
Table des matières

Introduction	9
Chapitre 1. Les microalgues	13
1.1. Définition	13
1.2. Caractéristiques	14
1.3. Applications des microalgues	15
1.3.1. Domaine alimentaire	15
1.3.2. Domaine pharmaceutique	15
1.3.3. Domaine cosmétique	15
1.3.4. Domaine énergétique	16
1.3.4.1. Production de biométhane	16
1.3.4.2. Production de biocarburant	16
1.3.4.3. Production de biohydrogène	17
1.3.5. Domaine environnemental	17
1.3.5.1. Traitement des eaux usées	17
1.3.5.2. Agriculture	18
1.3.5.3. Systèmes de support de vie	18
1.3.5.4. Séquestration de CO ₂	18
1.4. Système de culture de microalgues	20
1.4.1. Systèmes ouverts	20
1.4.2. Systèmes fermés « photobioréacteurs »	22
1.4.2.1. Les photobioréacteurs tubulaires	22
1.4.2.2. Les photobioréacteurs plats	23
1.5. Facteurs influençant la culture algale	24
1.5.1. La lumière	24
1.5.2. La température	25

1.5.3. Le pH	26
1.5.4. Les nutriments	26
1.5.4.1. Le carbone	26
1.5.4.2. L'azote	27
1.5.4.3. Le phosphore	27
1.5.4.4. Les microéléments	27
1.5.5. Salinité du milieu	28
1.5.6. Agitation	28
1.5.7. Transfert gaz-liquide	29
1.6. Conclusion	29
Chapitre 2. La biofixation de CO₂	31
2.1. Sélection de l'espèce de microalgue	32
2.1.1. Activité photosynthétique	33
2.1.2. Mécanisme de concentration de CO ₂ « MCC »	33
2.1.3. Choix de l'espèce algale	34
2.2. Optimisation de la conception du photobioréacteur	37
2.3. Conclusion	38
Chapitre 3. Modélisation du bioprocédé	41
3.1. Modes de fonctionnement	41
3.1.1. Le mode <i>batch</i>	41
3.1.2. Le mode <i>fed-batch</i>	43
3.1.3. Le mode continu	43
3.2. Modélisation de la vitesse de croissance	45
3.2.1. Modèles généraux	45
3.2.1.1. Modèle de Monod	45
3.2.1.2. Modèle de Haldane	46
3.2.1.3. Modèle de Contois	46
3.2.2. Modèle de Droop	47
3.2.3. Modèle portant sur l'influence de la lumière	47
3.2.4. Modèle portant sur l'influence du carbone	48
3.2.5. Modèles portant sur l'influence simultanée de plusieurs paramètres	49
3.2.6. Choix du modèle de croissance	53
3.3. Modèles de bilan de matière	54
3.4. Identification des paramètres du modèle	55
3.5. Exemple : culture de <i>Chlorella vulgaris</i>	57
3.5.1. Dispositif expérimental	57

3.5.2. Modélisation	60
3.5.3. Identification paramétrique	62
3.5.3.1. Identification du coefficient $k_L a$	62
3.5.3.2. Identification du rendement de conversion $Y_{X/CIT}$	63
3.5.3.3. Identification des paramètres du modèle de croissance	64
3.6. Conclusion	68
Chapitre 4. Estimation de la concentration cellulaire	69
4.1. Généralités sur l'estimation	69
4.2. Etat de l'art	72
4.3. Filtre de Kalman	74
4.3.1. Principe	74
4.3.2. Filtre de Kalman discret	75
4.3.3. Filtre de Kalman étendu discret.	77
4.3.4. Réglage du filtre de Kalman.	78
4.3.5. Exemple de mise en œuvre	79
4.4. Observateur asymptotique	81
4.4.1. Principe	81
4.4.2. Exemple de mise en œuvre	82
4.5. Observateur par intervalles.	84
4.5.1. Principe	84
4.5.2. Exemple de mise en œuvre	86
4.5.2.1. Conception de l'observateur	87
4.5.2.2. Stabilité de l'observateur	89
4.5.2.3. Choix des gains de l'observateur	92
4.6. Application à la culture de <i>Chlorella vulgaris</i>	95
4.7. Conclusion	98
Chapitre 5. Commande du bioprocédé	101
5.1. Détermination des conditions optimales de fonctionnement	101
5.1.1. Conditions opératoires optimales.	102
5.1.2. Point de fonctionnement optimal	102
5.2. Généralités sur la commande de systèmes.	103
5.3. Etat de l'art	105
5.4. Commande par modèle générique (GMC).	107
5.4.1. Principe	107
5.4.2. Avantages et inconvénients	108
5.4.3. Exemple de mise en œuvre	109
5.5. Commande linéarisante entrée/sortie.	110

5.5.1. Principe	110
5.5.2. Avantages et inconvénients	112
5.5.3. Exemple de mise en œuvre	112
5.6. Commande prédictive non linéaire	114
5.6.1. Principe	114
5.6.2. Commande prédictive non linéaire (CPNL)	116
5.6.2.1. Formulation du problème	117
5.6.2.2. Résolution	119
5.6.3. Avantages et inconvénients	120
5.6.4. Exemple de mise en œuvre	120
5.7. Application à la culture de <i>Chlorella vulgaris</i>	126
5.7.1. Performances de la commande GMC	127
5.7.2. Performances de la commande prédictive.	130
5.8. Conclusion	135
Conclusion	137
Bibliographie	141
Index	155