- **Autres cas** :  $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$

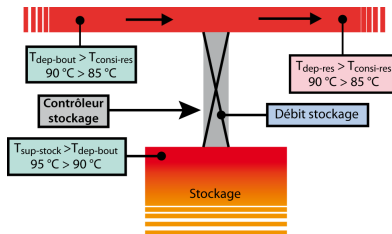
# Mode stockage

- **Hypothèses** :  $(Enc_{CH1} = 0) \wedge T_{dep-bout} > T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow 0 \geq Deb_{stock} \geq -Deb_{res} + 5 = Deb_{stock}^{max}$
- **Cas 1** :  $T_{sup-stock} \leq T_{dep-bout}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = K_{in} \cdot Deb_{stock}^{max} \cdot \frac{(T_{dep-bout} - T_{consi-res})}{T_{consi-res}}$
- **Autres cas** :  $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$



# Mode stockage

- **Hypothèses** :  $(Enc_{CH1} = 0) \wedge T_{dep-bout} > T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow 0 \geq Deb_{stock} \geq -Deb_{res} + 5 = Deb_{stock}^{max}$
- **Cas 1** :  $T_{sup-stock} \leq T_{dep-bout}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = K_{in} \cdot Deb_{stock}^{max} \cdot \frac{(T_{dep-bout} - T_{consi-res})}{T_{consi-res}}$
- **Autres cas** :  $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$

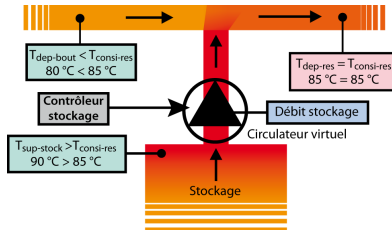


# Mode déstockage

- **Hypothèses** :  $T_{dep-bout} < T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow 0 \leq Deb_{stock} \leq Deb_{res} - 5 = Deb_{stock}^{max}$   
 $\Rightarrow T_{dep-res} = \frac{T_{dep-bout} \cdot (Deb_{res} - Deb_{stock}) + T_{sup-stock} \cdot Deb_{stock}}{Deb_{res}}$
- **Cas 1** :  $T_{sup-stock} > T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = -Deb_{res} \cdot \frac{T_{consi-res} - T_{dep-bout}}{T_{sup-stock} - T_{dep-bout}}$   
 $\Rightarrow T_{dep-res} = T_{consi-res}$
- **Cas 2** :  $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} < T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = -K_{out} \cdot Deb_{stock}^{max}$
- **Autres cas** :  $T_{sup-stock} < T_{dep-bout} < T_{consi-res} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$

# Mode déstockage

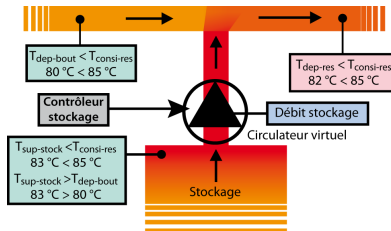
- Hypothèses :**  $T_{dep-bout} < T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow 0 \leq Deb_{stock} \leq Deb_{res} - 5 = Deb_{stock}^{max}$   
 $\Rightarrow T_{dep-res} = \frac{T_{dep-bout} \cdot (Deb_{res} - Deb_{stock}) + T_{sup-stock} \cdot Deb_{stock}}{Deb_{res}}$
- Cas 1 :**  $T_{sup-stock} > T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = -Deb_{res} \cdot \frac{T_{consi-res} - T_{dep-bout}}{T_{sup-stock} - T_{dep-bout}}$   
 $\Rightarrow T_{dep-res} = T_{consi-res}$
- Cas 2 :**  $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} < T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = -K_{out} \cdot Deb_{stock}^{max}$
- Autres cas :**  $T_{sup-stock} < T_{dep-bout} < T_{consi-res} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$





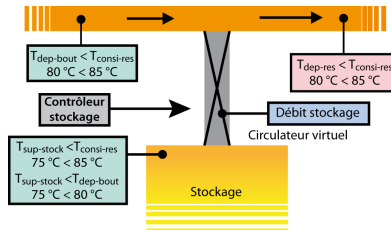
# Mode déstockage

- Hypothèses :**  $T_{dep-bout} < T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow 0 \leq Deb_{stock} \leq Deb_{res} - 5 = Deb_{stock}^{max}$   
 $\Rightarrow T_{dep-res} = \frac{T_{dep-bout} \cdot (Deb_{res} - Deb_{stock}) + T_{sup-stock} \cdot Deb_{stock}}{Deb_{res}}$
- Cas 1 :**  $T_{sup-stock} > T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = -Deb_{res} \cdot \frac{T_{consi-res} - T_{dep-bout}}{T_{sup-stock} - T_{dep-bout}}$   
 $\Rightarrow T_{dep-res} = T_{consi-res}$
- Cas 2 :**  $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} < T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = -K_{out} \cdot Deb_{stock}^{max}$
- Autres cas :**  $T_{sup-stock} < T_{dep-bout} < T_{consi-res} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$



# Mode déstockage

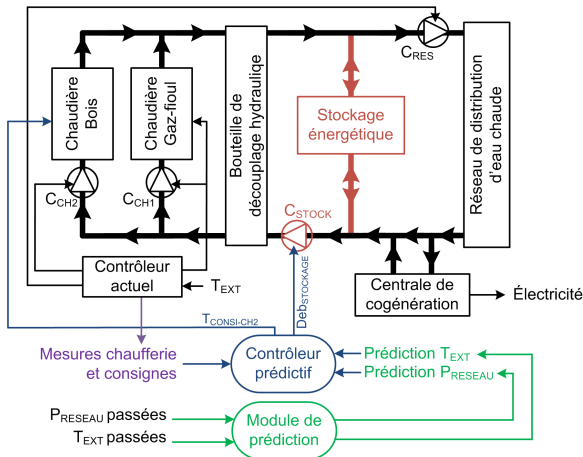
- Hypothèses :**  $T_{dep-bout} < T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow 0 \leq Deb_{stock} \leq Deb_{res} - 5 = Deb_{stock}^{max}$   
 $\Rightarrow T_{dep-res} = \frac{T_{dep-bout} \cdot (Deb_{res} - Deb_{stock}) + T_{sup-stock} \cdot Deb_{stock}}{Deb_{res}}$
- Cas 1 :**  $T_{sup-stock} > T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = -Deb_{res} \cdot \frac{T_{consi-res} - T_{dep-bout}}{T_{sup-stock} - T_{dep-bout}}$   
 $\Rightarrow T_{dep-res} = T_{consi-res}$
- Cas 2 :**  $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} < T_{consi-res}$   
 $\Rightarrow Deb_{stock} = -K_{out} \cdot Deb_{stock}^{max}$
- Autres cas :**  $T_{sup-stock} < T_{dep-bout} < T_{consi-res} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$



# Sommaire

- 1 Contexte énergétique
- 2 Description du projet Opti-EnR
  - Critères d'optimisation
  - Contrôleur simple (CS)
  - **Contrôleur prédictif (MPC)**
  - Résultats
- 3 Modélisation et identification
- 4 Stockage énergétique
- 5 Prédiction des variables exogènes
- 6 **Contrôle et optimisation**

# 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

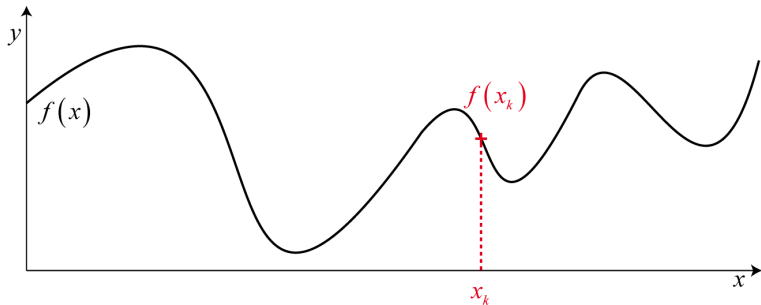
$$\left( \Delta Deb_{Stock}(k/k), \dots, \Delta Deb_{Stock}(k+c-1/k), \right. \\ \left. \Delta T_{consi-CH2}(k/k), \dots, \Delta T_{consi-CH2}(k+c-1/k) \right)$$

- Contraintes liées au problème à respecter

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

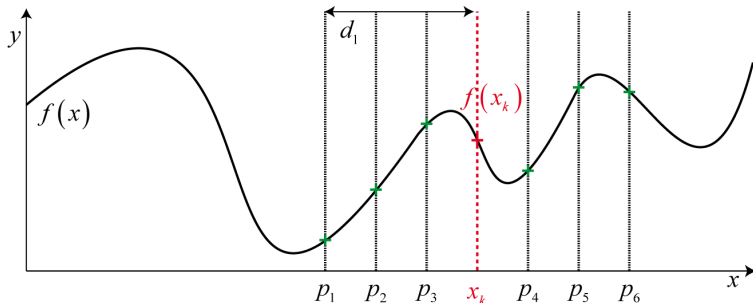
# Algorithme d'optimisation

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



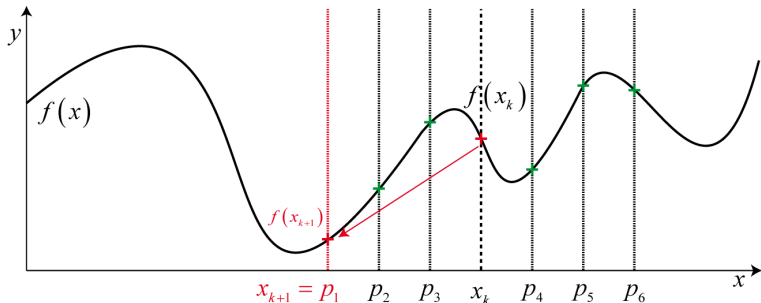
# Algorithme d'optimisation

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



# Algorithme d'optimisation

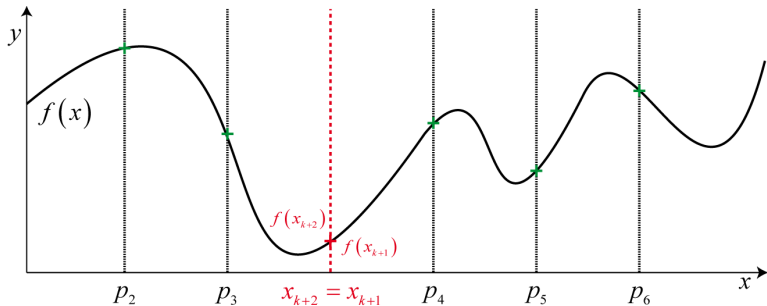
- Algorithme de "recherche directe" par "motifs généralisés"
  - Optimisation globale
  - Minimisation non-linéaire
  - Gradient de la fonction inconnu





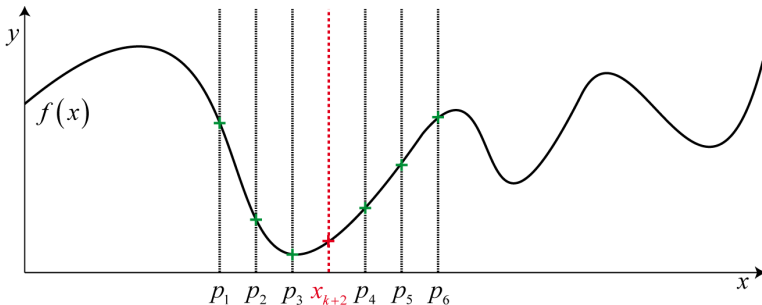
# Algorithme d'optimisation

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



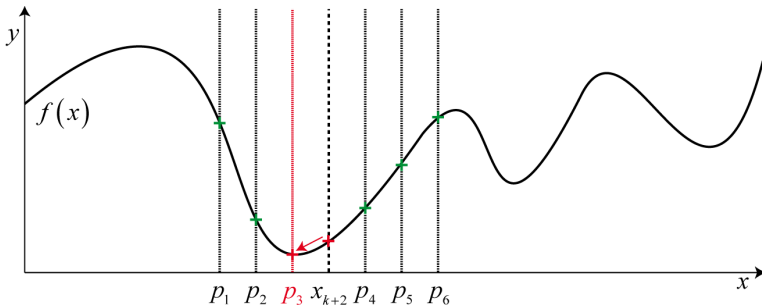
# Algorithme d'optimisation

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

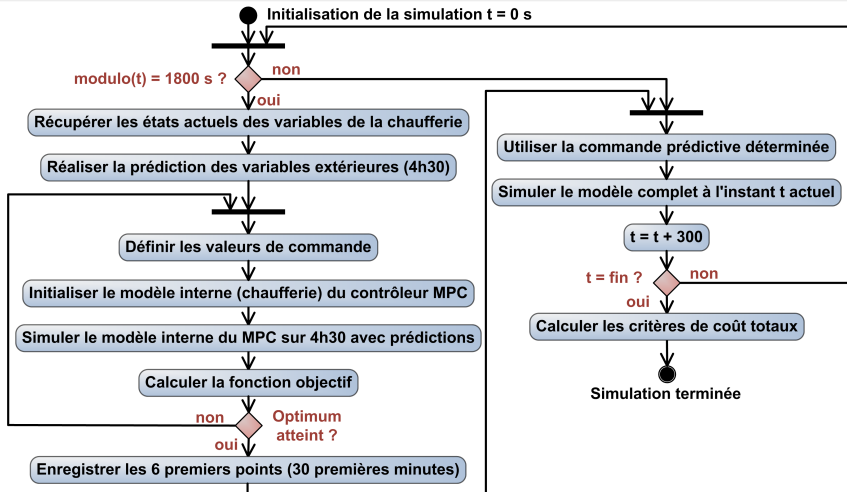


# Algorithme d'optimisation

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



# Séquence de fonctionnement du contrôleur



# Sommaire

- 1 Contexte énergétique
- 2 Description du projet Opti-EnR
  - Critères d'optimisation
  - Contrôleur simple (CS)
  - Contrôleur prédictif (MPC)
  - **Résultats**
- 3 Modélisation et identification
- 4 Stockage énergétique
- 5 Prédiction des variables exogènes
- 6 **Contrôle et optimisation**

# Résultats remarquables

Période considérée : du 16 janvier au 2 mars 2009

Critère		Configuration						
Type	Unité	Référence	$CS_1$	$CS_2$	$CS_3$	$CS_4$	$CS_5$	MPC
$V_{tot}$	m <sup>3</sup>	0	3500	3000	4000	1000	4000	1500
$T_{consi-CH2}$	°C	-	92	97	97	97	97	-
$K_{IN}$	-	-	0,2	1	0,2	0,6	1	-
$K_{OUT}$	-	-	0,4	0,6	0,6	0,2	0,8	-
$NbCP$	-	24 635	25 486	28 208	27 262	27 555	28 418	21 203
$V_{Gaz}$	m <sup>3</sup>	38 001	59 901	15 815	20 376	17 070	15 796	17 533
$V_{FOD}$	l	3287	13 676	3027	2445	3089	2993	2244
$J_1$	k€	61,62	75,64	59,79	59,52	59,07	60,16	47,07
$J_2$	°C	0,56	1,002	0,096	0,227	0,191	0,072	0,252
$J_3$	MW·h	3712	4157	3953	3869	3880	3980	3030
$J_4$	%	11,6	18,34	4,95	6,15	5,40	4,90	6,80
$J_5$	tCO <sub>2</sub>	139,1	221,0	93,8	100,9	95,8	94,1	83,3
$J_6$	%	100	146,1	66,2	73,4	69,9	65,5	64,3



Moins bien que référence



CS optimal



MPC meilleur que CS

# Améliorations obtenues grâce au MPC

- **Consommation de bois : -13,9 %**
- Consommation de gaz : -53,9 % (CS5 : -73,6 %)
- Consommation de fioul : -31,7 %
- J1 (prix) : -23,6 %
- J2 (erreur de consigne) : -55 % (CS5 : -87 %)
- J3 (énergie totale) : -27,1 %
- J4 (taux de couverture fossile) : -41,4 % (CS5 : -57,8 %)
- J5 (émissions de CO<sub>2</sub>) : -40,1 %
- J6 (mixte) : -35,7 %

# Améliorations obtenues grâce au MPC

- Consommation de bois : **-13,9 %**
- Consommation de gaz : **-53,9 % (CS5 : -73,6 %)**
- Consommation de fioul : -31,7 %
- J1 (prix) : -23,6 %
- J2 (erreur de consigne) : -55 % (CS5 : -87 %)
- J3 (énergie totale) : -27,1 %
- J4 (taux de couverture fossile) : -41,4 % (CS5 : -57,8 %)
- J5 (émissions de CO<sub>2</sub>) : -40,1 %
- J6 (mixte) : -35,7 %



# Améliorations obtenues grâce au MPC

- Consommation de bois :  $-13,9\%$
- Consommation de gaz :  $-53,9\%$  (CS5 :  $-73,6\%$ )
- Consommation de fioul :  $-31,7\%$
- J1 (prix) :  $-23,6\%$
- J2 (erreur de consigne) :  $-55\%$  (CS5 :  $-87\%$ )
- J3 (énergie totale) :  $-27,1\%$
- J4 (taux de couverture fossile) :  $-41,4\%$  (CS5 :  $-57,8\%$ )
- J5 (émissions de  $\text{CO}_2$ ) :  $-40,1\%$
- J6 (mixte) :  $-35,7\%$

# Améliorations obtenues grâce au MPC

- Consommation de bois :  $-13,9\%$
- Consommation de gaz :  $-53,9\%$  (CS5 :  $-73,6\%$ )
- Consommation de fioul :  $-31,7\%$
- J1 (prix) :  $-23,6\%$
- J2 (erreur de consigne) :  $-55\%$  (CS5 :  $-87\%$ )
- J3 (énergie totale) :  $-27,1\%$
- J4 (taux de couverture fossile) :  $-41,4\%$  (CS5 :  $-57,8\%$ )
- J5 (émissions de  $\text{CO}_2$ ) :  $-40,1\%$
- J6 (mixte) :  $-35,7\%$

# Améliorations obtenues grâce au MPC

- Consommation de bois : -13,9 %
- Consommation de gaz : -53,9 % (CS5 : -73,6 %)
- Consommation de fioul : -31,7 %
- J1 (prix) : -23,6 %
- J2 (erreur de consigne) : -55 % (CS5 : -87 %)
- J3 (énergie totale) : -27,1 %
- J4 (taux de couverture fossile) : -41,4 % (CS5 : -57,8 %)
- J5 (émissions de CO<sub>2</sub>) : -40,1 %
- J6 (mixte) : -35,7 %

# Améliorations obtenues grâce au MPC

- Consommation de bois : -13,9 %
- Consommation de gaz : -53,9 % (CS5 : -73,6 %)
- Consommation de fioul : -31,7 %
- J1 (prix) : -23,6 %
- J2 (erreur de consigne) : -55 % (CS5 : -87 %)
- J3 (énergie totale) : -27,1 %
- J4 (taux de couverture fossile) : -41,4 % (CS5 : -57,8 %)
- J5 (émissions de CO<sub>2</sub>) : -40,1 %
- J6 (mixte) : -35,7 %

# Améliorations obtenues grâce au MPC

- Consommation de bois :  $-13,9\%$
- Consommation de gaz :  $-53,9\%$  (CS5 :  $-73,6\%$ )
- Consommation de fioul :  $-31,7\%$
- J1 (prix) :  $-23,6\%$
- J2 (erreur de consigne) :  $-55\%$  (CS5 :  $-87\%$ )
- J3 (énergie totale) :  $-27,1\%$
- J4 (taux de couverture fossile) :  $-41,4\%$  (CS5 :  $-57,8\%$ )
- J5 (émissions de  $\text{CO}_2$ ) :  $-40,1\%$
- J6 (mixte) :  $-35,7\%$

# Améliorations obtenues grâce au MPC

- Consommation de bois :  $-13,9\%$
- Consommation de gaz :  $-53,9\%$  (CS5 :  $-73,6\%$ )
- Consommation de fioul :  $-31,7\%$
- J1 (prix) :  $-23,6\%$
- J2 (erreur de consigne) :  $-55\%$  (CS5 :  $-87\%$ )
- J3 (énergie totale) :  $-27,1\%$
- J4 (taux de couverture fossile) :  $-41,4\%$  (CS5 :  $-57,8\%$ )
- J5 (émissions de  $\text{CO}_2$ ) :  $-40,1\%$
- J6 (mixte) :  $-35,7\%$

# Améliorations obtenues grâce au MPC

- Consommation de bois :  $-13,9\%$
- Consommation de gaz :  $-53,9\%$  (CS5 :  $-73,6\%$ )
- Consommation de fioul :  $-31,7\%$
- J1 (prix) :  $-23,6\%$
- J2 (erreur de consigne) :  $-55\%$  (CS5 :  $-87\%$ )
- J3 (énergie totale) :  $-27,1\%$
- J4 (taux de couverture fossile) :  $-41,4\%$  (CS5 :  $-57,8\%$ )
- J5 (émissions de  $\text{CO}_2$ ) :  $-40,1\%$
- J6 (mixte) :  $-35,7\%$

# Conclusion

- Développement d'un modèle de fonctionnement global de la chaufferie à partir de relevés expérimentaux
- Développement et intégration d'un modèle de système de stockage énergétique
- Développement d'un outil de prédiction des variables exogènes au modèle (température extérieure et puissance du réseau)
- Développement et optimisation d'un contrôleur simple puis d'un contrôleur prédictif
- Réduction du coût de fonctionnement de la chaufferie et des émissions de CO<sub>2</sub> (en simulation)



# Conclusion

- Développement d'un modèle de fonctionnement global de la chaufferie à partir de relevés expérimentaux
- Développement et intégration d'un modèle de système de stockage énergétique
- Développement d'un outil de prédiction des variables exogènes au modèle (température extérieure et puissance du réseau)
- Développement et optimisation d'un contrôleur simple puis d'un contrôleur prédictif
- Réduction du coût de fonctionnement de la chaufferie et des émissions de CO<sub>2</sub> (en simulation)

# Conclusion

- Développement d'un modèle de fonctionnement global de la chaufferie à partir de relevés expérimentaux
- Développement et intégration d'un modèle de système de stockage énergétique
- Développement d'un outil de prédiction des variables exogènes au modèle (température extérieure et puissance du réseau)
- Développement et optimisation d'un contrôleur simple puis d'un contrôleur prédictif
- Réduction du coût de fonctionnement de la chaufferie et des émissions de CO<sub>2</sub> (en simulation)

# Conclusion

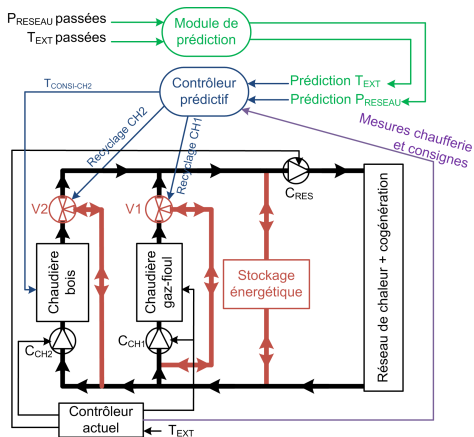
- Développement d'un modèle de fonctionnement global de la chaufferie à partir de relevés expérimentaux
- Développement et intégration d'un modèle de système de stockage énergétique
- Développement d'un outil de prédiction des variables exogènes au modèle (température extérieure et puissance du réseau)
- Développement et optimisation d'un contrôleur simple puis d'un contrôleur prédictif
- Réduction du coût de fonctionnement de la chaufferie et des émissions de CO<sub>2</sub> (en simulation)

# Conclusion

- Développement d'un modèle de fonctionnement global de la chaufferie à partir de relevés expérimentaux
- Développement et intégration d'un modèle de système de stockage énergétique
- Développement d'un outil de prédiction des variables exogènes au modèle (température extérieure et puissance du réseau)
- Développement et optimisation d'un contrôleur simple puis d'un contrôleur prédictif
- Réduction du coût de fonctionnement de la chaufferie et des émissions de CO<sub>2</sub> (en simulation)

# Perspectives

- Modification hydraulique différente pour l'intégration du système de stockage



# Perspectives

- Modification hydraulique différente pour l'intégration du système de stockage
- Utilisation d'un système de stockage plus évolué
  - Autres fluides
  - Matériaux à changement de phase
- Développement d'autres types de contrôleurs
  - Contrôleur flou
  - Contrôleur neuronal
  - ...
- Implantation des contrôleurs *in situ*
  - D'abord sur un site pilote
  - Ensuite sur le site de La Rochelle

# Perspectives

- Modification hydraulique différente pour l'intégration du système de stockage
- Utilisation d'un système de stockage plus évolué
  - Autres fluides
  - Matériaux à changement de phase
- Développement d'autres types de contrôleurs
  - Contrôleur flou
  - Contrôleur neuronal
  - ...
- Implantation des contrôleurs *in situ*
  - D'abord sur un site pilote
  - Ensuite sur le site de La Rochelle

# Perspectives

- Modification hydraulique différente pour l'intégration du système de stockage
- Utilisation d'un système de stockage plus évolué
  - Autres fluides
  - Matériaux à changement de phase
- Développement d'autres types de contrôleurs
  - Contrôleur flou
  - Contrôleur neuronal
  - ...
- Implantation des contrôleurs *in situ*
  - D'abord sur un site pilote
  - Ensuite sur le site de La Rochelle



# Revue internationale avec comités de lecture (1)

## Articles publiés ou acceptés



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, IFAC, Elsevier,*  
doi :10.1016/j.engappai.2010.09.003, 2010



Benjamin Paris, Julien Eynard, Stéphane Grieu, Thierry Talbert & Monique Polit

Heating controls for energy management in buildings

*Energy and Buildings, Elsevier, volume 42, numéro 10, pages 1908-1917, Octobre 2010*

# Revue internationale avec comités de lecture (2)

## Articles soumis



Julien Eynard, Stéphane Grieu & Monique Polit.

Modular approach for modelling a multi-energy district boiler

*Applied Mathematical Modeling, Elsevier, article soumis en juillet 2010*



Julien Eynard, Julien Nou, Thierry Talbert, Stéphane Grieu & Antoine Dominguez

Coupling of renewable energy sources : Application to a geothermal and thermal solar installation

*Renewable Energy, Elsevier, article soumis en juin 2010*



Benjamin Paris, Julien Eynard, Stéphane Grieu & Monique Polit

Hybrid PID-fuzzy control scheme for managing energy resources in buildings

*Applied Soft Computing, WFSC, Elsevier, article soumis en avril 2010*

# Conférences internationales avec actes (1)

## *Communications publiées*



Julien Eynard, Benjamin Paris, Stéphane Grieu, Thierry Talbert & Frédérik Thiéry

Control strategies for managing energy in a building mock-up

*11<sup>th</sup> International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition*,  
pages 767–774, Glasgow, Écosse, 27–30 Juillet 2009



Benjamin Paris, Thierry Talbert, Julien Eynard, Stéphane Grieu, Adama Traoré, & Monique Polit

On-line monitoring station for energy diagnosis in buildings

*11<sup>th</sup> International Building Performance Simulation Association Conference and Exhibition*,  
pages 2013-2019, Glasgow, Écosse, 27-30 Juillet 2009



Benjamin Paris, Julien Eynard, Frédérik Thiéry, Adama Traoré, Thierry Talbert & Stéphane Grieu

Fuzzy-PID control for multisource energy management in buildings

*iREED 2008 Renewable Energies and Eco-Design in Electrical Engineering*, Montpellier,  
France, 10 & 11 Décembre 2008

## Conférences internationales avec actes (2)

### *Communications publiées*



Thierry Talbert, Benjamin Paris, Julien Eynard, Stéphane Grieu & Olivier Fruchier  
Lab-scale prototype for on-line monitoring and energy diagnosis in buildings  
*iREED 2008 Renewable Energies and Eco-Design in Electrical Engineering*, Montpellier, France, 10 & 11 Décembre 2008



Benjamin Paris, Julien Eynard, Grégory François, Thierry Talbert & Monique Polit  
A prototype for on-line monitoring and control of energy performance for renewable energy buildings  
*ICINCO 2008, 5<sup>th</sup> International Conference on Informatics in Control, Automation & Robotics*, pages 125–130, Funchal, Portugal, 11–15 Mai 2008

### *Communications soumises*



Julien Eynard, Stéphane Grieu & Monique Polit  
Optimal control of a multi-energy district boiler : a case study  
*IFAC WC 2010, 18<sup>th</sup> World Congress of the International Federation of Automatic Control*, soumis en septembre 2010

# Conférences nationales

## Communications publiées



Julien Eynard, Benjamin Paris, Stéphane Grieu & Grégory François

Stratégies de contrôle pour la gestion énergétique d'un bâtiment

*3<sup>ème</sup> Journées Doctorales, Journées Nationales du GDR-MACS (Modélisation, Analyse et Contrôle des Systèmes), Angers, France, 17 & 18 mars 2009*



Benjamin Paris, Julien Eynard, Grégory François, Thierry Talbert, Frédéric Thiéry & Monique Polit

Gestion des ressources énergétiques d'un bâtiment : contrôle neuroflow

*Conférence francophone IBPSA France 2008 (International Building Performance Simulation Association), Lyon, France, 6 & 7 Novembre 2008.*



Benjamin Paris, Julien Eynard, Frédéric Thiéry, Adama Traoré, Monique Polit & Thierry Talbert

Travaux pratiques sur la gestion énergétique optimale d'un bâtiment EnR

*7<sup>ème</sup> Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes CETISIS 2008, Bruxelles, Belgique, 27-29 Octobre 2008*

Merci pour votre attention