

Modélisation d'un réacteur biologique à l'aide de multimodèle

Anca Maria NAGY, Gilles MOUROT, José RAGOT, Georges SCHUTZ

15 octobre 2008



Nancy-Université

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Objectif

1. Proposer une méthode de décomposition d'un système non-linéaire(SNL)

Problématique

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Objectif

1. Proposer une méthode de décomposition d'un système non-linéaire(SNL)
2. Appliquer cette méthode au modèle NL du réacteur à boues activées

Problématique

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspectives

Objectif

1. Proposer une méthode de décomposition d'un système non-linéaire(SNL)
2. Appliquer cette méthode au modèle NL du réacteur à boues activées

Problématique

1. Caractérisation globale d'un SNL difficile avec un modèle unique

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspectives

Objectif

1. Proposer une méthode de décomposition d'un système non-linéaire(SNL)
2. Appliquer cette méthode au modèle NL du réacteur à boues activées

Problématique

1. Caractérisation globale d'un SNL difficile avec un modèle unique
2. Complexité importante du modèle mathématique

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Objectif

1. Proposer une méthode de décomposition d'un système non-linéaire(SNL)
2. Appliquer cette méthode au modèle NL du réacteur à boues activées

Problématique

1. Caractérisation globale d'un SNL difficile avec un modèle unique
2. Complexité importante du modèle mathématique
3. Propriétés importantes attribuées au systèmes LTI (stabilité, contrôlabilité, observabilité, etc.)

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion générale du multimodèle

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Introduction

Préliminaires

Notion générale du multimodèle

L'épuration par boues activées

Le réacteur biologique

Le modèle ASM1 réduit

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Introduction

Préliminaires

Notion générale du multimodèle

L'épuration par boues activées

Le réacteur biologique

Le modèle ASM1 réduit

Passer vers un multimodèle

Méthodologie générale

Application au modèle ASM1 réduit

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Introduction

Préliminaires

Notion générale du multimodèle

L'épuration par boues activées

Le réacteur biologique

Le modèle ASM1 réduit

Passer vers un multimodèle

Méthodologie générale

Application au modèle ASM1 réduit

Conclusions et Perspectives

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

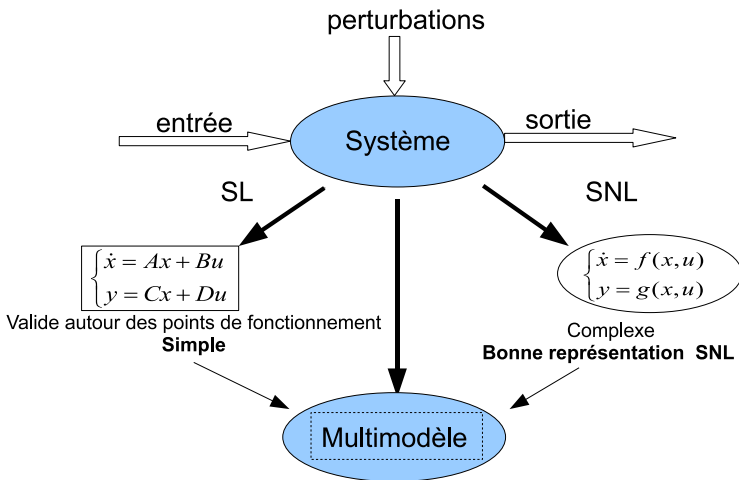
Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Introduction

Préliminaires



CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Notion générale du multimodèle

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x(t) + B_i \cdot u(t) + \beta_i] \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [C_i \cdot x(t) + D_i \cdot u(t) + \delta_i] \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) = 1 \quad \text{et} \quad \mu_i(x, u) \geq 0$$

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Notion générale du multimodèle

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x(t) + B_i \cdot u(t) + \beta_i] \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [C_i \cdot x(t) + D_i \cdot u(t) + \delta_i] \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) = 1 \quad \text{et} \quad \mu_i(x, u) \geq 0$$

1. Partitionnement de l'espace en différentes zones

Notion générale du multimodèle

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x(t) + B_i \cdot u(t) + \beta_i] \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [C_i \cdot x(t) + D_i \cdot u(t) + \delta_i] \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) = 1 \quad \text{et} \quad \mu_i(x, u) \geq 0$$

1. Partitionnement de l'espace en différentes zones
2. Attribuer à chaque zone un sous-modèle (linéaire de préférence)

Notion générale du multimodèle

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x(t) + B_i \cdot u(t) + \beta_i] \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [C_i \cdot x(t) + D_i \cdot u(t) + \delta_i] \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) = 1 \quad \text{et} \quad \mu_i(x, u) \geq 0$$

1. Partitionnement de l'espace en différentes zones
2. Attribuer à chaque zone un sous-modèle (linéaire de préférence)
3. Contribution de chaque sous-modèle quantifié par μ_i

Notion générale du multimodèle

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x(t) + B_i \cdot u(t) + \beta_i] \\ y(t) = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [C_i \cdot x(t) + D_i \cdot u(t) + \delta_i] \end{cases}$$

$$\sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) = 1 \quad \text{et} \quad \mu_i(x, u) \geq 0$$

1. Partitionnement de l'espace en différentes zones
2. Attribuer à chaque zone un sous-modèle (linéaire de préférence)
3. Contribution de chaque sous-modèle quantifié par μ_i
4. Contribution de chaque sous-modèle à la description du modèle global

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

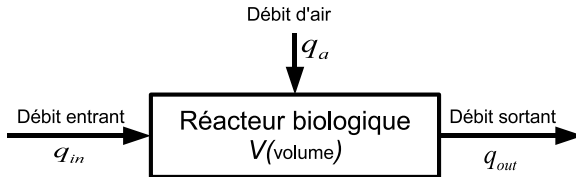
Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

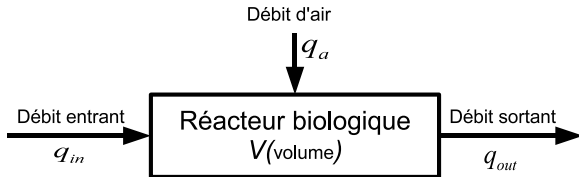
Conclusions
et Perspec-
tives

L'épuration par boues activées

Le schéma d'un réacteur biologique



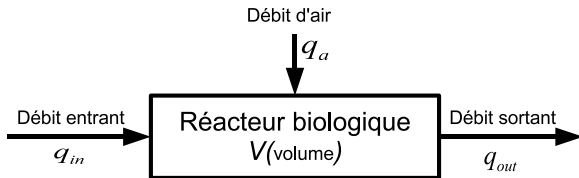
Le schéma d'un réacteur biologique



1. Mode de fonctionnement considéré : asservissement à partir d'un volume de référence V_{ref}

$$q_{out} = q_{in} - K_1(V_{ref} - V)$$

Le schéma d'un réacteur biologique



1. Mode de fonctionnement considéré : asservissement à partir d'un volume de référence V_{ref}

$$q_{out} = q_{in} - K_1(V_{ref} - V)$$

2. Modèle utilisé : ASM1 réduit (pollution carbonée)

L'épuration par boues activées

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

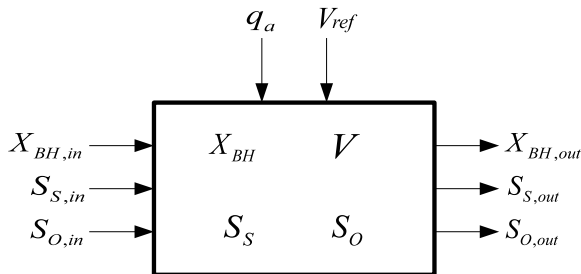
Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspectives

Le modèle ASM1 réduit



Hypothèses :

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{BH,out}(t) = X_{BH}(t) \\ S_{S,out}(t) = S_S(t) \\ S_{O,out}(t) = S_O(t) \\ S_{O,in}(t) = 0 \end{array} \right.$$

L'épuration par boues activées

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspectives

Le modèle ASM1 réduit

$$\begin{cases} \dot{V} = K_1(V_{ref} - V) \\ \dot{X}_{BH} = \frac{q_{in}}{V}(X_{BH,in} - X_{BH}) - (1-f)b_H X_{BH} + \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH} \\ \dot{S}_S = \frac{q_{in}}{V}(S_{S,in} - S_S) + (1-f)b_H X_{BH} - \frac{\mu_H}{Y_Y} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH} \\ \dot{S}_O = -\frac{q_{in}}{V} S_O + K q_a (S_{O,sat} - S_O) + \frac{Y_H - 1}{Y_H} \mu_H \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH} \end{cases} \quad (1)$$

$$x = \begin{bmatrix} V \\ X_{BH} \\ S_S \\ S_O \end{bmatrix}$$

$$u = \begin{bmatrix} X_{BH,in} \\ S_{S,in} \\ q_a \\ V_{ref} \end{bmatrix}$$

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique

Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Passer vers un multimodèle

Passer vers un multimodèle

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x + B_i \cdot u]$$

Méthodologie générale

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

**Méthodologie
générale**

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x + B_i \cdot u]$$

Méthodologie générale

1. Passer le système sous la forme LPV :

$$\dot{x} = A(x, u) \cdot x + B(x, u) \cdot u$$

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

**Méthodologie
générale**

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspectives

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x + B_i \cdot u]$$

Méthodologie générale

1. Passer le système sous la forme LPV :

$$\dot{x} = A(x, u) \cdot x + B(x, u) \cdot u$$

2. Identifier les nonlinéarités (variables de prémisse)

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x + B_i \cdot u]$$

Méthodologie générale

1. Passer le système sous la forme LPV :

$$\dot{x} = A(x, u) \cdot x + B(x, u) \cdot u$$

2. Identifier les nonlinéarités (variables de prémisse)
3. Partitionner en 2 les variables de prémisse (TPC) :

$$z = F_1(z) \cdot z_{max} + F_2(z) \cdot z_{min}$$

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \mu_i(x, u) \cdot [A_i \cdot x + B_i \cdot u]$$

Méthodologie générale

1. Passer le système sous la forme LPV :

$$\dot{x} = A(x, u) \cdot x + B(x, u) \cdot u$$

2. Identifier les nonlinéarités (variables de prémisse)
3. Partitionner en 2 les variables de prémisse (TPC) :

$$z = F_1(z) \cdot z_{max} + F_2(z) \cdot z_{min}$$

4. Calculer les sous-modèles et les fonctions de pondération

Passer vers un multimodèle

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Application au modèle ASM1 réduit

$$\dot{X}_{BH} = \frac{q_{in}}{V} (X_{BH,in} - X_{BH}) - (1-f)b_H X_{BH} + \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH}$$

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Application au modèle ASM1 réduit

$$\dot{X}_{BH} = \frac{q_{in}}{V} (X_{BH,in} - X_{BH}) - (1-f)b_H X_{BH} + \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH}$$

1. Forme LPV :

$$\dot{X}_{BH} = \left[-\frac{q_{in}}{V} - (1-f)b_H + \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right] X_{BH} + \left(-\frac{q_{in}}{V} \right) X_{BH,in}$$

Application au modèle ASM1 réduit

$$\dot{X}_{BH} = \frac{q_{in}}{V} (X_{BH,in} - X_{BH}) - (1-f)b_H X_{BH} + \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH}$$

1. Forme LPV :

$$\dot{X}_{BH} = \left[-\frac{q_{in}}{V} - (1-f)b_H + \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right] X_{BH} + \left(-\frac{q_{in}}{V} \right) X_{BH,in}$$

2. Nonlinéarités (variables de prémisse) :

$$Z_1 = \frac{q_{in}}{V}$$

$$Z_2 = \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O}$$

Application au modèle ASM1 réduit

$$\dot{X}_{BH} = \frac{q_{in}}{V} (X_{BH,in} - X_{BH}) - (1-f)b_H X_{BH} + \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH}$$

1. Forme LPV :

$$\dot{X}_{BH} = \left[-\frac{q_{in}}{V} - (1-f)b_H + \frac{\mu_H}{Y_H} \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right] X_{BH} + \left(-\frac{q_{in}}{V} \right) X_{BH,in}$$

2. Nonlinéarités (variables de prémisse) :

$$z_1 = \frac{q_{in}}{V} \quad z_2 = \frac{S_S}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O}$$

3. Partitionnement en 2 de z_1 et z_2 :

$$z_1 = F_{1,1}(z_1) \cdot z_{1,max} + F_{1,2}(z_1) \cdot z_{1,min}$$

$$z_2 = F_{2,1}(z_2) \cdot z_{2,max} + F_{2,2}(z_2) \cdot z_{2,min}$$

Application au modèle ASM1 réduit

4. Calcul des sous-modèles et des fonctions des pondération :

$$B_1 = B(z_{2,max}) \quad A_1 = A(z_{1,max}, z_{2,max})$$

$$B_2 = B(z_{2,min}) \quad A_2 = A(z_{1,max}, z_{2,min})$$

$$B_3 = B_1 \quad A_3 = A(z_{1,min}, z_{2,max})$$

$$B_4 = B_2 \quad A_4 = A(z_{1,min}, z_{2,min})$$

$$\mu_1(x, u) = F_{1,1}(z_1)F_{2,1}(z_2)$$

$$\mu_2(x, u) = F_{1,1}(z_1)F_{2,2}(z_2)$$

$$\mu_3(x, u) = F_{1,2}(z_1)F_{2,1}(z_2)$$

$$\mu_4(x, u) = F_{1,2}(z_1)F_{2,2}(z_2)$$

Passer vers un multimodèle : résultats

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

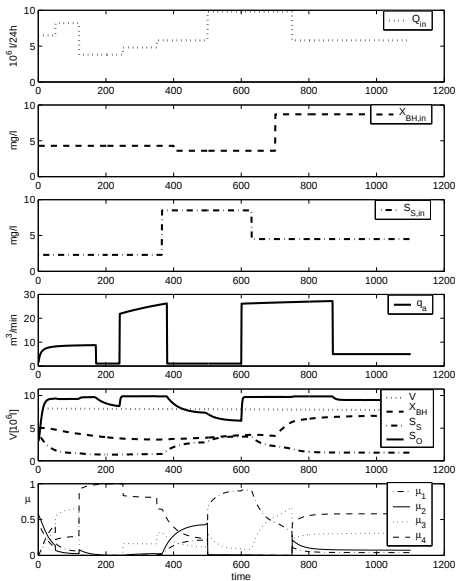
Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspectives



CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Conclusions et Perspectives

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires
Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale

Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Conclusions

1. Méthode analytique générale d'obtention d'un multimodèle, sans perte d'information
2. Méthode qui évite une difficulté souvent rencontrée dans les techniques de décomposition : le choix des points de fonctionnement
3. Application au modèle du réacteur biologique (à boues activées)

Perspectives

1. Étendre la méthodologie sur un modèle plus général
2. Estimation d'état et ses applications pour le diagnostic de fonctionnement de systèmes (station d'épuration en particulier)

CRAN

Anca Maria
NAGY,
Gilles
MOUROT,
José
RAGOT,
Georges
SCHUTZ

Introduction

Préliminaires

Notion
générale du
multimodèle

L'épuration
par boues
activées

Le réacteur
biologique
Le modèle
ASM1 réduit

Passer vers
un multi-
modèle

Méthodologie
générale
Application au
modèle ASM1
réduit

Conclusions
et Perspec-
tives

Merci beaucoup pour votre attention !