



Commande prédictive non linéaire de la culture de microalgues pour la valorisation biologique de CO_2

Rayen Filali, Sihem Tebbani, Didier Dumur

Département Automatique, E3S, SUPELEC, Gif sur Yvette

Dominique Pareau, Filipa Lopes

LGPM, Ecole Centrale Paris, Châtenay-Malabry

Sette Diop

LSS, SUPELEC, Gif sur Yvette







- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Plan de la présentation

- Introduction
- Modélisation du bioprocédé 11.
- Identification des paramètres du III. modèle
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions et perspectives





Contexte de la thèse

Les microalgues Démarche suivie

- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Contexte de la thèse

- ✓ Contexte mondial actuel : préoccupation croissante liée au réchauffement climatique et aux émissions de gaz à effet de serre
- ✓ Orientation de la recherche vers les procédés de séquestration du dioxyde de carbone
- ✓ Rôle potentiel des systèmes biologiques application de la biotechnologie microalgale
- ✓ Etape préliminaire pour la conception d'un procédé industriel
- Optimisation de la stratégie de fixation de CO₂ par les microalgues par la mise en place d'une loi de commande robuste





Contexte de la thèse

Les microalgues

Démarche suivie

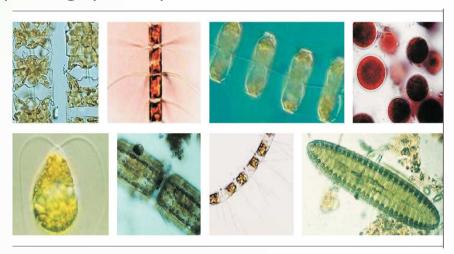
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

14 Juin 2012

VI. Conclusions & perspectives

Les microalgues

- Microorganismes eucaryotes photosynthétiques (30 000) espèces différentes)
- Diversité morphologique importante







Contexte de la thèse

Les microalgues

Démarche suivie

- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Les microalgues

- Microorganismes eucaryotes photosynthétiques (30 000) espèces différentes)
- Diversité morphologique importante
- Habitat : majoritairement des environnements aquatiques
- Nutrition: majoritairement photoautotrophe
- Métabolisme : la photosynthèse



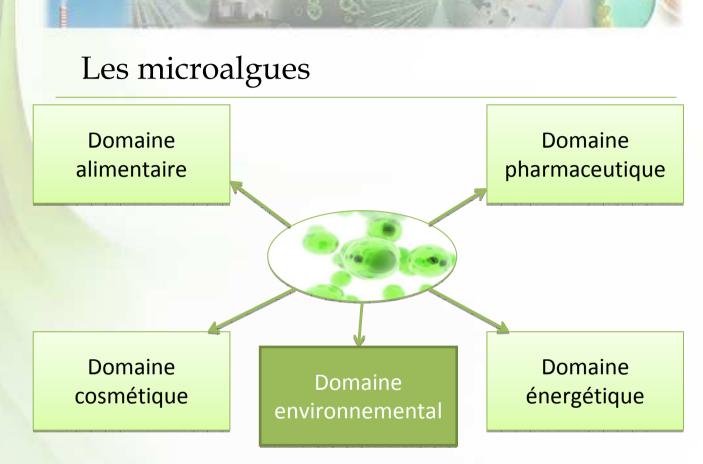


Contexte de la thèse

Les microalgues

Démarche suivie

- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives



- Caractéristiques biochimiques intéressantes
- Bio-fixation de CO₂ par les microalgues





Contexte de la thèse

Les microalgues

Démarche suivie

- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

14 Juin 2012

VI. Conclusions & perspectives

Les microalgues

Système de culture : ouvert ou fermé « photobioréacteur »





	Système ouvert	Système fermé
Capacité de fixation de CO ₂	Faible	Elevée
Productivité de biomasse	Faible (0,06-0,1 g.L ⁻¹ .j ⁻¹)	Elevée (0,09-2,7 g.L ⁻¹ .j ⁻¹)
Vitesse spécifique de croissance	Faible	Elevée
Commande du procédé	Difficile	Facile
GT CPNL		17 7





Contexte de la thèse

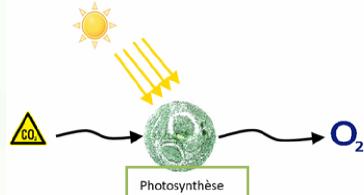
Les microalgues

Démarche suivie

- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Les microalgues

Culture de microalgues



- > Activité photosynthétique influencée par les conditions opératoires
- ✓ Lumière
- ✓ Apport carbone
- ✓ Température
- ✓ pH
- ✓ Apport en nutriment
- Maîtrise des conditions opératoires







Contexte de la thèse Les microalgues

Démarche suivie

- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Démarche suivie

Sélection de l'espèce algale

- Forte tolérance vis-à-vis de concentrations élevées de CO2
- Vitesse de croissance la plus importante possible
- Tolérance vis-à-vis des gaz toxiques
- Etude bibliographique : plusieurs espèces candidates



➤ Choix de l'espèce Chlorella vulgaris





Contexte de la thèse Les microalgues

Démarche suivie

- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Démarche suivie

Sélection de l'espèce

Modélisation de la croissance

- ■Choix d'un modèle de croissance pertinent
- Identification des paramètres du modèle
- ■Validation du modèle

- Estimation de la concentration de biomasse à partir de la concentration du carbone inorganique total
- ■Etude de la robustesse
- ■Validation expérimentale des observateurs

Estimation de la concentration cellulaire

Synthèse d'une loi de commande



- ■Choix de la stratégie de commande
- ■Etude de la robustesse
- Comparaison des performances avec une seconde loi de commande
- ■Implantation sur un PBR de 9,6 L



Efficacité d'utilisation de CO₂

14 Juin 2012

GT CPNL





II. Modèle du bioprocédé

Choix du modèle

Cinétique d'évolution de la biomasse

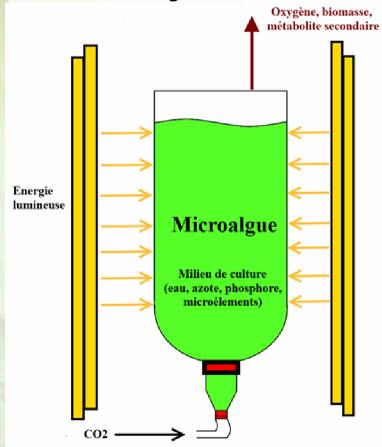
Modèle relatif à la lumière

Cinétique d'évolution du CIT

- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Bioprocédé

❖ Dispositif biologique : culture en batch et continu de Chlorella vulgaris



- X: concentration de biomasse (microalgue)
- CIT: concentration en carbone inorganique total (substrat)





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé

Choix du modèle

Cinétique d'évolution de la biomasse

Modèle relatif à la lumière Cinétique d'évolution du CIT

- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Choix du modèle

- * Objectif : synthèse d'une loi de commande pour la culture de microalgues
- Choix du modèle
- ✓ Pertinent
- ✓ Faible complexité mathématique
- phénomènes > Prise compte des en environnementaux les plus importants
 - > Lumière importance de la photosynthèse
- Carbone





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé

Choix du modèle

Cinétique d'évolution de la biomasse

Modèle relatif à la lumière

Cinétique d'évolution du CIT

- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Cinétique d'évolution de la biomasse

❖ Bilan massique : réacteur continu parfaitement agité en régime non stationnaire

$$V \frac{dX}{dt} = V \underline{u} X - F X$$

$$N \text{ cell accumulées}$$

$$N \text{ cell produits}$$

$$N \text{ cell sortantes}$$

- μ : vitesse spécifique de croissance
- F: débit d'alimentation
- V : volume du réacteur
- Modèle de croissance

$$\mu = \mu_{\text{max}} \left(\frac{E}{K_E + E} \right) \left(\frac{[CIT]}{K_{CL} X + [CIT]} \right)$$

- $\mu_{\rm max}$: vitesse spécifique maximale de croissance
- E : énergie lumineuse accessible par cellule
- $K_{\rm F}$: constante de limitation par E
- K_{CI} : constante de limitation par CIT





II. Modèle du bioprocédé

Choix du modèle

Cinétique d'évolution de la biomasse

Modèle relatif à la lumière

Cinétique d'évolution du CIT

- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Modèle relatif à la lumière

❖ Calcul de l'énergie lumineuse accessible par cellule « E »

$$E = \frac{\left(I_{IN} - I_{OUT}\right)A_r}{V X}$$

- *I*_{IN} : intensité lumineuse incidente
- *I*_{OUT}: intensité lumineuse sortante
- A_r : surface éclairée du photobioréacteur

Modélisation de l'intensité lumineuse sortante

$$I_{OUT} = C_1 I_{IN} X^{C_2}$$

 C_1 et C_2 : constantes adimensionnelles





II. Modèle du bioprocédé

Choix du modèle

Cinétique d'évolution de la biomasse

Modèle relatif à la lumière

Cinétique d'évolution du CIT

- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Cinétique d'évolution du CIT

* Bilan massique:

$$\underbrace{Vd\left[CIT\right]}_{M \text{ de carbone accumulées}} = \underbrace{k_L a}_{le \text{ carbone transférée } s} \underbrace{V\left(\left[CO_{\frac{a}{2}}\right] - \left[CO_{\frac{a}{2}}\right]\right)}_{le \text{ carbone transférée } s} \underbrace{dt - \underbrace{F\left[CIT\right]dt}_{M \text{ de carbone sortantes}} - \underbrace{\mu}_{X/CIT}_{X/CIT} \underbrace{Vdt}_{M \text{ de carbone consonmée}}$$

- $Y_{X/CIT}$: render ent de conversion du carbone en biomasse
- $k_{\rm I} a$: coefficient volumique de transfert gaz-liquide de CO_2
- $[CO_2^*]$: contentration de CO_2 en équi ibre avec la phase gazeuse

Déterm nation de la concentration en CO₂

$$[CO_{2}] = \frac{[CIT]}{\left[1 + \frac{K_{1}}{[H^{+}]} + \frac{K_{1}K_{2}}{[H^{+}]^{2}}\right]} \quad avec \quad [CIT] = [CO_{2}] + [HCO_{3}] + [CO_{3}]^{2}$$

- K_1 et K_2 : constants de dissociation
- $[H^+]$: concentrate en ions hydrogène
- Loi de Henry

$$\left[CO_2^*\right] = \frac{P_{CO_2}}{H}$$

- $P_{\rm CO2}$: pression partielle de CO_2
- H: constante de Henry pour une température de 25°C





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres

Stratégie d'identification

Dispositif expérimental

Résultats d'identification

Validation du modèle

- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Stratégie d'identification

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d} X}{\mathrm{d} t} = \mu X - \frac{F}{V} X \\ \frac{\mathrm{d} [CIT]}{\mathrm{d} t} = -\mu \frac{X}{Y_{X/CIT}} - \frac{F}{V} [CIT] - (k_L a) [CO_2^*] - [CO_2] \end{cases}$$

$$\mu = \mu_{\max} \left(\frac{E}{K_E + E} \right) \left(\frac{[CIT]}{K_{CL} X + [CIT]} \right)$$

$$I_{OUT} = C_1 I_{IN} X^{C_2}$$

- 7 paramètres à identifier :
- ✓ Modèle de croissance (μ_{max} , K_{E} et K_{CL})
- ✓ Modèle de lumière (C_1 et C_2)
- ✓ Dynamique liée au CIT $(k_L a \text{ et } Y_{X/CIT})$
- L'identification s'effectue en deux étapes :
- ✓ Identification paramétrique grâce à des données expérimentales issues de cultures de Chlorella vulgaris
- ✓ Validation par d'autres jeux de données (4 campagnes de culture)





- Introduction
- Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres

Stratégie d'identification

Dispositif expérimental

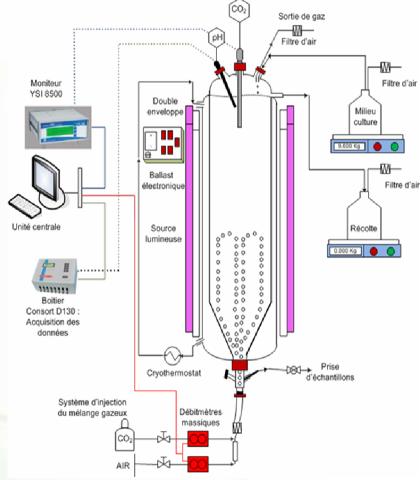
Résultats d'identification

Validation du modèle

- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Dispositif expérimental

- Photobioréacteur : colonne à bulle de 9,6 L
- Agitation : système « air-lift »
- Débit gazeux régulé
- Eclairage en continu
- Température régulée
- Apport en milieu de culture pompe commandable







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres

Stratégie d'identification

Dispositif expérimental

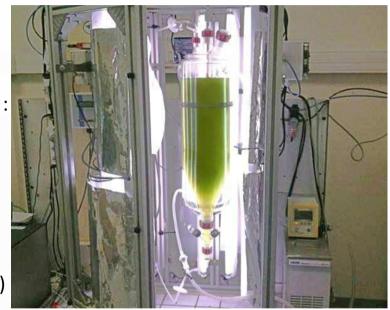
Résultats d'identification

Validation du modèle

- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Dispositif expérimental

- Conditions de culture
- ■Température : 25°C
- Intensité lumineuse incidente : 90 μE.m⁻².s⁻¹
- ■Débit gazeux : 2,5 V.V.H (volume d'air par volume du réacteur par heure)
- ■Mélange gazeux : air (5% CO₂)
- Mesures expérimentales



hors ligne	en ligne	
Concentration de biomasse	рН	
Intensité lumineuse	[CO ₂] dissous dans le liquide	

14 Juin 2012 GT CPNL





- Introduction
- Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres

Stratégie d'identification Dispositif expérimental

Résultats d'identification

Validation du modèle

- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Résultats d'identification

- ■A partir de la mesure de [CO₂] et du bilan matière :

$$Vd[CO_2] = k_L a [CO_2]^* - [CO_2] Vdt$$

Deux campagnes expérimentales : en absence et en présence de cellules algales inactives

$$k_L a = 1.4 \,\mathrm{h}^{-1} \pm 0.5 \,\mathrm{h}^{-1}$$

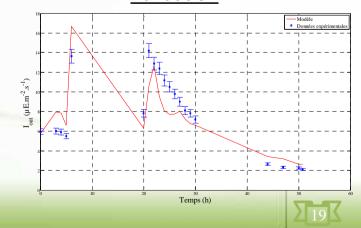
- \diamond Identification des paramètres du modèle de I_{out}
- A partir de la mesure de la lumière incidente et sortante
- ➤ Régression linéaire

$$I_{OUT} = C_1 I_{IN} X^{C_2}$$

Identification

	Valeur	Intervalle de confiance à 95%
C_{1}	0,493	[0,490;0,496]
C_2	-0,925	[-0,926;-0,924]

Validation







- Introduction
- Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres

Stratégie d'identification Dispositif expérimental

Résultats d'identification

Validation du modèle

- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Résultats d'identification

Identification des paramètres du modèle de croissance :

$$\mu = \mu_{\text{max}} \left(\frac{E}{K_E + E} \right) \left(\frac{[CIT]}{K_{CL}} X + [CIT] \right)$$

- Stratégie: minimisation de l'erreur entre la mesure et la valeur prédite de la concentration de biomasse
- Identification paramétrique par régression non-linéaire selon y_{i, mesuré}: vecteur des valeurs un critère des moindres carrés

$$J(\theta) = \sum_{i=1}^{N} \left((y_{i,\text{mod}} \partial_{i} \theta) - y_{i,\text{mesuré}} \right)^{T} Q_{i} (y_{i,\text{mod}} \partial_{i} \theta) - y_{i,\text{mesuré}})$$

Campagne expérimentale de culture en mode continu

mesurées

y_{i, modèle}: vecteur des prédictions

 θ : vecteur des paramètres

N : nombre de points de mesure

 Q_i : matrice de pondération

Paramètres	Valeur	Unité	Intervalle de confiance à 95%
$\mu_{ m max}$	1,07	h ⁻¹	[0,89 ; 1,24]
K_{E}	0,08	μΕ. s ⁻¹ . 10 ⁹ cell ⁻¹	[0,07 ; 0,09]
$K_{\rm CL}$	3,8	mmol. 10 ⁹ cell ⁻¹	[3,1 ; 4,5]





Validation du modèle

- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres

Stratégie d'identification Dispositif expérimental Résultats d'identification

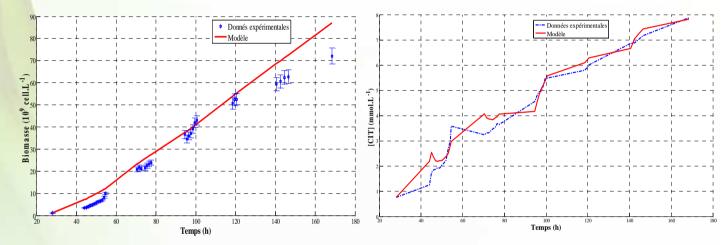
Validation du modèle

- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

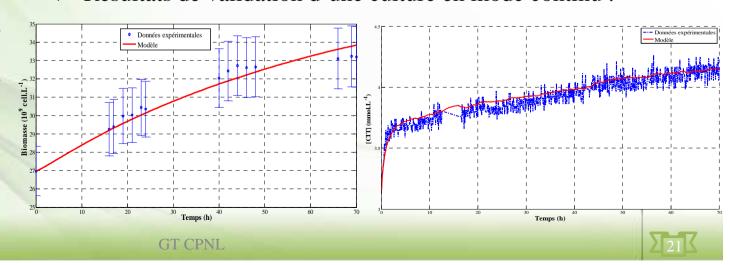
14 Juin 2012

VI. Conclusions & perspectives

* Résultats de validation d'une culture en mode batch :



Résultats de validation d'une culture en mode continu :







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres

Stratégie d'identification Dispositif expérimental Résultats d'identification

Validation du modèle

- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Conclusions modèle

- Modèle pertinent de faible complexité : simplicité de structure
- Validation du modèle pour des cultures de Chlorella vulgaris en mode batch et continu dans un photobioréacteur de 9,6 L
- Equation d'état du système :

$$(S) \begin{cases} \frac{\mathrm{d} X}{\mathrm{d} t} = \mu X - \frac{F}{V} X & \text{avec} : \\ \frac{\mathrm{d} [CIT]}{\mathrm{d} t} = -\mu \frac{X}{Y_{X/[CIT]}} - \frac{F}{V} [CIT] + k_L a \left([CO_2^*] - [CO_2] \right) \end{cases}$$

Etape préliminaire pour le développement de stratégie d'estimation et de loi de commande robuste pour la culture de microalgues





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

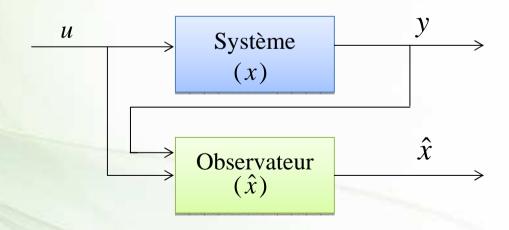
Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Estimation de la concentration cellulaire

- ❖ **Difficulté** : limitations des capteurs physiques pour la mesure en ligne de la concentration cellulaire
- **Solution** : synthèse de « capteurs logiciels » ou observateur
- **Principe**: estimation des variables d'état non mesurées à partir des mesures disponibles en temps réel et à partir du modèle mathématique du système







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Principe de l'observateur

- **Objectif** : estimation de la concentration de biomasse à partir de la mesure de la concentration de carbone inorganique total
- Ltat de l'art des observateurs appliqués aux bioprocédés : trois classes
- Observateurs exponentiels:
- Avantage : vitesse de convergence réglable
- Inconvénient : dépendance vis-à-vis de la qualité du modèle
- Filtre de Kalman
- ✓ *Observateurs asymptotiques* :
- Avantage : robustesse vis-à-vis de la qualité du modèle
- Inconvénient : vitesse de convergence fixée par les conditions opératoires
- Observateur asymptotique proposé par Bastin et Dochain (1990)
- Observateurs hybrides:
- Avantage : combinaison des avantages de l'observateur exponentiel et asymptotique
- Observateur par intervalles





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

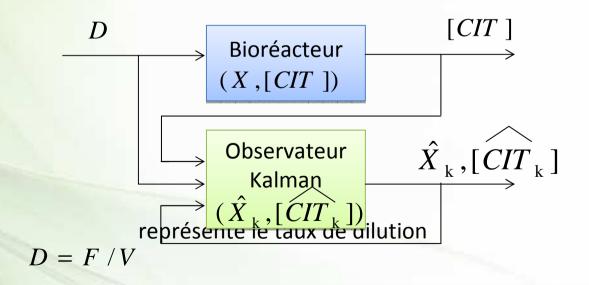
Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Filtre de Kalman

- Bioprocédé considéré :
- Modèle fortement non-linéaire et dynamique lente induisant des mesures à des intervalles temporels importants
- Application du filtre de Kalman étendu discret
- Discrétisation du modèle par la méthode d'Euler







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Principe de l'observateur Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

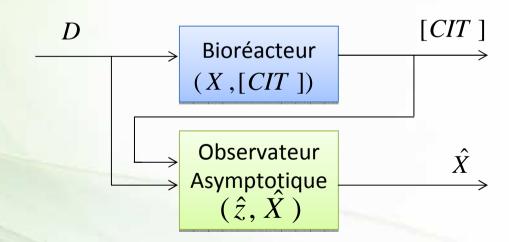
Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Observateur asymptotique

- Principe : stratégie d'estimation en boucle ouverte développée par Bastin et Dochain (1990) qui utilise une partie du modèle en éliminant certaines incertitudes par les mesures disponibles
- Structure : transformation de la représentation d'état du système avec introduction d'un état auxiliaire noté z







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Principe de l'observateur Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles Essais de simulation Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Observateur asymptotique

- Application au bioprocédé considéré :
- Equation d'état du système

$$(S) \begin{cases} \frac{\mathrm{d} X}{\mathrm{d} t} = \mu X - \frac{F}{V} X \\ \frac{\mathrm{d} [CIT]}{\mathrm{d} t} = -\mu \frac{X}{Y_{X/CIT}} - \frac{F}{V} [CIT] + k_L a \left([CO_2^*] - [CO_2] \right) \end{cases}$$

Introduction d'un état auxiliaire z

$$z = X + Y_{X/CIT}[CIT]$$

Structure de l'observateur asymptotique

$$(O_z) \begin{cases} \dot{\hat{z}} = -\hat{D}\hat{z} + Y_{X/CIT}k_L a \left[CO_2 \right]^* - \left[CO_2 \right] \\ \hat{X} = \hat{z} - Y_{X/CIT} \left[CIT \right] \end{cases}$$

Vitesse de convergence dépendante des conditions opératoires





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

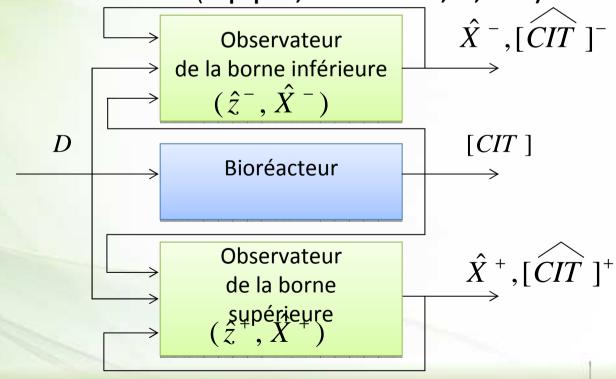
Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Observateur par intervalles

- Principe : stratégie d'estimation qui permet de reconstruire des limites supérieure et inférieure de l'état non mesuré à partir des mesures disponibles
- **Structure** : couplage de deux dynamiques auxiliaires
- Travaux issus de (Rapaport, A. et Dochain, D., 2005)







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Observateur par intervalles

- Application au bioprocédé considéré :
- Représentation d'état issue de l'observateur asymptotique :

$$(S_{z,X}) = \begin{cases} \dot{z} = -Dz + Y_{X/CIT} k_L a ([CO_2]^* - \alpha [CIT]) \\ \dot{X} = \mu ([CIT], X) X - DX \end{cases} \text{ avec } \frac{[CIT] = \frac{z - X}{Y_{X/CIT}}}{1 + K_1 / [H^+] + K_1 K_2 / [H^+]^2}$$

Cas d'incertitudes uniquement sur les paramètres du modèle **de « μ »** : considérant $X_0^- \le X_0 \le X_0^+$, la structure de l'observateur par intervalles est définie par :

$$(O_{z,X}) = \begin{cases} \dot{z}^{\pm} = -D\hat{z}^{\pm} + Y_{Y_{X/CIT}} k_L a \cdot ([CO_2]^* - \alpha \cdot \frac{\hat{z}^{\pm} - \hat{X}^{\pm}}{Y_{X/CIT}}) + g_1^{\pm} \cdot ([CIT]_{mes} - \frac{\hat{z}^{\pm} - \hat{X}^{\pm}}{Y_{X/CIT}}) \\ \dot{\hat{X}}^{\pm} = \mu^{\pm}(y, \hat{X}^{\pm}) \hat{X}^{\pm} - D\hat{X}^{\pm} + g_2^{\pm} \cdot ([CIT]_{mes} - \frac{\hat{z}^{\pm} - \hat{X}^{\pm}}{Y_{X/CIT}}) \end{cases}$$

Initialisation: $X^{\pm}(0) = X_0^{\pm} \quad z^{\pm}(0) = X_0^{\pm} + Y_{X/CIT} \cdot [CIT]_{mes}(0)$





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Observateur par intervalles

- L'observateur par intervalles doit satisfaire deux conditions :
- Condition de coopérativité : termes diagonaux de la matrice jacobienne de la dynamique de l'erreur sont positifs

$$\begin{cases} g_1^{\pm} \ge -\alpha Y_{X/CIT} k_L a \\ g_2^{\pm} \le 0 \end{cases}$$

Condition de stabilité : Matrice jacobienne *J* doit être Hurwitz

$$\begin{cases} Trace(J) < 0 \\ Det(J) > 0 \end{cases}$$





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Observateur par intervalles

Condition suffisante sur les gains de l'observateur

$$\begin{cases} g_1^{\pm} \geq -\alpha Y_{X/CIT} k_L a \\ \\ g_2^{\pm} < \min \begin{bmatrix} 0 \\ g_1^{\pm} + Y_{X/CIT} \left(2D + \alpha k_L a - \mu_{\max}^{\pm}\right) \\ \left(DY_{X/CIT} + g_1^{\pm} + \alpha k_L a Y_{X/CIT} \left(1 - \frac{\mu_{\max}^{\pm}}{D}\right) \right] \end{cases}$$

L'observateur par intervalles permet de générer un intervalle **stable** permettant de borner la trajectoire de l'état à estimer

$$\begin{cases} X^{-}(t) \le X(t) \le X^{+}(t), & \forall t \ge 0 \\ et \ X^{+}(t) - X^{-}(t) & stable \end{cases}$$

Borne supérieure de l'erreur d'estimation

$$E_X^+ = -(0 \quad 1)(J^{++})^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ \Lambda \end{pmatrix}$$





- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Principe de l'observateur

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. S<mark>ynthèse d'une loi de commande</mark>
- VI. Conclusions & perspectives

Observateur par intervalles

- Objectifs de la synthèse de l'observateur :
- ✓ Améliorer la convergence exponentielle de l'observateur
- ✓ Minimiser l'intervalle entre la borne supérieure et inférieure
- ✓ Garantir les conditions de coopérativité et de stabilité
- Optimisation du réglage de l'observateur par intervalles :
- Réglage par des gains fixes :
- ✓ Choix des valeurs propres de la matrice jacobienne
- ✓ Minimisation de l'erreur asymptotique
- Inconvénients du réglage par gains fixes :
- ✓ Peu robuste vis-à-vis des incertitudes sur le modèle
- ✓ Gains déterminés pour un taux de dilution constant





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Principe de l'observateur Filtre de Kalman Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Observateur par intervalles

- **Solution**: réglage par gains variables
- Approche d'optimisation par application du filtre de Kalman :
- Avantage : modélisation des incertitudes sur le modèle via des bruits additifs fictifs
- Inconvénients :
- ✓ Perte éventuelle de la condition de coopérativité
- Réglage des matrices de covariance du bruit d'état Q et du bruit de mesure *R* : choix empirique





- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Principe de l'observateur

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

Paramètres	Valeur	Unité
$I_{ m in}$	90	μΕ. m ⁻² . s ⁻¹
$P_{ m CO2}$	0,05	atm
pН	6	sans dimension
V	9,6	L
$A_{ m r}$	0,3	m ²
$Y_{\mathrm{X/CIT}}$	1211	10 ⁹ cell. mol ⁻¹
$k_{\rm L}a$	1,4	h ⁻¹
H	29	atm. L. mol ⁻¹
X_0	20	10 ⁹ cell.L ⁻¹
$[CIT]_0$	2	mmol.L ⁻¹

- ✓ Temps d'échantillonnage T_e = 1 min pour la dynamique et τ = 10 min pour les mesures
- Bruit de mesures : bruit blanc gaussien appliqué aux mesures du CIT avec un écart type de 1%





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

 \checkmark Profil du débit d'alimentation F:

$$F = \begin{cases} 0.1 \text{L.h}^{-1} & si \ 0 \le t \le 160 \text{h} \\ 0.5 \text{L.h}^{-1} & si \ 160 \text{h} \le t \le 340 \text{h} \\ 0.1 \text{L.h}^{-1} & si \ 340 \text{h} \le t \end{cases}$$

- \checkmark Réglage des pondérations : Q, R et P_0 choisis empiriquement
- Q: matrice de covariance du bruit d'état : qualité du modèle
- ✓ Petit si modèle fiable
- ✓ Grand si modèle non fiable.

R : matrice de covariance du bruit des mesures : qualité des mesures

- ✓ Petit si mesures fiables
- ✓ Grand si mesures non fiables
- P_0 : matrice de covariance de l'erreur de prédiction initiale : confiance à l'initialisation
- ✓ Petit si confiance élevée à l'initialisation
- ✓ Grand si faible confiance à l'initialisation





- Introduction
- Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

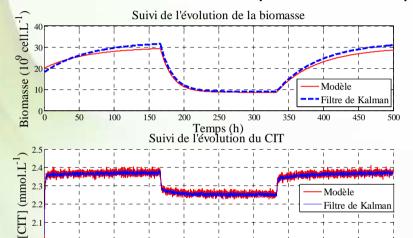
Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

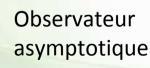
Avec 20% de désadaptation sur les paramètres du modèle

Filtre de Kalman



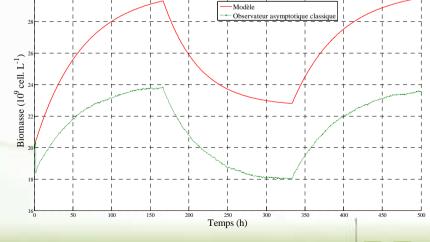
Temps (h)

Filtre de Kalman



100

150







- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Principe de l'observateur

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

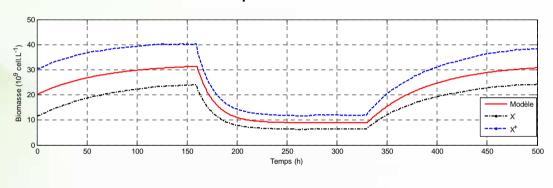
Essais de simulation

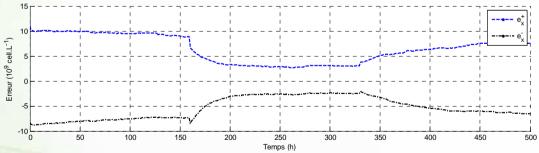
Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

✓ Avec 20% de désadaptation sur les paramètres du modèle
 Observateur par intervalles





- > Bonne performance de l'observateur par intervalles
- > Sensibilité du filtre de Kalman à la qualité du modèle
- ightharpoonup Qualité d'estimation de l'observateur asymptotique présente une forte sensibilité à la valeur du $k_{\rm L}a$ et $Y_{\rm X/CIT}$





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Principe de l'observateur

Filtre de Kalman

Observateur asymptotique

Observateur par intervalles

Essais de simulation

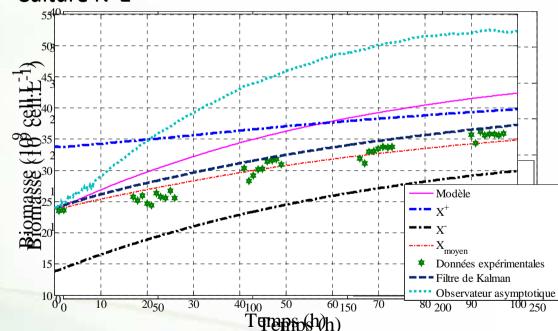
Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Validation expérimentale

Deux campagnes de cultures de Chlorella vulgaris avec deux débits d'alimentation différents : culture N°1 avec F = 0,15 L.h⁻¹ et culture N°2 avec $F = 0.12 \text{ L.h}^{-1}$





- Bonne qualité d'estimation du filtre de Kalman, meilleure estimation pour l'observateur par intervalles
- Mauvaise convergence de l'observateur asymptotique GT CPNL







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire

Principe de l'observateur Filtre de Kalman Observateur asymptotique Observateur par intervalles

Essais de simulation

Validation expérimentale

- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Conclusions observateur

- Le Filtre de Kalman étendu est robuste vis-à-vis des incertitudes sur $k_{\rm L}a$ et $Y_{
 m X/CIT}$ mais les performances d'estimation dépendent de la qualité du modèle de « µ »
- L'observateur asymptotique est ne dépend pas des incertitudes des paramètres du modèle de « µ » mais la qualité d'estimation est fortement sensible à la valeur des paramètres $k_{\rm L}a$ et $Y_{\rm X/CIT}$
- **Solution**: observateur par intervalles
- Réglage des gains selon trois approches : réglage par gains fixes et variables
- ➤ Validation expérimentale : l'observateur par intervalles est retenu pour la synthèse d'une loi de commande





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Mise en œuvre de la CPNL Essais de simulation Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Objectif de la commande

Objectif: optimisation de la productivité de la culture sous les conditions opératoires choisies afin de maximiser la fixation de CO_2 .

$${D, X^*(0)} = Arg \max (R_X = X(t_f)D)$$

- Recherche du point de fonctionnement optimal
- * Approche : synthèse d'une loi de commande robuste qui permet de maximiser la productivité
- Solution retenue : loi de commande prédictive non-linéaire « CPNL »





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Mise en œuvre de la CPNL

Essais de simulation

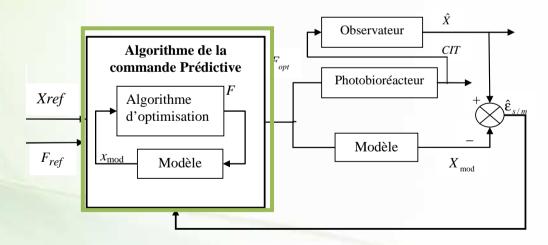
Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Mise en œuvre de la CPNL

- Minimisation d'un critère quadratique à horizon fini pour la détermination de la commande « optimale »
- Résolution d'un problème d'optimisation non-linéaire en ligne, tout en respectant les contraintes opératoires du procédé
- Détermination d'une séquence de commandes futures, dont seule la première valeur est appliquée sur le système
- Stratégie de l'horizon fuyant







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Mise en œuvre de la CPNL

Essais de simulation

Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives



Mise en œuvre de la CPNL

* Résolution d'un problème d'optimisation : minimisation d'un critère quadratique

$$\min_{U} \sum_{j=1}^{N} (X_{ref_{k+j}} - \tilde{X}_{k+j})^{2} + \lambda \sum_{j=1}^{N} (F_{ref_{k+j-1}} - F_{k+j-1})^{2}$$

$$S.c. \begin{cases} \tilde{X}_{k+1} = H \ f_{d}(\tilde{X}_{k}, F_{k}) \\ \vdots \\ \tilde{X}_{k+N} = H \ f_{d}(\tilde{X}_{k+N-1}, F_{k+N-1}) \\ F_{k} \geq 0, \ \forall \ k \in IN, \ \tilde{X}_{k} \geq 0, \ \forall \ k \in IN \end{cases}$$

$$H = [0 \ 1]$$

$$U = \left\{ \widetilde{X}_{k+1}, \dots, \widetilde{X}_{k+N}, F_k, \dots, F_{k+N-1} \right\}$$
 vecteur d'optimisation

Prédiction du vecteur d'état

 \tilde{X} biomasse prédite par le modèle

 X_{ref} biomasse de référence

horizon de prédiction N

facteur de pondération sur la commande





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Mise en œuvre de la CPNL

Essais de simulation

Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Mise en œuvre de la CPNL

- Vers la robustification de la CPNL :
- Signal D.O.M « Différence Objet-Modèle » : prise en compte de l'erreur entre le modèle et le système

$$\widetilde{X}_{k+j} = X_{\operatorname{mod}_{k+j}} + \underbrace{(X_k - X_{\operatorname{mod}_k})}_{\varepsilon_{v/m}(k)}, \quad j = \overline{1, N}$$

Nouvelle structure du problème d'optimisation :

$$\min_{U} \sum_{j=1}^{N} (X_{ref_{k+j}} - \widetilde{X}_{k+j})^{2} + \lambda \sum_{j=1}^{N} (F_{ref_{k+j-1}} - F_{k+j-1})^{2}$$

$$X_{mod_{k+1}} = H f_{d}(x_{mod_{k}}, F_{k})$$

$$\vdots$$

$$X_{mod_{k+N}} = H f_{d}(x_{mod_{k+N-1}}, F_{k+N-1})$$

$$F_{k} \ge 0, \quad \forall k \in IN, \quad x_{k} \ge 0, \quad \forall k \in IN$$

$$H = [0 \quad 1]$$





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Mise en œuvre de la CPNL

Essais de simulation Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Mise en œuvre de la CPNL

- **❖ Problématique de la résolution du problème d'optimisation**
- ■Choix du pas de discrétisation : la dynamique lente entraîne une augmentation de l'horizon de prédiction
- Présence de contraintes non linéaires : augmentation du temps de calcul en temps réel lors de la résolution du problème d'optimisation
- Solution: utilisation de l'approche CVP (Control Vector Parameterization)
 - Pas nécessaire de discrétiser le modèle continu : seules les valeurs de commande sont discrétisées
 - Les variables d'état prédites sont déterminées par l'intégration numérique des équations différentielles
 - Commande approchée par une fonction constante par morceau
 - > Application d'une période d'échantillonnage élevée





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Mise en œuvre de la CPNL

Essais de simulation Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Mise en œuvre de la CPNL

Problème de programmation non-linéaire :

$$\min_{U} \sum_{j=1}^{N} (X_{ref_{k+j}} - \tilde{X}_{k+j})^{2} + \lambda \sum_{j=1}^{N} (F_{ref_{k+j-1}} - F_{k+j-1})^{2}$$

$$s.c. F_{k} \ge 0 \quad \forall k \in IN$$

$$U' = \{F_{k}, \dots, F_{k-N-1}\}$$

Simplification de la structure : changement de variable

$$F = \exp(v)$$

La formulation du problème d'optimisation d'un critère quadratique non contraint

$$\min_{U^{"}} \sum_{j=1}^{N} (X_{ref_{k+j}} - \tilde{X}_{k+j})^{2} + \lambda \sum_{j=1}^{N} (F_{ref_{k+j-1}} - \exp(v_{k+j-1}))^{2}$$

$$U^{"} = \{v_{k}, \dots, v_{k+N-1}\}$$





Introduction

- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Objectif de la commande

Mise en œuvre de la CPNL

Essais de simulation

Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

Paramètres	Valeur	Unité
$I_{ m in}$	90	μΕ. m ⁻² . s ⁻¹
$P_{ m CO2}$	0,05	atm
pН	6,5	sans dimension
V	9,6	L
$A_{ m r}$	0,3	m ²
$Y_{ m X/CIT}$	1211	10 ⁹ cell. mol ⁻¹
$k_{ m L}a$	1,4	h ⁻¹
H	29	atm. L. mol ⁻¹
X_0	19	10 ⁹ cell.L ⁻¹
$[CIT]_0$	2	mmol.L ⁻¹

- Temps d'échantillonnage $T_{\rm e}$ = 0,5 min pour la dynamique et $T_{\rm e}$ = 5 min pour les mesures ; durée de simulation = 20 h
- Profil de référence de la biomasse

$$X_{\text{ref}} = \begin{cases} 20 \ 10^{9} \text{ cell.L}^{-1} & \text{si } 0 \le t \le 5\text{h} \\ 21 \ 10^{9} \text{ cell.L}^{-1} & \text{si } 5\text{h} \le t \le 12\text{h} \\ 20 \ 10^{9} \text{ cell.L}^{-1} & \text{si } 12\text{h} \le t \end{cases}$$





- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

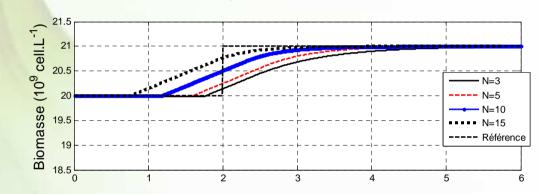
Essais de simulation

Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

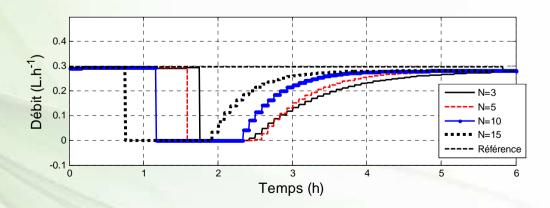
VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

- Choix des paramètres de la CPNL :
 - Choix de N, avec $\lambda = 1$











- Introduction
- Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

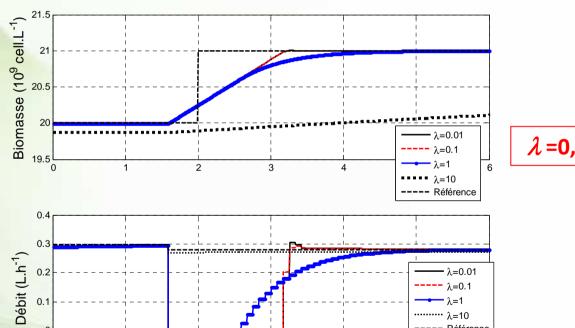
Essais de simulation

Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

- Choix des paramètres de la CPNL :
 - Choix de λ , avec N = 5



Temps (h)

 $\lambda = 0,1$

····· λ=10 ---- Référence

-0.1 L





- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

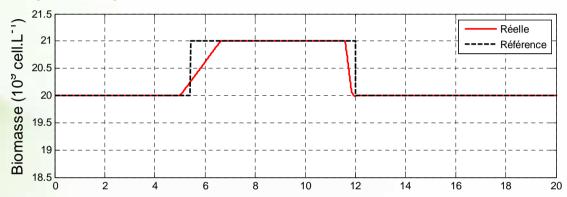
Essais de simulation

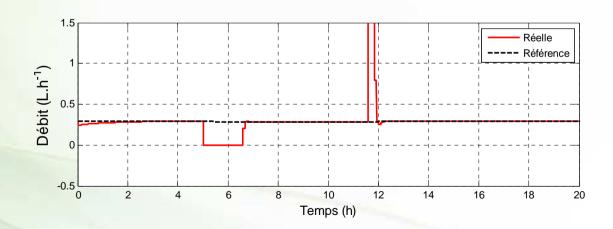
Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

✓ Analyse des performances dans le cas nominal :





> Bonnes performances de la loi de commande prédictive







- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Essais de simulation

Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

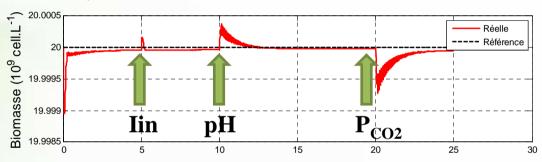
VI. Conclusions & perspectives

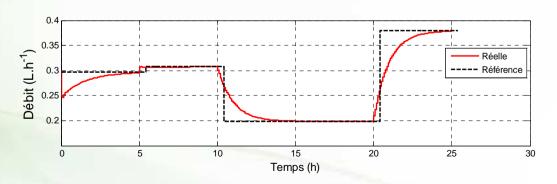
Essais de simulation

✓ Analyse des performances en présence de perturbation, cas

nominal:

$$\begin{cases} I_{in} \text{ de } 90 \text{ à } 100 \mu \text{E.m}^{-2}.\text{s}^{-1} & t = 5\text{h} \\ \text{pH de } 6.5 \text{ à } 6 & t = 10\text{h} \\ P_{CO2} \text{ de } 0.05 \text{ à } 0.1 \text{ atm} & t = 20\text{h} \end{cases}$$





> Bonnes performances de la loi de commande prédictive





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Essais de simulation

Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

- ✓ Analyse de la robustesse de la CPNL : incertitudes de 30% des paramètres μ_{max} , K_{E} et K_{CL} et 20% des paramètres $k_{\text{L}}a$ et $Y_{\text{X/CIT}}$
- 3 structures testées
- Structure de commande non couplée à une stratégie d'estimation : mesure de la concentration de biomasse disponible en ligne
- CPNL couplée à un filtre de Kalman
- CPNL couplée à l'observateur par intervalles







- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

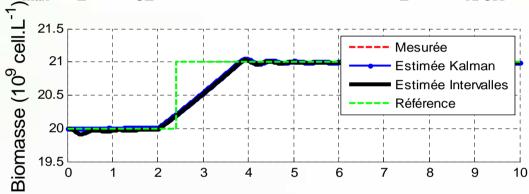
Essais de simulation

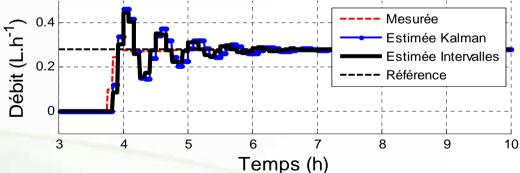
Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

🗸 Analyse de la robustesse de la CPNL : incertitudes de 30% des paramètres $\mu_{\rm max}$, $K_{\rm E}$ et $K_{\rm CL}$ et 20% des paramètres $k_{\rm L}a$ et $K_{\rm CL}$





Dégradation des performances de la loi de commande prédictive suite à l'utilisation d'une stratégie d'estimation, mais de bonnes performances globalement





- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

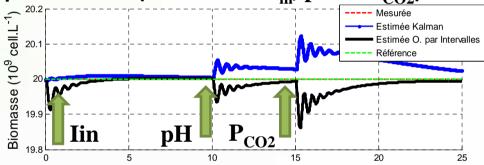
Essais de simulation

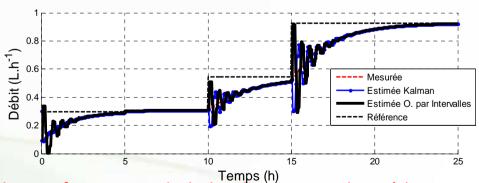
Comparaison avec la GMC Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Essais de simulation

- ✓ Analyse de la robustesse de la CPNL : incertitudes de 30% des paramètres $\mu_{\rm max}$, $K_{\rm E}$ et $K_{\rm CL}$ et 20% des paramètres $k_{\rm L}a$ et $K_{\rm L}a$ et $K_{\rm CL}$
- \checkmark Présence de perturbation (variation de $I_{\rm in}$, pH et $P_{\rm CO2}$)





Dégradation des performances de la loi de commande prédictive suite à l'utilisation d'une stratégie d'estimation, mais de bonnes performances globalement





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Objectif de la commande Mise en œuvre de la CPNL Essais de simulation

Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Comparaison avec la GMC

- Objectif: valoriser les performances de la CPNL
- Commande par Modèle Générique (GMC)
- Principe: imposer une trajectoire de référence à la variable à asservir

$$F = -\frac{V}{X} \left[G_1(X_{ref} - X) + G_2 \int_0^t (X_{ref} - X) dt - \mu X \right]$$

- \checkmark X_{ref} : valeur de référence de la concentration de biomasse
- \checkmark G_1 et G_2 : paramètres de réglage de la GMC

$$\begin{cases} G_1 = 2\xi \,\omega_0 \\ G_2 = \omega_0^2 \text{ avec} \end{cases}$$

coefficient d'amortissement d'un deuxième ordre équivalent

 ω_0 pulsation propre d'un deuxième ordre équivalent





- Introduction
- Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

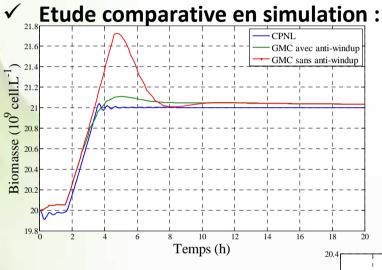
Essais de simulation

Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Comparaison avec la GMC



Réponse à un échelon de montée de 20 à 21 10^9 cell. L⁻¹ à t = 1.6 h

Réponse à un échelon de descente de 20 à 19 109 cell. L-1 à t = 1,6 h

> Productivité « cumulée » R_{x,c} $(g.L^{-1})$

CPNL 0,18

0,09 **GMC**

CPNL GMC avec anti-windup GMC sans anti-windup cell. L^{-1}) Biomasse (10^9)

Performances légèrement supérieures de la CPNL en termes de temps de réponse et de dépassement 55 GT CPNL





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Objectif de la commande Mise en œuvre de la CPNL Essais de simulation

Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Validation expérimentale

- Implantation de la CPNL couplée à une stratégie d'estimation sur le même banc d'essai
- Réglage similaire de la CPNL par rapport aux essais de simulation
- Objectif de la commande : régulation de la concentration de biomasse autour de 20 109 cell. L-1 en forçant le débit d'alimentation à suivre une trajectoire de référence
 - \triangleright Productivité visée : $R_x = 0,19 \text{ g.L}^{-1}.j^{-1}$
 - Analyse des performances de la CPNL par des tests de variation de consigne en échelon descendant
 - Temps d'échantillonnage fixé à 5 min





- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Mise en œuvre de la CPNL

Essais de simulation

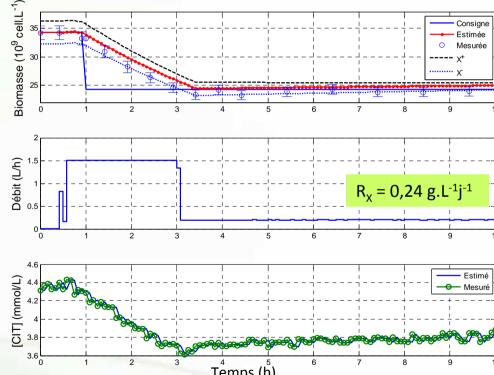
Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Validation expérimentale

✓ Analyse des performances de la CPNL couplée à l'observateur par intervalles : réponse à un échelon descendant de 34,2 à 24,2 10° cell. L-¹à t = 1h



- ➤ Bonnes performances de la CPNL avec un faible dépassement et un temps de réponse
- ► Productivité « cumulée » : R_{X,C} = 0,29 g. L⁻¹





- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Mise en œuvre de la CPNL

Essais de simulation

Comparaison avec la GMC

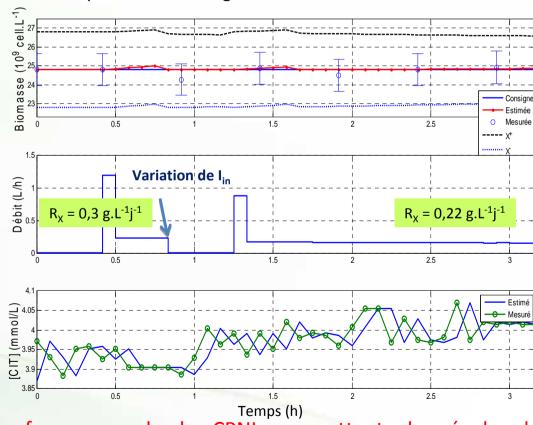
Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Validation expérimentale

✓ Analyse de la robustesse de la CPNL couplée à l'observateur par intervalles : réponse à une consigne constante de 25 109 cell. L-1

Présence de perturbation de la lumière (variation de I_{in} de 90 à 50 μ E.m⁻².s⁻¹ à t = 0,75 h)



➤ Bonnes performances de la CPNL permettant de réguler la concentration de biomasse en rejetant les effets des perturbations GT CPNL





- I. Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Objectif de la commande
Mise en œuvre de la CPNL
Essais de simulation
Comparaison avec la GMC

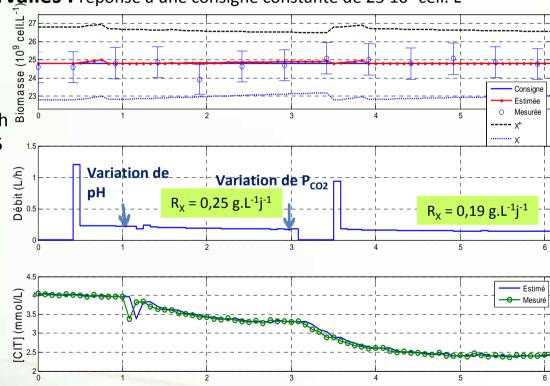
Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Validation expérimentale

✓ Analyse de la robustesse de la CPNL couplée à l'observateur par intervalles : réponse à une consigne constante de 25 109 cell. L-1

Présence de perturbation du pH et de P_{CO2} (variation de pH de 6,4 à 6 à t=1 h et de P_{CO2} de 0,05 à 0,03 à t=3h)



Temps (h)

Bonnes performances de la CPNL permettant de réguler la concentration de biomasse en rejetant les effets des perturbations







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande

Objectif de la commande Mise en œuvre de la CPNL Essais de simulation Comparaison avec la GMC

Validation expérimentale

VI. Conclusions & perspectives

Conclusions CPNL

GT CPNL

- Implantation de la CPNL sur un banc d'essai expérimental de cultures de *Chlorella vulgaris* dans un photobioréacteur instrumenté pour la régulation de la concentration cellulaire
- Bonnes performances de la loi de commande en termes de rejet de perturbations, de temps de réponse et de dépassement
- Robustesse de la CPNL vis-à-vis des incertitudes des paramètres du modèle et ceux liés à la dynamique du CIT
- Meilleures performances que la commande GMC.
- Meilleure productivité que la commande GMC.







- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Conclusion Générale

Perspectives

Conclusion Générale

- > Validation d'un **modèle** de culture pertinent
- Développement de trois stratégies d'estimation de la concentration de biomasse à partir des mesures du CIT : le filtre de Kalman étendu, l'observateur asymptotique et l'observateur par intervalles
- Performances d'estimation supérieures de l'observateur par intervalles
- Implantation de la commande prédictive non-linéaire couplée à une stratégie d'estimation pour une culture de microalgues dans un photobioreacteur





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Conclusion Générale

Perspectives

Conclusion Générale

- Apport de la stratégie de commande
- Quantification de la productivité de biomasse « R_x » et du rendement de bio- fixation de $CO_2 \ll R_{CO2} \gg 1$

	R _X (g.L ⁻¹ .j ⁻¹)	R _{CO2} (gCO ₂ .L ⁻¹ .j ⁻¹)
CPNL, avec conditions actuelles	0,2	0,37

Littérature : valorisation des résultats par rapport à une étude de la croissance de Chlorella vulgaris en présence de concentrations élevées de CO_2 (P_{CO2} = 0,13 atm ; I_{in} = 125 μ E.m⁻².s⁻¹ ; pH = 6,3)

	R _X (g.L ⁻¹ .j ⁻¹)	R _{CO2} (gCO ₂ .L ⁻¹ .j ⁻¹)
Littérature	0,38	0,97
CPNL avec les nouvelles conditions opératoires	0,64	1,15

- Résultat encourageant, mais il faut optimiser les conditions opératoires
- Quantification de l'efficacité de fixation de CO₂
- $\eta = 60\%$





- Introduction
- II. Modèle du bioprocédé
- III. Identification des paramètres
- IV. Estimation de la concentration cellulaire
- V. Synthèse d'une loi de commande
- VI. Conclusions & perspectives

Conclusion Générale

Perspectives

Perspectives

- Modélisation
- Etude de sensibilité paramétrique : hiérarchiser les paramètres selon leur influence sur le modèle
- Validation du modèle sur d'autres points de fonctionnement (domaine de validité plus significatif)
- **Estimation:**
- Validation des performances des observateurs sur un domaine sur d'autres points de fonctionnement
- Synthèse d'autres stratégies d'estimation robustes : observateur hybride et à horizon fuyant
- Commande
- Maximisation de la productivité en considérant la lumière comme variable de commande