

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

Thèse ministérielle 2007-2010

Julien Eynard¹
sous la direction de Monique Polit² et Stéphane Grieu³

¹ Doctorant, Laboratoire ELIAUS, UPVD

² Directeur de thèse, PR, Laboratoire ELIAUS, UPVD

³ 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

Contexte énergétique
Description du projet Opti-EnR
Modélisation et identification
Stockage énergétique
Prédiction des variables exogènes
Contrôle et optimisation

Problématique énergétique globale
Sélection d'un secteur à fort potentiel

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 (CO₂, CH₄)
- 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 (CO₂, CH₄)
- 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 (CO₂, CH₄)
- 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 (CO₂, CH₄)
- 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 (CO₂, CH₄)
- 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 (CO₂, CH₄)
- 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

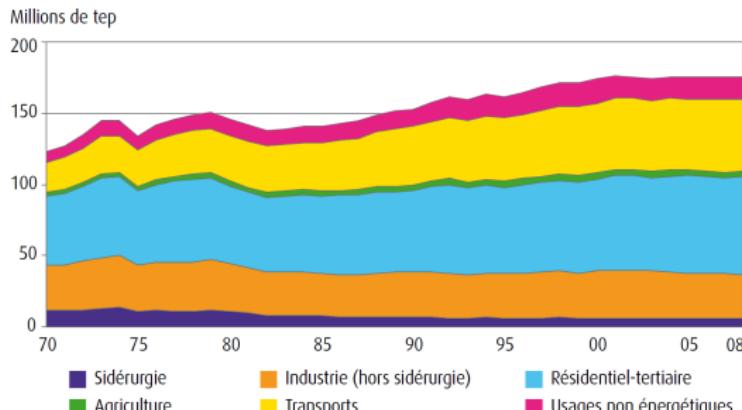
5 Prédiction des variables exogènes

6 Contrôle et optimisation

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

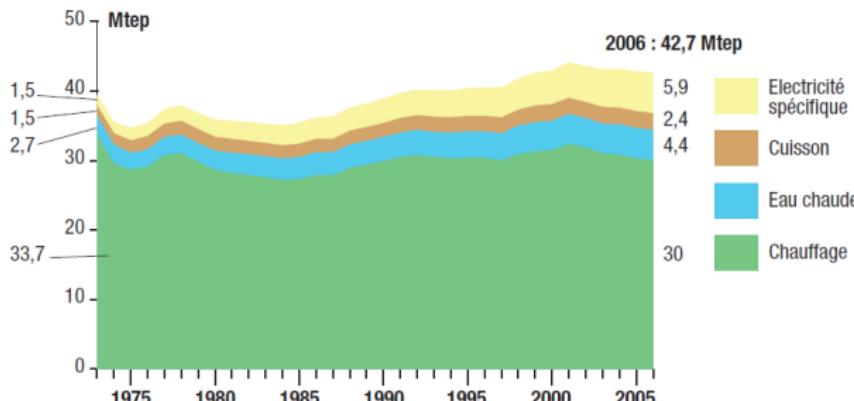
Le chauffage pour le bâtiment

- 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 %)



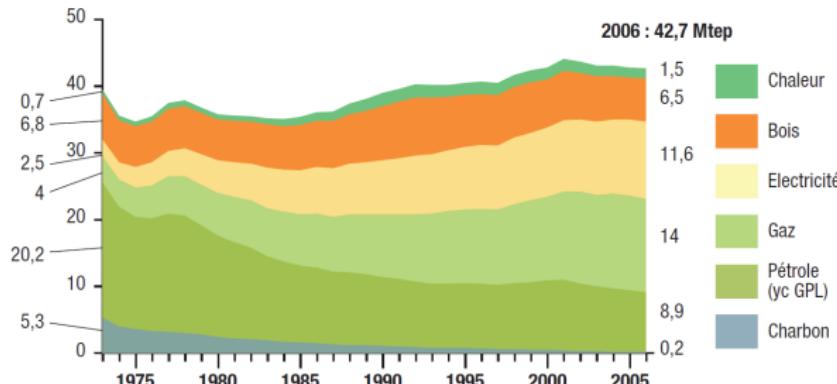
Le chauffage pour le bâtiment

- 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 %)
- Energies 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

3 Modélisation et identification

4 Stockage énergétique

5 Prédiction des variables
exogènes

6 Contrôle et optimisation

● La chaufferie de La Rochelle
● Les étapes du projet

Caractéristiques de la chaufferie

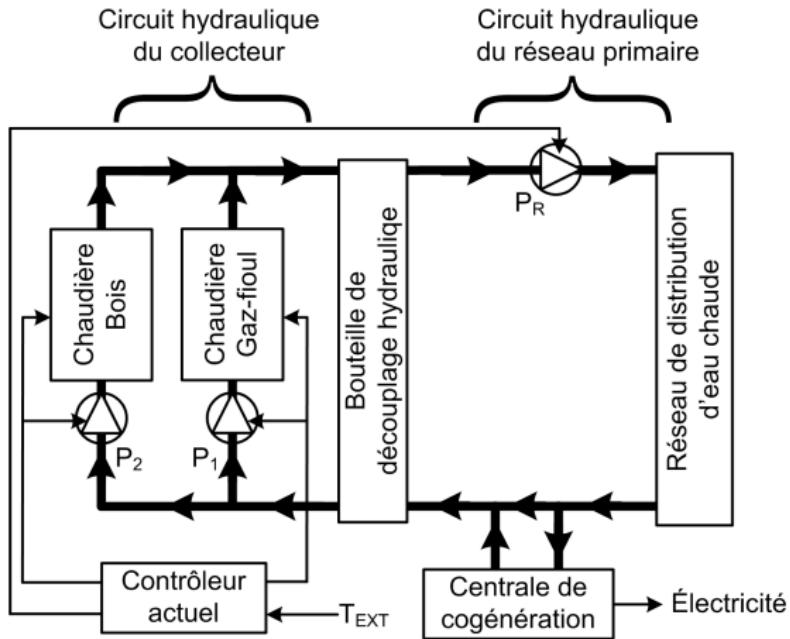
Éléments constitutifs de la chaufferie gérée par Cofely GDF-SUEZ

- 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



Sommaire

1 Contexte énergétique

2 Description du projet
Opti-EnR

3 Modélisation et identification

4 Stockage énergétique

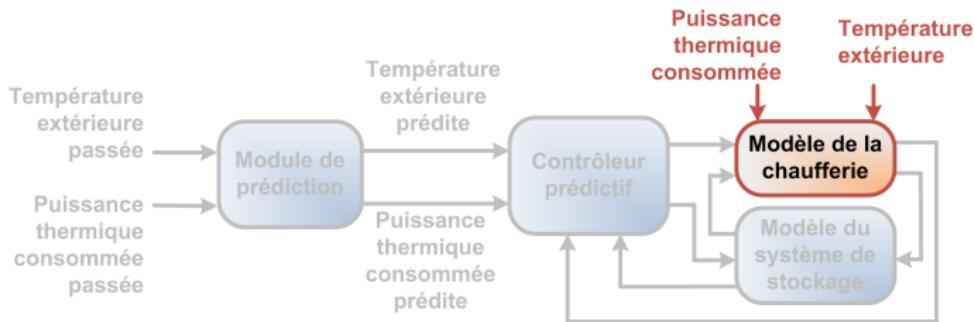
5 Prédiction des variables
exogènes

6 Contrôle et optimisation

● La chaufferie de La Rochelle
● Les étapes du projet

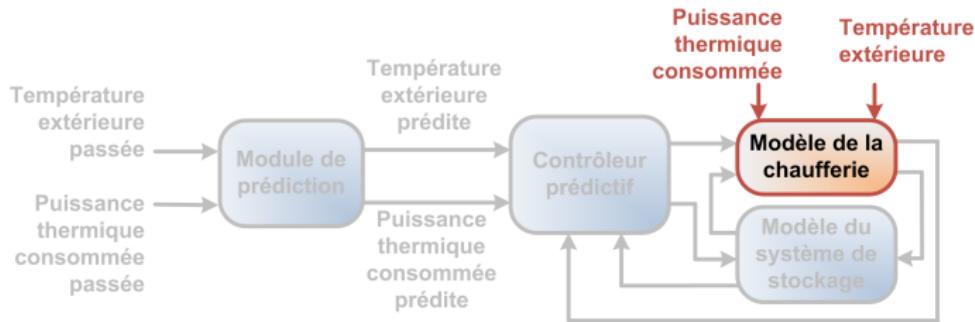
Description des différentes étapes

- 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



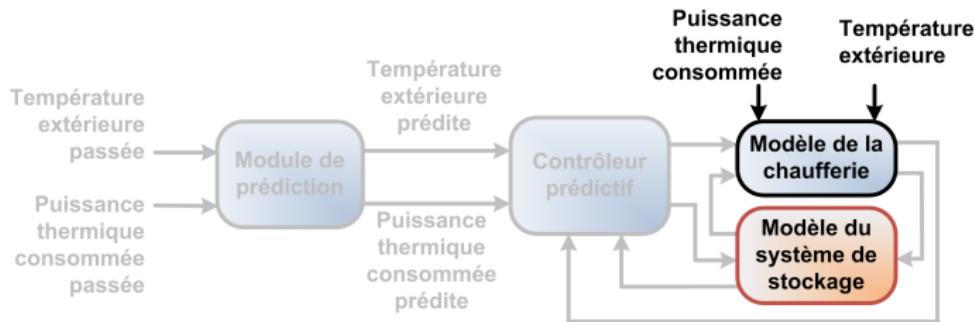
Description des différentes étapes

- 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



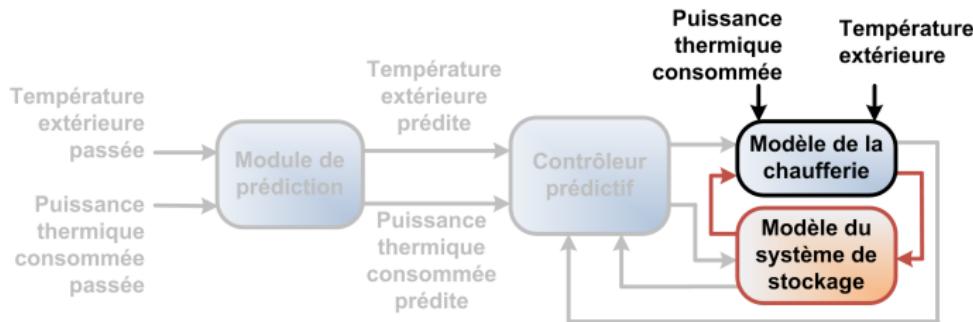
Description des différentes étapes

- 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



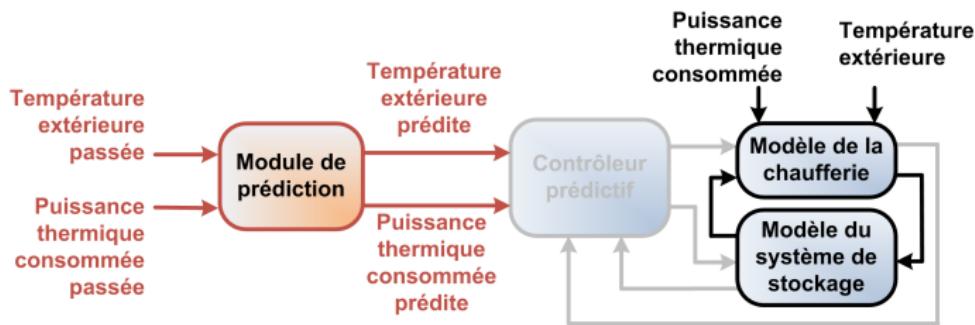
Description des différentes étapes

- 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



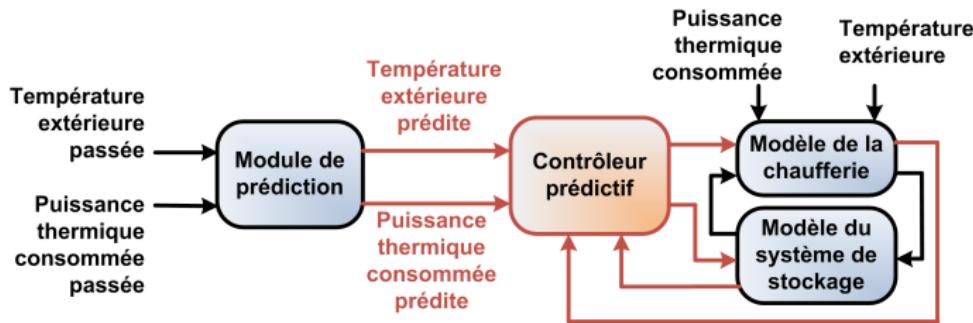
Description des différentes étapes

- 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

Contexte énergétique
Description du projet Opti-EnR
Modélisation et identification
Stockage énergétique
Prédiction des variables exogènes
Contrôle et optimisation

Procédure utilisée
Modélisation de la chaufferie

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 (ζ_x, ζ_y)

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

- Comparer les réponses simulées et expérimentales

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

- 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 (ζ_x, ζ_y)

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

- Comparer les réponses simulées et expérimentales

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

- 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 (ζ_x, ζ_y)

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

- Comparer les réponses simulées et expérimentales

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

- 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 (ζ_x, ζ_y)

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

- 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 (ζ_x, ζ_y)

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

- 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 (ζ_x, ζ_y)

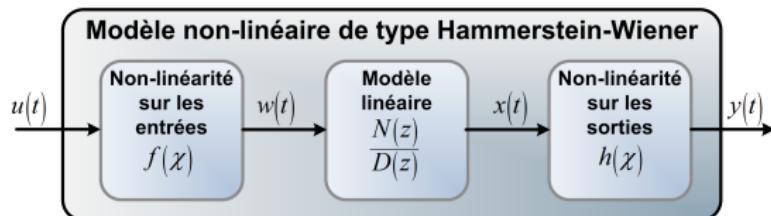
$$\min_{\zeta_x, \zeta_y} \left(\sum_{i=1}^{n_y} \left(\omega^i \cdot \sum_{k=1}^{N_E} |y_i^{exp}(k) - y_i^{sim}(k)|^2 \right) \right)$$

- 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

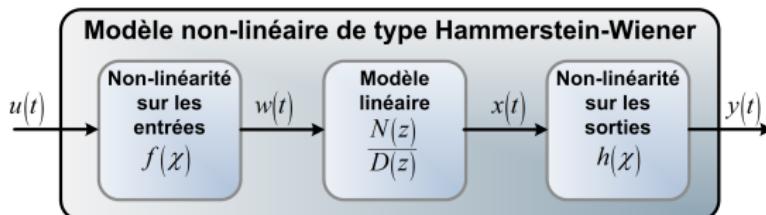


- Non-linéarités sur les entrées et les sorties
 - Fonctions affines par morceaux

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

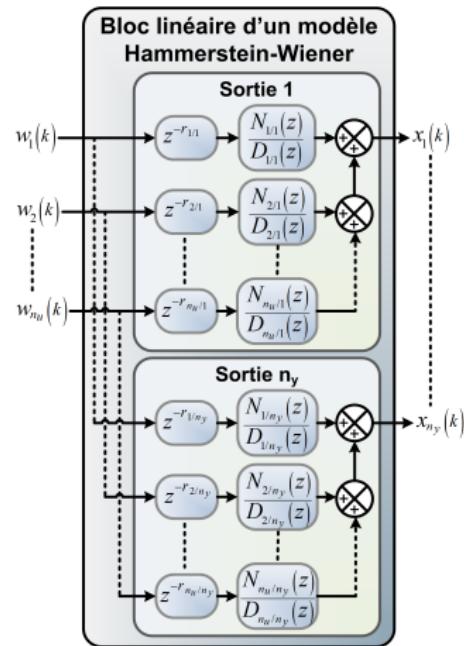
- Partie centrale linéaire (fonctions de transfert)

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)

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



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 :

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

$$\begin{cases} W &= \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n \end{pmatrix} \\ \omega_i &= \frac{1}{|\max(y_{exp_i})|} \end{cases}$$

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 :

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

$$\begin{cases} W &= \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n \end{pmatrix} \\ \omega_i &= \frac{1}{|\max(y_{exp_i})|} \end{cases}$$

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 :

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

$$\begin{cases} W &= \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n \end{pmatrix} \\ \omega_i &= \frac{1}{|\max(y_{exp_i})|} \end{cases}$$

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 :

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

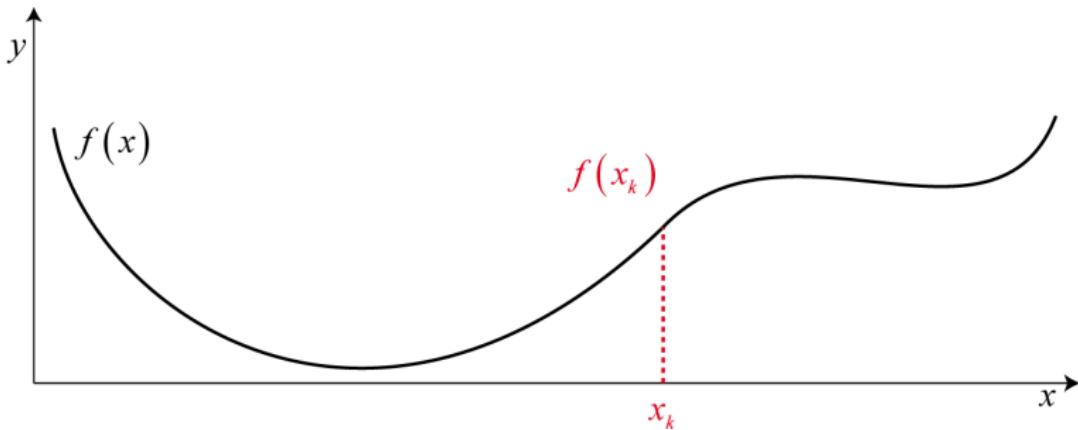
$$\begin{cases} W &= \begin{pmatrix} \omega_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n \end{pmatrix} \\ \omega_i &= \frac{1}{|\max(y_{exp_i})|} \end{cases}$$

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

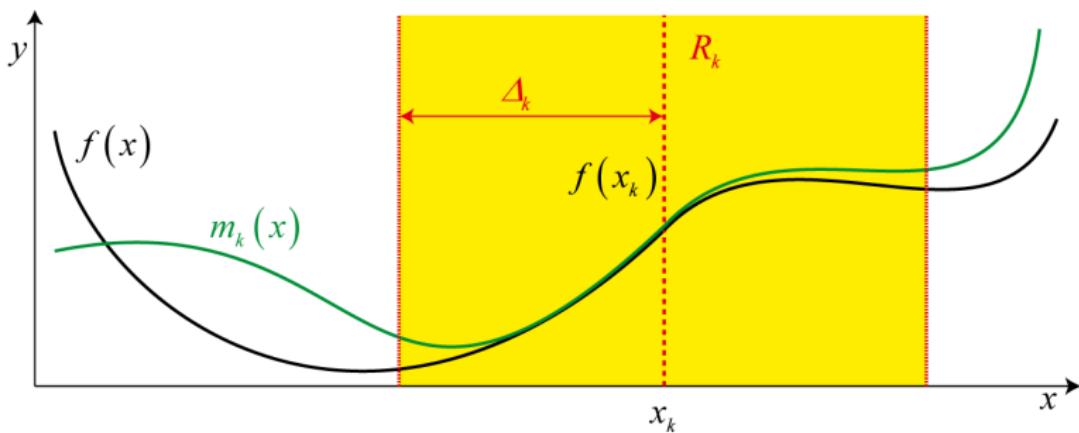
Algorithme d'identification (2)

- 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



Algorithme d'identification (2)

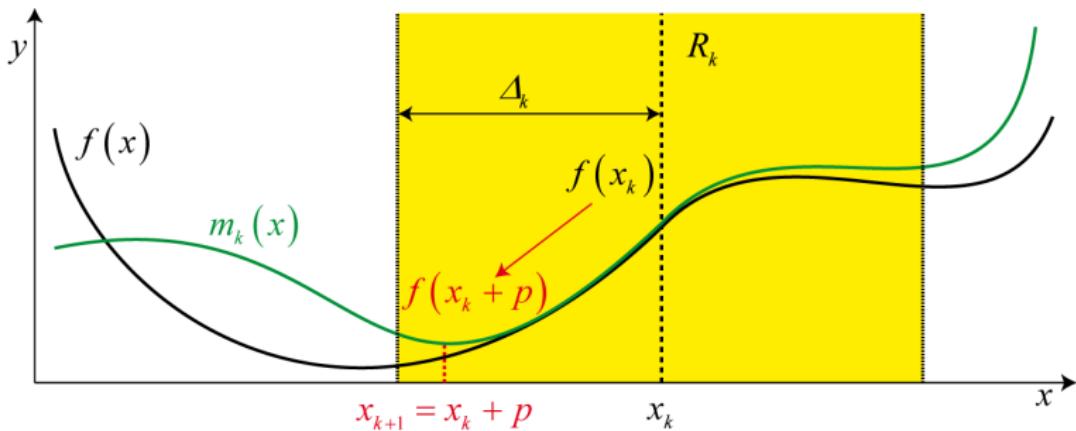
- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
 - Minimisation itérative
 - Utilisation de la région de confiance
 - Résolution par la méthode de Gauss-Newton



Algorithme d'identification (2)

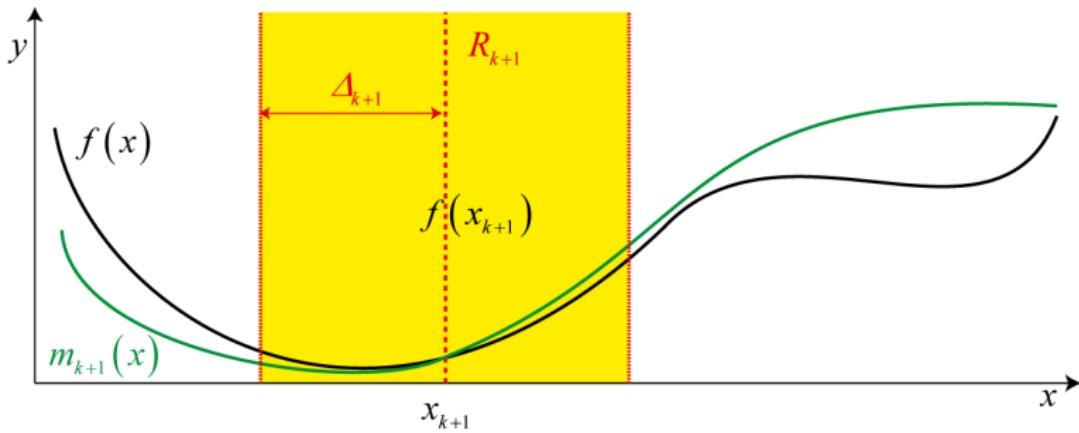
- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
 - Minimisation itérative
 - Utilisation de la région de confiance
 - Résolution par la méthode de Gauss-Newton

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



Algorithme d'identification (2)

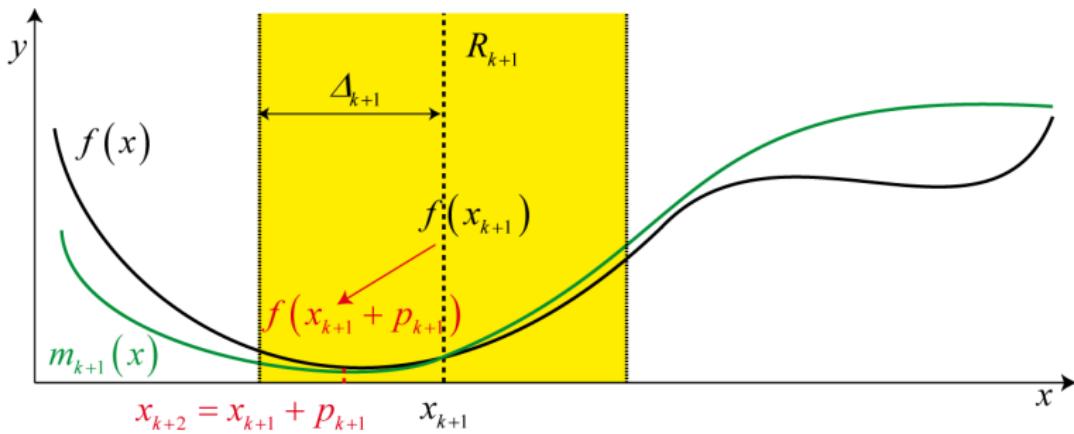
- Moindres carrés non-linéaires et méthode de la région de confiance de Newton
 - Minimisation itérative
 - Utilisation de la région de confiance
 - Résolution par la méthode de Gauss-Newton



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

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



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

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

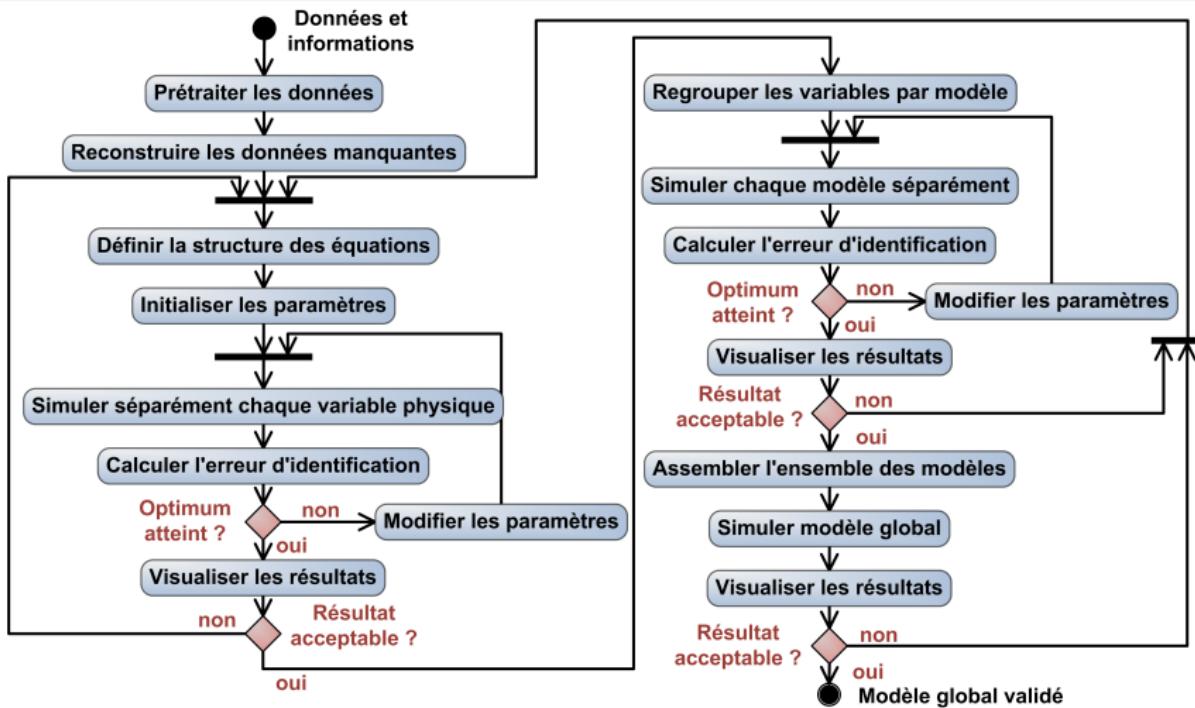
- Calcul du Hessien approché H par la direction de Gauss-Newton

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

- Résolution par la méthode du gradient conjugué préconditionné

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

Approche modulaire itérative



Sommaire

Contexte énergétique
Description du projet Opti-EnR
Modélisation et identification
Stockage énergétique
Prédiction des variables exogènes
Contrôle et optimisation

Procédure utilisée
Modélisation de la chaufferie

1 Contexte énergétique

2 Description du projet Opti-EnR

3 Modélisation et identification

4 Stockage énergétique

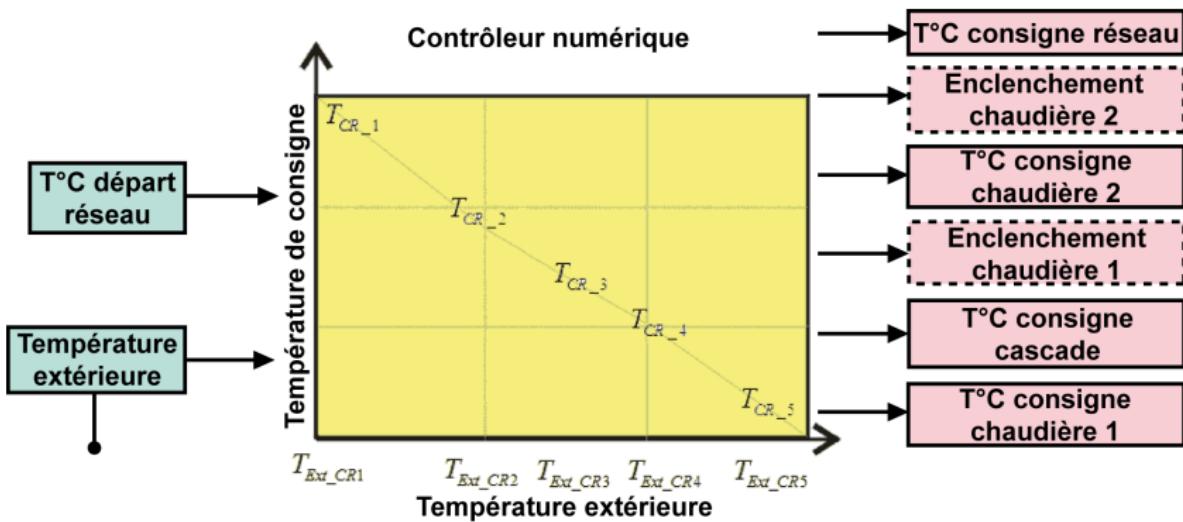
5 Prédiction des variables exogènes

6 Contrôle et optimisation

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

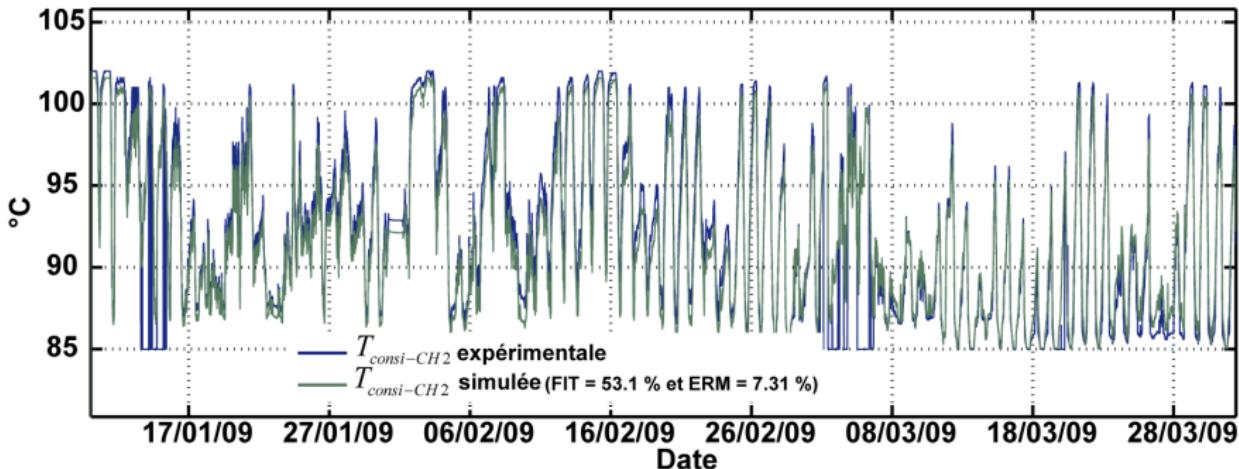
Régulation générale (1)

- Description du fonctionnement



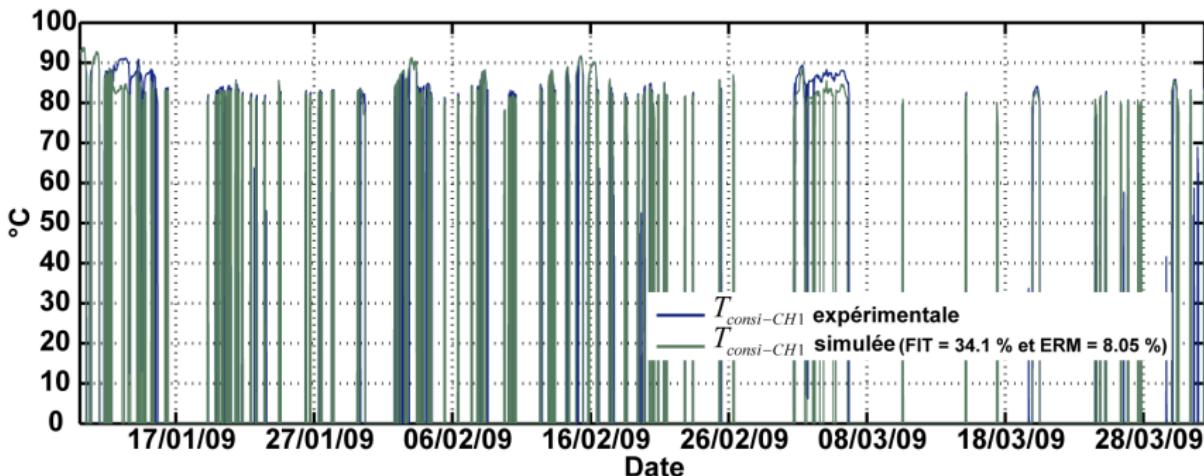
Régulation générale (2)

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



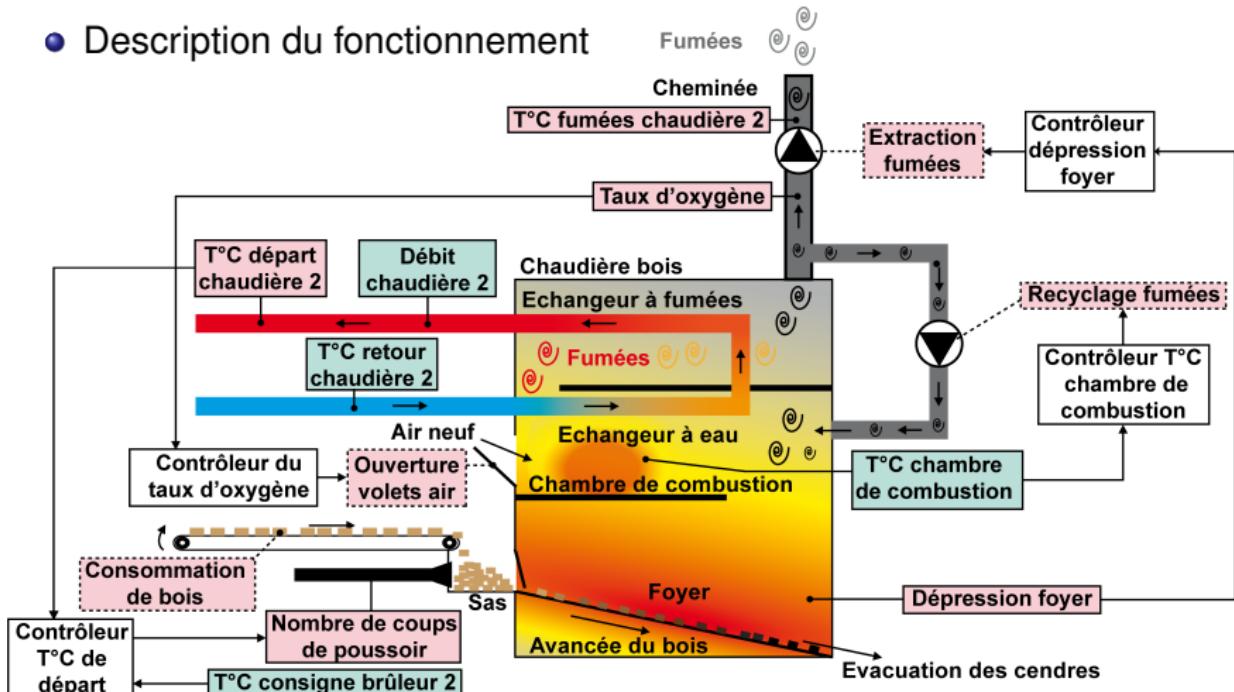
Régulation générale (3)

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



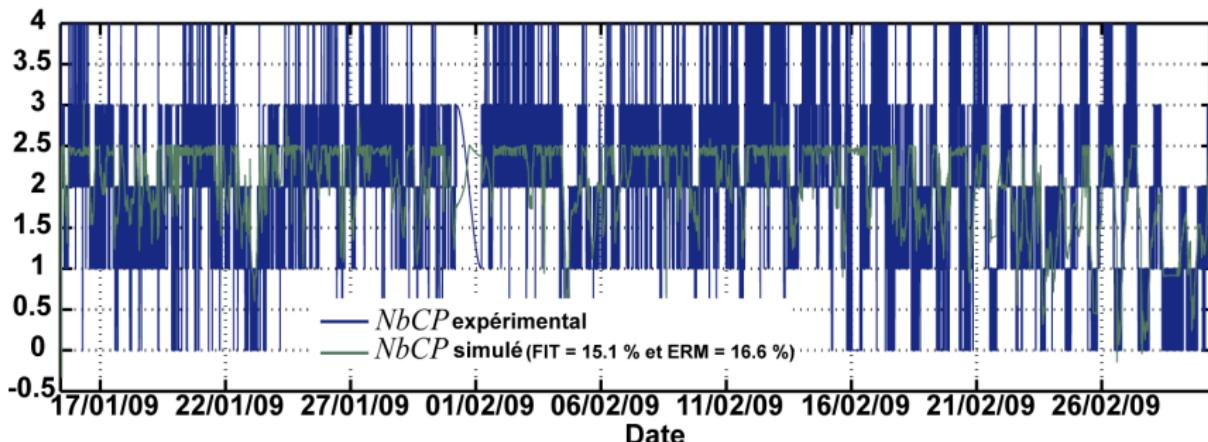
Chaudière à bois (1)

- Description du fonctionnement



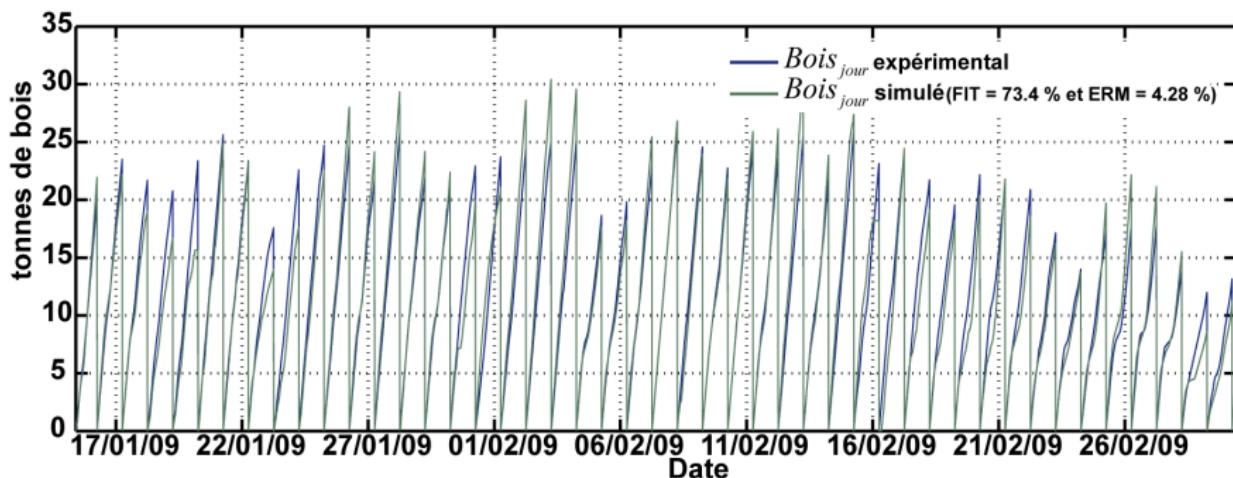
Chaudière à bois (2)

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



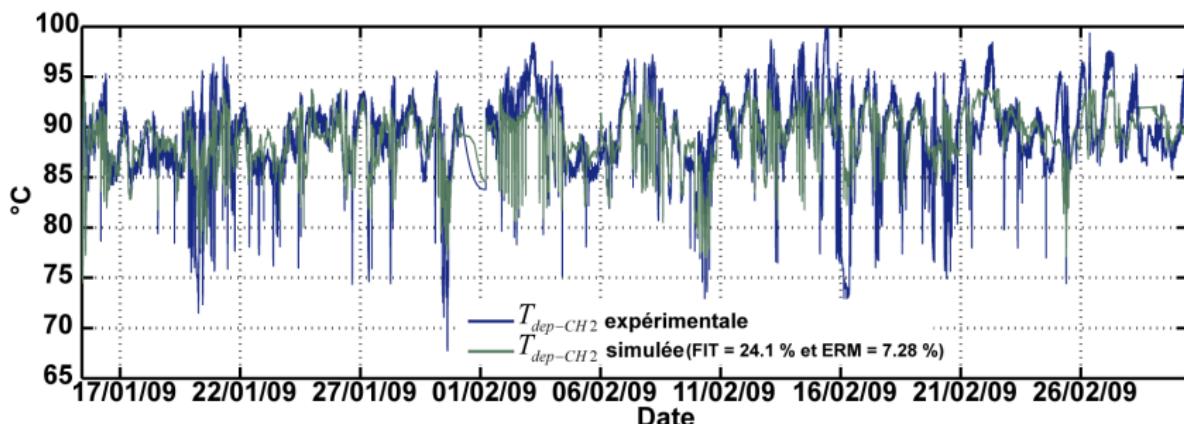
Chaudière à bois (3)

- Consommation journalière de bois
 - Modèle de connaissance



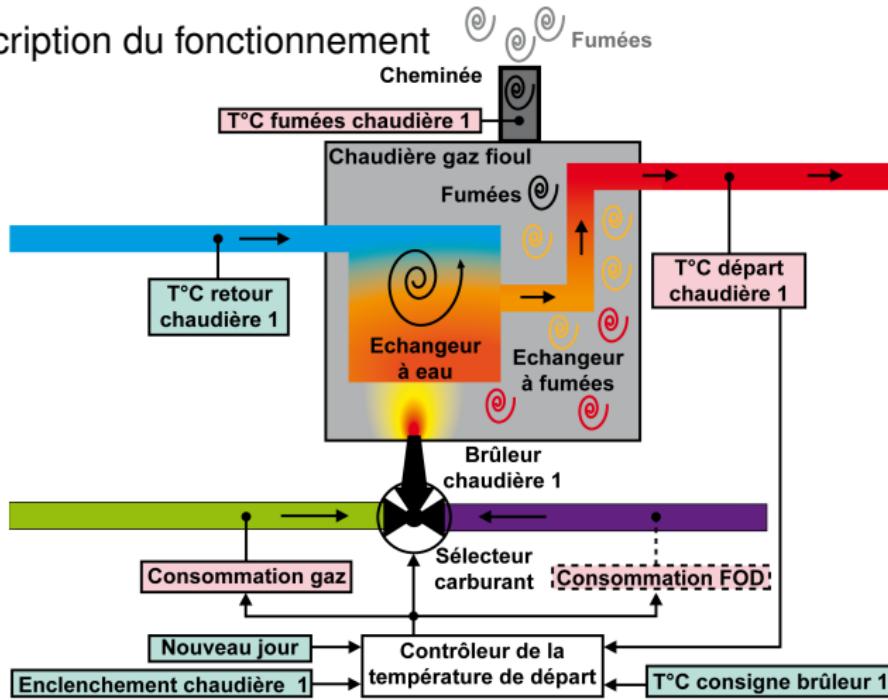
Chaudière à bois (4)

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



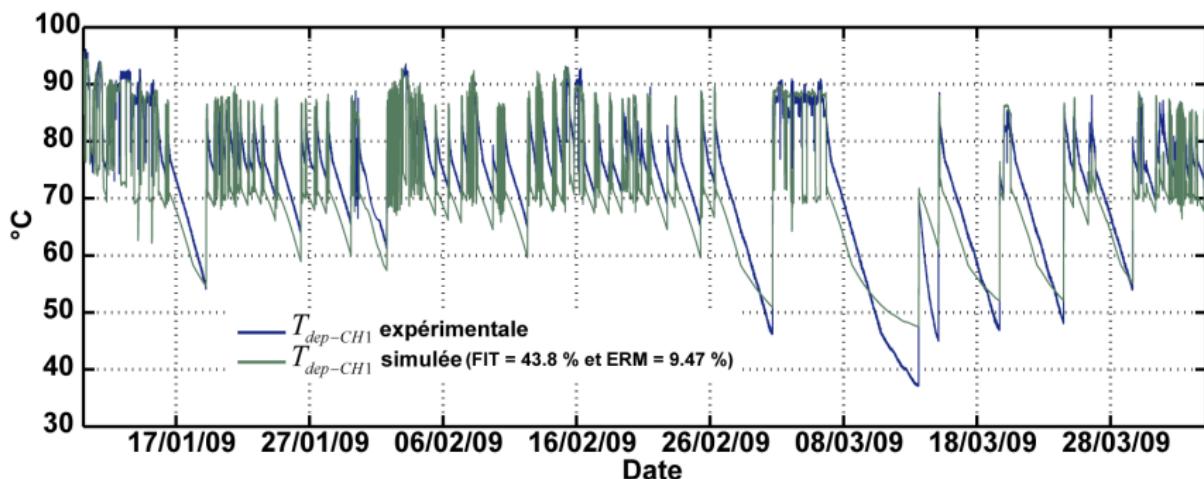
Chaudière à gaz-fioul (1)

- Description du fonctionnement



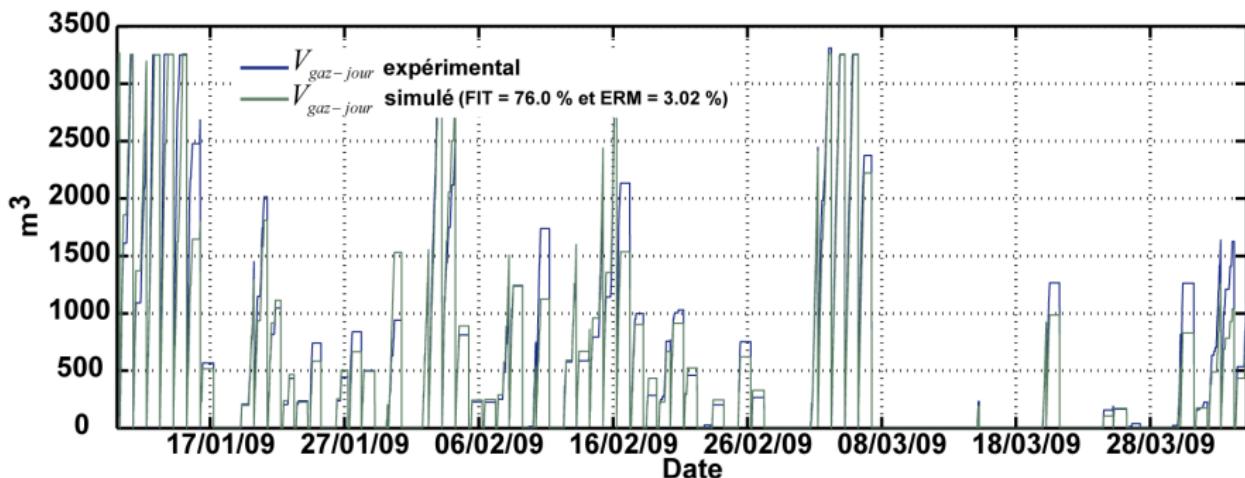
Chaudière à gaz-fioul (2)

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



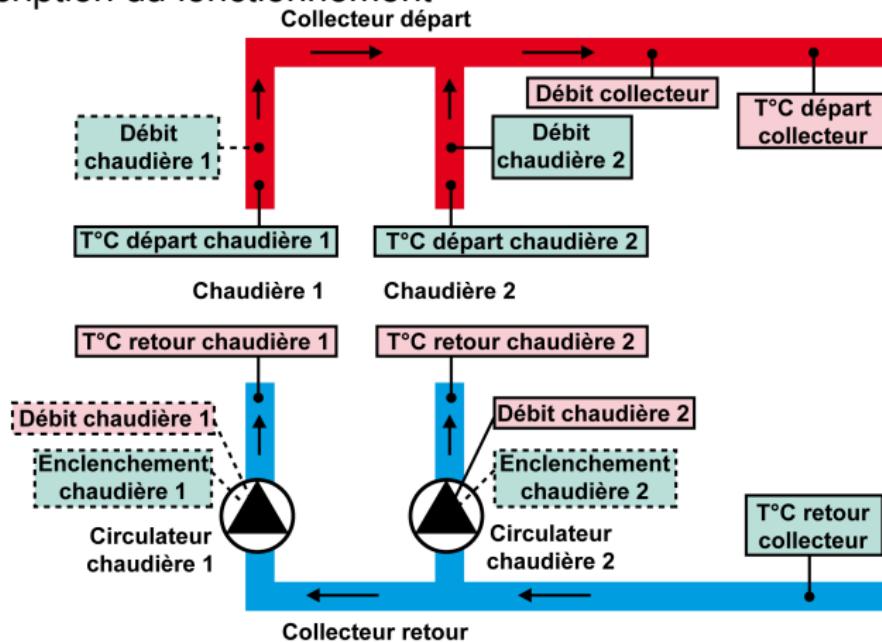
Chaudière à gaz-fioul (3)

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



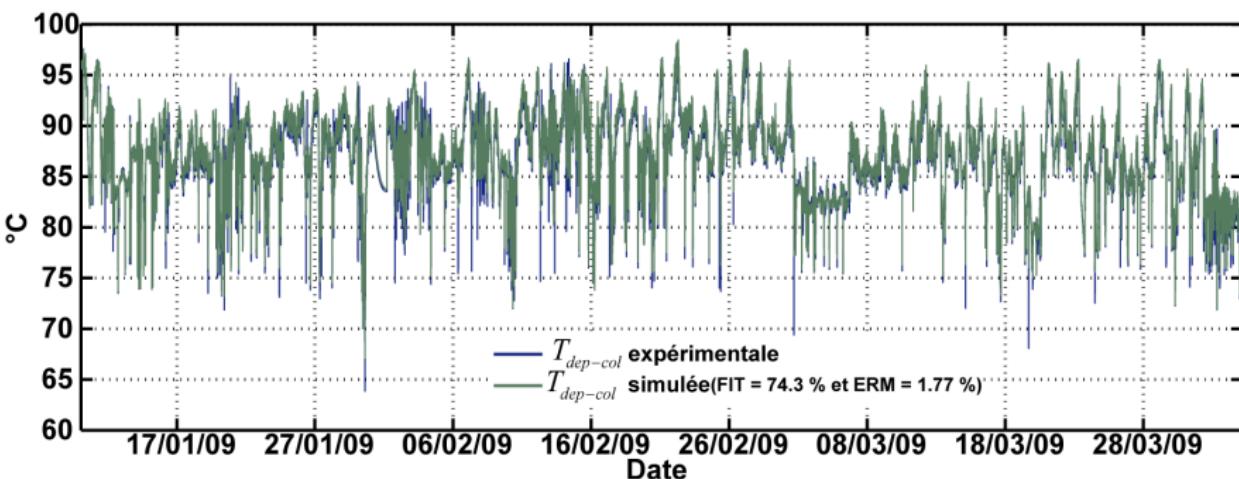
Circuit collecteur (1)

- Description du fonctionnement



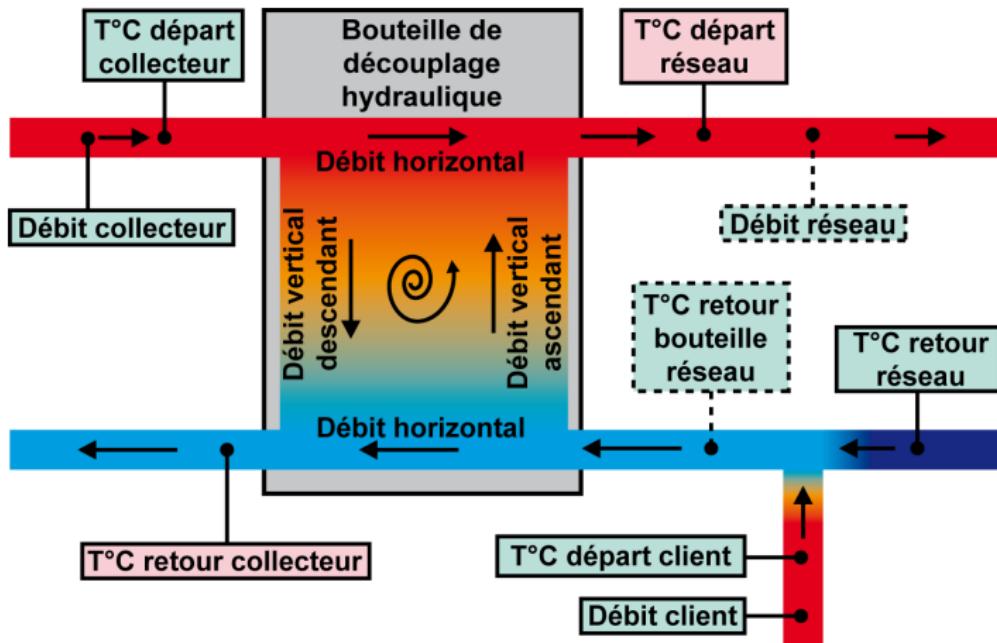
Circuit collecteur (2)

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



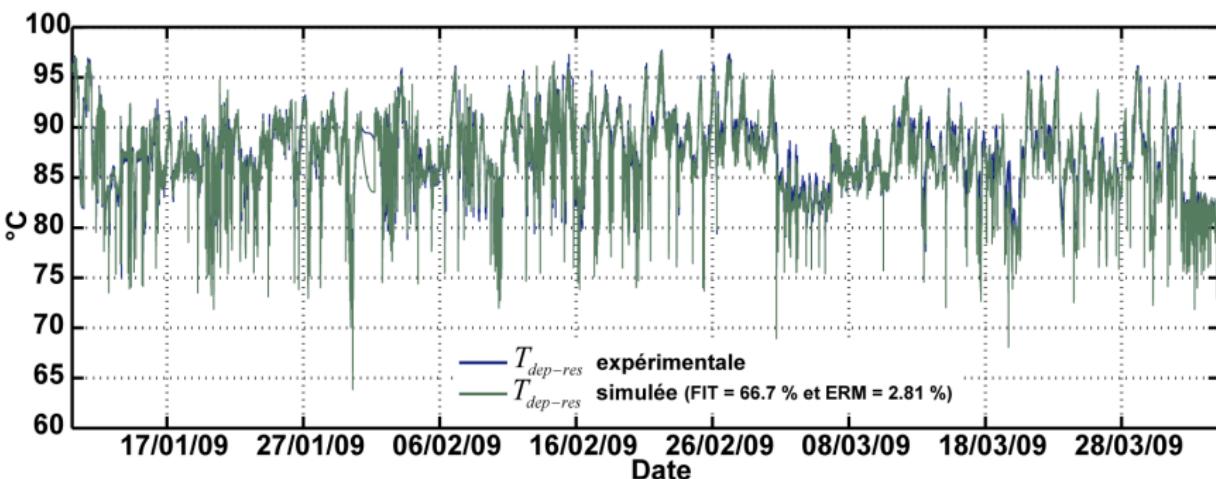
Bouteille de découplage hydraulique (1)

- Description du fonctionnement



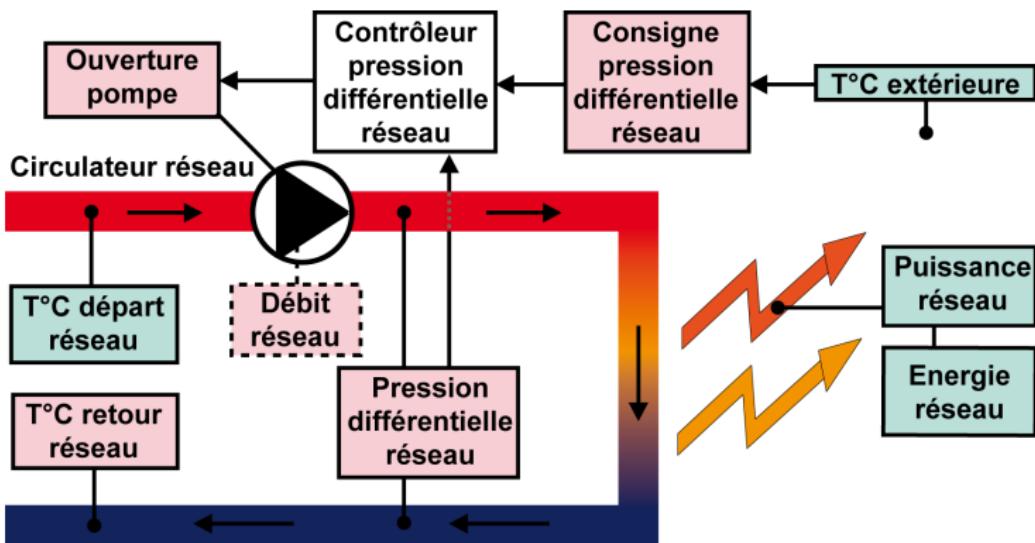
Bouteille de découplage hydraulique (2)

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



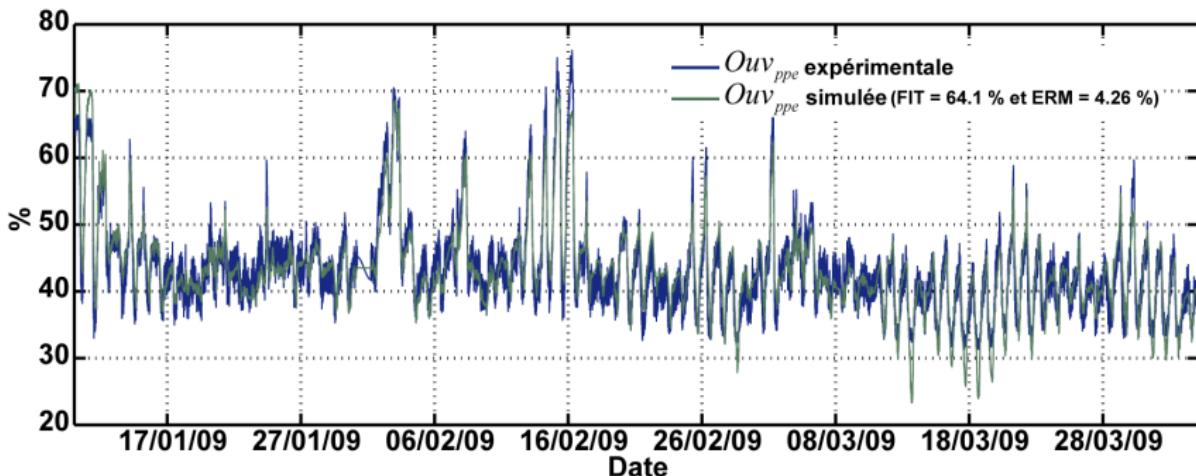
Réseau de chaleur (1)

- Description du fonctionnement



Réseau de chaleur (2)

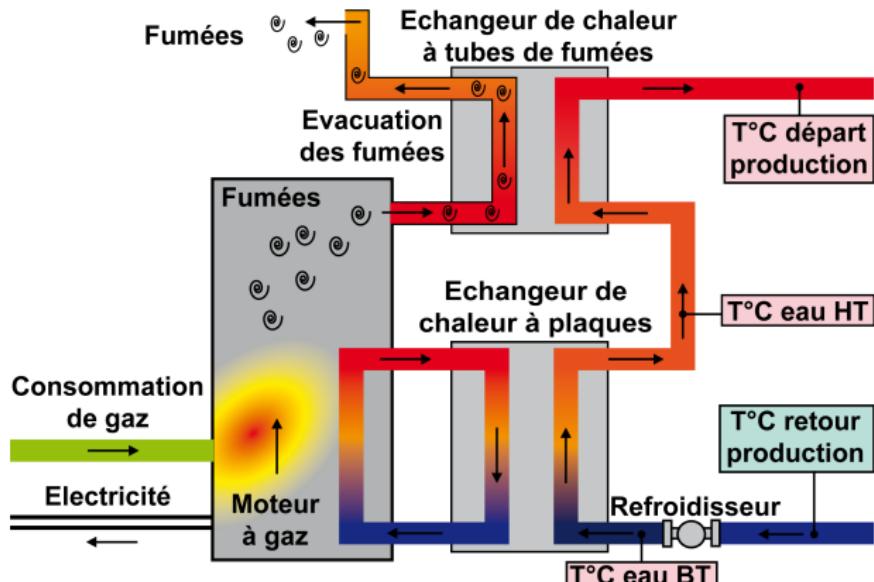
- Ouverture de la pompe réseau Ouv_{ppe}
 - Modèle paramétrique



Centrale de cogénération (1)

- Description du fonctionnement

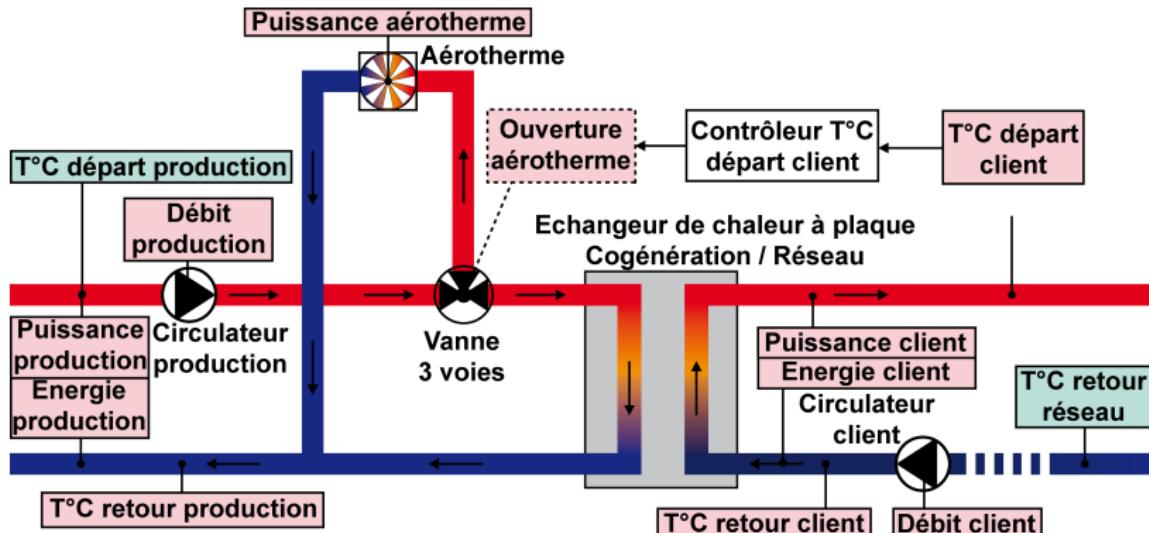
Moteur de la cogénération



Centrale de cogénération (1)

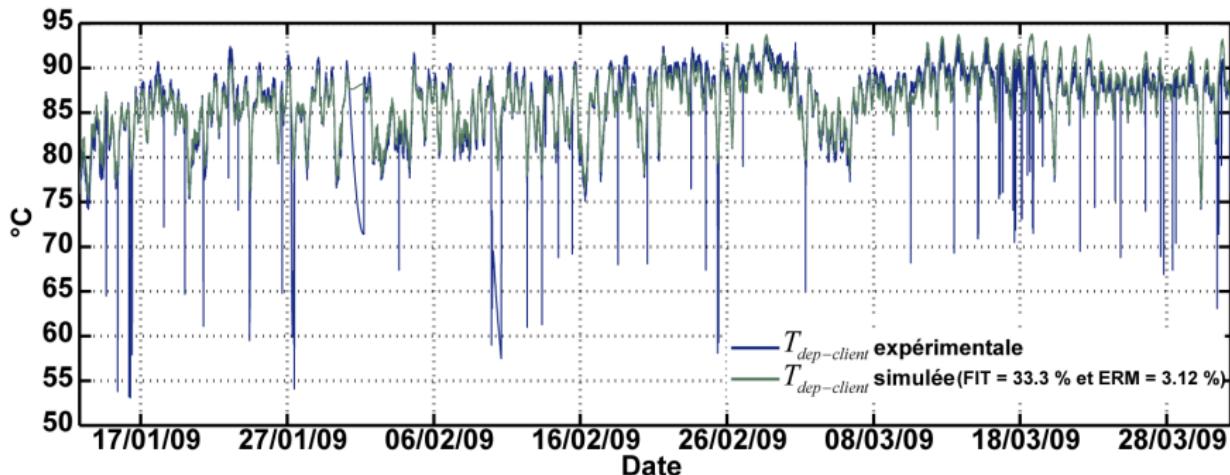
- Description du fonctionnement

Echangeur cogénération / réseau



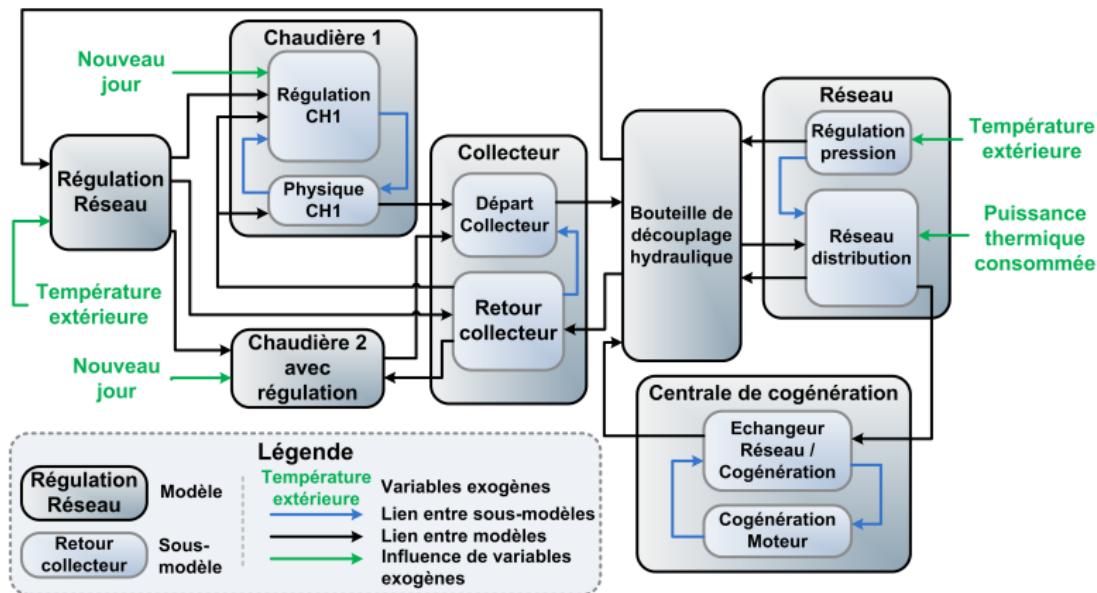
Centrale de cogénération (2)

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



Modèle global de la chauffeerie

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



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

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

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 : ($T_{amb} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

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 : ($T_{amb} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

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 : ($T_{amb} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

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 : ($T_{amb} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
- 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 : ($T_{amb} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
- 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 : ($T_{amb} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Isolation : 10 cm de polypropylène

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 : ($T_{amb} \approx 10 \text{ }^\circ\text{C}$)
- 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”¹

● Paramètres

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

● Mode stockage

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

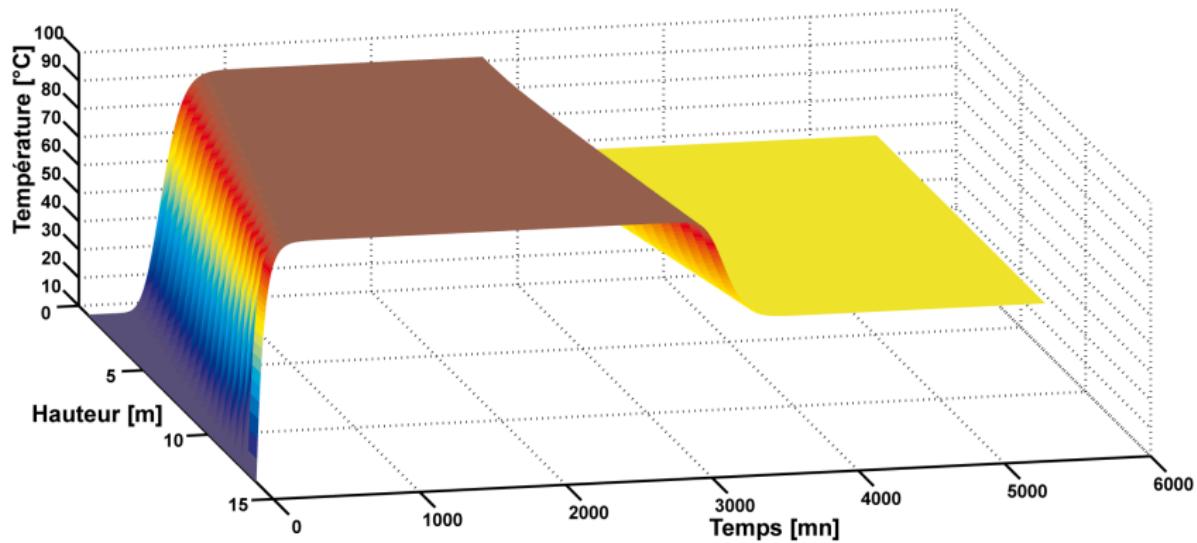
● Mode déstockage

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

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

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

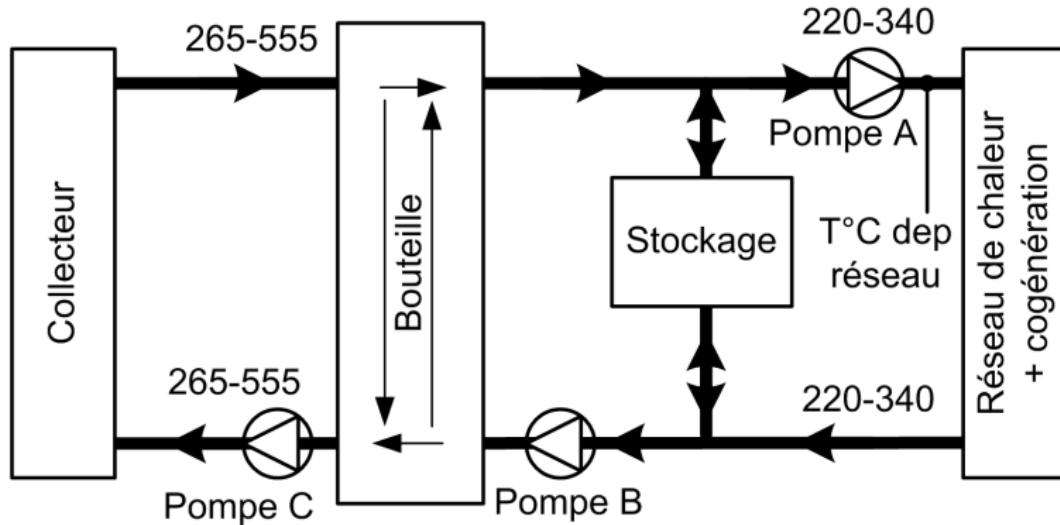
4 Stockage énergétique

5 Prédiction des variables exogènes

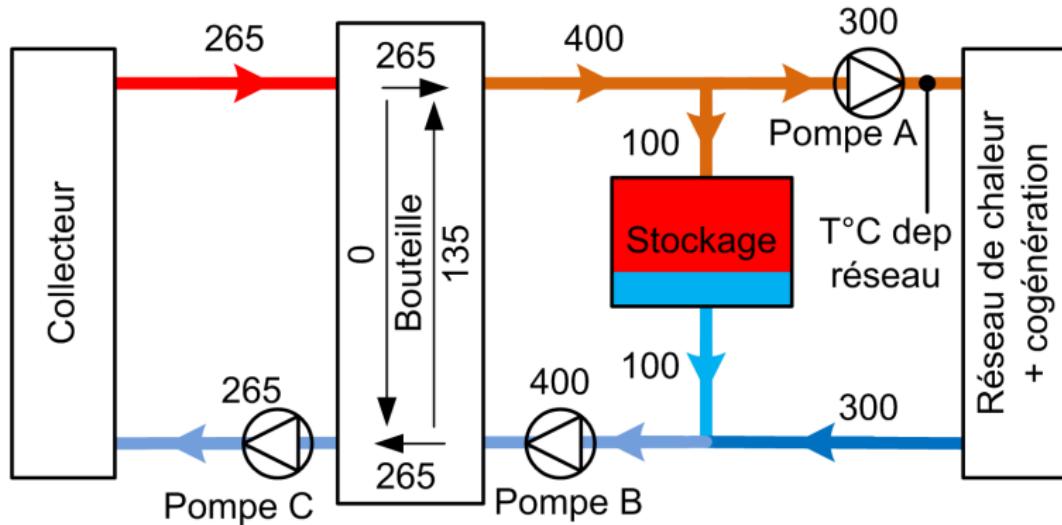
6 Contrôle et optimisation

- 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

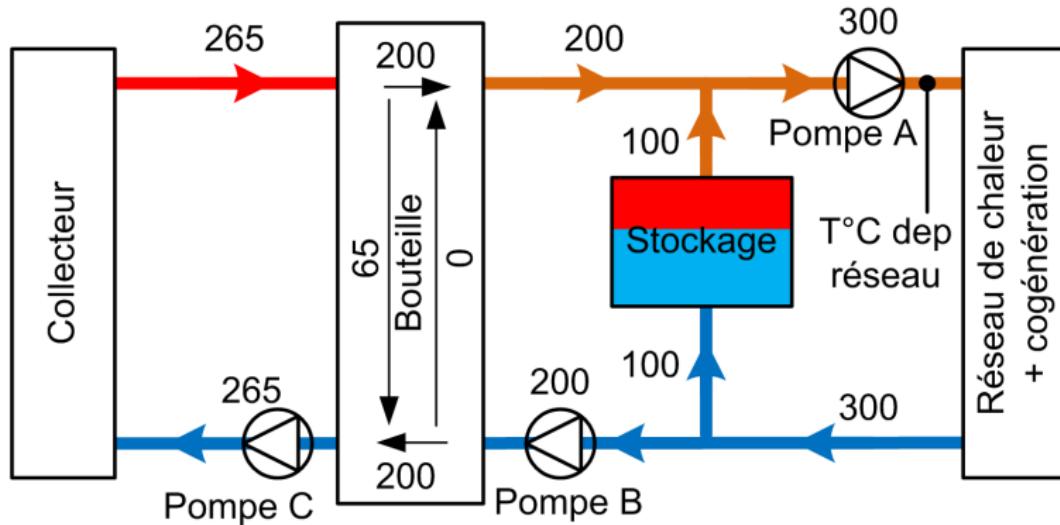
Schéma général



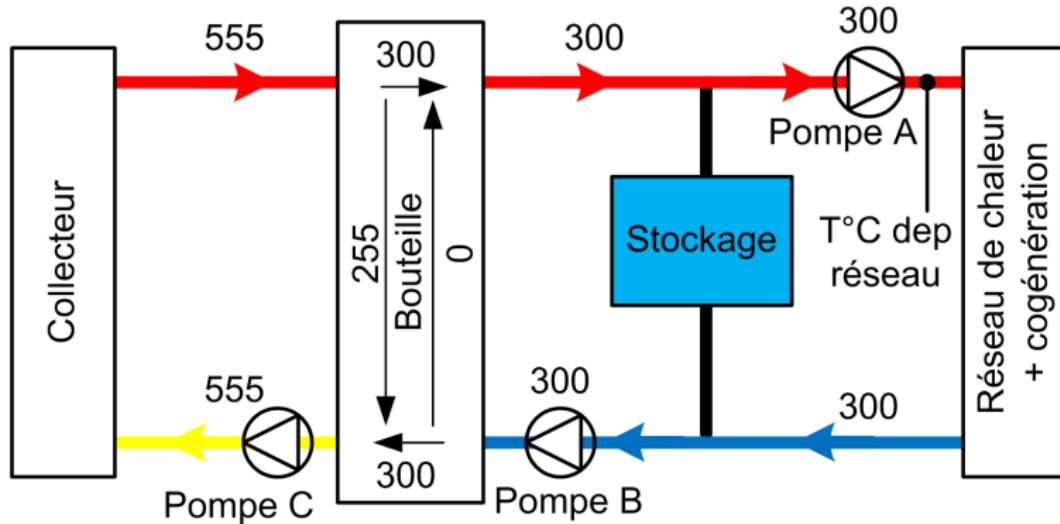
Mode stockage



Mode déstockage



Mode déconnecté



Sommaire

1 Contexte énergétique

2 Description du projet Opti-EnR

3 Modélisation et identification

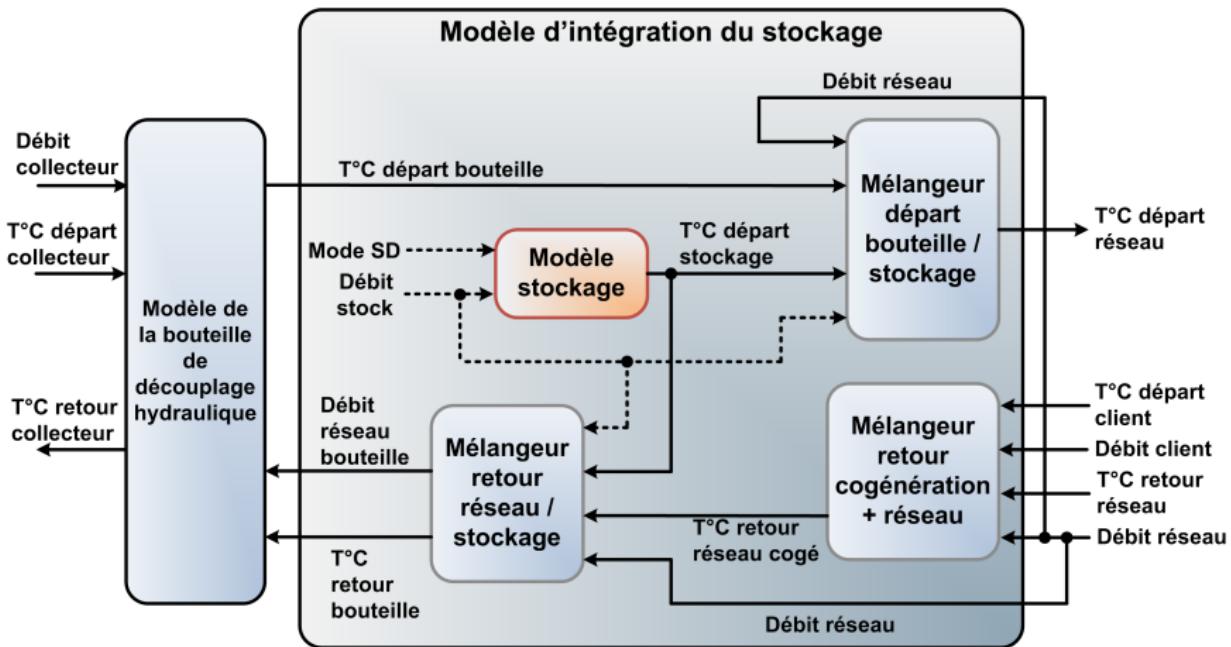
4 Stockage énergétique

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

Contexte énergétique
Description du projet Opti-EnR
Modélisation et identification
Stockage énergétique
Prédition des variables exogènes
Contrôle et optimisation

Outils employés
Méthodologie de la prédition
Résultats de la prédition

1 Contexte énergétique

2 Description du projet Opti-EnR

3 Modélisation et identification

4 Stockage énergétique

5 Prédition des variables exogènes

6 Contrôle et optimisation

● Outils employés

- Méthodologie de la prédition
- Résultats de la prédition

La transformée en ondelettes

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

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

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

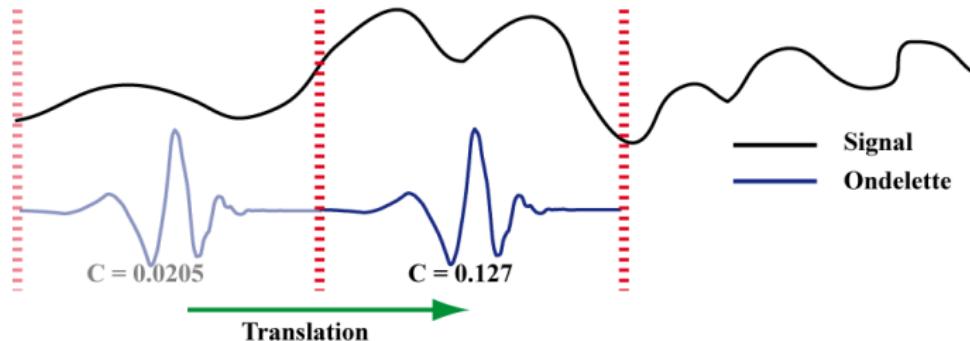
La transformée en ondelettes

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



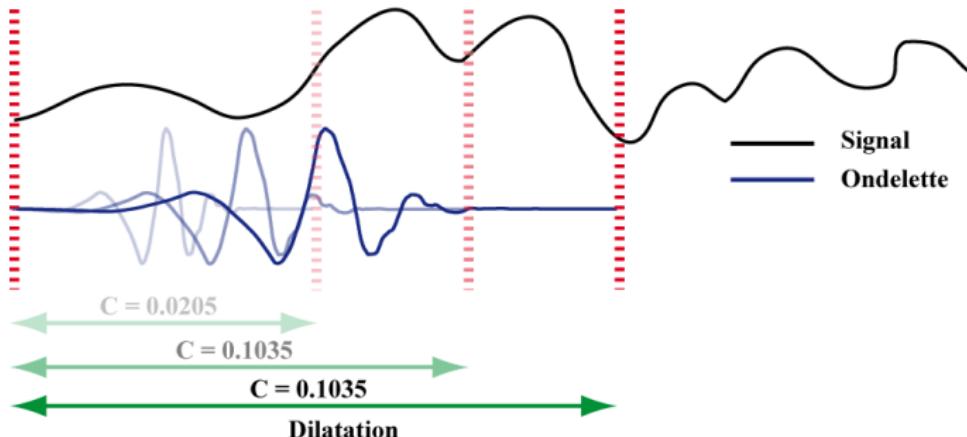
La transformée en ondelettes

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



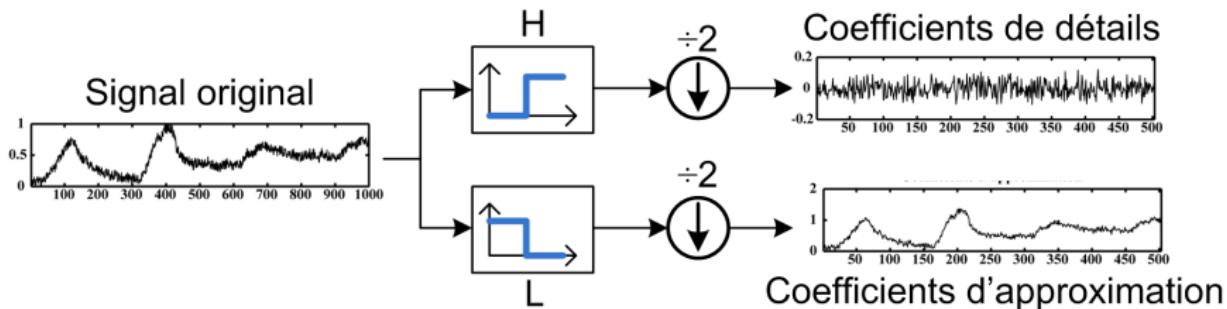
La transformée en ondelettes

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



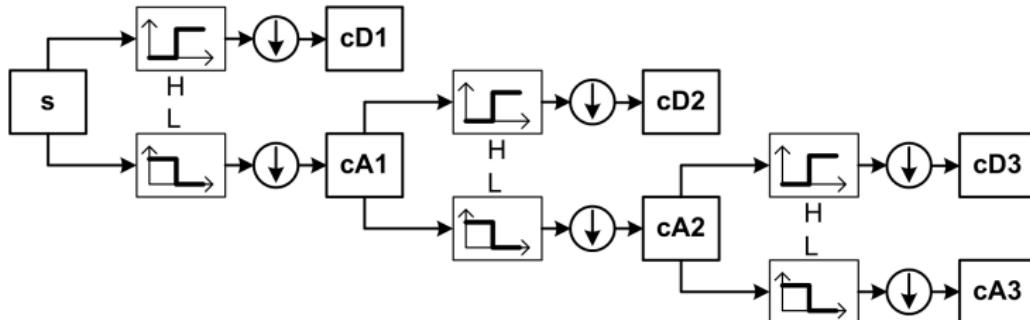
La transformée en ondelettes

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



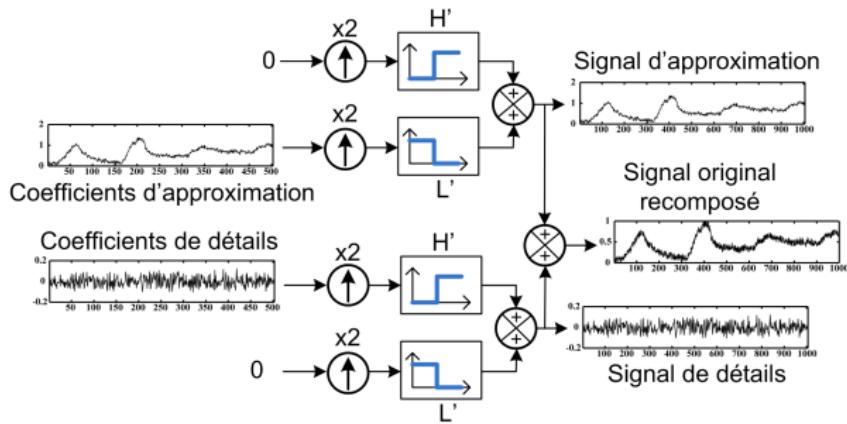
La transformée en ondelettes

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



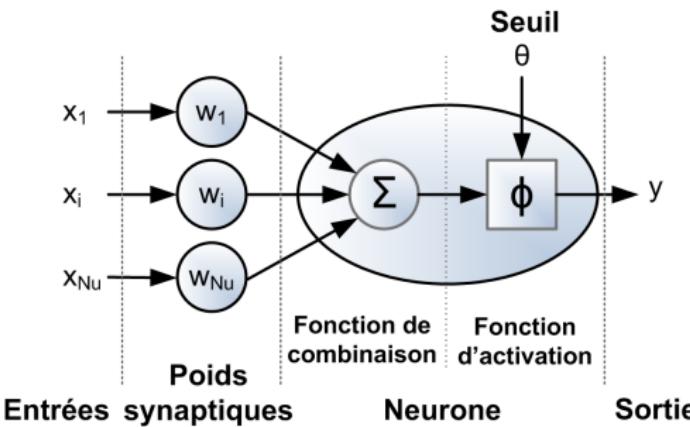
La transformée en ondelettes

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



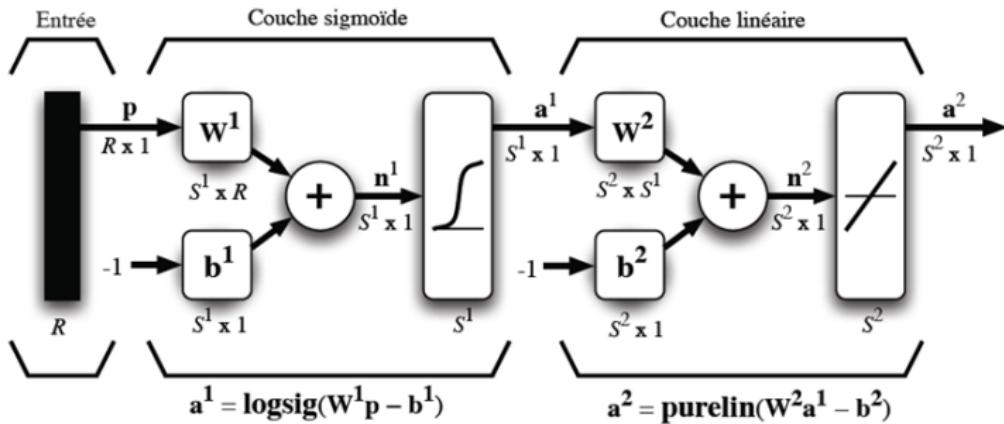
Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

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



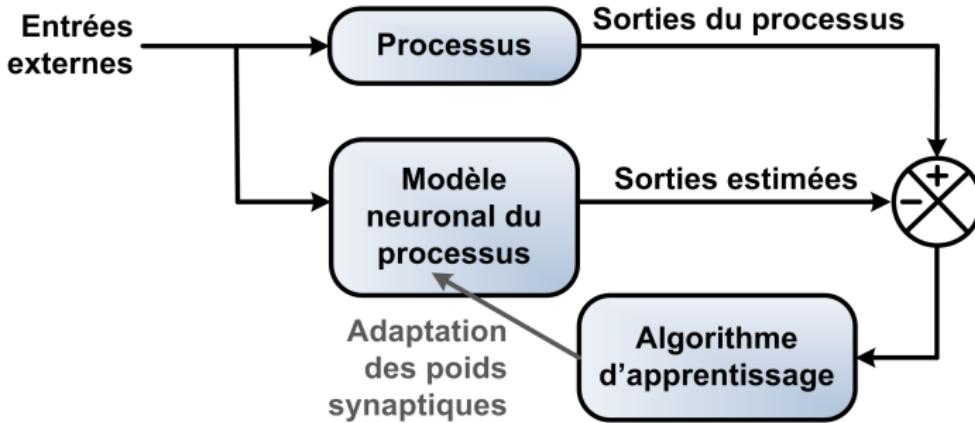
Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA)

- 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 β 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

$$H = J^T \cdot J = \begin{bmatrix} J_1^T & J_2^T \end{bmatrix} \cdot [J_1 J_2]^T = J_1^T \cdot J_1 + J_2^T \cdot J_2$$

Sommaire

1 Contexte énergétique

2 Description du projet Opti-EnR

3 Modélisation et identification

4 Stockage énergétique

5 Prédition des variables exogènes

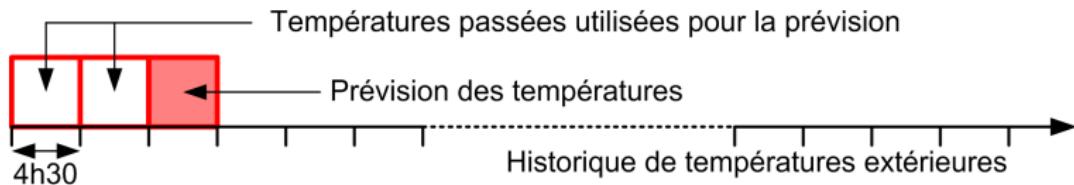
6 Contrôle et optimisation

Outils employés
Méthodologie de la prédition
Résultats de la prédition

- Outils employés
- **Méthodologie de la prédition**
- Résultats de la prédition

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



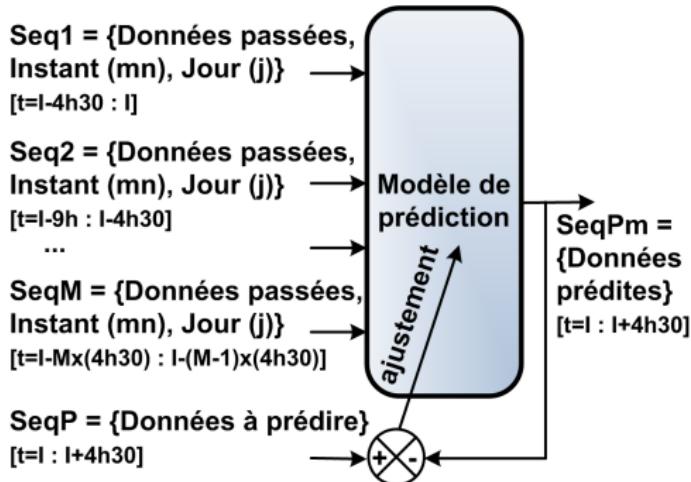
Séries temporelles

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



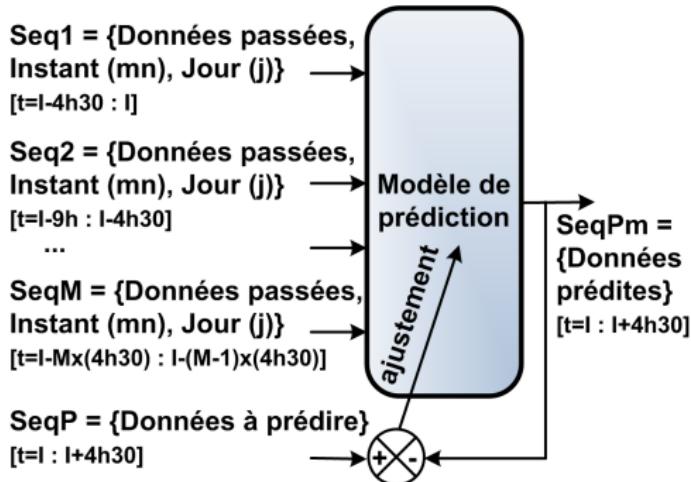
Modèle de prédiction

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



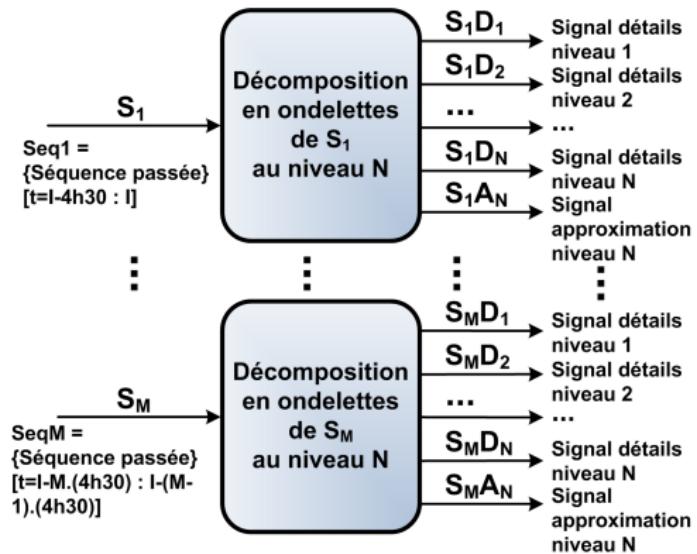
Modèle de prédiction

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



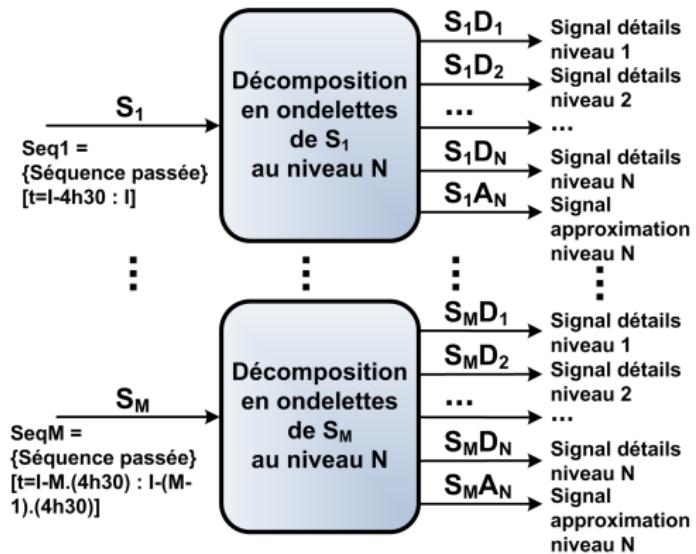
Décomposition en ondelettes

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



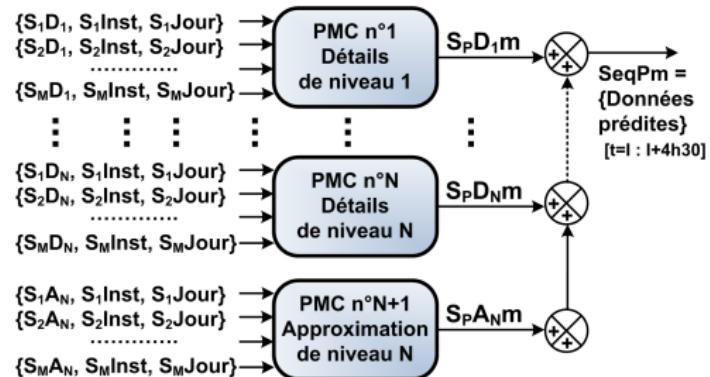
Décomposition en ondelettes

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



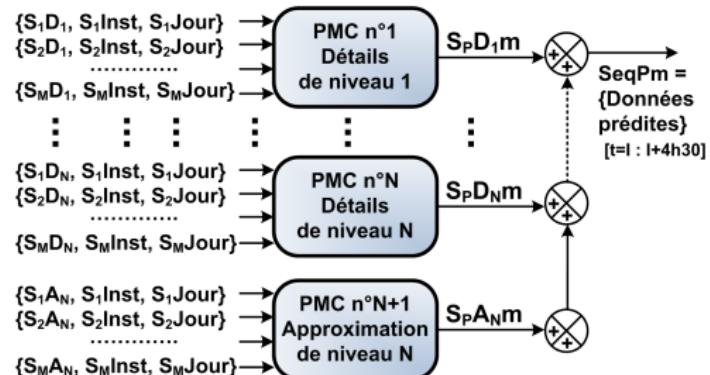
Prédiction et recomposition

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



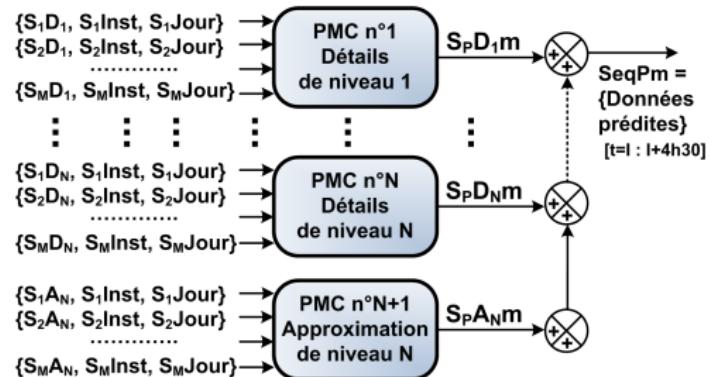
Prédiction et recomposition

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



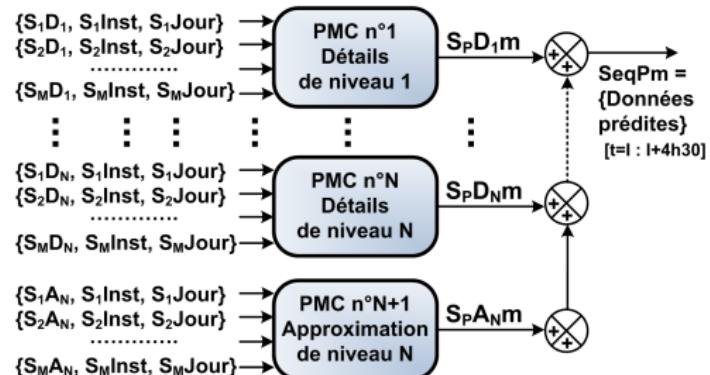
Prédiction et recomposition

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



Prédiction et recomposition

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



Sommaire

1 Contexte énergétique

2 Description du projet Opti-EnR

3 Modélisation et identification

4 Stockage énergétique

5 Prédition des variables exogènes

6 Contrôle et optimisation

Outils employés
Méthodologie de la prédition
Résultats de la prédition

- Outils employés
- Méthodologie de la prédition
- **Résultats de la prédition**

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 prédictive 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	Symbol	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 prédictive 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	Symbol	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

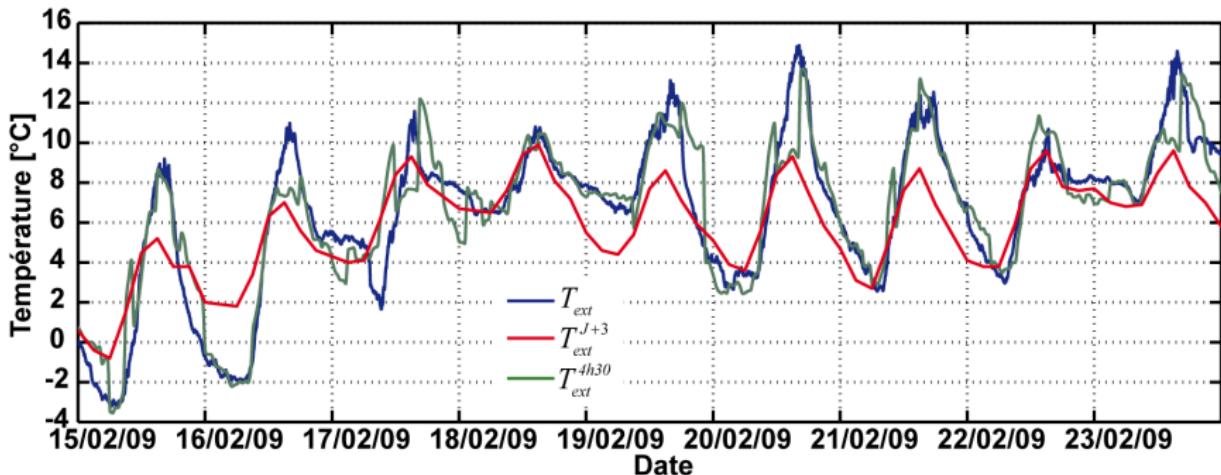
- Prédire la température extérieure T_{ext} et la puissance consommée par le réseau de chaleur P_{res}
- Minimiser l'écart entre la variable prédictive V^{4h30} et la variable réelle V

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

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

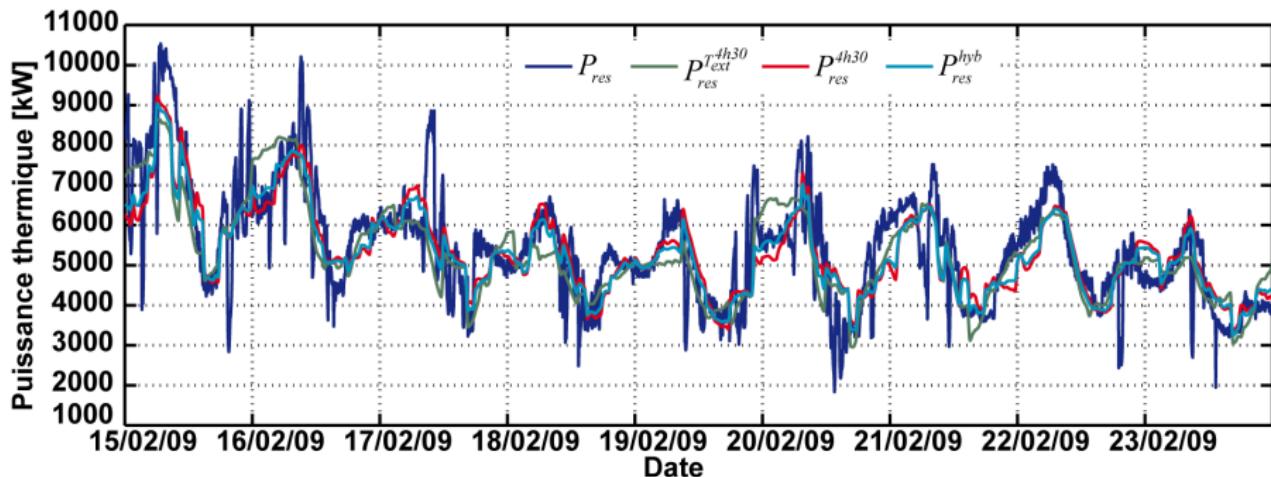
Paramètre	Symbole	Valeur optimale
Ordre de l'ondelette	R	4
Niveau de décomposition	N	5
Nombre de neurones cachés par réseau	F	5
Nombre de séquences passées	M	4
Période d'échantillonnage	T_E	30 mn

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]
$P_{res}^{T_{ext}^{J+3}}$	37,6	6,97	761,9	$P_{res}^{T_{ext}^{4h30}}$	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	$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$	900	10,5	9760
Coût financier	$\text{\texteuro}\cdot\text{kWh}^{-1}$	14	36	41
ACV du CO_2	$\text{gCO}_2\cdot\text{kWh}^{-1}$	13	234	270

Caractéristiques des combustibles

Critère	Unité	Bois	Gaz	Fioul (FOD)
Énergie volumique	$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$	900	10,5	9760
Coût financier	$\text{\texteuro}\cdot\text{kWh}^{-1}$	14	36	41
ACV du CO_2	$\text{gCO}_2\cdot\text{kWh}^{-1}$	13	234	270

Caractéristiques des combustibles

Critère	Unité	Bois	Gaz	Fioul (FOD)
Énergie volumique	$\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$	900	10,5	9760
Coût financier	$\text{\texteuro}\cdot\text{kWh}^{-1}$	14	36	41
ACV du CO_2	$\text{gCO}_2\cdot\text{kWh}^{-1}$	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

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

- 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

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

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

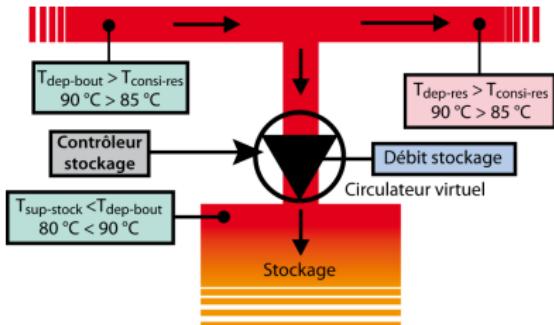
- Critères d'optimisation
- **Contrôleur simple (CS)**
- Contrôleur prédictif (MPC)
- Résultats

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 :** $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$

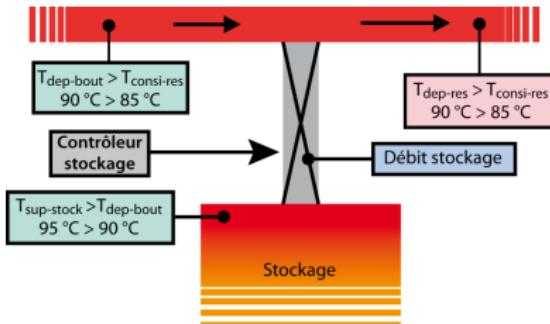
Mode stockage

- 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 : $T_{dep-bout} < T_{sup-stock} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$

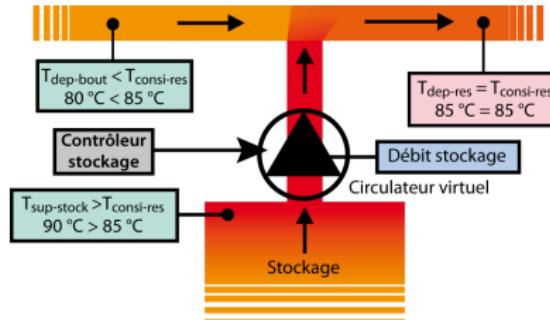


Mode déstockage

- **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 :** $T_{sup-stock} < T_{dep-bout} < T_{consi-res} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$

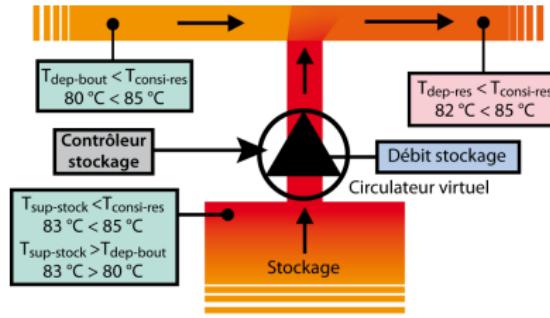
Mode déstockage

- 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 : $T_{sup-stock} < T_{dep-bout} < T_{consi-res} \Rightarrow Deb_{stock} = 0$



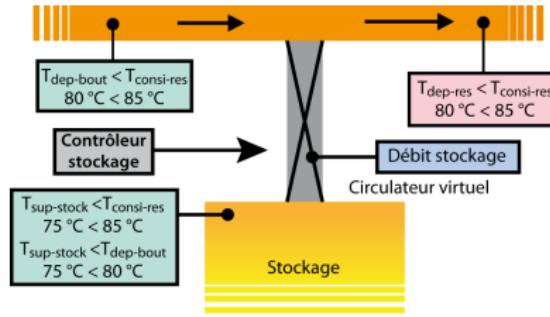
Mode déstockage

- 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

3 Modélisation et identification

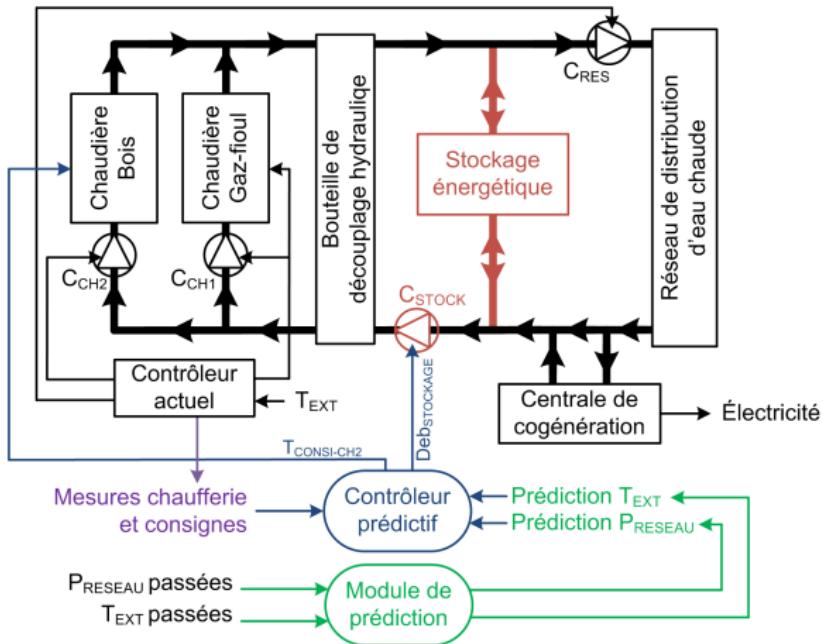
4 Stockage énergétique

5 Prédiction des variables exogènes

6 Contrôle et optimisation

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

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

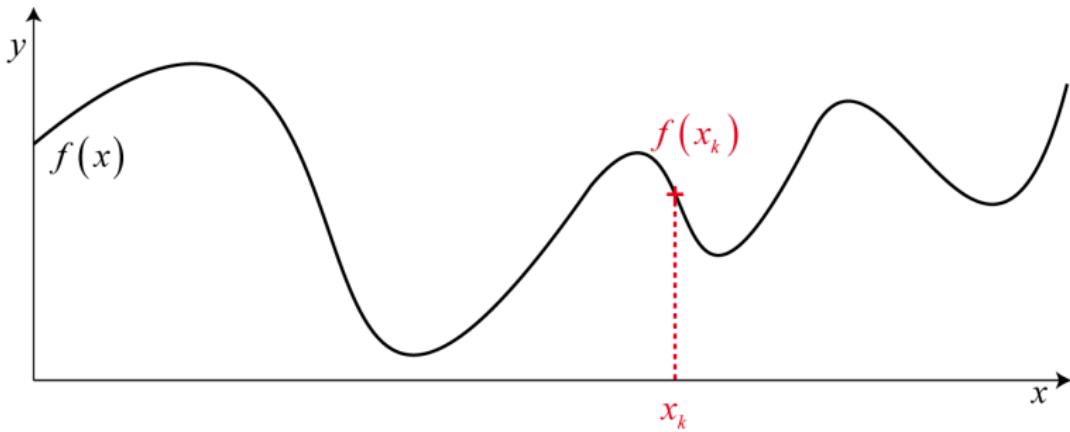
$$\left(\begin{array}{l} \Delta Deb_{Stock}(k/k), \dots, \Delta Deb_{Stock}(k + c - 1/k) \\ \Delta T_{consi-CH2}(k/k), \dots, \Delta T_{consi-CH2}(k + c - 1/k) \end{array} \right)$$

- Contraintes liées au problème à respecter

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Modèle de la chaufferie avec } T_{ext-pred} \text{ et } P_{res-pred} \text{ comme entrées} \\ 0 \leq Deb_{Stock}(k + i/k) \leq Deb_{Stock-max} = Deb_{res} - 10 \quad \forall i \in [0, \dots, p-1] \\ (Enc_{CH1}(k + i/k) = 1) \vee (T_{dep-bout}(k + i/k) \leq T_{sup-stock}(k + i/k)) \\ \Rightarrow Deb_{Stock}(k + i/k) \leq 0 \quad \forall i \in [0, \dots, p-1] \\ 90^\circ C \leq T_{consi-CH2} \leq 97^\circ C \quad \forall i \in [0, \dots, p-1] \\ \Delta Deb_{Stock}(k + h) = 0 \quad \forall h \in [c, \dots, p-1] \\ \Delta T_{consi-CH2}(k + h) = 0 \quad \forall h \in [c, \dots, p-1] \\ p = 54 : \text{horizon de prédiction} = 4h30 \\ c = 36 : \text{horizon de contrôle} = 3h \end{array} \right.$$

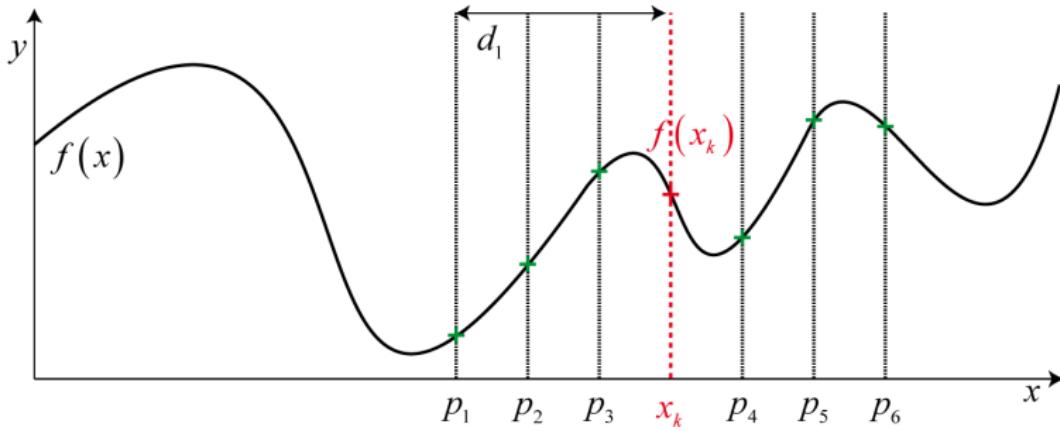
Algorithme d'optimisation

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



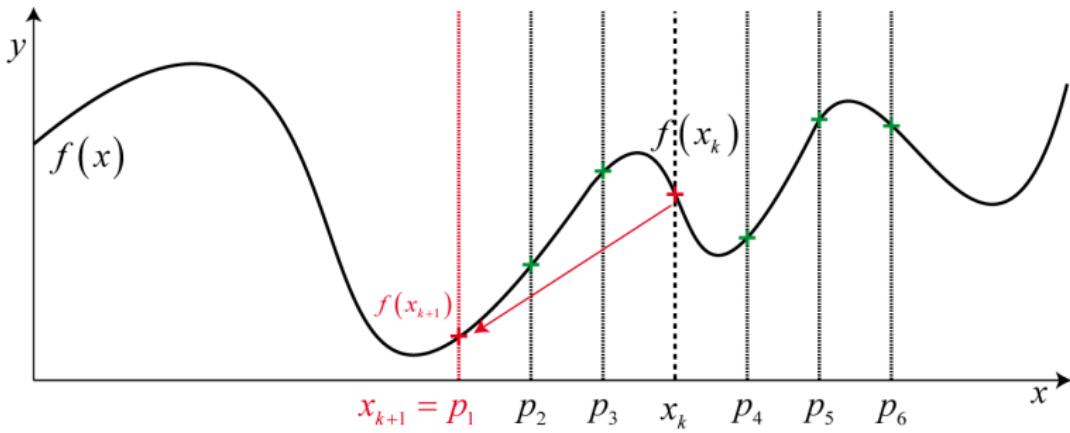
Algorithme d'optimisation

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



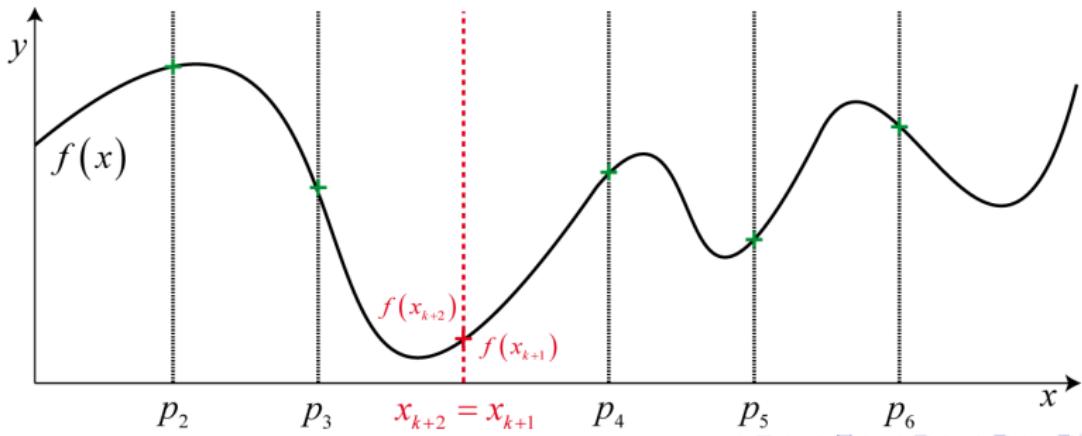
Algorithme d'optimisation

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



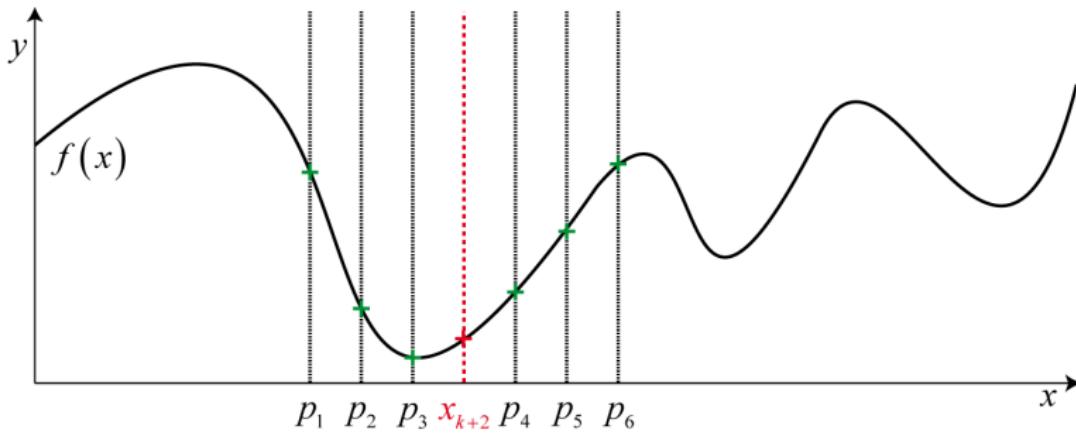
Algorithme d'optimisation

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



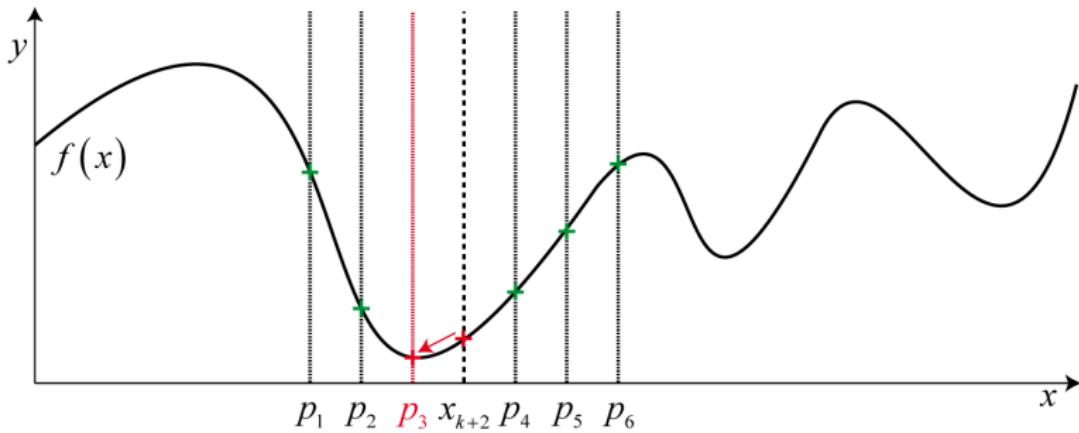
Algorithme d'optimisation

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

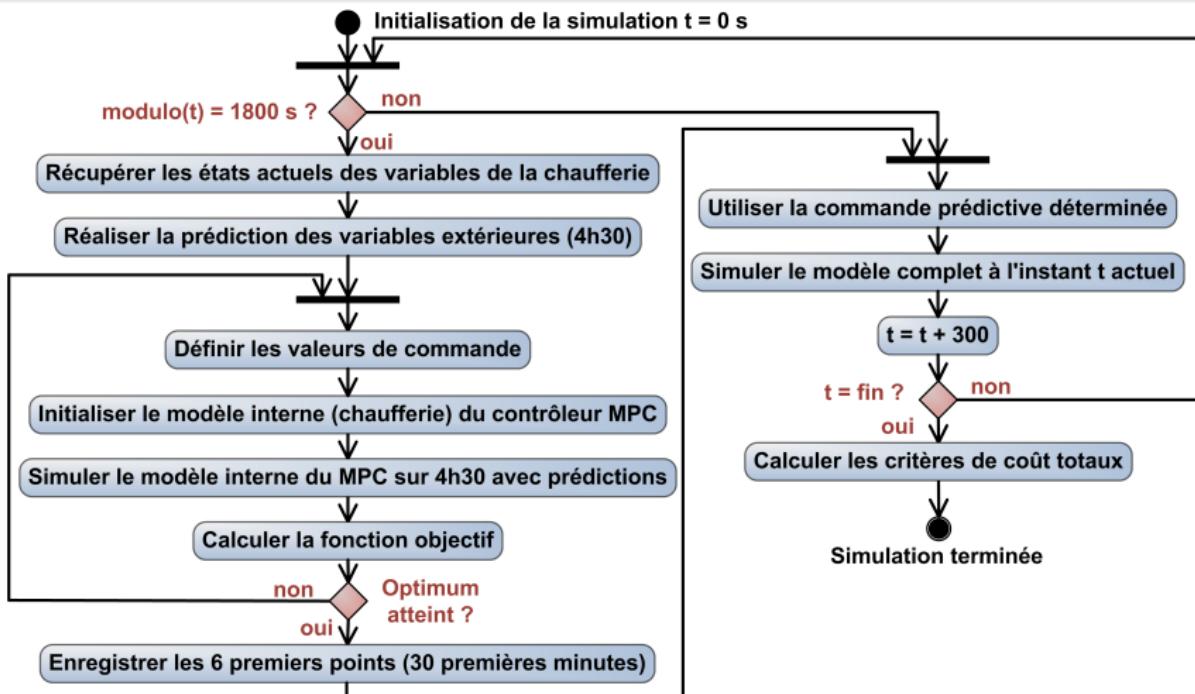


Algorithme d'optimisation

- 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

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

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 ³	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 ³	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 ₂	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 CO₂) : -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 CO₂) : -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 CO₂) : -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 CO₂) : -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 CO₂) : -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 CO₂) : -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 CO₂) : -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 CO₂) : -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 CO₂) : -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 CO₂ (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 CO₂ (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 CO₂ (en simulation)

Conclusion

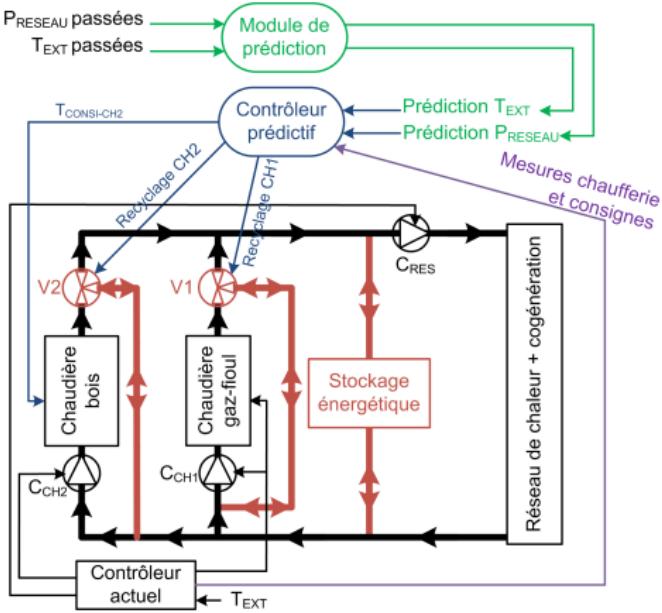
- Développement d'un modèle de fonctionnement global de la chaufferie à partir de relevés expérimentaux
- Développement et intégration d'un modèle de système de stockage énergétique
- Développement d'un outil de prédiction des variables exogènes au modèle (température extérieure et puissance du réseau)
- Développement et optimisation d'un contrôleur simple puis d'un contrôleur prédictif
- Réduction du coût de fonctionnement de la chaufferie et des émissions de CO₂ (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 CO₂ (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

Revues internationales 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

Revues internationales 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 & Frédéric Thiéry
Control strategies for managing energy in a building mock-up

11th 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

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



Benjamin Paris, Julien Eynard, Frédéric 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, 5th 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, 18th 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^{ème} 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 neuroflou
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^{ème} Colloque sur l'Enseignement des Technologies et des Sciences de l'Information et des Systèmes CETSIS 2008, Bruxelles, Belgique, 27-29 Octobre 2008

Merci pour votre attention