

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF-1

FACULTE DE TECHNOLOGIE

THESE

Présenté au département d'Electronique

Pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT LMD

Filière : Electronique

Option : Electronique et commande industrielle

Par

BOUYAHIA Semcheddine

THEME

***Commande et supervision d'un procédé
biotechnologique***

Application à la production d'un biogaz

Soutenue le 01/07/2020 devant le Jury:

KRIM Fateh	Professeur	Univ. F. Abbas Sétif 1	Président
SEMCHEDDINE Samia	Professeur	Univ. F. Abbas Sétif 1	Encadreur
MENDIL Boubaker	Professeur	Univ. Bejaia	Examineur
MESSOUS Ammar	M.C.A	Univ. F. Abbas Sétif 1	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce travail

À la mémoire de ma mère

Mon cher père

Mes chers frères et sœurs

Mes amis, mes collègues et à tous ceux qui m'ont encouragé

Remerciements

Je remercie tout d'abord **ALLAH** de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme cette thèse du doctorat.

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration de ma thèse et notamment mon directeur de thèse **Pr. SEMCHEDDINE Samia**, pour son intérêt et son soutien, sa grande disponibilité et ses nombreux conseils durant la réalisation de ma thèse.

Je tiens également à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer cette thèse :

Monsieur **KRIM Fateh**, Professeur à l'Université de Sétif 1, d'avoir accepté de juger mon travail et de présider le jury de soutenance de cette thèse. Messieurs **MENDIL Boubaker**, Professeur à l'Université de Bejaiaia, et **MESSOUS Ammar**, M.C.A à l'Université de Sétif 1, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à **TALBI Billel**, **BOUTALBI Oussama**, **LAIB Abdelbaset**, **SAHLI Abdeslem**, **BELAOUT Abdesslam**, **ARABI Abderrazak**, **FEROURA Hamza** et **BEY Habib** pour leurs conseils au cours de l'élaboration de cette thèse.

Enfin, pour tous ceux qui, de près ou de loin, ont rendu ce travail possible.

Table des matières

Dédicaces	ii
Remerciements.....	iii
Table des matières	iv
Liste des figures	VII
Liste des tableaux.....	IX
INTRODUCTION GENERALE	1
<i>CHAPITRE I</i>	5
CHAPITRE I PRINCIPE DE LA DIGESTION ANAEROBIE	5
I.1. Introduction.....	5
I.2. La digestion anaérobie	5
I.2.1. Historique	5
I.2.2. Définition.....	6
I.2.3 Principe de production de biogaz.....	9
I.2.4 Avantages et limites de la digestion anaérobie.....	9
I.3. Etapes de la digestion anaérobie.....	10
I.3.1. L'étape hydrolytique	10
I.3.2. L'étape acidogène.....	10
I.3.3. L'étape acétogène	11
I.3.4. L'étape méthanogène.....	11
I.4. Paramètres physico-chimiques de la digestion anaérobie	13
I.4.1. Température	13
I.4.2. Le potentiel hydrogène (pH)	14
I.4.3. Substrat.....	14
I.4.4. Agitation	15
I.4.5. Humidité	15
I.5. Mode de digestion anaérobie.....	15
I.5.1. Mode continu	17
I.5.2. Mode discontinu.....	17
I.5.3. Mode semi-continu	17

I.5.4. Mode perfusé	17
I.6. Caractéristiques du biogaz	18
I.7. Utilisation d'un biogaz.....	18
I.8. Conclusion.....	20
 CHAPITRE II	21
MODELISATION DES PROCEDES DE DIGESTION	
ANAEROBIE	21
II.1 Introduction	21
II.2. Modèle de la digestion anaérobie	22
II.2.1 Modèle cinétique enzymatique	23
II.2.2 Du chémostat au méthaniseur	24
II.2.3 Modèle ADM1.....	28
II.2.3.1 Structure du modèle ADM1.....	28
II.2.3.2 Choix de modélisation	30
II.2.4 Modèle AM2.....	31
II.2.4.1 Description du modèle AM2.....	31
II.2.4.2 Equations du modèle dynamique	31
II.2.5 Modèle tri-phasique.....	35
II.2.6 Choix d'un niveau de description et complexité associée	35
II.2.7 Modèle réduit et sa validation	356
II.3 Conclusion	37
 CHAPITRE III	38
MODE GLISSANT	38
III.1 Introduction.....	38
III.2 Mode glissant d'ordre un	38
III.2.1 Formulation de problème	39
III.2.2 Conception SMC.....	39
III.2.2.1 Surface de glissement.....	40
III.2.2.2 Loi de commande.....	42
III.2.2.3 Commande par mode glissant à base de la commande équivalente	43
III.3 Problème de chattering	45
III.3.1 Approche par couche limite.....	46

III.3.2 Approche basée sur l'observateur	46
III.3.3 Méthode de gain dépend de l'état.....	46
III.4 Commande par mode glissant d'ordre supérieur.....	47
III.4.1 Mode glissant d'ordre deux	47
III.5 Algorithme Super-Twisting.....	51
III.5.1 Différentiateurs exact par mode glissant.....	52
III.6 Adaptation du mode glissant	53
III.7 Conclusion	54
<i>CHAPITRE IV</i>	55
COMMANDE PAR MODE GLISSANT D'ORDRE UN	55
IV.1 Introduction	56
IV.2 Modèle dynamique du bioprocédé.....	57
IV.3 Contrôleurs SMC et gain adaptatif	57
IV.3.1 Loi SMC	58
IV.3.2 Loi SMC adaptatif	59
IV.3.3 Analyse de stabilité	59
IV.4 Résultats et discussion:.....	61
IV.5 Conclusion	68
<i>CHAPITRE V</i>	68
COMMANDE PAR MODE GLISSANT D'ORDRE DEUX	68
Introduction.....	69
V.2 Conception du contrôle utilisant un algorithme de super twtsting	69
V.2.1 Algorithme de super twisting.....	69
V.2.2Analyse de la stabilité.....	71
V.3 Conception de contrôle utilisant un algorithme adaptatif de super twisting.....	73
V.4 Résultats et discussion	74
V.5 Conclusion.....	81
CONCLUSION GENERALE	83
Bibliographies.....	84

Liste des figures

Figure 1. Technologies de conversion de la biomasse et des déchets.....	2
Figure 2. Principaux produits de la digestion anaérobie et leur utilisation facultative.....	2
Figure I.1 La conversion de la matière organique dans la digestion anaérobie.	7
Figure. I.2 production d'un biogaz dans un digesteur expérimental.	8
Figure. I.3 Comparatif des procédés anaérobie et à boues activées.....	9
Figure I.4 Les étapes de la digestion anaérobie.	12
Figure I.5 Effet de la température sur le taux de croissance des méthanogènes.	14
Figure I.6 Schéma représentatif d'un bioprocédé.	16
Figure I.7 Différents modes de fonctionnement d'un bioprocédé.	16
Figure I.8 Les équivalences énergétiques du méthane.	19
Figure II.1 Type de modèle selon les phases de la méthanisation prises en compte.....	23
Figure II.2 Processus biochimiques et physiques pris en compte dans ADM1.	29
Figure II.3 Processus biochimiques dans ADM1.....	30
Figure II.4 Schéma du processus de la digestion anaérobie à 2 phases.	32
Figure III.1 l'idée de mode glissant.	41
Figure III.2 Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande d'état.	42
Figure III.3 Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état.	43
Figure III.4 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.....	43
Figure III.5 Fonction <i>sign</i>	44
Figure III.6 Phénomène de chattering.	46
Figure III.7 Couche limite.....	46
Figure III.8 Augmentation du degré relatif.....	48
Figure III.9 Algorithme du Twisting : plan de phase (s, s')	49
Figure III.10 Algorithme sous-optimal : plan de phase (s, s').....	50
Figure III.11 Algorithme du Super Twisting : plan de phase (s, s')	52
Figure III.12 Schéma de principe du différentiateur robuste.....	53
Figure IV.1 Réponse temporelle de la concentration de biomasse avec SMC et AGSMC, (b) zoom en vue de (a).....	62

Figure IV.2 Erreur d'évolution de la biomasse avec SMC et AGSMC.....	63
Figure IV.3 Évolution temporelle de la concentration du substrat avec SMC et AGSMC, (b) zoom en vue de (a).	63
Figure IV.4 (a) Contrôle de l'action du SMC et de l'AGSMC, (b) zoom en vue de (a).....	64
Figure IV.5 Variation du gain AGSMC du contrôleur.....	65
Figure IV.6 Évolution de la concentration de biomasse sous SMC en cas perturbé et non perturbé.	66
Figure IV.7 Évolution de la concentration de la biomasse sous AGSMC dans les cas perturbés et non perturbés.	66
Figure IV.8 Évolution de la concentration du substrat avec SMC et ASMC dans le cas de perturbation, (b) zoom en vue de (a).	67
Figure IV.9 Variation du gain AGSMC du contrôleur en cas perturbé et non perturbé.	67
Figure IV.10 (a) Action de contrôle du SMC et de l'AGSMC en cas de perturbation, (b).	68
Figure V.1 Structure de contrôle de la stratégie ASTA pour un bioprocédé non linéaire	74
Figure V.2 Évolution de la concentration de la biomasse avec SMC et STA.	76
Figure V.3 Le signal de commande pour le SMC et le STA.....	77
Figure V.4 Zoom du signal de commande pour le SMC et le STA.....	77
Figure V.5 Evolution de la concentration de la biomasse avec SMC et STA dans le cas incertain.	78
Figure V.6 Le signal de commande pour le SMC et le STA dans le cas incertain.	78
Figure V.7 Zoom du signal de commande pour le SMC et le STA dans le cas incertain.	79
Figure V.8 Evolution de la concentration de biomasse avec SMC et STA dans le cas de perturbation incertaine avec grande perturbation.	79
Figure V.9 Évolution de la concentration de la biomasse avec STA et ASTA dans le cas incertain.	80
Figure V.10 Le signal de commande du STA et de l'ASTA dans le cas incertain.	80
Figure V.11 Zoom du signal de commande du STA et de l'ASTA dans le cas incertain.	81
Figure V.12 Variation du gain pour le STA et l'ASTA.	81

Liste des tableaux

Tableau I.1 Rendement de production de biogaz en fonction de la nature du substrat.....	15
Tableau I.2 Composition générale du biogaz.....	18
Tableau II.1 Différences de complexité des modèles ADM1 et AM2.....	36

Introduction générale

Le terme “Énergie renouvelable” désigne une énergie qui provient de ressources naturellement réapprovisionnés sur une échelle de temps humaine. Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux. Premièrement, ils augmentent l'indépendance et l'approvisionnement énergétique en fournissant des moyens de production locaux, et d'autre part, ils ont un impact positif sur la planète parce qu'ils remplacent les combustibles fossiles, et donc, limitent les émissions de gaz à effet de serre.

Dans ce contexte, l'application de la biotechnologie à la transformation de la biomasse est considérée comme l'une des stratégies les plus dominantes et intéressantes pour produire des énergies renouvelables qui doit être utilisée avec soin et attention [1].

La biomasse est toute matière produite biologiquement à base de carbone, d'hydrogène et d'oxygène. Elle comprend une grande variété de matériaux, le bois, les résidus forestiers, la paille, le fumier, les déchets agricoles verts, les boues d'épuration, les déchets animaux, les déchets alimentaires...etc. Ainsi, contrairement aux énergies éolienne et solaire, une disponibilité continue de l'énergie biomasse peut toujours être garantie.

En 1997, Gosh [2] a estimé que la récupération des déchets organiques et des effluents industriels pourrait réduire de 20 % le réchauffement climatique. En effet, il existe de nombreuses façons intelligentes d'utiliser la biomasse. Elle peut être utilisée directement via la combustion pour produire la chaleur, ou indirectement après sa conversion en diverses formes de biocarburants, comme illustré dans la figure 1.

Parmi les processus de conversion possibles de la biomasse, le bioprocédé de digestion anaérobie a été évalué comme l'un des technologies les plus éconergétiques et les plus bénéfiques pour l'environnement pour la production de bioénergie [3-5]. La raison pour laquelle il émerge spectaculairement partout dans le monde et d'attirer l'intérêt de nombreux chercheurs que nous sommes parmi eux. En fait, la digestion anaérobie est un processus prometteur pour la récupération des déchets, la protection de l'environnement et la stabilisation du réseau électrique. C'est un processus important pour produire une énergie précieuse qui est appelée biogaz, et un résidu de la production du digestat. La figure 2 donne un aperçu schématique des principaux produits de la digestion anaérobie et de leur utilisation facultative.

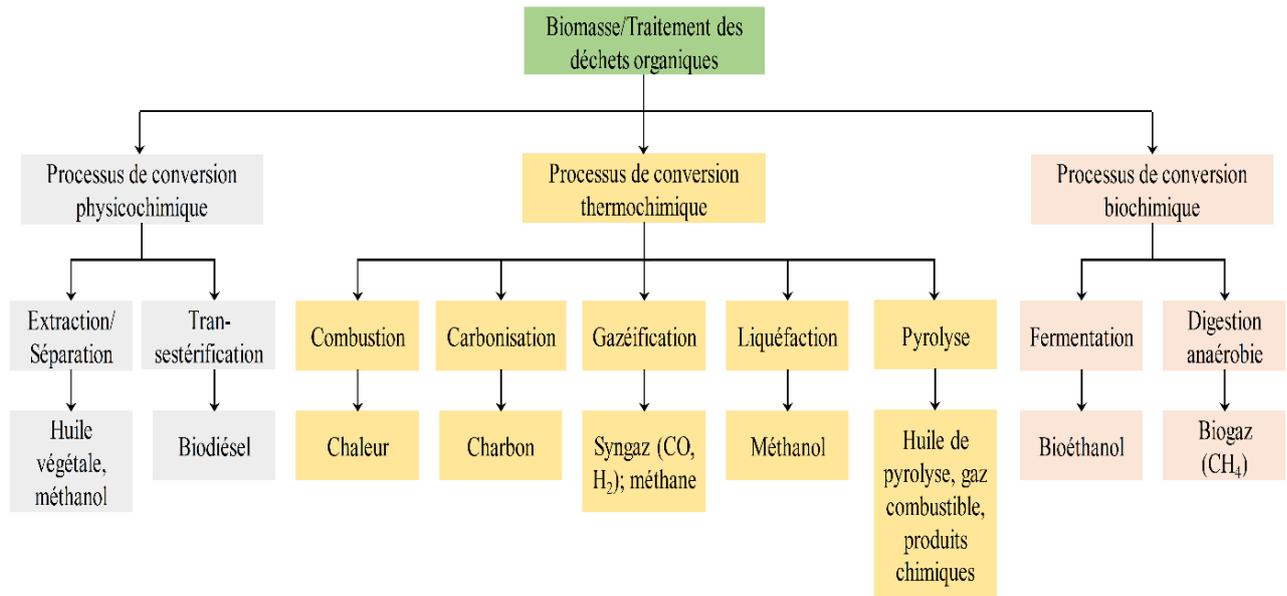


Figure 1. Technologies de conversion de la biomasse et des déchets.

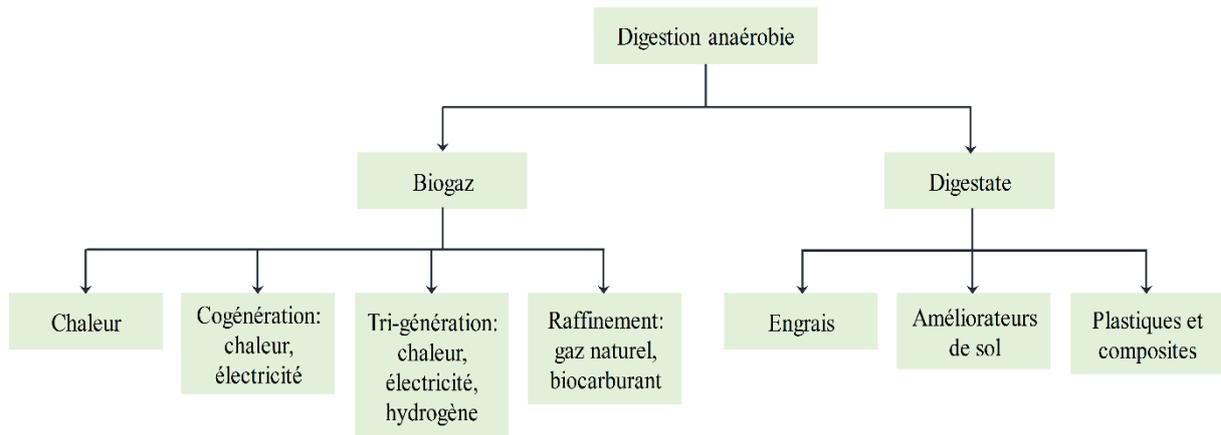


Figure 2. Principaux produits de la digestion anaérobie et leur utilisation facultative.

Malgré l'investissement sur cette technologie, plusieurs problématiques restent ouvertes et font l'objet de plusieurs axes d'études comme :

- 1- La réduction des coûts du bioprocédé et de sa maintenance.
- 2- La modélisation des bioprocédés où on trouve actuellement une bibliographie abondante de modèles mentionnés dans la littérature.
- 3- La commande du bioprocédé en vue d'améliorer ses performances.

Dans cette thèse, nous nous sommes intéressés plus particulièrement au troisième axe, qui traite les problématiques de la commande du bioprocédé de digestion anaérobie, afin d'améliorer sa performance. L'objectif principal de cette thèse consiste alors à développer et appliquer des techniques de commande avancées, à savoir la commande par mode glissant et les

commande adaptatives, au bioprocédé de digestion anaérobie continu afin d'asservir effectivement la croissance de la biomasse en assurant un niveau élevé de précision, de rapidité en réponse et de robustesse faces aux différentes classes d'incertitudes, paramétrique et non-paramétriques.

Cette thèse est articulée autour de cinq chapitres qui sont organisés de la manière suivante :

Chapitre I. Ce chapitre vise à mettre l'accent sur les concepts de base des bioprocédés et ces applications dans le domaine de digestion anaérobie. Différentes étapes de production de biogaz ont été discutées.

Chapitre II. Ce chapitre est consacré à la modélisation dynamique des différents modèles de digestion anaérobie existant dans la littérature. Principalement le modèle complexe et **ADM1** (Anaerobic Digestion Model no1) qui caractérise le comportement global du phénomène de production de biogaz mais tellement complexe qu'il est inexploitable dans le contrôle. Ensuite d'autres modèles plus simples et exploitable dans le contrôle sont abordés tels que le modèle de digestion anaérobie à deux étapes nommé AM2 (Anaerobic Model N°2. Le modèle tri-phasique et le modèle réduit et le plus simple qui a fait l'objet de cette thèse.

Chapitre III. La première partie de ce chapitre présente un état de l'art sur les techniques de commande par mode glissant d'ordre un "Conventionnel" et mode glissant d'ordre supérieur. Différentes approches pour minimiser le phénomène de broutement (chattering en anglais) ont été discutées dans la deuxième parties. Les concepts de base pour l'adaptation des techniques des commandes par modes glissants sont finalement introduits.

Chapitre IV. Dans ce chapitre, après avoir décrit le modèle dynamique du bioprocédé considéré, nous allons nous intéresser dans un premier temps à la commande par mode glissant d'ordre un pour la régulation de la concentration de certains polluants à un niveau constant (bas) prédéfini. Par la suite, nous allons synthétiser une commande par mode glissant d'ordre un adaptative à base d'un algorithme d'adaptions des gains. Ce concept, permet de résoudre le problème de broutement sur la sortie du bioprocédé grâce aux gains du contrôleur qui s'adaptent vis-à-vis des perturbations et des variations paramétriques. Une analyse de la stabilité au sens de Lyapunov des commandes proposées est présentée. Des résultats de simulations sous l'environnement MATLAB® sont présentés pour illustrer les performances des approches proposées.

Chapitre V. Le but de ce chapitre consiste à étudier le problème de stabilisation des bioprocédés en appliquant des techniques de mode glissant d'ordre deux. Dans un premier temps, cet objectif est atteint en appliquant une commande basée sur l'algorithme Super-Twisting. Une deuxième étape de développement consiste à proposer une approche qui permet d'adapter dynamiquement les gains du contrôleur afin d'assurer l'existence d'un mode glissant réel ainsi que l'atténuation du phénomène de broutement. Une analyse théorique et des tests numériques par simulation sont présentés pour évaluer les performances de l'approche proposée.

On a terminé ce travail par une conclusion générale et quelques perspectives sur les futurs travaux.

Chapitre I

Principe de la digestion anaérobie

I.1. Introduction

La digestion anaérobie est un processus naturel par lequel la matière organique est transformée en un biogaz qui contient principalement du méthane (CH_4), du dioxyde de carbone (CO_2) et des traces d'autres gaz. Elle résulte de l'activité d'un écosystème microbien anaérobie complexe. Le biogaz est une source d'énergie qui peut être utilisée directement en remplacement du gaz naturel, pour produire de la chaleur et de l'électricité par cogénération ou encore comme carburant pour véhicules. Ainsi, la domestication par l'homme de ce processus naturel permet de traiter les eaux usées et les déchets tout en récupérant une source d'énergie renouvelable. La récupération de ce biogaz qui peut être émis lors de la dégradation naturelle de la matière organique contribue également à réduire les émissions de gaz à effet de serre auxquelles le méthane contribue fortement. Ce chapitre contient une présentation des principes généraux de la digestion anaérobie et des principaux paramètres et les différentes étapes de fonctionnement.

I.2. La digestion anaérobie

I.2.1. Historique

L'historique de la digestion anaérobie peut être retrouvé dans [6]. La découverte de la méthanisation remonte à 1776 lorsque A. Volta, durant une de ses promenades, observa que du gaz se libérait d'un marais. Après avoir étudié ce phénomène et fait plusieurs expériences, il mit en

évidence que le gaz des marais était inflammable. Un peu plus tard en 1787, A.L. Lavoisier lui donna le nom de *gas hidrogenium carbonatrum*, mais le terme de méthane fut proposé en 1865 et confirmé en 1892 par un congrès international de nomenclature chimique. Pendant ce temps, la présence de ce gaz est mise en évidence dans d'autres milieux (dont le fumier) et son origine est attribuée à l'activité microbienne. Celle-ci se développe dans des milieux anaérobies naturels :

- Le gaz des marais qui contient une forte proportion de méthane provient de la décomposition des déchets organiques végétaux des marécages. Cette décomposition se déroule également dans les lacs et les rizières.
- Les sols des zones humides tels que les forêts tropicales, la toundra et les tourbières participent aussi à la production du méthane atmosphérique.
- Les processus de digestion des animaux libèrent du méthane, (Les ruminants et les termites sont la source d'une quantité importante de gaz).
- Les phénomènes anaérobies qui se déroulent dans les sédiments marins sont responsables d'une partie du méthane dissous dans l'eau de mer.

I.2.2. Définition

La digestion anaérobie (appelée aussi méthanisation ou fermentation), est le processus naturel par lequel la matière organique est transformée en gaz par l'action de microorganismes en l'absence d'oxygène. La caractéristique principale de la digestion anaérobie est que la quasi-totalité de la matière organique dégradée par l'écosystème microbien, se retrouve sous forme de biogaz (bio méthane), composé de méthane (CH_4) à plus de 50%, de dioxyde de carbone (CO_2) et dans un degré moindre d'hydrogène (H_2). Le bio méthane présente l'avantage de pouvoir être valorisé sous forme d'énergie renouvelable.

Cette énergie renouvelable présente de nombreux avantages telles que : la préservation de l'environnement en trouvant une solution aux déchets organiques qui seront transformés en produits d'utilité (bio énergie). Cette énergie peut être utilisée par les pays pauvres en énergie fossile comme elle peut être utilisée par les pays riches en énergie fossile comme supplément au gaz naturel comme il est le cas en Algérie où beaucoup de régions isolées souffrent de manque de gaz naturel sachant que les déchets organiques sont disponibles partout. Le bio gaz est maintenant très utilisé pour remplacer et accompagner l'énergie fossile surtout grâce au contrôle qui améliore la production du bio gaz.

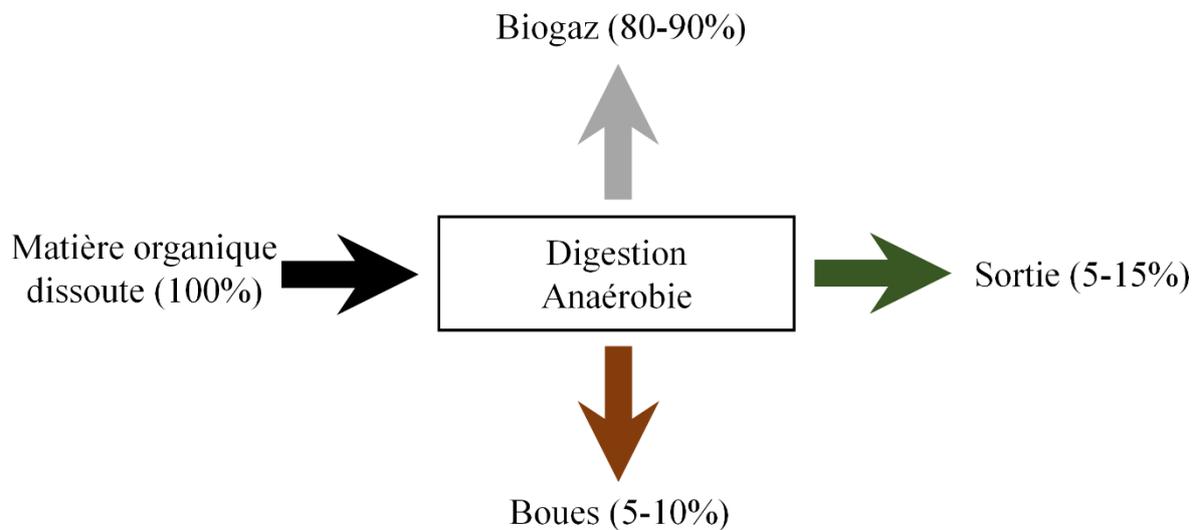


Figure I.1 La conversion de la matière organique dans la digestion anaérobie [6].

Malgré les avantages de la digestion anaérobie, en particulier la production de méthane (CH_4), potentiellement valorisable comme source d'énergie (Figure I.1), elle possède aussi des inconvénients :

- La vitesse de croissance des microorganismes qui est très faible, ce qui nécessite de fixer des temps de séjour de boues élevés ;
- Il y a potentiellement production d'odeurs ;
- Elle est sensible aux variations environnementales ;
- Elle possède une écologie microbienne complexe, impliquant différents types de microorganismes ce qui conduit à n'avoir pas les conditions optimales simultanément pour tous les organismes [7].

I.2.3. Principe de production de biogaz

Le biogaz est une énergie renouvelable, issu de la digestion des déchets organiques. Ce phénomène généralement naturel peut être contrôlé et optimisé dans des digesteurs (appelé aussi fermenteurs).

Ce gaz peut être le méthane qui sera l'objectif de notre thèse ou bien il peut être un autre gaz. La référence [8] définit d'une manière détaillée le processus d'obtention du biogaz méthane, comme le montre la Figure I.2.

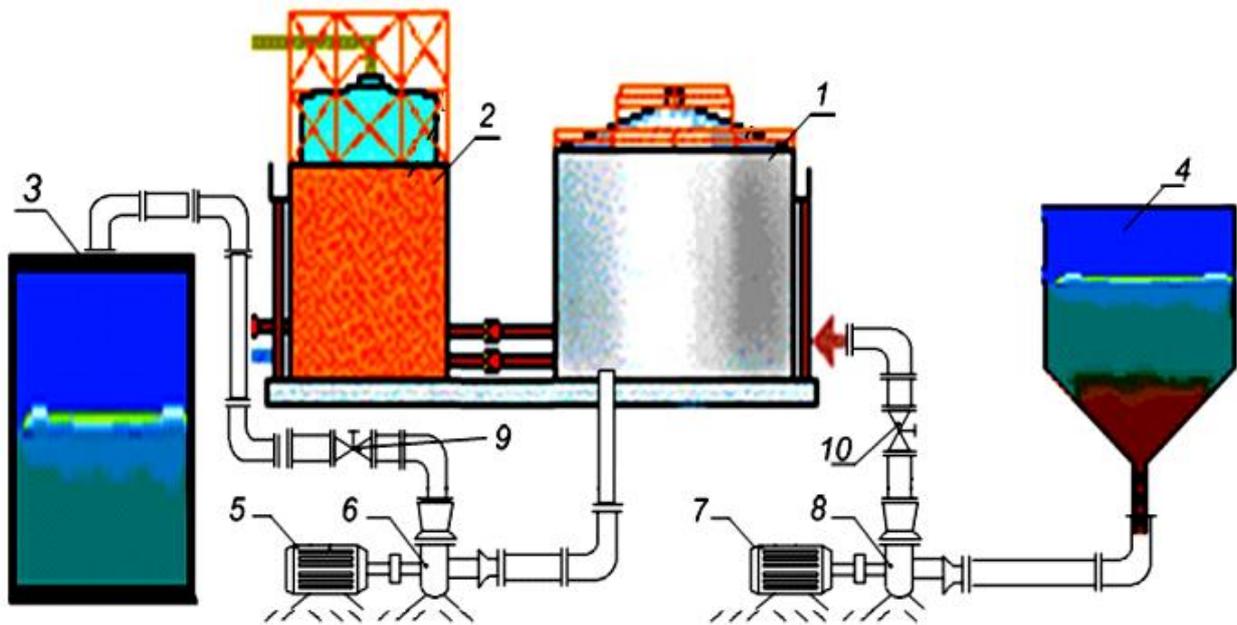


Figure I.2 production d'un biogaz dans un digesteur expérimental.

- 1- digesteur (bioréacteur)
- 2- gazomètre
- 3- réservoir pour digestat
- 4- réservoir pour le substrat
- 5, 7- disques
- 6, 8- pompes
- 9,10- vannes d'arrêt

Le processus de la digestion anaérobie (appelée aussi méthanisation ou fermentation) est un processus naturel qui se produit dans les écosystèmes naturels tels que les marais, le tube digestif (le rumen) des mammifères herbivores comme les bovins et les ovins, les insectes et les sols. C'est un processus biologique, qui consiste à digérer les matières organiques contenues dans les coproduits qu'ils soient solides ou liquides en l'absence totale de l'oxygène. Au cours du processus, des produits obtenus :

- Le BIOGAZ principalement composé de méthane (CH_4) et du dioxyde de carbone (CO_2).
- Sous-produits tels que le DIGESTAT (méthanisation des coproduits solides).

Les deux principaux buts de la méthanisation à l'échelle industrielle sont premièrement obtenir une source d'énergie via le biogaz et deuxièmement abattre les pollutions contenues dans les déchets organiques.

I.2.4. Avantages et limites de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie constitue un moyen efficace pour traiter des eaux usées, des boues de stations d'épuration, des rejets de l'industrie agro-alimentaire, ou encore des déjections animales, ... Différentes technologies de méthanisation ont été développées pour s'adapter au mieux aux effluents à traiter, pour simplifier le procédé et en minimiser le coût, ou pour optimiser la production de biogaz. Le traitement d'effluents par digestion anaérobie présente de nombreux avantages par rapport à la technologie aérobie qui est plus largement répandue :

Faible production de boues ; la fermentation méthanogène produit en quantité 5 à 10 fois moins

Traitement des charges organiques élevées ; de 2 à 80 kgDCO par mètre cube de réacteur et par jours, avec des rendements épuratoires de plus de 80%,

Faible coût énergétique ; contrairement aux procédés aérobies, il ne faut pas transférer de l'oxygène au milieu, action qui consomme beaucoup d'énergie,

Valorisation énergétique ; le biogaz produit peut servir de carburant.

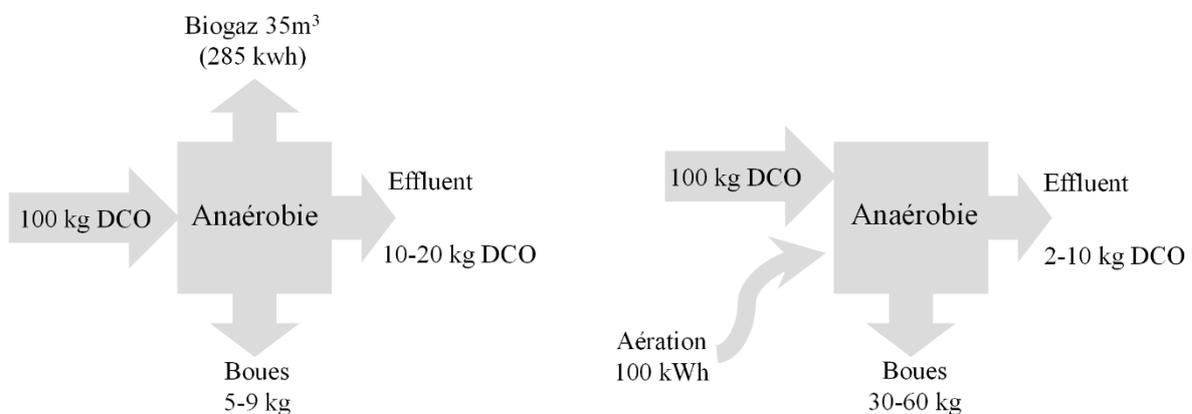


Figure. I.3 Comparatif des procédés anaérobie et à boues activées.

Cependant la méthanisation des déchets présente également certains inconvénients en comparaison aux procédés à boues activées :

- La faible vitesse de croissance des bactéries anaérobies impose une cinétique d'épuration lente.
- Les populations bactériennes mises en jeu sont sensibles aux surcharges organiques et aux composés toxiques.

- Une réputation d'instabilité liée à la sensibilité de la dynamique de croissance des bactéries.
- Un post-traitement aérobie peut être nécessaire avant de rejeter l'effluent dans le milieu naturel.

I.3. Etapes de la digestion anaérobie

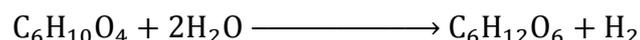
Durant la digestion anaérobie, le substrat utilisé par les bactéries et les produits fabriqués permettent de distinguer quatre étapes qui sont :

- L'étape hydrolytique.
- L'étape acidogène.
- L'étape acétogène.
- L'étape méthanogène.

I.3.1. L'étape hydrolyse

La matière organique présente dans les résidus alimentaires se compose en général de carbohydrates (cellulose, l'hémicellulose, l'amidon, etc.), de protéines et de lipides (huiles et graisses). Durant les premières étapes de la méthanisation, les bactéries acidogènes produisent des enzymes extracellulaires qui décomposent ces substrats organiques complexes en monomères par hydrolyse. Cette transformation permet de rendre assimilable le substrat par les bactéries et facilite la pénétration des molécules à travers les parois des cellules [9- 11]. L'étape d'hydrolyse est considérée comme l'étape limitante dans le processus global de méthanisation des matières complexes par rapport aux autres étapes [10, 12, 13]. Les bactéries de la phase d'hydrolyse ont un métabolisme de type anaérobie strict ou facultatif [14, 15].

Le mélange de matière organique résiduelle peut être représenté approximativement par la formule chimique $C_6H_{10}O_4$ et la réaction d'hydrolyse peut être écrite comme suit [16] :

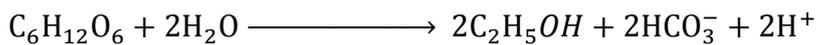
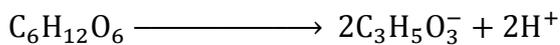
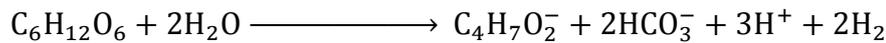
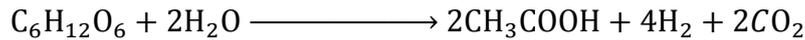


I.3.2. L'étape acidogénèse

Au cours de cette étape, une dégradation des composés monomères en acides organiques, en alcools, en hydrogène et dioxyde de carbone par l'action de bactéries fermentatives acidogènes a lieu [17]. Comme son nom le suggère, la phase acidogénèse se traduit donc souvent par une

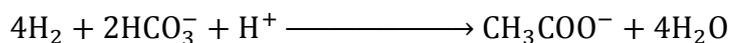
acidification du milieu [18]. Elle est généralement rapide en raison du fort taux de croissance des bactéries mises en jeu [15, 19]. Les principaux produits issus de la dégradation de monosaccharides sont les suivants : l'acide acétique, l'acide butyrique, l'acide lactique, l'acide formique, les alcools (éthanol, méthanol), l'hydrogène et le dioxyde de carbone.

Les réactions métaboliques de ces produits sont les suivantes [14]:



I.3.3. L'étape acétogènèse

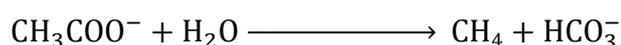
L'étape d'acétogènèse permet la transformation des acides issus de la phase d'acidogènèse en acétate, en hydrogène et en dioxyde de carbone, par l'action de différents groupes de bactéries. Il s'agit de bactéries acétogènes productrices obligées d'hydrogène, et les bactéries homoacétogènes (de La Farge, 1995) suivant les réactions suivantes [14]:



I.3.4. L'étape méthanogène

Cette étape représente la dernière phase de la méthanisation. Elle permet de transformer l'hydrogène, le dioxyde de carbone et l'acétate en méthane. Les bactéries impliquées dans ces réactions sont classées parmi les bactéries anaérobies strictes [20]. Elles se divisent en deux populations bactériennes : les méthanogènes acétoclastiques utilisant les acétates pour produire du méthane, et les méthanogènes hydrogénoclastiques réduisant le dioxyde de carbone ou l'acide formique avec le dihydrogène [21].

Les équations suivantes montrent la production du biogaz [22] :



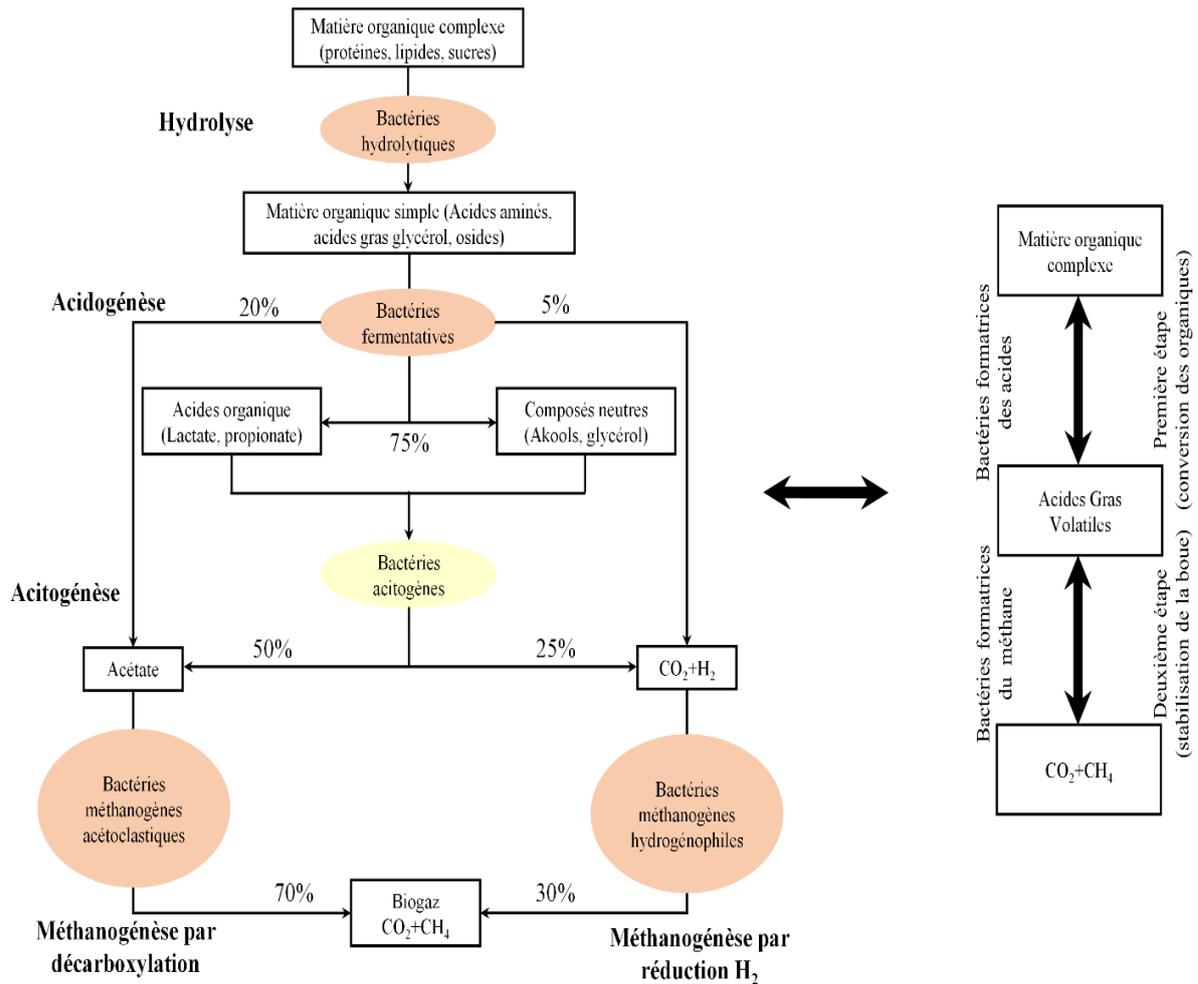
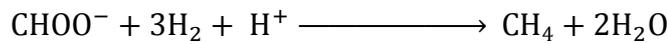


Figure I.4 Les étapes de la digestion anaérobie. A gauche : toutes les étapes. A droite : schéma simplifié [6].

La digestion anaérobie est un processus complexe. Toutefois, si l'on considère un effluent où la matière organique est essentiellement soluble, il peut être résumé en considérant seulement les deux étapes principales comme synthétisé sur la Figure I.3 à droite [23] :

– Étape 1 : Acidogénèse

Dans cette première étape, il n'y a pas une production de méthane, les matières organiques complexes (comme les corps gras, les protéines et les carbohydrates) sont converties par un groupe

de bactéries anaérobies dites formatrices d'acide. Elles sont hydrolysées, digérées et converties biologiquement en simples matières organiques, qui sont en grande partie des Acides Gras Volatiles (AGV).

– Étape 2 : Méthanogénèse

Pendant cette étape, les produits de l'étape précédente AGV, sont convertis par un groupe bactérien dit formatrices du méthane en produits finaux gazeux, à savoir le méthane CH_4 et le dioxyde du carbone CO_2 .

I.4. Paramètres physico-chimiques de la digestion anaérobie

Les conditions de la digestion anaérobie sont déterminées par différents paramètres qui peuvent être mesurés et contrôlés quotidiennement.

I.4.1. Température

Les bactéries méthanogènes responsables de la digestion anaérobie sont spécifiques de la température du biodigesteur. On répartit les organismes en trois catégories, selon la plage de températures comme le montre la Figure I.4 laquelle leur croissance est optimale :

- Les psychrophiles dominant entre 4-20 °C, avec un optimum de croissance vers 15 °C.
- Les mésophiles dominant entre 20-45 °C, avec un optimum vers 37 °C.
- Les thermophiles dominant entre 55-70 °C, avec un optimum vers 60 °C.

Figure I.5 montre les plages de températures où la croissance de ces trois populations est possible. La température est un facteur prépondérant pour le rendement énergétique d'où la nécessité de placer un thermomètre dans le système d'installation. La plupart des fermenteurs sont des digesteurs mésophiles et la fermentation thermophile est surtout utilisée pour les grosses unités de digestion anaérobie [24].

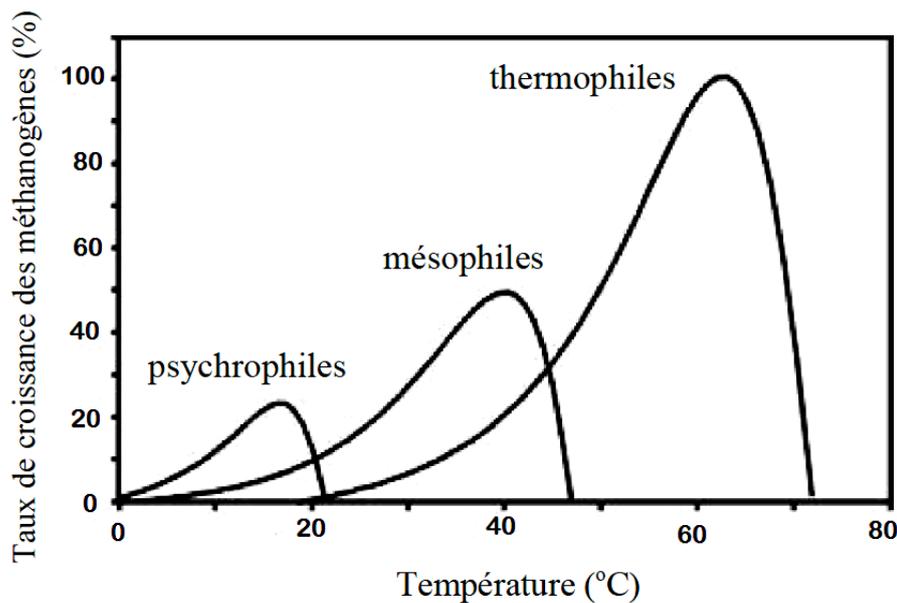


Figure I.5 Effet de la température sur le taux de croissance des méthanogènes (*IWA TASK GROUP FOR MATHEMATICAL, 2002*)

I.4.2. Le potentiel hydrogène (pH)

L'acidité ou la basicité du milieu réactionnel joue un grand rôle pour le bon fonctionnement d'un bioréacteur. Les organismes peuvent être séparés en fonction de leur pH (potentiel d'hydrogène) optimal de croissance :

- Les acidophiles : $1 < \text{pH} < 5,5$.
- Les neutrophiles : $5,5 < \text{pH} < 8$.
- Les alcalophiles : $8,5 < \text{pH} < 11,5$.

On considère habituellement que la gamme optimale de pH pour la digestion anaérobie se situe entre 6,7 et 7,3 [25]. Les $\text{pH} < 6,7$ et $\text{pH} > 7,3$ peuvent inhiber la réaction de méthanisation. L'ajout du bicarbonate de sodium NaHCO_3 à raison de $3,5 \text{ Kg/m}^3$ dans le digesteur permet de rétablir la valeur optimale de pH [26].

I.4.3. Substrat

Le substrat c'est la matière organique première, la plus fréquemment employée est d'origine animale ou humaine et mélangée quelquefois à des résidus végétaux tels que fumier, résidus agroalimentaires, ou boue d'épuration.

Le Tableau I.1 montre le rendement de production de biogaz pour quelques substrats :

Substrat	Rendement moyen (l / Kg)
Bouse de vaches	200
Crottins de chevaux	200
Fientes de volailles	310
Fumier de moutons	135
Eaux d'égout	340

Tableau I.1 Rendement de production de biogaz en fonction de la nature du substrat.

I.4.4. Agitation

Une bonne agitation permet de maintenir les matières solides en suspension, d'éviter la formation de mousse et de *croûte*, d'accroître la surface d'échange, d'assurer le transfert de chaleur et de faciliter le dégagement des bulles de biogaz [24].

I.4.5. Humidité

Comme pour toute activité biologique, la présence d'eau est indispensable. L'humidité des déchets doit être suffisante pour que l'hydrolytique, première étape de la digestion anaérobie, puisse se dérouler normalement. De ce fait le substrat organique doit être dilué (85 à 90% d'eau avec 10 à 15% de matière sèche) [27].

I.5. Mode de digestion anaérobie

On s'intéresse aux bioprocédés infiniment mélangés uniquement. La Figure I.5 montre un schéma représentatif classique d'un bioprocédé. Il est composé de :

1. Un double paroi dans laquelle circule de l'eau permettant la régulation de la température à l'intérieur du bioprocédé,
2. Un agitateur permettant l'homogénéité du milieu de culture,
3. Plusieurs connecteurs permettant l'ajout du milieu d'alimentation, le soutirage du milieu de culture et la liaison avec les différents capteurs réalisant les mesures en ligne du pH, de la température et/ou des concentrations des divers constituants.

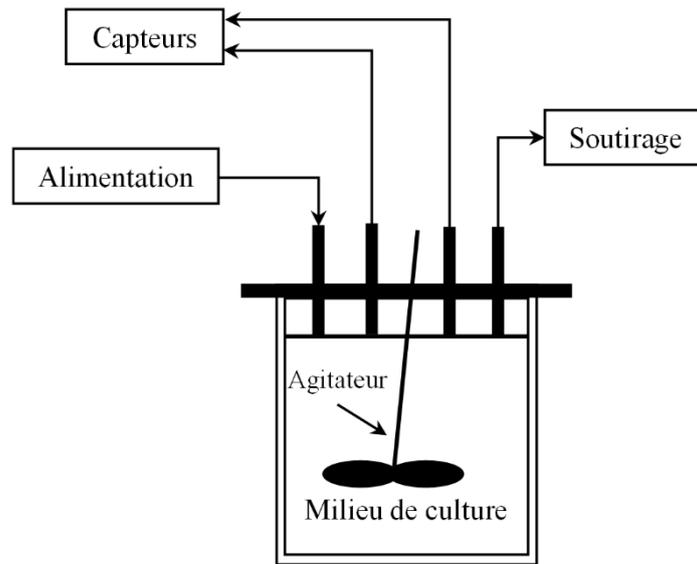


Figure I.6. Schéma représentatif d'un bioprocédé.

A ce jour, la plupart des bioprocédés sont équipés de capteurs permettant les régulations du pH, de la température et de la concentration en oxygène dissous, pour permettre au bioprocédé de fonctionner dans des conditions favorables. Le pH est régulé en ajoutant une solution basique ou acide au milieu de culture. La température est régulée à l'aide de l'eau circulant dans la double paroi, enfin la concentration en oxygène dissous est régulée en agissant sur la vitesse d'agitation et/ou le débit d'air injecté dans le milieu de culture.

On rencontre pour un bioprocédé quatre modes de fonctionnement. La différence provient principalement des types de débit d'alimentation F_{in} et de soutirage du milieu de culture F_{out} . La Figure I.6 représente un schéma de ces quatre modes de fonctionnement.

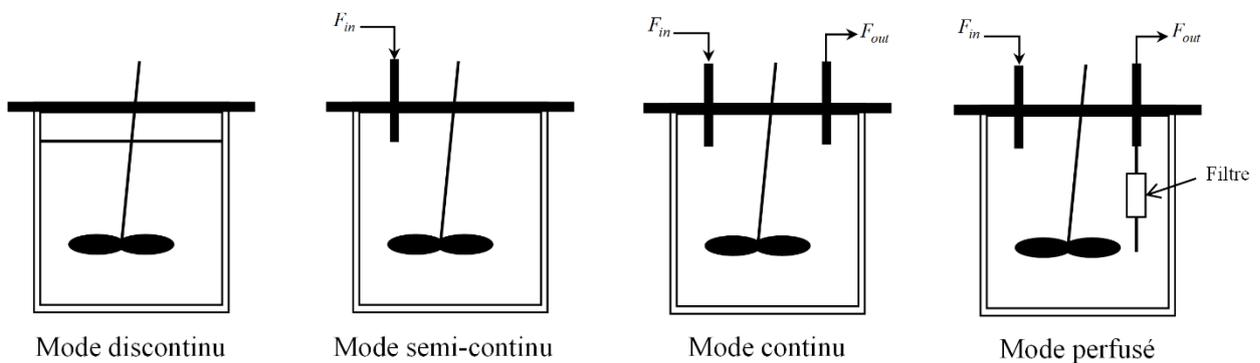


Figure I.7. Différents modes de fonctionnement d'un bioprocédé.

La digestion anaérobie peut fonctionner en quatre modes selon l'alimentation du

bioréacteur : mode continu, discontinu, semi-continu ou perfusé.

I.5.1. Mode continu

Ce mode de fonctionnement est le plus utilisé pour les installations de grandes tailles, il consiste à alimenter le bioréacteur par la matière organique de manière continue et le milieu de culture est soutiré continuellement, de façon telle que le volume du milieu de culture reste constant. Les débits d'alimentation et de soutirage sont donc non nuls. Ce mode est par exemple employé dans le cas du traitement des eaux [28].

I.5.2. Mode discontinu

Le mode discontinu ou batch est très simple puisque le digesteur est rempli avec la matière organique au démarrage de la culture, et les débits d'alimentation et de soutirage du milieu de culture sont nuls (aux prélèvements d'échantillons près). Le volume du milieu de culture est donc approximativement constant. En effet, en pratique, une légère variation du volume est due à la régulation du pH et à l'évaporation (échange entre la phase liquide et la phase gazeuse). La biomasse et le produit ne sont récupérés qu'à la fin de la culture. Le temps de digestion est fonction de divers paramètres comme la température ou le type de substrat. Une fois la digestion effectuée, le digesteur est vidé et un nouveau cycle peut commencer [29].

La production de biogaz est irrégulière (rapide au début de la fermentation, beaucoup plus lente vers la fin). Ce système nécessite d'autre part beaucoup de main d'œuvre pour le transport du substrat et aussi d'entretien [24].

I.5.3. Mode semi-continu

Appelé aussi fed-batch, c'est la combinaison du mode en continu et en discontinu. Le bioréacteur fonctionne avec un cycle alternant le remplissage, la réaction, la décantation, et la vidange. Le bioréacteur n'est pas vide totalement, ceci a pour but de conserver une partie des micro-organismes pour en former un nouveau cycle [28]. Ainsi, le volume du milieu de culture augmente et la biomasse et le produit sont récupérés à la fin de la culture. Pour une meilleure exploitation de ce mode, le débit d'alimentation doit être calculé à l'aide d'un régulateur.

I.5.4. Mode perfusé

Comme pour le mode continu, les débits d'alimentation et de soutirage sont non nuls. La principale différence est la présence du filtre permettant d'évacuer le milieu de culture usé et de

garder la biomasse à l'intérieur du bioprocédé. Ce mode est utilisé pour les cultures de cellules animales.

1.6. Caractéristiques du biogaz

Le biogaz est un gaz produit par un processus de digestion anaérobie par l'action de certaines bactéries sur divers résidus organiques. C'est un gaz incolore, inodore et qui est considéré comme une source d'énergie.

Comme nous avons mentionné précédant la qualité du biogaz dépend du substrat. Le biogaz de qualité moyenne est constitué de 38 % de CO₂ et de 62 % de CH₄. D'une manière générale, la composition du biogaz est indiquée dans le Tableau I.2 :

Elément	Symbole	Proportions pour 1 Nm ³ de biogaz brut
Méthane	CH ₄	50 – 75 %
Dioxyde de carbone	CO ₂	25 – 45 %
Vapeur d'eau	H ₂ O	2 – 7 %
Azote	N ₂	0 – 2 %
Hydrogène	H ₂	0 – 1 %
Oxygène	O ₂	0 – 2 %
Hydrogène sulfure	H ₂ S	0 – 2 %

Tableau I.2 Composition générale du biogaz.

Nm³ = normal mètre cube, est une unité de mesure de quantité de gaz qui correspond au contenu d'un volume d'un mètre cube, pour un gaz se trouvant dans les conditions normales de température et de pression (0 °C et 1 atm).

1.7. Utilisation d'un biogaz

Le biogaz possède différents domaines d'utilisation et nombreux avantages, on peut utiliser:

- Pour alimenter une cogénération qui produit de l'électricité et de la chaleur. L'électricité est peut-être exportée via le réseau public ; et la chaleur peut être utilisée pour le chauffage des digesteurs et le reste peut servir à tout autre usages : séchage du digestat, production d'eau chaude, alimentation d'un chauffage domestique.

De ce fait, le méthane, représentant 50 à 75 % du volume de biogaz produit, est utilisable comme source d'énergie renouvelable car il est issu de déchets organiques qui ne seraient pas valorisés par ailleurs, ainsi 1 m³ de méthane (soit 8 570 kcal) est l'équivalent d'un litre de gasoil, comme montré dans la figure I.7.

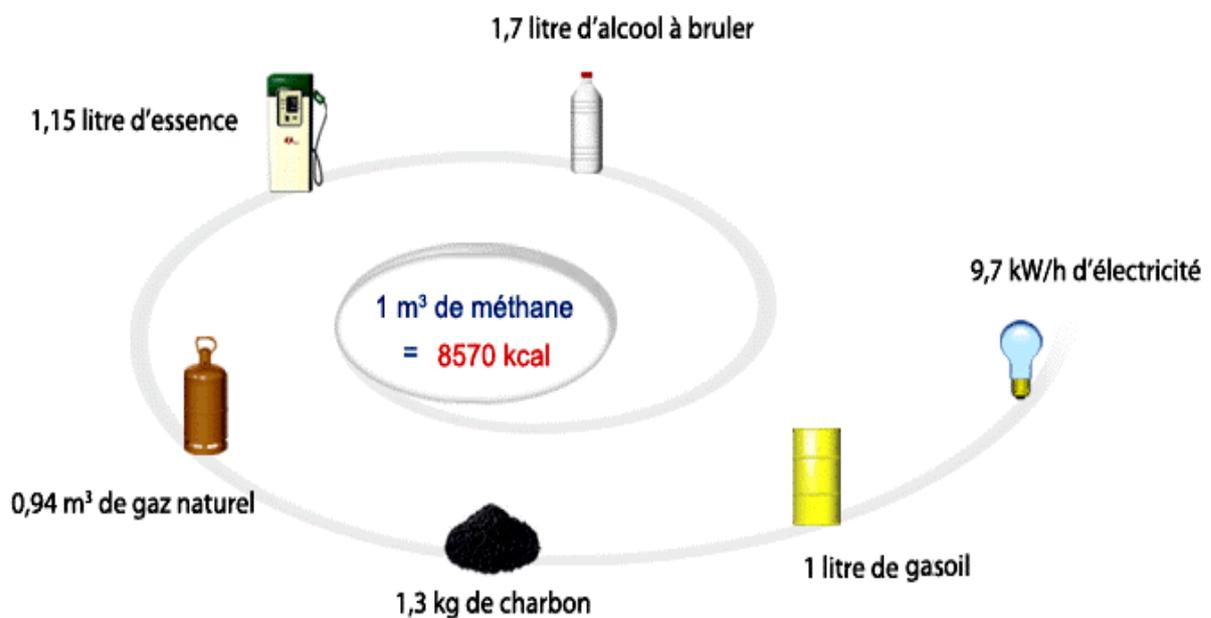


Figure I.8 Les équivalences énergétiques du méthane.

- Pour améliorer des produits agricoles, les effluents traités de manière adéquate sont transformés en engrais de très bonne qualité.
- Comme carburant, les moteurs à biogaz présentent des atouts sur le plan environnemental, ils permettent : une baisse des émissions d'oxydes d'azote (NO_x) ; l'absence d'émission de dioxyde de soufre (SO₂) ; une meilleure sécurité ; la réduction du bruit. Donc le biogaz c'est un biocarburant est considéré comme un moyen efficace pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

I.8. Conclusion

Dans ce premier chapitre on a présenté d'une façon générale quelques idées sur les biotechnologies et les procédés de méthanisation à partir des définitions de base sur les fermenteurs, leurs types et les différents modes de fonctionnement. Ainsi qu'une présentation générale de la digestion anaérobie qui sera utilisée dans l'application du chapitre IV et V. Dans le chapitre qui suit, on va expliciter la notion de modélisation mathématique du procédé biotechnologique et comment obtenir un modèle dynamique d'un fermenteur à partir des bilans massique.

Chapitre 2

Modélisation des procédés de digestion anaérobie

II.1 Introduction

La modélisation des systèmes est une représentation particulière de la réalité. Il s'agit de la première étape à franchir pour estimer, observer, contrôler ou diagnostiquer un procédé. C'est en effet sur la base d'un modèle dynamique du procédé que s'effectuent la conception, l'analyse et la mise en œuvre des méthodes de surveillance et de commande. Dans le cadre des bioprocédés en général et de la digestion anaérobie en particulier, la considération des bilans de matière des principaux composants du système est une manière naturelle pour caractériser sa dynamique [30].

Lors du fonctionnement d'un procédé de digestion anaérobie, le problème majeur vient du fait que les Acides Gras Volatiles (AGV) produits pendant la réaction d'acidogénèse peuvent s'accumuler dans le bioréacteur et déstabiliser donc le processus. C'est la raison pour laquelle les outils de modélisation, de contrôle et de supervision sont nécessaires pour optimiser le fonctionnement des digesteurs anaérobies. Selon l'objectif pour lequel ils ont été développés, les modèles de digestion anaérobie peuvent être classés en deux groupes : i) les modèles de grandes dimensions, développés par les praticiens pour reproduire le comportement phénoménologique du système et ii) les modèles simplifiés développés pour le contrôle, décrivant de manière macroscopique la digestion anaérobie en un faible nombre d'étapes en cascade et ayant une dimension limitée. Un état de l'art sur les modèles de la digestion anaérobie existants avant 1999 est donné dans [31].

Le modèle ADM1 est le modèle phénoménologique de digestion anaérobie le plus complet et l'un des plus utilisés. Une première version de ce modèle a vu le jour dans un rapport scientifique et technique en 2001 [32]. C'est un modèle complexe de 32 équations différentielles modélisant les réactions et les échanges entre les différentes espèces liquides et gazeuses. Malheureusement, du fait de sa grande dimension, son utilisation pour l'estimation, la commande et la supervision

des digesteurs anaérobies n'est pas appropriée [32-33].

Pour faire du contrôle des digesteurs anaérobies, un modèle nommé AM2 (Anaerobic Model N°2) beaucoup plus approprié est utilisé. C'est un modèle à deux étapes : l'Acidogénèse et la Méthanogénèse, qui comprend six équations différentielles. Il a été développé dans le cadre du projet européen AMOCO (Advanced MONitoring and COntrol System for anaerobic processes) [34].

II.2. Modèle de la digestion anaérobie

Comme nous avons mentionné auparavant plusieurs modèles ont été développés pour modéliser le principe de la digestion anaérobie. Ces modèles peuvent être des modèles à une phase ne prenant compte que de la phase de méthanogènes à partir de l'acétate ou des acides gras volatils en équivalent acétate.

Les modèles contenant au plus deux phases sont aisés pour une digestion anaérobie en mode continu, et parfaitement agite sur lesquels la concentration en AGVs, le flux de méthane produit et la concentration en biomasse sont mesurés pour différents temps de passage. Les modèles en deux étapes se rapprochent de la réalité de l'expérimentation, car ils décrivent les transformations des matières organiques (substrats complexes de départ) en acides gras organiques qui seront transformés en grande partie en méthane.

Les modèles à trois et quatre phases sont des modèles plus complexes. Les cinétiques d'hydrolyses des polymères ainsi que le modèle de l'acétogènes s'ajoutent au modèle bi-phasique pour parvenir un modèle quadri-phasique assez simplifié. Ces modèles sont importants vis-à-vis de la description du processus de la digestion anaérobie. Toutefois leur application est très limitée à cause de l'augmentation de nombre de données en entrée du modèle [28].

La présentation des modèles existants se fera en fonction du nombre de phases du processus de méthanisation pris en compte par le modèle, comme montré dans la Figure II-2.

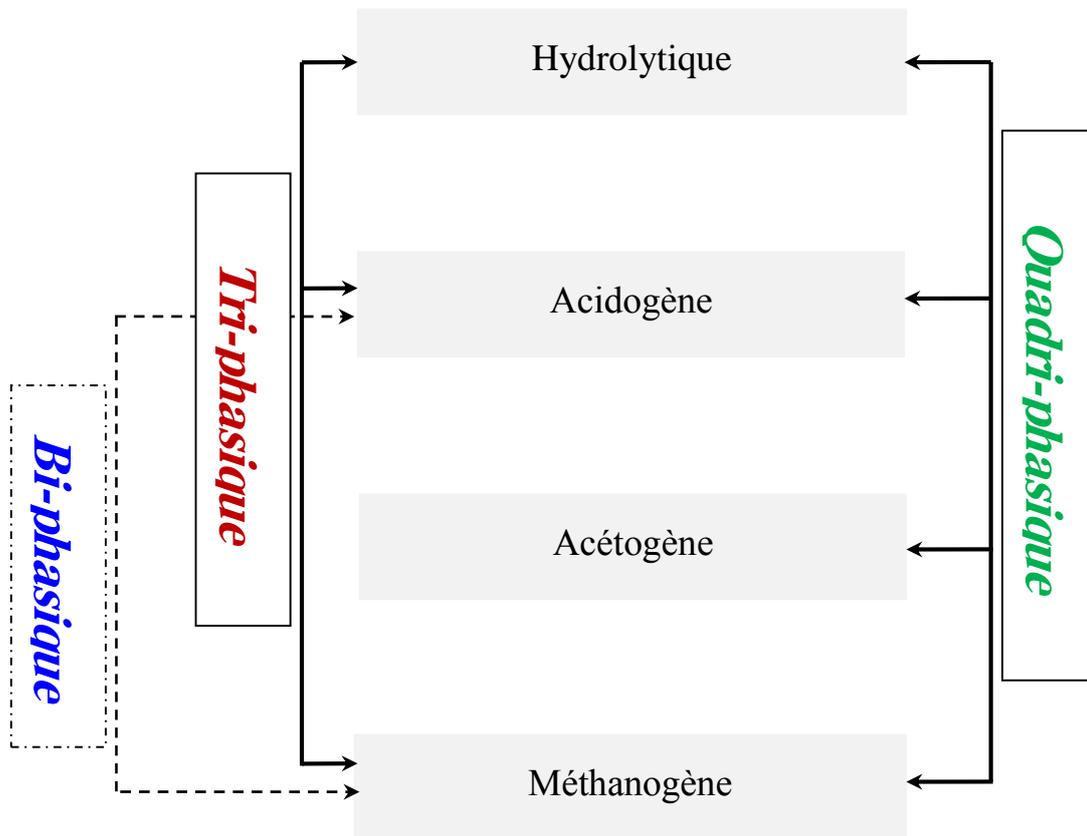


Figure II-1 Type de modèle selon les phases de la méthanisation prises en compte

II.2.1 Modèle cinétique enzymatique

Les fondements de la cinétique microbienne dérivent de la cinétique enzymatique en chimie, science qui émergea au début du 20^{ème} siècle. Malgré des conditions expérimentales non-idéales (milieu non tamponné, utilisation d'enzymes non purifiées) les premières recherches dans ce domaine mirent en évidence le rôle de catalyseur des enzymes au travers de complexes Enzyme-Substrat [35]. Une première étape essentielle fut franchie lorsqu'un modèle mathématique fut proposé pour décrire la vitesse d'une réaction enzymatique v comme une fonction du substrat s :

$$v = V_m \frac{s}{K_s + s} \quad (\text{II.1})$$

où V_m est la vitesse maximale de réaction et K_s est la concentration pour laquelle la vitesse est la moitié du maximum. Cette relation proposée initialement par Victor Henri en 1902, connue comme la relation de Michaelis-Menten, a été confirmée à de nombreuses reprises depuis son introduction [36].

Peu d'années après, vers 1925, John B. S. Haldane et George Edward Briggs, proposèrent une interprétation différente des travaux d'Henri et introduisirent une équation représentant

l'inhibition d'une réaction enzymatique par un excès de substrat :

$$v = V_m \frac{s}{K_s + s + \frac{s^2}{K_i}} \quad (\text{II.2})$$

où K_i est la constante d'inhibition.

Ces deux équations seront utilisées par la suite comme base pour construire des modèles de croissance bactérienne.

II.2.2 Du chémostat au méthaniseur

Au même titre que l'on peut chercher à contrôler un procédé chimique ou physique, les recherches sur la modélisation de la croissance bactérienne répondent à la volonté des scientifiques de comprendre et de décrire les processus microbiens en vue de les maîtriser.

Le premier modèle convaincant reliant le taux de croissance bactérienne μ à un substrat limitant S fut introduit par Monod (1942) [37] qui prouva que le ralentissement et l'arrêt de la croissance des bactéries aient liés à l'appauvrissement en substrat du milieu de culture. À partir de bilans de masse qu'il avait obtenus, il suggéra que la croissance bactérienne soit représentée par une fonction à deux paramètres μ_m et K_s selon l'équation :

$$\mu(s) = \mu_m \frac{s}{K_s + s} \quad (\text{II.3})$$

où le paramètre K_s représente l'affinité des microorganismes pour le substrat, et μ_m est la vitesse maximale de croissance. Bien que ce modèle soit proche de l'équation de Michaelis-Menten pour la cinétique enzymatique, Monod ne fit le rapprochement que plus tard, vers 1950, en évoquant le rôle que jouent les enzymes dans la dégradation du substrat. Monod formula également le principe selon lequel la vitesse de croissance d'une population bactérienne pourrait toujours être représentée comme le produit de la biomasse vivante x , et d'un autre facteur μ qui serait le taux de croissance [37]:

$$\frac{dx}{dt} = \mu x \quad (\text{II.4})$$

Par la suite il développa le premier modèle de chémostat. Il présenta les équations de conservation de deux variables, la concentration (densité) de biomasse x et le substrat limitant S , dans un bioréacteur continu en considérant les "sources" et "puits" pour ces grandeurs, et il proposa le système II.5 pour décrire leur évolution :

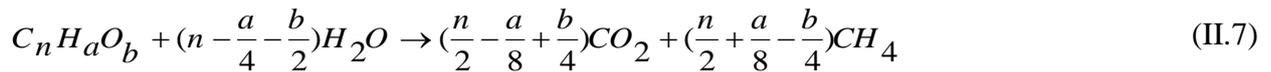
$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = -Dx + \mu(s)x \\ \frac{dx}{dt} = D(s_{in} - s) + \frac{\mu(s)}{Y}x \\ \mu(s) = \mu_m \frac{s}{K_s + s} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

où Y désigne le rendement de la conversion du substrat en biomasse, et s_{in} est la concentration du substrat organique dans l'alimentation du chémostat. Le taux de dilution D est défini comme le rapport du débit d'alimentation Q_{in} , au volume V du réacteur ; $D = Q_{in} / V$.

Ce système permet non seulement de déterminer par intégration les équations d'évolution des variables, mais l'étude des équilibres du système montre que le taux de croissance peut être imposé (dans une certaine mesure) au travers du taux de dilution ; en effet la première équation se réduit à l'équilibre à l'égalité (II.6).

$$D = \mu(s) \quad (\text{II.6})$$

Concernant la modélisation des processus de fermentation, il faut remonter au début du 20^{ème} siècle pour trouver les premières descriptions macroscopiques du phénomène. L'équation générale (II.7) de la dégradation de matière organique par fermentation (Illinois State Water Survey Division, 1939) constitue en quelque sorte un premier modèle qui permet, connaissant les caractéristiques de l'alimentation, de prédire les produits formés.



La fermentation étant un processus complexe, le choix des réactions à représenter constitue la première étape de la construction du modèle mathématique, et il faut ensuite obtenir les équations d'évolution des différentes variables. Malgré l'absence de lois universelles pour les cinétiques bactériennes, des principes comme la conservation de la matière, ou l'électroneutralité s'appliquent aux bioprocédés.

L'utilisation de bilans de matière constitue un outil puissant pour déduire les équations du modèle [38-40]. L'évolution de la masse M d'un constituant est définie par l'équation suivante :

$$\frac{dM}{dt} = \underbrace{M_{Entrées} - M_{Sorties}}_{\text{Flux entrée/sortie}} + \underbrace{M_{Gaz \rightarrow Liquide} - M_{Liquide \rightarrow Gaz}}_{\text{Echanges gazeux}} + \underbrace{M_{Produite} - M_{Consommée}}_{\text{Bioréaction}} \quad (\text{II.8})$$

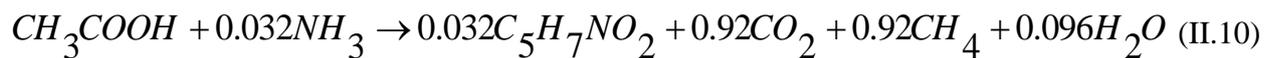
Un grand nombre de modèles reposent sur cette méthode, et les différences se situent principalement au niveau des choix de représentation des cinétiques bactériennes.

Les premiers modèles se sont surtout focalisés sur la méthanogénèse sous l'hypothèse

qu'elle serait l'étape limitante dans le procédé global de digestion anaérobie [41]. Andrews (1968) propose d'utiliser une fonction de Haldane (équation II.2) pour représenter l'inhibition de la croissance des méthanogènes aux fortes concentrations de substrat. Il étudia le système (II.9) dans le cas d'une culture fermée ($D = 0$) et d'une culture continue.

$$\begin{cases} \frac{ds}{dt} = -Dx + \mu(s)x \\ \frac{dx}{dt} = D(s_0 - s) + \frac{\mu(s)}{Y}x \\ \mu(s) = \mu_m \frac{s}{K_s + s + \frac{s^2}{k_i}} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Andrews relie le caractère instable de la digestion anaérobie à l'existence de deux points d'équilibres localement stables pour ce système. Il mit également en évidence l'idée de "lessivage" et de taux de dilution maximal, c'est-à-dire le taux de dilution au-delà duquel le temps de séjour dans le bioréacteur est plus faible que le taux de croissance, et ne permet pas l'accumulation de biomasse. Un modèle complet ne considérant qu'une seule espèce bactérienne, les méthanogènes, fut présenté par [42]. En considérant une formule moléculaire empirique de la biomasse bactérienne ($C_5H_7NO_2$), ils obtinrent une équation stoechiométrique représentant la conversion de l'acétate en biogaz et biomasse :



À la même époque Ierusalimsky s'intéressa à l'inhibition non-compétitive de la croissance sur un substrat simple, et introduisit l'équation (II.11) où I est la concentration de l'inhibiteur et K_i la constante d'inhibition :

$$\mu = \mu_m \frac{s}{K_s + s} \frac{K_i}{K_i + I} \quad (\text{II.11})$$

Par la suite la représentation du procédé a été améliorée en considérant des étapes supplémentaires.

Sinechal et al. (1979) [43] furent parmi les premiers à prendre en compte la solubilisation des composés organiques dans un modèle général de digestion anaérobie. D'autres auteurs se sont intéressés à l'inhibition par des substrats différents des AGV, comme l'azote [44], l'hydrogène [45] ou les composés sulfatés [46]. Par exemple, Hill et Barth incluent un terme supplémentaire dans l'équation de Haldane (II.2) du taux de croissance des méthanogènes pour représenter la

double inhibition par les AGV et l'ammoniac dissous (NH_3) dans la digestion des effluents d'élevages :

$$\mu = \mu_m \frac{agv}{agv + K_s + \frac{agv^2}{K_i} + \frac{\text{NH}_3 agv}{K_n}} \quad (\text{II.12})$$

Mosey (1983) [45] ouvra la voie à des modèles toujours plus complexes en détaillant la représentation de l'acidogénèse. Il introduit un modèle impliquant 4 populations bactériennes et 7 réactions :

- une population acidogène,
- une population acétogène,
- une population méthanogène acétotrophe,
- une population méthanogène hydrogénotrophe.

Ce modèle est construit autour des voies métaboliques de l'acidogénèse et de l'acétogénèse pour rendre compte de l'inhibition de certaines populations bactériennes par l'hydrogène. De nombreux auteurs ont complété ce modèle [47-48], en introduisant de nouveaux substrats comme le lactate [46], en prenant en compte la compétition entre espèces bactériennes [49-50], ou encore en considérant les régimes de fonctionnement, psychro-, méso- ou thermophile [51-52]. Finalement un modèle générique, baptisé ADM1 (IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes, 2002), a été proposé par un groupe d'experts internationaux de la digestion anaérobie sous l'égide de l'international Water Association (IWA). Ce modèle très détaillé, incluant 7 espèces bactériennes et de nombreux substrats répond au besoin de disposer d'une plate-forme commune de travail ; il peut aussi bien servir de base à un procédé virtuel pour la mise en place d'unités de dépollution, que pour tester dans un cadre plus réaliste avant de les valider expérimentalement des stratégies de contrôle basées sur d'autres modèles plus simples. Si ce modèle est séduisant par l'exhaustivité des phénomènes qu'il permet de décrire, sa grande complexité (32 équations et plus de 80 paramètres) en font un système fortement non-linéaire difficile à appréhender. Cette complexité représente un frein à l'analyse mathématique du modèle et limite ses possibilités d'utilisation pour des stratégies de contrôle.

Un modèle plus synthétique, baptisé AM2 [34], représente les principaux flux de masse en ne considérant que deux populations bactériennes ; les acidogènes et les méthanogènes. Sa structure simple (en comparaison du modèle ADM1) se prête plus aisément à des procédures de calibration et permet le développement de capteurs logiciels et de stratégies de contrôle [53].

Des solutions alternatives ont été envisagées pour représenter les cinétiques bactériennes.

Les réseaux de neurones sont une alternative aux modèles "classiques" de Monod (II.3), Haldane (II.2) et Ierusalimsky (II.11). Ces modèles "boîtes-noire" permettent de s'affranchir de toute connaissance a priori des relations entre les différentes variables [30]. L'étape cruciale pour ces modèles est la phase d'apprentissage. Lorsqu'un grand nombre de données sont à disposition, l'apprentissage est facilité et un modèle entrée/sortie peut être obtenu [54]. Sinha et al. (2002) ont ainsi proposé un modèle basé uniquement sur un réseau de neurones pour simuler le fonctionnement d'un réacteur UASB.

Un autre choix consiste à coupler le modèle dynamique obtenu par bilan de masse, avec un réseau de neurones dont le rôle est uniquement d'estimer les cinétiques bactériennes [55].

II.2.3 Modèle ADM1

Le modèle ADM1 qui est actuellement le modèle phénoménologique de digestion anaérobie le plus complet permettant de simuler les réacteurs anaérobies. Une première version de ce modèle a vu le jour dans un rapport scientifique et technique en 2001. ADM1 décrit 19 processus biochimiques, populations bactériennes, 26 variables d'état, dont une grande partie n'est pas accessible à la mesure et 86 paramètres. Ce modèle répond au besoin de disposer d'une plate-forme commune de travail, il peut aussi bien servir de base à un procédé virtuel pour la mise en place d'unités de dépollution, que pour tester dans un cadre plus réaliste avant de valider expérimentalement des stratégies de contrôle basées sur d'autres modèles plus simples [8].

II. 2.3.1 Structure du modèle ADM1

Ce modèle repose sur un bilan entrée/sortie considère cinq étapes pour la digestion anaérobie impliquant 7 espèces bactériennes :

- deux étapes extracellulaires:
 1. la solubilisation de la matière particulaire,
 2. l'hydrolyse enzymatique extracellulaire des matières solubles.
- trois étapes intracellulaires :
 3. l'acidogénèse,
 4. l'acétogénèse,
 5. la méthanogénèse.

À ces processus biochimiques s'ajoutent les échanges physico-chimiques :

- les équilibres acide/base,
- les transferts entre les phases liquide et gazeuse.

Les figures II.3 et II.4 schématisent les voies métaboliques et les processus modélisés dans ADM1.

Cette structure est proche de celle de [56], où dans une première étape la biomasse morte était recyclée en :

- une fraction de matière organique biodégradable,
- une fraction de composés dissous, protéines, mélange de lipides et sucres,
- une fraction de matière organique non-biodégradable (équivalent à la fraction particulaire inerte dans ADM1),
- une partie minérale non biodégradable (équivalent à la partie inerte soluble dans ADM1).

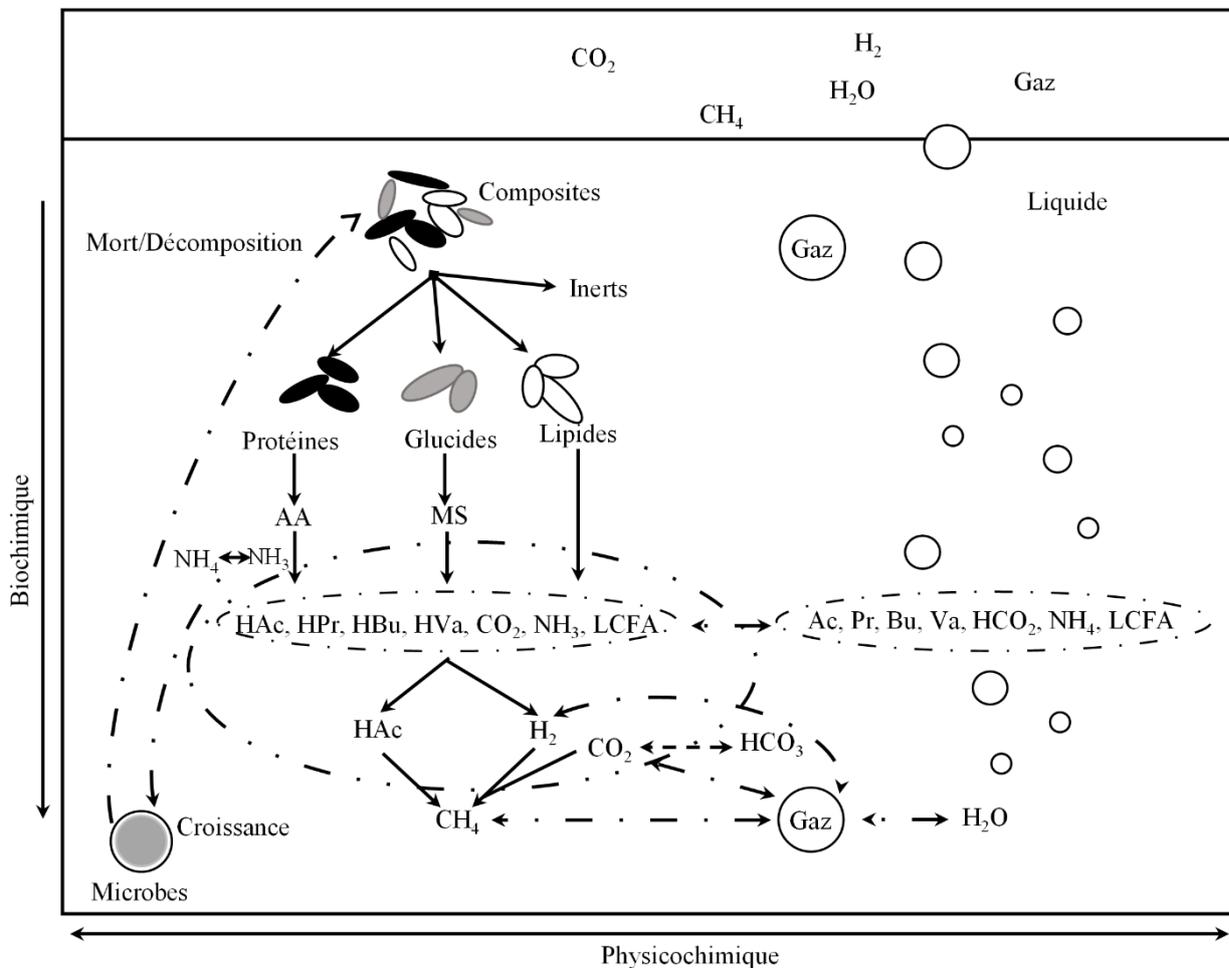


Figure. II.2 Processus biochimiques et physiques pris en compte dans ADM1.

méthanogénèse hydrogénophile

L'influence de la température, qui était déjà prise en compte dans le modèle de [43], est aussi une caractéristique du modèle ADM1 ; cette dépendance des paramètres cinétiques et physicochimiques à la température permet d'adapter le modèle pour représenter soit un procédé mésophile, soit un procédé thermophile.

Concernant les échanges liquide/gaz, le modèle représente les transferts de matière pour les trois principaux gaz : le dihydrogène, le méthane et le dioxyde de carbone. Le modèle de transfert choisi repose sur la théorie des deux films [38].

$$q_i = k_{La} (S_i - K_H P_i) \quad (\text{II.14})$$

où k_{La} est le coefficient volumique global, et S_i et P_i sont respectivement la concentration dissoute et la pression partielle du composé i . À l'équilibre, cette relation se réduit à la loi de Henry. Cette expression introduite par [42], a été reprise par la plupart des modèles [34] [44] [58]. Une particularité du modèle ADM1 réside dans l'expression du pH qui peut être calculé de deux manières différentes :

- soit à partir de l'équation d'évolution de l'hydrogène, incluse dans le système différentiel,
- soit à partir d'un système algébrique décrivant les équilibres acide/base des espèces en solution.

Les auteurs dans [59] ont privilégié ces différents choix de modélisation en raison de leur souplesse qui permet de supprimer ou d'ajouter aisément de nouveaux substrats, des fonctions d'inhibition, ou encore des espèces pour rendre compte de compétition pour l'accès aux substrats. L'incorporation des étapes d'hydrolyse et de solubilisation permet par exemple de représenter le recyclage de la biomasse morte, ou l'interconnexion du modèle ADM1 avec un modèle à boue activée [60-61].

II.2.4 Modèle AM2

II. 2.4.1 Description du modèle AM2

Le modèle AM2 est un modèle à deux étapes fut développé dans le cadre du projet européen AMOCO [34]. C'est un modèle simple à identifier, capable de reproduire le comportement dynamique et de prendre en compte le phénomène de la déstabilisation des digesteurs anaérobies par accumulation des AGV. De tous les modèles actuels, il apparaît comme l'un des plus adaptés pour le contrôle de ces systèmes.

Le développement du modèle AM2 est basé sur l'hypothèse que les populations bactériennes

intervenant dans la digestion anaérobie, peuvent être divisées en deux groupes principaux de caractéristiques homogènes et que la digestion anaérobie peut être décrite par un processus à deux étapes centrales (acidogène et méthanogène), et seuls deux substrats et deux groupes bactériens sont considérés (Figure II.5). La référence [62] est bien étudié le modèle AM2.

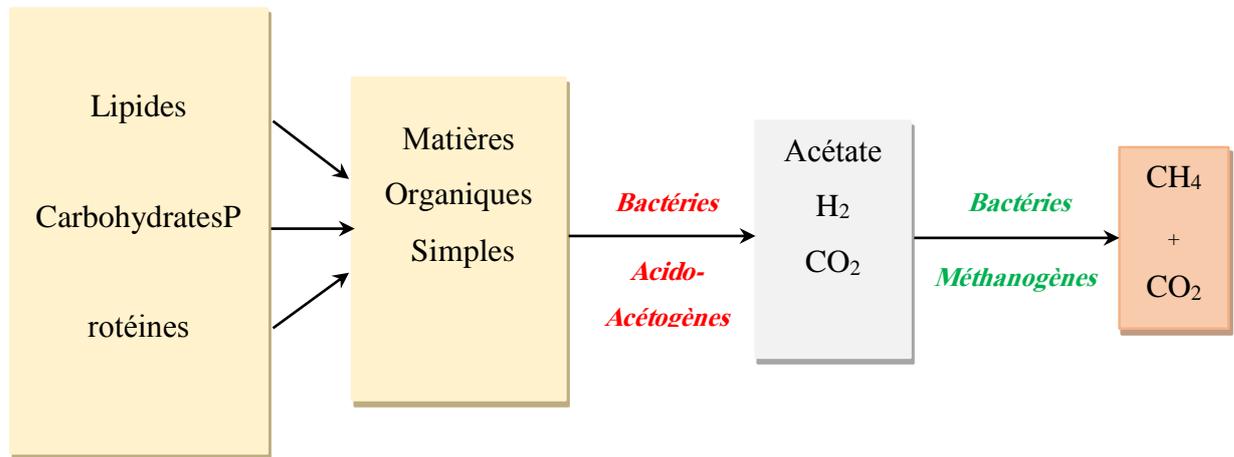


Figure II.4 Schéma du processus de la digestion anaérobie à 2 phases [62].

La première étape est celle de l'acidogène modélisée par une population de bactéries Acido-Acétogènes de concentration X_1 qui décompose le substrat carboné en AGV (qui devient le substrat), et en dioxyde de carbone.

On considère dans ce modèle simplifié que les AGV sont uniquement présents sous forme non ionisées et se comportent comme de l'acide acétique.

Notons que les deux substrats sont aussi présents dans l'alimentation du réacteur. La réaction chimique modélisée est donc la suivante :



où K_1 représente le taux de dégradation du substrat et K_2 représente le taux de production des acides gras volatiles. Avec la vitesse de réaction :

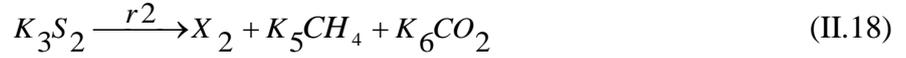
$$r_1 = \mu_1 X_1 \quad (\text{II.16})$$

La croissance de cette population suit une cinétique de Monod:

$$\mu_1 = \mu_{1\max} \frac{S_1}{S_1 + k_{s1}} \quad (\text{II.17})$$

où $\mu_{1\max}$ représente le taux de croissance maximal et k_{s1} la constante de demi-saturation.

La seconde étape est celle de la méthanogènes modélisée par une population de bactéries méthanogènes acétoclastes de concentration X_2 qui transforment les acides gras volatiles (substrat S_2 , provenant de l'alimentation issu de l'acidogène) en méthane et en dioxyde de carbone selon la réaction chimique suivante :



Avec la vitesse de réaction :

$$r_2 = \mu_2 X_2 \quad (\text{II.19})$$

La croissance de cette population suit une cinétique de Haldane qui permet de modéliser l'inhibition des méthanogènes par l'accumulation des AGV. On a :

$$\mu_2 = \mu_{2\max} \frac{S_2}{S_2 + k_{s2} + S_2^2 / K_{I2}} \quad (\text{II.19})$$

où $\mu_{2\max}$ représente le taux de croissance maximal, k_{s2} la constante de saturation et K_{I2} la constante d'inhibition.

II.2.4.2. Equations du modèle dynamique

Le modèle mathématique basé sur les lois de croissances est le modèle AM2, qui fait intervenir les variables dynamiques suivantes :

- X_1 et X_2 , sont respectivement la concentration de la population bactérienne acidogène et la concentration de la population bactérienne méthanogène.
- S_1 et S_2 , sont respectivement la concentration du substrat de matières organiques simples dans le bioréacteur et la concentration du substrat en acides gras volatils dans le bioréacteur.

Le modèle mathématique s'exprime sous la forme d'un système d'équations différentielles du premier ordre de la forme :

$$\begin{cases} \frac{dX_1}{dt} = \mu_1 X_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = \mu_2 X_2 \\ \frac{dS_1}{dt} = -Y_1 \mu_1 X_1 \\ \frac{dS_2}{dt} = Y_b \mu_1 X_1 - Y_2 \mu_2 X_2 \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Le débit de méthane, qui est le produit attendu, dépend directement de la croissance de la population bactérienne méthanogène X_2 , selon la relation:

$$Q = Y_g \mu_2 X_2 \quad (\text{II.22})$$

On distingue 9 paramètres qui interviennent dans ce modèle, soit ($\mu_{1\max}$, K_{S1} , $\mu_{2\max}$, K_{S2} , K_{I2} , Y_1 , Y_2 , Y_b , Y_g).

Pour résoudre ce système d'équations différentielles, il faut aussi fournir les conditions initiales, qui sont alors les estimations des quantités initiales des concentrations des substrats et des bactéries au démarrage du bioréacteur.

II.2.5 Modèle tri-phasique

Le modèle tri-phasique, fait intervenir la phase d'hydrolyse (phase de solubilisation), la phase d'acidogène et la phase de méthanogène. Des relations mathématiques exprimant l'évolution de la biomasse hydrolytique, l'hydrolyse de substrat complexe de départ (glucose).

La phase d'hydrolyse se concentre sur la désintégration des substrats complexes contenus dans l'effluent afin de les transformer en substrats solubles. Cette phase permet de suivre la variation des concentrations en substrat organique complexe et l'hydrolyse de la biomasse hydrolytique pendant un certain temps. La phase acido-acétogène illustre la variation des composés obtenus lors de la phase d'hydrolyse en acides gras volatils, acétate, et en alcools. La phase de la méthanogène décrit la transformation des acides gras volatils et de l'acétate en biogaz par l'intermédiaire de la biomasse méthanogène [28].

Ce modèle est basé sur les travaux de Hill et Barth [44], trois étapes de la méthanisation sont considérées. La première s'agit de l'hydrolyse et la liquéfaction des matières organiques insolubles par les enzymes extracellulaires. La seconde étape décrite la phase de production des acides (acidogène) et la dernière étape illustre la phase de méthanogène.

La dynamique du système de digestion anaérobie représentée par le modèle tri-phasique est illustrée par les équations différentielles suivantes:

$$\begin{cases} \frac{dS_0}{dt} = -bX_1S_0 + DY_pS_{in} - DS_0 \\ \frac{dX_1}{dt} = (\mu_1 - D)X_1 \\ \frac{dS_1}{dt} = -Y_1\mu_1X_1 + bX_1S_0 - DS_1 \\ \frac{dX_2}{dt} = (\mu_2 - D)X_2 \\ \frac{dS_2}{dt} = -Y_2\mu_2X_2 + Y_b\mu_1X_1 - DS_2 \end{cases}$$

$$Q = Y_g\mu_2X_2$$

Les variables dans ce modèle sont :

X_1 et X_2 , sont respectivement la concentration de la population bactérienne acidogène et la concentration de la population bactérienne méthanogène.

S_0 , S_1 , S_2 et S_{in} sont respectivement la concentration en substrat de matières organiques complexes dans le bioréacteur, la concentration du substrat de matières organiques simples dans le bioréacteur, la concentration du substrat en acides gras volatils dans le bioréacteur et la concentration entrante du substrat.

Y_p , b , Y_1 , Y_2 , Y_b , Y_g , μ_{m1} , μ_{m2} , k_{s1} , k_{s2} : sont des coefficients.

D : le taux de dilution est défini comme le rapport du débit d'alimentation Q_{in} (l/jour), au volume du bioréacteur V_1 (l) ; $D = \frac{Q_{in}}{V_1}$

Les cinétiques de croissance des bactéries acidogènes et méthanogènes sont explicitées par le modèle de Monod.

II.2.6 Choix d'un niveau de description et complexité associée

Le tableau 2.1 présente de façon synthétique les différences de complexité des modèles AM2 et ADM1. Le choix d'omettre dans le modèle AM2 certaines voies métaboliques comme la dégradation des acides aminés, ou l'acétogénèse et la méthanogénèse hydrogénotrophe permet d'obtenir une structure très synthétique. Cependant cette simplicité a un certain prix, puisque ce modèle se limite à des alimentations simples (uniquement 2 substrats).

La très grande différence entre ces deux modèles soulève la question de la légitimité et de

l'utilité d'un modèle simple face à des modèles plus complets. Notre objectif étant de modéliser la production de biogaz, et plus particulièrement la production de méthane, les étapes intermédiaires revêtent une importance moindre que l'étape finale de méthanogénèse, et l'utilisation d'un modèle simple comme AM2 peut se justifier. Par ailleurs [63] ont montré que dans de nombreux cas, des modèles aussi simples que le modèle de [40] étaient suffisants pour prédire correctement un certain nombre de variables.

	ADM1	AM2
Processus	5 solubilisation hydrolyse acidogénèse acétogénèse méthanogénèse	2 Acidogénèse Méthanogénèse
Biomasses	7	2
Réactions	19	2
Paramètres	86	9
Sorties	32	8

Tableau 2.1 Différences de complexité des modèles ADM1 et AM2.

II.2.7 Modèle réduit et sa validation

Le modèle de description du processus de la digestion anaérobie utilisé dans cette thèse est la celui à une étape. C'est un modèle de base proposée dans [64-67] consacrée à la modélisation de la digestion anaérobie obtenue par fermentation.

La dynamique du système de digestion anaérobie représentée par le modèle est illustrée par le système d'équations différentielles du premier ordre suivant:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = (\mu(S) - D)X \\ \frac{dS}{dt} = -k_1\mu(S)X + D(S_i - S) \end{cases}$$

X est la concentration de la population bactérienne (ou de la biomasse) (g/l), S est la concentration de substrat de matières organiques complexes dans le bioréacteur (g / l), S_i est la concentration de substrat d'entrée (g/l), k_1 et k_2 sont des coefficients positifs constants représentant les rendement.

Le débit de sortie mesuré, en biogaz (méthane) est donné par : $Q = k_2 \mu(S)X$

$\mu = \mu_m \frac{S}{S + k_s}$ Exprime le taux de croissance des bactéries méthanogènes obtenu grâce au modèle Monod.

μ_m est le taux de croissance spécifique maximal (jour^{-1}) et k_s est un paramètre de saturation (g/l).

$X, S, Q, \mu(S)$ sont toujours des valeurs positives. D est le taux de dilution, défini comme le rapport du débit (jour^{-1}) au volume du bioréacteur.

Le modèle dans l'espace d'état est donné par la forme standard suivante:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = f_0(x, u, t) \\ y = C(S)x \end{cases}$$

Où x est le vecteur d'état défini par: $x = \begin{pmatrix} X \\ S \end{pmatrix}$, $f_0(x, \mu, t) = \begin{pmatrix} \mu X - DX \\ -k_1 \mu X + (S_i - S)D \end{pmatrix}$, u est l'entrée de contrôle: $u = D$ et $C(S) = (k_2 \mu(S) \quad 0)$

II.3 Conclusion

Ce chapitre a permis de récapituler les fondements théoriques du modèle utilisé dans le cadre de ce travail. Il a été rédigé les différents modèles selon le nombre de phases du processus de la méthanisation pris en compte par le modèle. Le modèle réduit est un modèle simple, basé sur une étape (la Méthanogénèse), établi via un bilan de matières. C'est le modèle le plus approprié pour superviser et commander les digesteurs anaérobies.

Chapitre 3

Mode glissant

III.1 Introduction

La prise en compte des différentes sources d'incertitudes dans le développement d'une loi de commande est nécessaire pour améliorer les performances du système en termes de la précision et de la robustesse de la tâche exécutée. Ces incertitudes peuvent être de nature paramétrique, comme par exemple les propriétés dynamique du système, ou encore de nature non paramétrique, comme par exemple des phénomènes non modélisés. Pour résoudre ce problème, des recherches sont menées dans le développement des techniques de commande robustes, telles que, la commande connue par H_∞ [68-70], la commande adaptative [71-73] et la commande par mode glissant (Sliding Mode Control "SMC"). Ce dernier, le sujet principal du présent chapitre, a connu un grand succès ces dernières années, cela est dû à sa simplicité d'implémentation, sa robustesse par rapport aux incertitudes du système et des perturbations externes entachant le processus et son application aux systèmes linéaires et non linéaires. SMC permet de remplacer les problèmes de $n^{\text{ième}}$ ordre par des problèmes de premier ordre équivalents [73].

Le but de ce chapitre est d'introduire les notions de bases du SMC et de présenter quelques algorithmes par SMC d'ordre supérieur. Dans la première partie, une synthèse de la commande basée sur les SMC classiques, connues par SMC d'ordre 1, est présentée [74]. La deuxième partie présente les algorithmes de commandes par mode glissant d'ordre supérieur robustes [75]. L'adaptation des algorithmes de commande par mode glissant est discutée dans la troisième partie.

III.2 Mode glissant d'ordre un

Cette section est principalement basée sur les travaux de [76-78]. Le principe de la

commande par SMC est de forcer les trajectoires d'état d'un système à atteindre une surface de glissement en temps fini, ensuite, y rester, grâce à une commande discontinue. Ainsi, après la convergence, la réponse dynamique du système dépend des paramètres et des équations qui définissent cette surface de glissement [76]. Celle-ci est déterminée en fonction des objectifs de la commande, des propriétés statiques et de la dynamique du système en boucle fermée. Il est possible de synthétiser la surface de glissement en fonction d'objectifs de contrôle classique comme : la stabilité globale, l'optimisation, la régulation, etc. Dans la théorie présentée dans les paragraphes suivants, les systèmes sont non-linéaire, mono-entrée mono-sortie (Single-Input/Single-Output SISO) et affine en la commande.

III.2.1 Formulation de problème

On considère le système SISO décrit par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = x_{i+1}(t) & i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n(t) = f(x) + b(x)u(t) + d(t) \\ y(t) = x_1(t) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

avec : $x(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ est le vecteur d'état, $f(x)$ et $b(x)$ sont des fonctions, non linéaires mesurables, du temps et des états, avec : $b(x) \geq b > 0$ ou b une constante donnée; $u(t)$: est la commande. $d(t)$: est une fonction inconnue introduite pour exprimer les incertitudes de modélisation et les perturbations externe et considérée comme étant bornée: $|d(t)| \leq D$.

L'objectif de la commande est de suivre avec précision une entrée désirée $y_d(t)$, malgré la présence d'incertitudes, l'imprécision du modèle et les variations paramétriques dans $f(x)$ et $b(x)$, c.à.d. $e(t) = y(t) - y_d(t)$ tend vers zéro malgré la présence des incertitudes.

III.2.2 Conception SMC

L'approche de la commande par mode glissant comporte deux étapes:

- **La première** étape est le choix d'une surface, linéaire ou non, (en conséquence appelée "surface de glissement") dans l'espace d'état de sorte que le système contrôlé montre les performances désirées.
- **La seconde** étape est représentée par la conception d'un retour d'état discontinu capable de forcer l'état du système à atteindre, en temps fini, une telle surface et rester sur cette surface.

III.2.2.1 Surface de glissement

- Définition

Soit $s(x,t) : X \times \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction suffisamment différentiable et considérée telle que son annulation permettra de satisfaire l'objectif de commande [73]. La fonction $s(x,t)$ est appelée variable de glissement ou de commutation.

L'ensemble $\sigma(t) = \{x / s(x,t) = 0\}$ représente alors une sous-variété de x de dimension $(n-1)$ appelée surface de glissement ou contrainte de commutation.

- Choix de la surface de glissement

La surface de glissement peut avoir la forme d'un Polynôme de Hurwitz. Dans ce cas la surface de glissement $s(t)$ est une combinaison linéaire des états du système.

$$s(x,t) = e^{n-1} + \dots + c_2 \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e \quad (\text{III.2})$$

où $e(t) = y(t) - y_d(t)$ et n est l'ordre du système.

Les coefficients $c_i (0 \leq i \leq n-2)$ sont choisis de telle sorte que les racines du polynôme (III.2) ont une partie réelle négative.

La difficulté réside dans le choix des coefficients c_i pour des grandes valeurs de n . Slotine [73] propose une forme générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée :

$$s(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(t), \lambda > 0 \quad (\text{III.3})$$

λ est une constante positive qui assure que (III.3) est un polynôme d'Hurwitz. Par exemple pour $n = 2$ la surface de glissement est égale à

$$s(t) = \dot{e}(t) + \lambda e(t) \quad (\text{III.4})$$

- Degré relatif

Le degré relatif est défini comme le nombre de fois que la sortie d'un système doit être dérivée pour que l'entrée de commande apparaisse.

Un régime glissant d'ordre n existe sur la surface σ si et seulement si le système (III.1) est de degré relatif n par rapport à $s(x,t)$.

- Condition d'attractivité

Dans la littérature de la commande par mode glissant, l'entrée de commande est conçue pour assurer l'attractivité. Cette condition spécifie si les trajectoires de l'état du système sont toujours

confinées vers la surface de glissement ou non. L'attractivité de la surface de glissement peut être exprimée par:

1. La limite de la surface de glissement

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} < 0, \quad \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} > 0 \quad (\text{III.5})$$

La condition ci-dessus garantit que s et \dot{s} ont des signes opposés, c.-à-d. $s\dot{s} < 0$.

2. La proposition d'une fonction de Lyapunov de la forme

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (\text{III.6})$$

La condition d'attractivité est vérifiée si la dérivée de V soit définie négative, c.-à-d.

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} s^2 = s\dot{s} < 0 \quad (\text{III.7})$$

Malgré la présence d'incertitudes, la loi de commande est conçue pour assurer une convergence temporelle à la surface de glissement. Par conséquent, une condition d'attractivité plus restrictive est donnée par:

$$s\dot{s} \leq -\eta |s| \quad (\text{III.8})$$

La condition (III.8) est appelée condition η -d'attractivité qui assure une convergence temporelle finie à $s = 0$.

- Temps de convergence

Le temps nécessaire pour atteindre la surface de glissement est connu comme le temps de convergence. Après avoir atteint la surface de glissement, les trajectoires se déplacent vers le point d'équilibre, cette dernière phase est appelée la phase de glissement ou le mode glissant. Pendant le mode de convergence, les trajectoires sont sensibles aux perturbations, aux incertitudes et aux variations paramétriques. Cependant, les trajectoires sont insensibles pendant le mode glissant [79]. L'idée de mode glissant peut être décrite comme dans la Figure III.1.

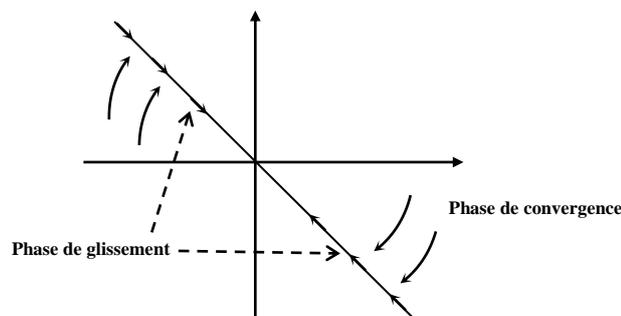


Figure III.1 l'idée de mode glissant.

à partir de l'équation (III.8), on a :

$$\begin{cases} \text{pour } s > 0 \rightarrow \dot{s} \leq -\eta \\ \text{pour } s < 0 \rightarrow \dot{s} \geq \eta \end{cases}$$

Par conséquent, on peut écrire

$$\eta \leq \dot{s} \leq -\eta \quad (\text{III.9})$$

On intègre l'équation (III.9), on trouve :

$$\eta t \leq s(t) - s(0) \leq -\eta t \quad (\text{III.10})$$

quand $t = t_{reach}$, $s(t_{reach}) = 0$ (t_{reach} est le temps de convergence) donc : $-\eta t_{reach} \leq s(0) \leq \eta t_{reach}$ ou bien $|s(0)| \leq \eta t_{reach}$.

On déduit qu'à partir d'une condition initiale $s(0)$, le temps nécessaire pour atteindre la surface de glissement [80] est donné par :

$$t_{reach} = \frac{|s(0)|}{\eta} \quad (\text{III.11})$$

III.2.2.2 Loi de commande

La deuxième étape est la conception d'une commande discontinue qui entraînera les trajectoires d'état du système vers la surface de glissement et, lorsqu'elle est atteinte, maintiendra le mouvement de glissement sur celle-ci pour toutes les périodes subséquentes

Dans les systèmes à structure variable basé sur la commande par mode de glissement, trois schémas de régulation sont possibles [81].

- Le schéma de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande est donné sur la Figure III.2. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance.

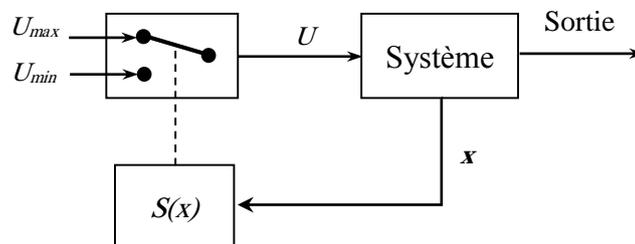


Figure III.2 Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande d'état. Dans ce cas la loi de commutation est donnée selon :

$$U = \begin{cases} U_{max} & \text{si } S(x) > 0 \\ U_{min} & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

- Le schéma de la structure par commutation au niveau d'une contre réaction d'état est illustré dans Figure III.3. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage.

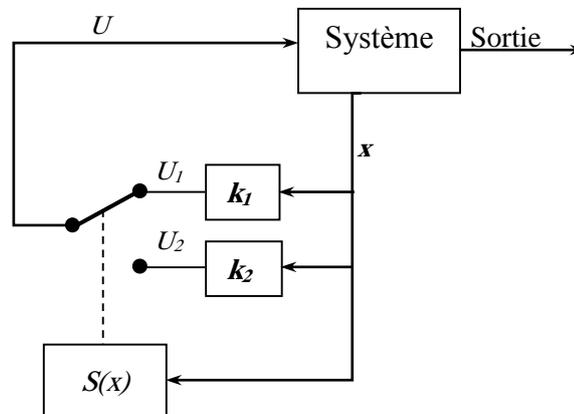


Figure III.3 Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état. La loi de commutation en fonction de contre-réaction d'état est donnée par :

$$U = \begin{cases} U_1 = k_1 x & \text{si } S(x) > 0 \\ U_2 = k_2 x & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

- Le schéma de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande en ajoutant une commande équivalente Figure III.4.

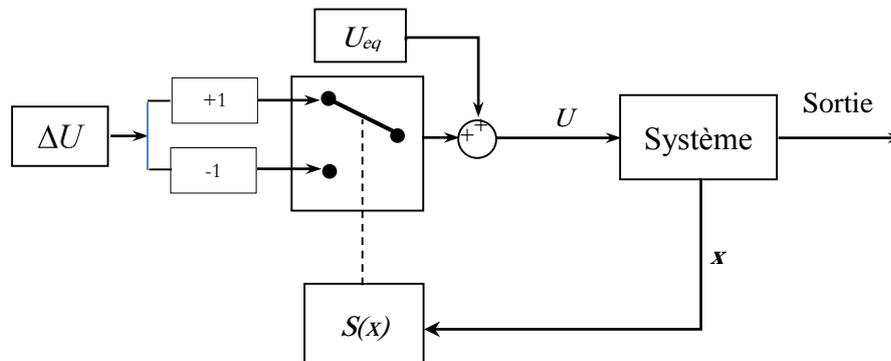


Figure III.4 Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.

Cette structure permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente.

III.2.2.3 Commande par mode glissant à base de la commande équivalente

Une procédure simple permet de calculer facilement et de manière systématique un algorithme de commande par modes glissants d'ordre un.

La commande par modes glissants se décompose généralement ainsi :

$$u = u_{\acute{e}q} + u_{sw}$$

où $u_{\acute{e}q}$ représente la commande équivalente, et u_{sw} est l'action discontinue (de commutation).

- $u_{\acute{e}q}$ déterminée à partir de la condition de convergence permet de décrire le mouvement de glissement idéal, c'est-à-dire dans le cas d'un système sans incertitudes. Elle est obtenue grâce aux conditions d'invariance de la surface donnée par : $s = \dot{s} = 0$
- u_{sw} est l'action discontinue qui assure la convergence en temps fini vers la surface de glissement et le rejet d'une certaine classe de perturbations. La forme la plus simple est la fonction relais donnée par l'équation :

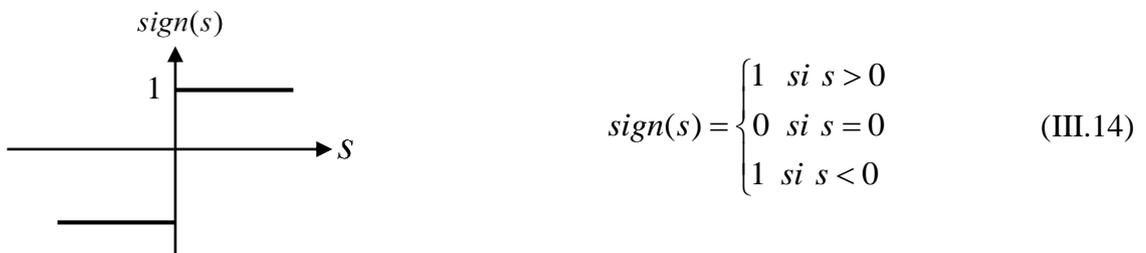


Figure III.5 Fonction sign .

A cette fin (perturbations), l'amplitude de la discontinuité doit être supérieure aux bornes dans lesquelles évoluent les incertitudes de modèle et les perturbations.

La commande équivalente $u_{\acute{e}q}$ peut être perçue comme un moyen, dans le cas d'un système incertain, de minimiser la composante haute fréquence d'une commande à régime glissant classique représentée par u_{sw} .

Exemple 1

Soit un système non-linéaire suivant :

$$\ddot{x} = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (\text{III.15})$$

Où : $x(t) \in \mathfrak{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathfrak{R}$ est l'entrée de commande. $f(x, t)$, $g(x, t)$ sont des fonctions non-linéaires de temps et des états.

Pour la conception de commande, une surface de glissement linéaire $s(x)$ est définie par

$$s(x) = \lambda e + \dot{e}$$

λ est une constante positive et $e = x - x_d$ est l'erreur entre l'état mesuré et l'état désiré.

La dérivée temporelle de la surface de glissement est :

$$\begin{aligned}\dot{s}(x) &= \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) + (\ddot{x} - \ddot{x}_d) \\ &= \lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) + (f(x, t) + g(x, t)u(t) - \ddot{x}_d)\end{aligned}\quad (\text{III.16})$$

Le terme $g(x, t)$ est supposé inversible. La commande équivalente correspondante est écrite comme :

$$u_{eq} = \frac{1}{g(x, t)} \left(-\lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) - (f(x, t) - \ddot{x}_d) \right) \quad (\text{III.17})$$

Pour rendre la loi de commande robuste contre les incertitudes, un terme discontinu est ajouté

$$u_{sw}(t) = \begin{cases} u^+(s) & \text{sign}(s(x)) > 0 \\ u^-(s) & \text{sign}(s(x)) < 0 \end{cases} \quad u^+ \neq u^- \quad (\text{III.18})$$

Donc la loi de contrôle comprend deux termes

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_{sw}(t) \quad (\text{III.19})$$

où u_{sw} est le contrôle correctif utilisé pour atteindre la surface de glissement et compenser les écarts par rapport à cette surface et u_{eq} est la commande équivalente utilisée pour rester sur cette surface et pour rendre la dérivée de la surface de glissement égale à zéro.

La loi de commande totale incluant la commande équivalente est :

$$u(t) = \frac{1}{g(x, t)} \left(-\lambda(\dot{x} - \dot{x}_d) - (f(x, t) - \ddot{x}_d) \right) - k \text{sign}(s(x)) \quad (\text{III.20})$$

où k est le gain de commutation qui peut être sélectionné en fonction de la condition d'attractivité.

III.3 Problème de broutement

Les discontinuités appliquées à la commande produisent des oscillations à la sortie du système, ce phénomène est appelé broutement (voir Figure III.6). C'est l'un des inconvénients les plus importants du mode glissant classique. Durant les années 80, plusieurs méthodes ont été proposées pour réduire le broutement [82]. Dans [83,73], les auteurs ont proposé de remplacer la fonction discontinue "signe", par une commande continue comme par exemple, la fonction de saturation, la fonction pseudo-signes, la fonction arc tangente ou la fonction tangente hyperbolique. Ces fonctions rendent le contrôle continu, par contre les trajectoires convergent uniquement vers un voisinage de la surface de glissement [84]. Dans [78], les auteurs ont proposé un observateur pour éliminer ce broutement ; Cette méthode est intéressante mais sensible aux incertitudes. Dans [85], les auteurs ont proposé le concept de la commande par mode glissant d'ordre deux, celle-ci assure la convergence de la variable de glissement et de sa première dérivée en temps fini vers zéro. Par la suite, cette approche a été développée par [86-87], d'une part pour réduire le

broutement, et d'autre part pour assurer la robustesse des systèmes de degré relatif quelconque. Des travaux récents proposent des commandes adaptatives par SMC d'ordre 1 et supérieur [88-89]. Ces lois de commande utilisent des gains dynamiques qui s'adaptent vis-à-vis des perturbations et des incertitudes du système contrôlé.

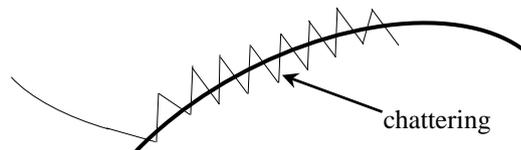


Figure III.6 Phénomène de broutement (chattering).

III.3.1 Approche par couche limite

L'approche de la couche limite s'adresse au broutement en augmentant les dimensions physiques de la surface de glissement de telle sorte que les modes de glissement seraient établis à la proximité de la surface plutôt qu'exactly à la surface (Figure III.7).

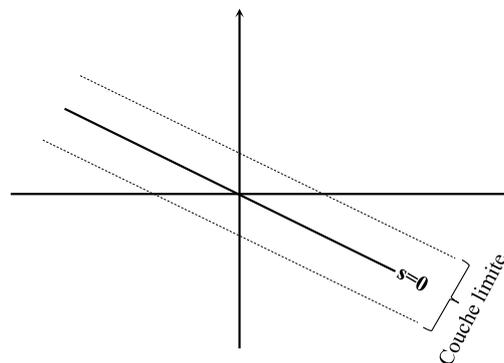


Figure III.7 Couche limite.

III.3.2 Approche basée sur l'observateur

La dynamique non modélisée d'un système physique est l'une des causes mises en évidence de la production de broutement. Cette méthode met en œuvre le SMC avec un observateur convergent asymptotique dans la boucle fermée. L'observateur est destiné à contourner la dynamique non modélisée et donc à produire un mode de glissement presque idéal.

III.3.3 Méthode de gain dépend de l'état

Cette section offre une autre méthode d'atténuer le phénomène de broutement sans avoir conçu un système supplémentaire comme par exemple dans le cas d'un observateur asymptotique qui a besoin d'informations préliminaires sur le système. Dans [90] Les auteurs ont démontré que l'amplitude de broutement est proportionnelle à un gain qui peut être réduit, sans perdre la garantie

d'existence du mode glissant, en utilisant une méthode de gain dépendant de l'état proposé par Utkin [91], cette méthode sera illustrée, par la suite, pour un système du second ordre.

On considère un système décrit par l'équation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1 x_1 + a_2 x_2 + u \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Avec une surface de glissement $s = \lambda x_1 + x_2$, où λ est une constante positive.

La commande u est donnée par :

$$\begin{cases} u = -M \text{sign}(s) \\ M = M(x_1) = M_0(|x_1| + \delta) \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

où M_0 est une constante positive, et δ est une constante positive suffisamment petite. On note que le gain M n'est pas constant mais une fonction de l'état x_1 . La constante M_0 doit être sélectionnée pour forcer l'apparition d'un mode de glissement le long de la surface de commutation. Il peut être trouvé analytiquement à partir des équations (III.21 et (III.22) que :

$$\dot{s} = (a_1 - a_2 c - c^2)x_1 - M_0(|x_1| + \delta)\text{sign}(s) \quad (\text{III.23})$$

Le mode glissement existe si :

$$M_0 \geq |a_1 - a_2 c - c^2| \quad (\text{III.24})$$

III.4 Commande par mode glissant d'ordre supérieur

Dans la section précédente, nous avons présenté la commande SMC classique qui est limitée par l'exigence de garantir un degré relatif égal à un pour la commande par rapport à la surface de glissement choisie et le phénomène de broutement. Dans le but d'éviter ces problèmes, une nouvelle génération des commandes par mode glissant est proposée dans les dernière années. Cette génération est connue sous le nom de mode glissant d'ordre supérieur (Higher Order Sliding Mode Control HOSMC) [75]. Dans cette approche, la commande discontinue agit sur les dérivées d'ordre supérieur de la variable de glissement. Elle est caractérisée par une grande précision et une grande robustesse par rapport aux techniques classiques de mode glissant tout en conservant les propriétés de convergence en temps fini. Dans la suite, nous présenterons les principes de commande par mode glissant d'ordre deux pour les systèmes SISO non-linéaire [92-98].

III.4.1 Mode glissant d'ordre deux

Un contrôleur par mode glissant d'ordre deux (SOSMC) est un cas particulier de contrôle en mode glissant d'ordre supérieur qui préserve les propriétés désirable, notamment l'invariance et la

réduction d'ordre, mais permet de réduire leur principal inconvénient : l'effet de broutement au voisinage de la surface de glissement [99-100].

Plusieurs algorithmes basés sur des lois de commande par mode glissant d'ordre deux ont été proposés. Dans cette section, nous présentons trois algorithmes bien connus. Deux parmi eux sont dédiés aux systèmes de degré relatif 2, qui sont l'algorithme sous-optimal et l'algorithme du Twisting. Le troisième est l'algorithme du Super-Twisting qui est dédié aux systèmes de degré relatif 1 par rapport à s .

Remarque 1 : Les algorithmes dédiés aux systèmes de degré relatif 2, peuvent être adaptés aux systèmes de degré relatif 1. L'adaptation est effectuée en augmentant le degré relatif du système, cela est effectué en agissant sur la dérivée de u , comme le montre (Figure III.8). La commande u est vue dans ce cas comme l'intégrale d'une commande discontinue (d'ordre deux, le twisting ou le sous optimale par exemple).

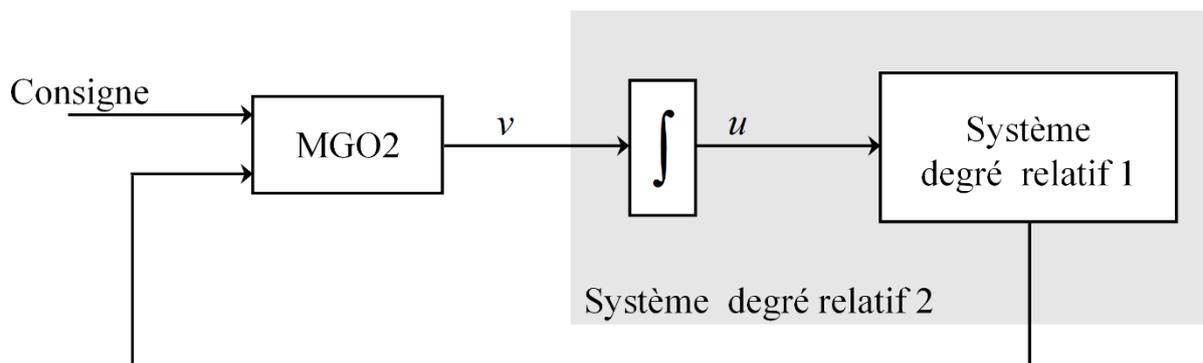


Figure III.8 Augmentation du degré relatif

□ Algorithme Twisting

L'algorithme du Twisting est basé sur une commutation de l'amplitude de la commande entre deux valeurs, de telle manière que, cette commutation crée des trajectoires circulaires jusqu'à la convergence en temps fini à l'origine (Figure III.9). La loi de commande de l'algorithme est définie comme suit :

$$u(t) = -r_1 \text{sign}(s) - r_2 \text{sign}(\dot{s}) \quad (\text{III.25})$$

r_1 et r_2 sont des constantes positives réglables, que satisfont les conditions suivantes :

$$\begin{cases} 0 < r_2 < r_1 \\ r_1 - r_2 > \frac{C'}{K_m} \\ K_m'(r_1 + r_2) - C' > K_M'(r_1 - r_2) + C' \end{cases} \quad (\text{III.26})$$

où C' , K_m' et K_M' sont des constantes positives. Plus de détails sur la preuve et la synthèse de la loi de commande peuvent être trouvés dans [101]. De même que l'algorithme sous-optimal, l'algorithme du Twisting peut être appliqué sur les systèmes de degré relatif 1 par rapport à s .

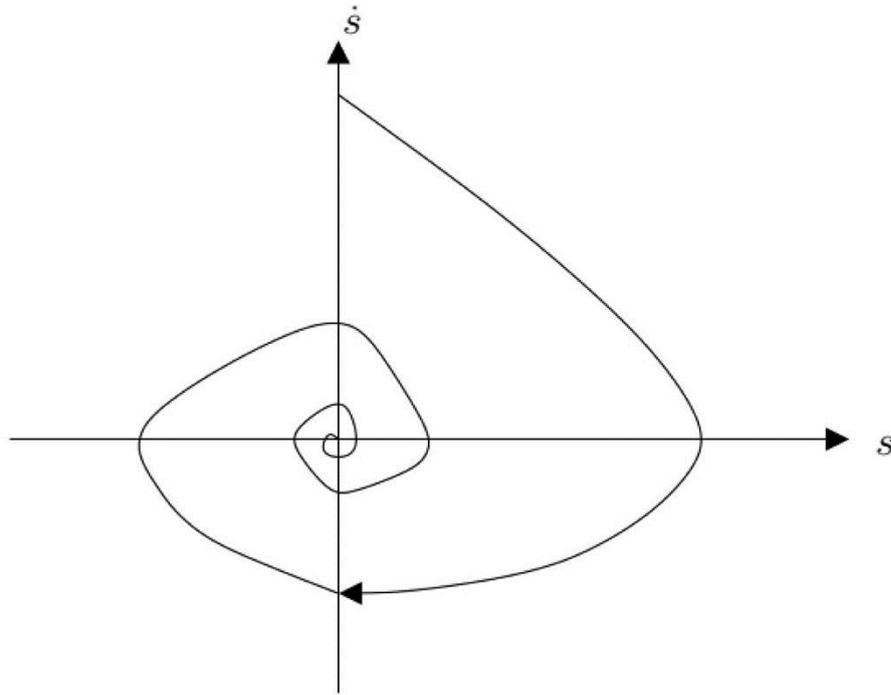


Figure III.9 Algorithme du Twisting : plan de phase (s , s')

□ Algorithme Sous-Optimal

L'algorithme sous-optimal est appliqué aux systèmes de degré relatif 1 et 2 par rapport à $s(x, t)$. Cet algorithme est inspiré de la commande optimale de type bang-bang [102]. Il assure la convergence de s et de s' en temps fini vers zéro, en limitant les trajectoires par des arcs paraboliques qui comprennent l'origine (Figure III.10). Dans le cas où le degré relatif de système est égale à 2 par rapport à $s(x, t)$, la loi de commande est définie par :

$$u(t) = -\alpha(t)V_M \text{sign}(s(t)) - \frac{1}{2}s_M(t) \quad (\text{III.27})$$

où V_M est une constante positive réglable et s_M est défini par :

$$s_M(t) = \begin{cases} s(0) & , \quad 0 \leq t \leq t_{M1} \\ s(t_{Mi}) & , \quad t_{Mi} \leq t \leq t_{Mi+1} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots \quad (\text{III.28})$$

où t_{Mi} sont les instants où $s' = 0$. Le paramètre $\alpha(t)$ est défini par :

$$\alpha(t) = \begin{cases} \alpha^* & , \text{ si } [s(t) - \frac{1}{2}s_M](s_M - s(t)) < 0 \\ 1 & , \text{ si } [s(t) - \frac{1}{2}s_M](s_M - s(t)) \leq 0 \end{cases} \quad (\text{III.29})$$

où α^* est une constante positive. Les paramètres du contrôleur, α^* et V_M , doivent satisfaire les conditions suivantes :

$$\begin{cases} \alpha^* & \in [0,1] \cap (0, \frac{3K_m'}{K_M'}) \\ V_M & = \max(\frac{C'}{\alpha^* K_m'}, \frac{4C'}{3K_m' - \alpha^* K_M'}) \end{cases} \quad (\text{III.30})$$

où C' , K_m' et K_M' sont des constantes positives.

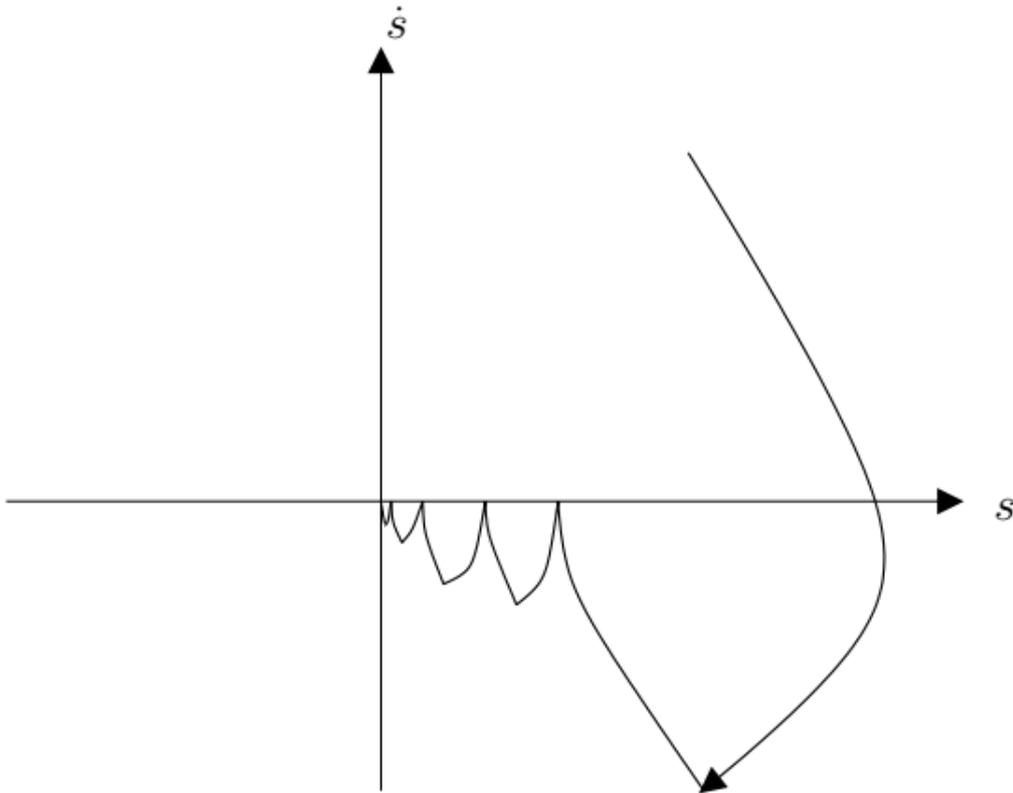


Figure III.10 Algorithme sous-optimal : plan de phase (s , \dot{s})

Suivant la remarque 1, l'algorithme sous-optimal peut être également appliqué aux systèmes de degré relatif 1 par rapport à s :

$$v(t) = \dot{u} = -\alpha(t)V_M \text{sign} \left(s(t) - \frac{1}{2}s_M(t) \right) \quad (\text{III.31})$$

Pour plus de détails sur la synthèse et la preuve de la convergence de l'algorithme voir [92,103].

III.5 Algorithme Super-Twisting

L'algorithme du Super Twisting est l'algorithme le plus utilisé pour la commande par mode glissant d'ordre 2. Celui-ci n'est applicable qu'aux systèmes qui présentent un degré relatif 1 par rapport à la variable de glissement. Cette loi de la commande converge en un temps fini avec une trajectoire semblable à celle de l'algorithme du Twisting (Figure III.11) [93].

Les principaux avantages de cet algorithme sont la continuité de la commande et l'absence du besoin de la dérivée de la surface de glissement.

La loi de commande du Super Twisting est donnée par l'équation suivante :

$$\begin{cases} u(t) = u_1 + u_2 \\ \dot{u}_1 = -\beta \text{sign}(s) \\ u_2 = -\alpha |s|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s) \end{cases} \quad (\text{III.32})$$

où α et β sont des constantes positives. La preuve de la stabilisation et de la convergence du système est présentée dans [101, 104]. Les conditions suffisantes des paramètres du contrôleur, pour assurer la convergence, elles sont données comme suit :

$$\begin{cases} \beta > \frac{C}{K_m} \\ \alpha^2 \geq \frac{4CK_M(\beta + C)}{K_m^3(\beta - C)} \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

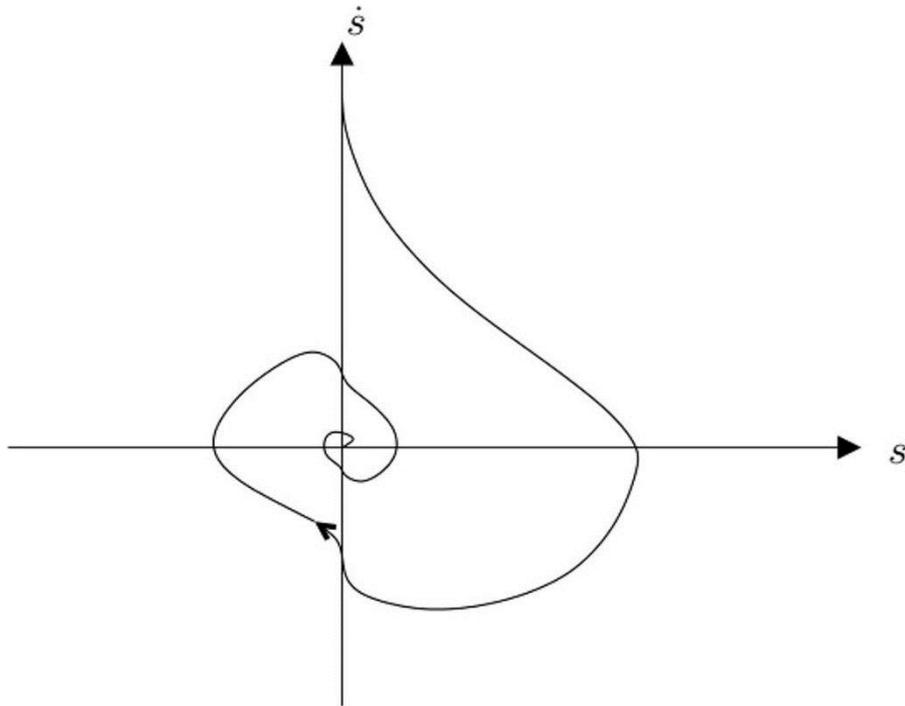


Figure III.11 Algorithme du Super Twisting : plan de phase (s, \dot{s}) .

III.5.1 Différentiateurs exact par mode glissant

Dans cette partie, un différentiateur (dérivateur) robuste via modes glissants d'ordre deux sera étudié [105, 106].

Principe

Soit une fonction $f(t)$ définie sur $[0, \infty[$ Supposons que cette fonction possède une dérivée. Soit C la constante de Lipschitz associée.

Pour trouver la dérivée de cette fonction, considérons l'équation suivante :

$$\dot{x} = u \quad (\text{III.34})$$

On Considère maintenant la surface de glissement suivante

$$s = x - f(t) \quad (\text{III.35})$$

Le but de la commande par mode glissant d'ordre deux est d'obtenir après bouclage $x = \dot{x} = 0$ en un temps fini grâce à la commande discontinue. Généralement, pour générer un régime glissant d'ordre deux sur cette surface choisie, on aura besoin de la connaissance de $s = x - f(t)$ et sa dérivée $\dot{s} = \dot{x} - \dot{f}(t)$.

L'algorithme du super-twisting permet de générer ce régime glissant d'ordre deux à partir des informations sur la surface de glissement seulement et donc aucune information sur la dérivée

de la fonction $f(t)$ n'est nécessaire.

En appliquant cet algorithme, la commande est donnée par :

$$\begin{cases} u(t) = u_1 - \alpha |s|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(s) \\ \dot{u}_1 = -\beta \text{sign}(s) \end{cases} \quad (\text{III.36})$$

L'entrée et la sortie de ce différentiateur sont respectivement $f(t)$ et u . En effet, en un temps

fini, on a : $\dot{s} = 0 \Rightarrow \dot{x} - \dot{f}(t) = u - \dot{f}(t) = 0$

Ou encore :

$$u = \dot{f}(t) \quad (\text{III.37})$$

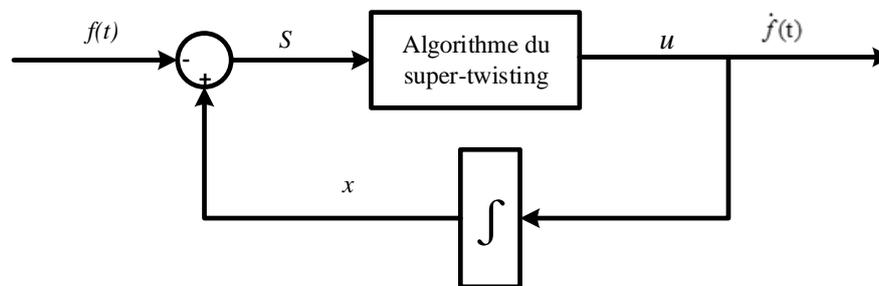


Figure III.12 Schéma de principe du différentiateur robuste.

La condition suffisante pour engendrer la convergence en temps fini de vers la surface de glissement est :

$$\begin{cases} \beta > C \\ \alpha^2 > 4C \frac{\beta + C}{\beta - C} \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

La figure III.12 représente un schéma simplifié d'un différentiateur robuste basé sur le super-twisting algorithm.

III.6 Adaptation du mode glissant

Dans les sections précédentes, nous avons mentionné que les algorithmes de commande par mode glissant sont régulés par un ensemble de paramètres qui sont sélectionnés en fonction des valeurs maximales des fonctions incertaines. Pratiquement, la surcharge « overloading » de ces paramètres permet d'améliorer les performances du système en termes de précision et de rejet d'incertitudes, cependant, elle augmente les risques du phénomène de broutement et par conséquent la déstabilisation du système. Les techniques de commande adaptatives sont largement introduites pour supporter les algorithmes de commande par mode glissant afin de gérer ce

compromis [107]. Le terme d'adaptation signifie l'ajustement du système de commande pour que le comportement de contrôleur soit conforme sur des nouvelles circonstances imprévisibles. Dans la littérature, on peut essentiellement distinguer deux classes de commande adaptative : la commande adaptative basée sur un identificateur de paramètres dynamique du système commandé et la commande adaptative basée sur régulateur de paramètres du contrôleur [108].

Les commandes adaptatives basées sur un identificateur de paramètres sont généralement composées de deux blocks. Un block interne pour l'estimation des paramètres dynamiques du système commandé et une rétroaction externe qui assure l'exécution des tâches associées. Ces techniques sont largement utilisées dans le cas où les paramètres dynamiques sont inconnus ou variant dans le temps et sont généralement supportées par les techniques de commande par mode glissant pour améliorer ces performances en terme de précision, de temps de convergence, de stabilité et de robustesse [109-110].

Le but principal de la commande adaptative basé sur un régulateurs des gains est de supporter un algorithme de commande par mode glissant avec un système de réglage qui permet d'ajuster les paramètres de commande discontinue jusqu'à l'assurance d'existence de mode glissant réel autour de la surface de glissement et d'éviter de la surcharge des gains de la commande discontinue. Dans ce cas on peut distinguer les approches basées sur un observateur des incertitudes [73]. Les gains de la commande discontinue sont ensuite définis comme une fonction des incertitudes observées. En plus de sa complexité, ces algorithmes permettent seulement de réduire l'effet des perturbations externes.

Une autre solution basée sur le principe de stabilisateur universel publié dans [108] [111] a été proposée dans [89] [112] pour le réglage des gains de mode glissant conventionnel. Un gain de contrôle adaptatif est entraîné par une fonction positive de la surface de glissement et une loi mise à jour appropriée. Une extension de cette approche est ensuite introduite dans [113] pour la régulation automatique du gain d'algorithme de super-twisting. Nous pouvons aussi mentionner les travaux d'A. Levant et son co-auteurs dans ce domaine [114] [107] où le problème de régulation des gains du Twisting algorithme est considéré. Cet algorithme est basé sur le principe d'assurer l'existence d'un régime de glissement réel d'ordre deux avec une précision bien spécifiée.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la commande par mode glissant, ses avantages et ses inconvénients. Nous avons abordé les différentes approches qui permettent de réduire le phénomène du broutement. Ensuite, nous avons présenté la commande par SOSMC. Celle-ci est

connue pour sa robustesse et sa convergence en temps fini vis-à-vis des perturbations et des variations paramétriques et la réduction du broutement. Les algorithmes les plus utilisés dans la littérature ont été présentés, notamment l'algorithme sous-optimal, l'algorithme du Twisting et l'algorithme du Super Twisting. Un différentiateur robuste exact est présenté, celui-ci est utilisé dans le but de calculer la dérivée de la variable de glissement pour certains algorithmes. Ensuite des commandes adaptatives par SOSMC ont été présentées, plus particulièrement l'algorithme du Super Twisting et l'algorithme du Super Twisting adaptative. Ces approches sont utilisées dans les chapitres 4 et 5 dans le but de commander le système biotechnologique (biogaz).

Chapitre 4

Commande par mode glissant d'ordre un

IV.1 Introduction

La SMC conventionnelle a été appliquée avec succès dans le domaine mécanique [90, 115]. Cette stratégie a été récemment étendue au procédé chimique [116]. Par ailleurs, quelques tentatives pour la mise en œuvre du SMC [117-119] et du SMC combinés avec des lois de contrôle adaptatif de référence de modèle [88] [120-121] sont suggérées pour les bioprocédés. Ces stratégies offrent un bon rendement dans l'occurrence des incertitudes des paramètres et perturbations externes.

A cet effet, une loi d'adaptation est introduite dans le présent chapitre dans la partie discontinue d'un contrôleur SMC conventionnel développé pour un processus biotechnologique, où la principale contribution de ce chapitre est de surmonter à la fois les deux problèmes de perturbation et d'atténuation du broutement dans la stratégie de contrôle du mode glissant en utilisant la méthode de contrôle adaptatif. Ainsi, le contrôle adaptatif proposé est composé d'une partie continue et une partie discontinue avec un gain adaptatif.

La stabilité et les propriétés de convergence de ce contrôleur sont prouvées par la méthode Lyapunov. Le principal avantage de l'utilisation de l'algorithme SMC avec un gain adaptatif est l'amélioration des performances du système, principalement la robustesse du système et le temps de réponse de la technique classique SMC. Un modèle de simulation complet pour le contrôleur proposé est développé dans l'Environnement MATLAB®. Les résultats de la simulation confirment la faisabilité et la performance l'amélioration du contrôleur proposé dans différentes conditions d'exploitation, par rapport au SMC conventionnel.

IV.2 Modèle dynamique du bioprocédé

Dans la pratique, le contrôle des procédés biotechnologiques se limite souvent à la régulation du pH et la température à des valeurs constantes favorables à la croissance microbienne. Il doute que le contrôle des variables d'état biologique (biomasse, substrats, ...etc.) puisse aider à augmenter la performance. Elaborer et appliquer des stratégies de contrôle avancées pour ces variables biologiques, il est obligatoire d'obtenir un modèle dynamique utile.

Au moyen d'un bilan massique des composants à l'intérieur du bioréacteur et en règles de modélisation, un modèle dynamique d'un prototype de bioprocédé continu qui a lieu dans un bioréacteur en cuve agitée continue CSTB (Continuous Stirred Tank Bioreactor) est défini par le système non linéaire suivant [122] :

$$\begin{cases} \dot{X} = \mu(S)X - DX \\ \dot{S} = -K_1\mu(S)X - DS + u \\ e = X - X^* \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

où $X(g/l)$ représente la concentration de biomasse et $S(g/l)$ la concentration de substrat. Dans Eq. (IV.1), D est le taux de dilution (h^{-1}) et K_1 est le coefficient de rendement. La variable de contrôle u est définie comme le débit d'alimentation du substrat au réacteur par unité de volume (g/lh) et X^* représente la concentration désirée de biomasse (g/l).

Pour ce bioprocédé spécifique, le taux de réaction est de la forme $\varphi(X, S) = \mu(S)X$, avec $\mu(S)$ est le taux de croissance spécifique (une fonction non linéaire de S).

Il existe de nombreux modèles pour le taux de croissance spécifique, selon le type de microorganismes impliqués dans la réaction. L'un des modèles les plus utilisé est le modèle cinétique de monod :

$$\mu(s) = \frac{\mu^* S}{(K_M + S)} \quad (\text{IV.2})$$

où μ^* est le taux de croissance spécifique maximal et K_M la constante Michaelis Menten.

L'objectif de contrôle pour le bioprocédé est contrôlé l'erreur de concentration e à zéro afin que la valeur de concentration de biomasse X devrait converger vers une valeur de point de consigne prescrite spécifiée par la constante X^* .

IV.3 Contrôleurs SMC et gain adaptatif

Cette section donne le détail de la conception SMC du bioprocédé défini par le processus (Eqs. (IV.1) et (IV.2)). En général, l'approche de contrôle en mode glissant consiste habituellement à : deux étapes [73] :

- Etape 1 Conception de la surface glissante : définir une variable de sortie fictive (dite "Variable glissante") en fonction de la Sortie mesurable, et d'un certain nombre (i.e. la dynamique de zéro associée) répond à la spécification de performance souhaitée.
- Étape 2 – Conception du contrôleur : définir une action de contrôle qui oriente à zéro en temps fini la variable glissante, malgré les incertitudes et les perturbations du modèle.

IV.3.1 Loi SMC

Comme indiqué ci-dessus, l'objectif du contrôle des processus de traitement des déchets est de contrôler la concentration de certains polluants à un niveau constant faible. Donc, on peut considérer ce qui suit fonction de sortie auxiliaire, qui est appelée dans ce cas la surface glissante :

$$\sigma = \dot{e} + \lambda e = \mu(S)X - DX + \lambda(X - X^*) \quad (\text{IV.3})$$

où σ est la surface de glissement et λ est une constante positive.

Il est relativement du premier degré avec l'entrée de contrôle, on peut donc utiliser la commande glissant d'ordre un FOSMC (First Order Sliding Mode Control) algorithmme pour assurer la stabilisation robuste de la surface dans l'Eq. (IV.3) Saisir le dérivé du premier ordre de la sortie dans Eq. (IV.3) pour obtenir :

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \left(\frac{\mu^* K_M}{(K_M + S)^2} \dot{S} \right) X + \mu(S) \dot{X} - D\dot{X} + \lambda \dot{X} \\ &= \mu'(S)X (-K_1 \mu(S)X - DS) + \mu'(S)X u + (\mu(S) - D + \lambda)(\mu(S) - D) \end{aligned} \quad (\text{IV.4})$$

où

$$\mu'(S) = \frac{\mu^* K_M}{(K_M + S)^2} \quad (\text{IV.5})$$

L'équation (IV.4) peut être exprimée comme suit :

$$\dot{\sigma} = \Psi + \mu'(S)X u = \Psi + \Gamma u = \Psi + d + \bar{u} \quad (\text{IV.6})$$

avec

$$\begin{cases} \Psi = \mu'(S)X (-K_1 \mu(S)X - DS) + (\mu(S) - D + \lambda)(\mu(S) - D) \\ \Gamma = \mu'(S)X \quad \text{et} \quad \bar{u} = \Gamma u \end{cases} \quad (\text{IV.7})$$

où la fonction inconnue d est introduite pour représenter toutes les incertitudes du modèle et les perturbations externes. Les fonctions Ψ et Γ sont supposées être telles que :

$$\begin{cases} |\Psi| \leq \Psi_M \\ 0 < \Gamma_m \leq |\Gamma| \leq \Gamma_M \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

On suppose que Ψ_M , Γ_m et Γ_M existent mais ne sont pas connus.

Le meilleur rapprochement de la loi de contrôle qui permettrait d'atteindre $\dot{\sigma} = 0$ et assure

la robustesse du système contrôlé est :

$$\bar{u} = \bar{u}_{eq} + \bar{u}_{sw} \quad (IV.9)$$

avec

$$\bar{u}_{eq} = -\Psi = \mu'(S)X[K_1\mu(S)X + DS] - (\mu(S) - D + \lambda)(\mu(S) - D)X \quad (IV.10)$$

et

$$\bar{u}_{sw} = -K \operatorname{sgn} \sigma, K > |d| \quad (IV.11)$$

où K est un scalaire strictement positif.

Dans ce cas, l'entrée de contrôle u peut être définie comme suit :

$$\begin{aligned} u &= \frac{\bar{u}}{\mu'(S)X} \\ &= K_1\mu(S)X - \frac{(\mu(S) - D)^2}{\mu'(S)} - \frac{1}{\mu'(S)X} \cdot (\lambda(\mu(S) - D)X + K \operatorname{sgn}(\lambda(X - X^*) + (\mu(S) - D)X)) \end{aligned} \quad (IV.12)$$

IV.3.2 Loi SMC adaptatif

Les performances de l'algorithme SMC décrit ci-dessus dépendent de la sélection appropriée du gain K . En raison du niveau élevé de non-linéarité dans le système considéré et de la présence de perturbations externes, nous pouvons choisir d'augmenter le gain de commutation K pour surmonter les problèmes précis de stabilisation et de rejet de perturbation dans la conception de contrôle. Cependant, un coefficient plus élevé peut produire un phénomène de broutement plus important, avec une amplitude proportionnelle à l'amplitude de discontinuité dans le contrôleur. Ainsi, le contrôleur global est composé d'une partie continue, comme dans Eq. (IV.9), et d'une partie discontinue avec un gain adaptatif.

Le gain K est adapté à la sortie du mode glissant selon l'algorithme suivant [110]:

$$K(t) = \begin{cases} \int_0^t \bar{K}_1 \cdot |\sigma(x,t)| dt & \text{if } |\sigma(x,t)| > \varepsilon > 0 \\ \bar{K}_2 \cdot |\eta| + \bar{K}_3, & \text{if } |\sigma(x,t)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (IV.13)$$

ou

$$\tau \dot{\eta} + \eta = \operatorname{sgn}(\sigma(x,t)) \quad (IV.14)$$

et \bar{K}_1 , \bar{K}_2 et \bar{K}_3 sont des constantes qui varient lorsqu'il y a un changement dans le signe de surface au temps t^* , où t^* est la plus grande valeur de temps et en dénotant t^{*-} le temps juste avant t^* : $\sigma(x(t^{*-}), t^{*-}) > \varepsilon$ et $\sigma(x(t^*), t^*) \leq \varepsilon$ pour un paramètre positif approprié ε .

IV.3.3 Analyse de stabilité

Nous commençons par l'étude de la stabilité du SMC classique, puis l'étude de la stabilité du SMC adaptatif.

La stabilité du système sous l'entrée de contrôle Eq. (IV.12) peut être montrée en choisissant la fonction Lyapunov suivante qui est définie positive :

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 > 0 \quad (\text{IV.15})$$

Prendre son premier dérivé de temps pour produire :

$$\dot{V} = \sigma \dot{\sigma} \quad (\text{IV.16})$$

Introduction u dans l'Eq. (IV.16), on peut obtenir :

$$\dot{V} = \sigma((\mu'(S)(-K_1 \mu(S)X - DS + u))X + (\mu(S) - D + \lambda)(\mu(S) - D)X) \quad (\text{IV.17})$$

alors :

$$\dot{V} = \sigma(-K \operatorname{sgn} \sigma) = -K |\sigma| < 0 \quad (\text{IV.18})$$

Ce qui implique la stabilité du système étudié.

Remarque 2 : Le problème de singularité peut se poser dans la conception du contrôle lorsque $X = 0$ est dépourvu de signification pratique ($X = 0$ signifie qu'il n'y a pas de microorganismes et que la vie dans le bioréacteur est interrompue).

Nous allons étudier la stabilité dans le cas du mode glissant à gain adaptative AGSMC (Adaptive Gain Sliding Mode Control) :

- Premier cas : $|\sigma(x,t)| > \varepsilon > 0$

Considérons la fonction candidate de Lyapunov suivante, avec K^* est une constante positive :

$$V = \frac{1}{2} \sigma^2 + \frac{1}{2\gamma} (K - K^*)^2 \quad (\text{IV.19})$$

et

$$\dot{V} = \sigma \cdot \Psi - \sigma \cdot \Gamma_m \cdot K \cdot \operatorname{sign}(\sigma) + \frac{1}{\gamma} (K - K^*) \cdot \bar{K}_1 \cdot |\sigma| \quad (\text{IV.20})$$

Par conséquent

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \Psi_M \cdot |\sigma| - \Gamma_m \cdot K \cdot |\sigma| + \frac{1}{\gamma} (K - K^*) \cdot \bar{K}_1 \cdot |\sigma| \\ \dot{V} &\leq \Psi_M \cdot |\sigma| - \Gamma_m \cdot K \cdot |\sigma| + \Gamma_m \cdot K^* \cdot |\sigma| - \Gamma_m \cdot K^* \cdot |\sigma| + \frac{1}{\gamma} (K - K^*) \cdot \bar{K}_1 \cdot |\sigma| \\ \dot{V} &\leq (\Psi_M - \Gamma_m \cdot K^*) \cdot |\sigma| + (K - K^*) \cdot (-\Gamma_m \cdot |\sigma| + \frac{\bar{K}_1}{\gamma} \cdot |\sigma|) \end{aligned} \quad (\text{IV.21})$$

Il existe toujours $K^* > 0$ tel que $K - K^* < 0$ pour tous $t > 0$. Il donne :

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -(-\Psi_M + \Gamma_m \cdot K^*) \cdot |\sigma| - (-\Gamma_m \cdot |\sigma| + \frac{\bar{K}_1}{\gamma} \cdot |\sigma|) \cdot |K - K^*| \\ &= -\beta_\sigma \cdot |\sigma| - \beta_K \cdot |K - K^*| \end{aligned} \quad (\text{IV.22})$$

avec: $\beta_\sigma = -\Psi_M + \Gamma_m \cdot K^*$ and $\beta_K = -\Gamma_m \cdot |\sigma| + \frac{\bar{K}}{\gamma} \cdot |\sigma|$.

Il existe toujours K^* et γ tel que $K^* \succ \frac{\bar{K}}{\Gamma_m}$ et $\gamma \prec \frac{\bar{K}}{\Gamma_m}$, qui donne $\beta_\sigma \succ 0$ et $\beta_K \succ 0$. Ensuite, nous obtenons :

$$\dot{V} = -\beta_\sigma \cdot \sqrt{2} \frac{|\sigma|}{\sqrt{2}} - \beta_K \cdot \sqrt{2\gamma} \frac{|K - K^*|}{\sqrt{2\gamma}} \quad (IV.23)$$

$$\dot{V} \leq -\min\{\beta_\sigma \sqrt{2}, \beta_K \sqrt{2\gamma}\} \left(\frac{|\sigma|}{\sqrt{2\gamma}} + \frac{|K - K^*|}{\sqrt{2\gamma}} \right) \leq -\beta \cdot V^{1/2}$$

avec: $\beta = \min\{\beta_\sigma \sqrt{2}, \beta_K \sqrt{2\gamma}\}$.

- Deuxième cas: $|\sigma(x, t)| \leq \varepsilon$

Selon le théorème développé en [123], si K est assez grand en ce qui concerne les effets de perturbations/incertitudes, alors la commande de mode de glissement proposée avec l'algorithme d'adaptation de gain Eq. (IV.13) permet de maintenir les réponses du système sur la surface de glissement $\sigma = 0$. En supposant que les réponses du système atteignent, cela signifie que K est assez grand comme requis par le théorème en [124]. Avant, le mode glissant est établi dans le système pour tous $t \geq t_r$ (où t_r représente le temps d'atteinte de la commande glissante). Par conséquent, le théorème est confirmé. D'Eqs. (IV.8) et (IV.9), nous pouvons noter que la principale caractéristique de cette approche est qu'elle n'exige pas a priori la connaissance du gain de contrôle. L'auto-réglage du paramètre de contrôle consiste à augmenter le gain de contrôle K , à partir d'une valeur initiale, puisqu'un mode de glissement est établi.

IV.4 Résultats et discussion:

Les tâches de contrôle simulées ont considéré le problème de la stabilisation de l'erreur e à zéro, qui est équivalente à la concentration de biomasse X convergeant vers une valeur de référence constante prédéterminée X^* , lorsque les valeurs prises en compte pour les paramètres du processus [124]: $K_1 = 12$, $D = 0.2h^{-1}$, $\mu^* = 2.1h^{-1}$, $K_M = 10g/l$. Afin d'analyser le comportement et de tester les performances des contrôleurs, les cas de simulation suivants sont pris en compte :

- La loi SMC Eq. (IV.12) est mis en œuvre pour le bioprocédé continu, avec les paramètres de contrôle $K = 3$, $\lambda = 1$, et le point de consigne pour la concentration de biomasse $X^* = 50 g/l$. Un changement de pas dans le point de consigne est fourni de la valeur initiale $X^* = 50 g/l$ à la valeur $C = 35 g/l$.
- Contrôle de l'entrée u et la loi d'adaptation du gain $K(t)$ respectivement lue comme dans

Eqs. (IV.12) et (IV.13). Le gain est initialisé $K(0) = 10$, et sa dynamique étant réglée avec $\bar{K}_1 = 10$, $\bar{K}_3 = 1$ et $\tau = 3h$.

Essai 1 : Cas nominal

Nous considérons le cas nominal où le modèle du système est connu et où aucun signal de perturbation externe n'affecte le système. Les figures IV.1 et IV.2 illustrent l'évolution de la concentration de la biomasse et l'erreur de suivi, respectivement, du processus nominal sous les contrôleurs susmentionnés.

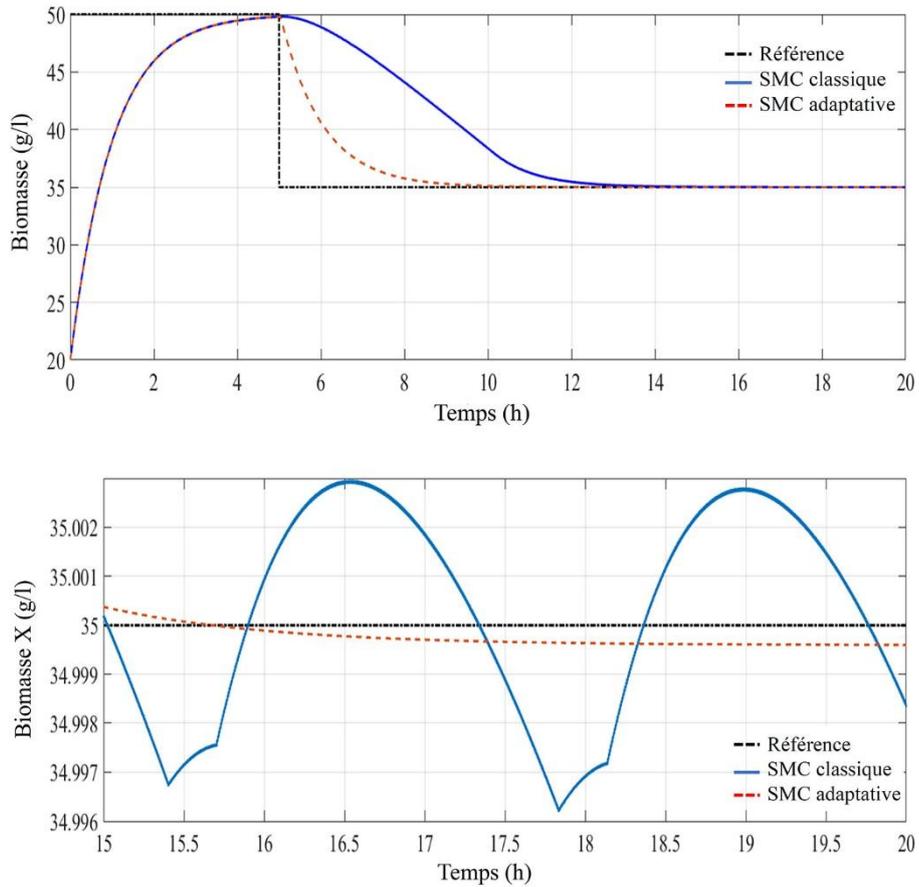


Figure. IV. 1. Réponse temporelle de la concentration de biomasse avec SMC et AGSMC, (b) zoom en vue de (a).

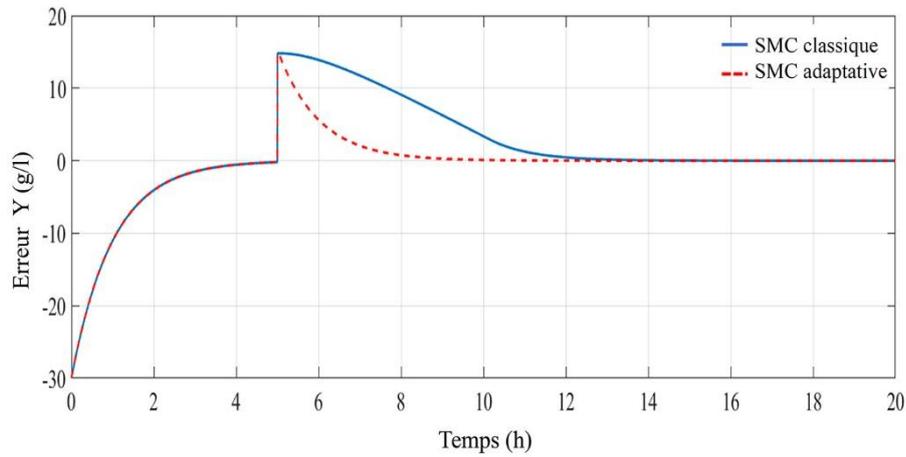


Figure. IV. 2. Erreur d'évolution de la biomasse avec SMC et AGSMC.

Par rapport à la SMC classique, il est clair que l'algorithme proposé permet d'atteindre une convergence rapide du système à sa référence souhaitée en Figure. IV. 1(a) et Figure. IV. 2. En outre, il est clairement vu de la Figure. IV. 1(b) que l'AGSMC permet d'atténuer les phénomènes de broutement qui caractérisent la réponse du système sous un gain fixe SMC.

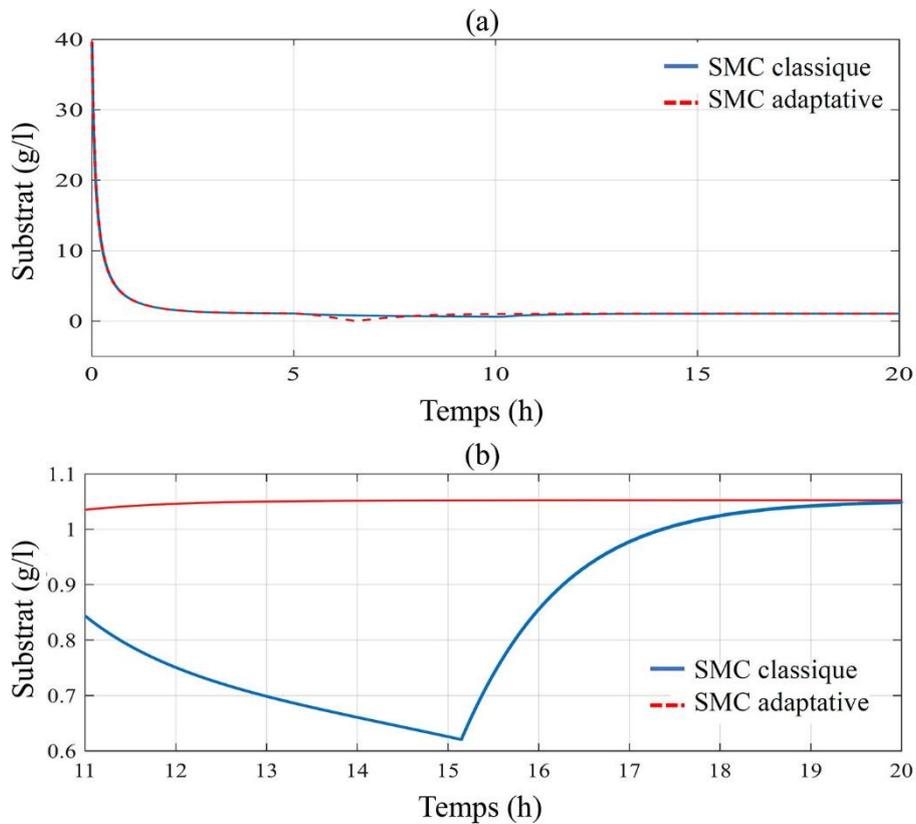


Figure. IV. 3. Évolution temporelle de la concentration du substrat avec SMC et AGSMC, (b) zoom en vue de (a).

Pour la valeur finale de la concentration de substrat S , le phénomène de broutement observé est toujours plus grand dans le contrôle SMC classique comme montre la Figure. IV. 3. La valeur finale de S est presque constante à partir de $13h$ et atteint une valeur constante de $1,05 \text{ g/l}$ à $14h$ dans le contrôle proposé (AGMSC). D'autre part, pour le contrôle classique (SMC), le temps d'atteinte de la valeur finale est supérieur à $19h$.

Comme pour la concentration du substrat S , le point d'équilibre non négligeable S_e est donné par [63] :

$$S_e = \frac{K_M D}{\mu^* - D} = 1.05 \quad (\text{VI.24})$$

Figure. IV. 4(a) met en évidence l'évolution des signaux de commande dans les deux cas. La valeur finale de u est plus oscillatoire dans la loi de contrôle classique (SMC) et la proposition (AGSMC) Figure. IV. 4(b).

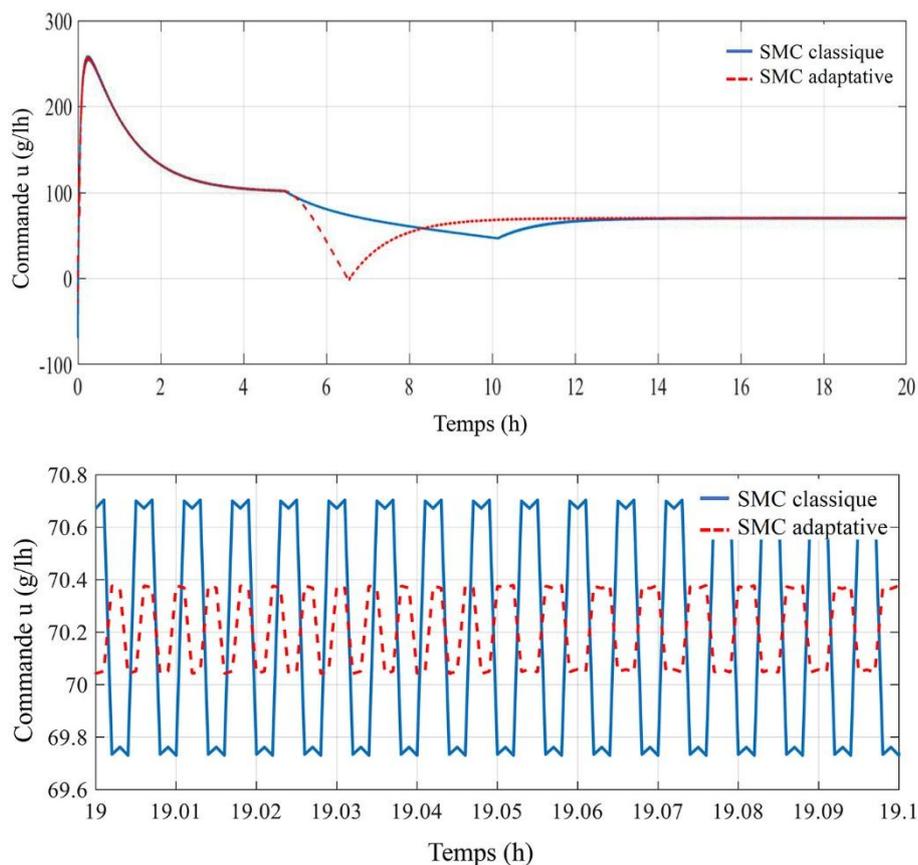


Figure. IV. 4. (a) Contrôle de l'action du SMC et de l'AGSMC, (b) zoom en vue de (a).

La variation du paramètre de gain (AGSMC) est montrée à la Figure. IV. 5. Afin de compenser rapidement le changement brusque de la concentration désirée de la biomasse, dans le temps, une

valeur augmentée du gain est établie. De plus, lorsque la concentration de biomasse atteint la valeur désirée, le gain du paramètre diminue jusqu'à une valeur faible. Le gain de valeur proposé en [110] ($K=3$) a été utilisé pour le contrôle classique, pendant ce temps avec contrôle adaptatif, comme le montre la Figure. IV. 5, la valeur de ce gain est généralement égale à 1.

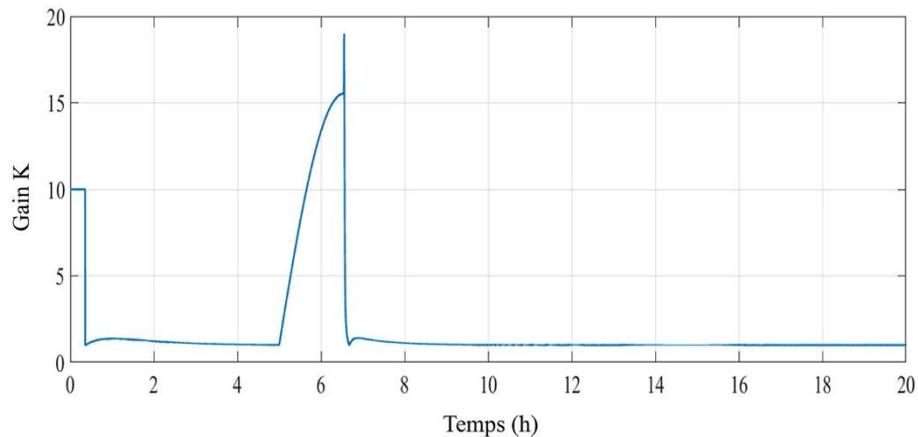


Figure. IV. 5. Variation du gain AGSMC du contrôleur.

Essai 2 : Cas perturbé

Afin d'évaluer la robustesse de l'algorithme de contrôle proposé (AGSMC) et de comparer avec la robustesse de la loi de contrôle classique (SMC), le système a été considéré dans un deuxième essai à être soumis à une perturbation externe distribuée aléatoirement d'une valeur maximale de 0,072, c.-à-d. nous ajoutons un bruit à la première équation :

$$\dot{X} = \mu(S)X - DX + W \quad (\text{IV.25})$$

avec W est une perturbation externe.

Figure. IV. 6 représente une étude comparative entre le cas nominal et le cas perturbé pour l'évolution du système selon l'algorithme classique (SMC), où le bruit a un effet sur la réponse de la concentration de biomasse. L'évolution du système dans les deux cas sous l'algorithme proposé (AGSMC) est montrée à la Figure. IV. 7. Comme vu, les performances du système sont préservées sous l'approche de contrôle proposée dans les deux cas.

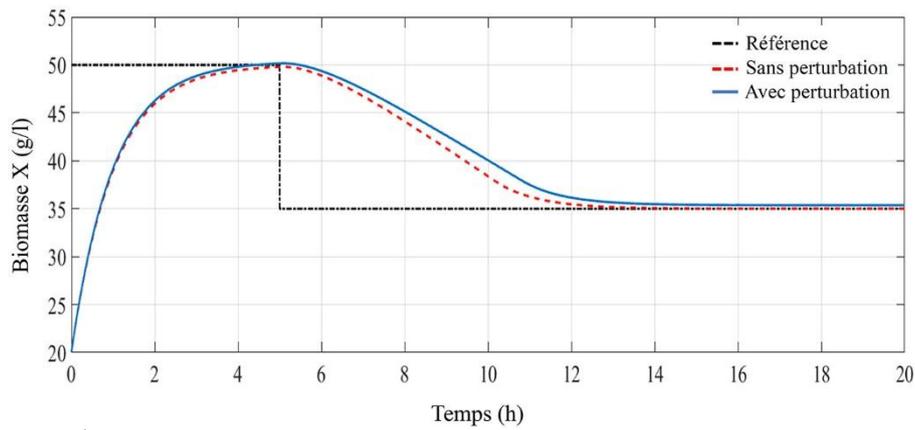


Figure. IV. 6. Évolution de la concentration de biomasse sous SMC en cas perturbé et non perturbé.

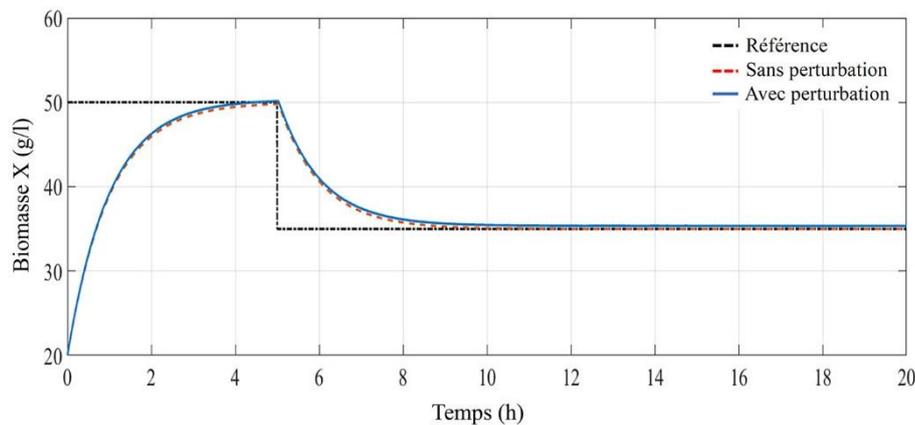
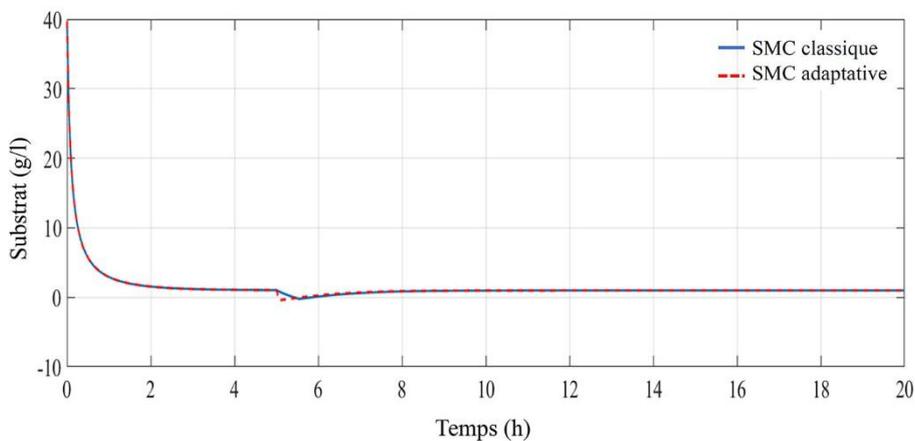


Figure. IV. 7. Évolution de la concentration de la biomasse sous AGSMC dans les cas perturbés et non perturbés.

Figure. IV. 8 représente l'évolution temporelle du substrat sous le SMC classique et le AGSMC proposé en cas de perturbation. La concentration du substrat atteint la valeur finale dans le cas AGSMC à (17h) avant le cas SMC (après 19h).

(a)



(b)

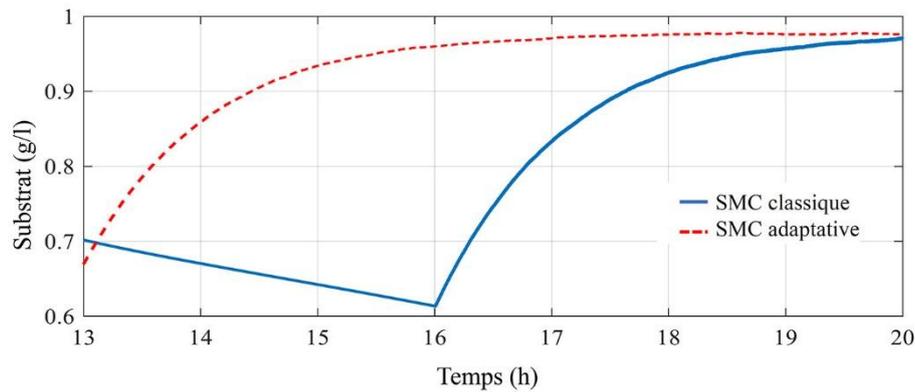


Figure. IV. 8. (a) Évolution de la concentration du substrat avec SMC et ASMC dans le cas de perturbation, (b) zoom en vue de (a).

Figure. IV. 9 illustre la variation des gains du contrôleur ASMC dans les cas perturbés et non perturbés. Dans le contrôle AGSMC, il varie et tient compte de la présence de bruit. Dans le cas du contrôle SMC classique, K est constant.

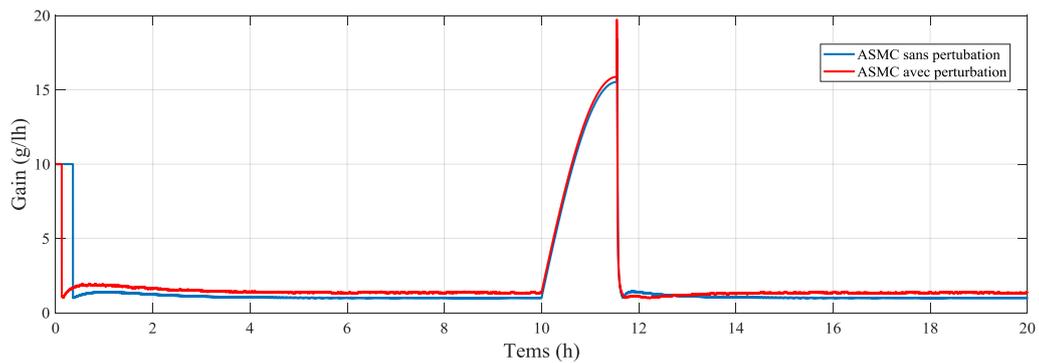


Figure. IV. 9. Variation du gain AGSMC du contrôleur en cas perturbé et non perturbé.

Figure. IV. 10 montre l'action de contrôle du SMC et de l'AGSMC en cas de perturbation. La bande d'oscillation est plus étroite avec le contrôle AGSMC par rapport au contrôle SMC classique.

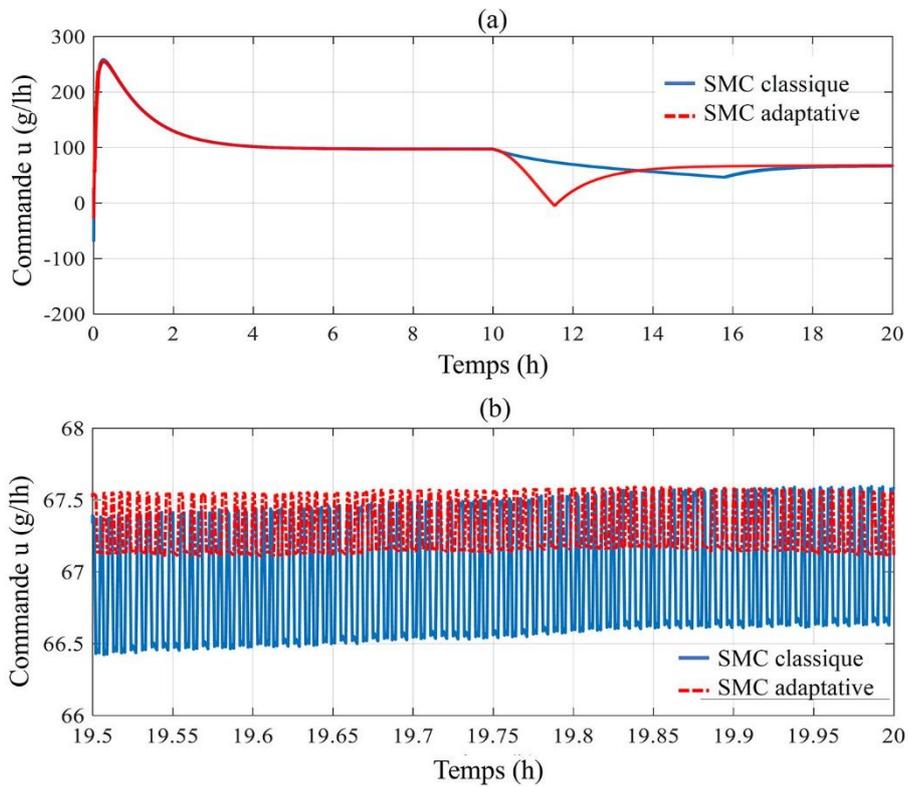


Figure. IV.10. (a) Action de contrôle du SMC et de l'AGSMC en cas de perturbation, (b) zoom en vue de (a).

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a développé un contrôleur de mode glissant de gain adaptatif pour la stabilisation précise d'un processus biotechnologique non linéaire dans le cadre de la production du méthane par fermentation. Tout d'abord, un algorithme de contrôle de mode glissant classique est développé. Ensuite, les paramètres de contrôle appropriés sont obtenus par une adaptation dynamique du gain de commutation pour obtenir une convergence rapide du système à sa valeur souhaitée. Les résultats de la simulation sont présentés pour illustrer l'efficacité de l'approche proposée. Comparée aux techniques classiques de commande en mode glissant, la méthode AGSMC est meilleure que la méthode SMC classique en termes de précision de stabilisation, de rapidité et de robustesse du système.

Chapitre 5

Commande par mode glissant d'ordre deux

V.1 Introduction

Ce chapitre traite l'élaboration d'une stratégie efficace pour le contrôle robuste du comportement des bioprocédés défini par le modèle dynamique donné par les équations (IV.1) et (IV.2) du chapitre précédent. L'objectif de contrôle est de réguler la concentration de certains polluants dans un procédé de traitement des déchets à un niveau inférieur prédéfini. Elle se caractérise par sa simplicité de développement, sa robustesse face aux incertitudes limitées, ainsi que par son niveau haut de précision par rapport aux algorithmes de contrôle de premier ordre en mode glissant.

V.2 Conception du contrôle utilisant un algorithme de super twisting

V.2.1 Algorithme de super twisting

Reprenons la surface de glissement définie dans (Eq.IV.3) et introduisons la rétro-action de contrôle linéarisante comme suit :

$$\bar{u} = \mu'(S)X u = \Gamma u \quad (\text{V.1})$$

Pour obtenir :

$$\dot{\sigma} = d(t) + \bar{u} \quad (\text{V.2})$$

où $d(t)$ ($d(t) = \Psi + d'(t)$) est une fonction dépendante du temps introduite pour modéliser toutes les incertitudes et les perturbations externes.

Hypothèse. Dans le présent travail, il est considéré que la perturbation $d(t)$ est Lipschitz et satisfait l'inégalité suivante :

$$|\dot{d}| \leq c \quad (\text{V.3})$$

Compte tenu de la dynamique du système Eq. (V.2) et de l'hypothèse Eq. (V.3), on peut utiliser l'algorithme super twisting (STA) pour la stabilisation du système Eq. (V.1). Les avantages des contrôleurs super-twisting sont bien connus car leurs conceptions n'ont pas besoin de la dérivée de la variable glissante, qui est obligatoire pour trouver la loi de contrôle dans les contrôleurs SMC conventionnels. En outre, la STA peut être appliquée à tout système qui a un degré relatif égal à 1 en ce qui concerne la surface de glissement. En revanche, d'autres algorithmes du mode glissant du second ordre ne sont appliqués qu'à un système dont le degré relatif est égal à 2 en ce qui concerne la variable de glissement utilisant des entrées de contrôleur limitées [125].

L'algorithme ST est donné comme une somme de deux composants et présenté par la loi de contrôle suivante [126-127]:

$$\begin{cases} \bar{u} = -\theta |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma) + u_1 \\ \dot{u}_1 = -K \text{sign}(\sigma) \end{cases} \quad (\text{V.4})$$

À partir de l'Eq. (V.4), il est clairement observé que STA n'exige pas l'estimation de $\dot{\sigma}$. La substitution de \dot{u}_1 à l'Eq. (V.4) dans l'Eq. (V.2) donne :

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -\theta |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma) + u_1 + d \\ \dot{u}_1 = -K \text{sign}(\sigma) \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

En utilisant la transformation suivante :

$$\xi = d - K \int_0^t \text{sign}(\sigma) d\tau \quad (\text{V.6})$$

Eq. (V.5) peut être exprimé comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -\theta |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma) + \xi \\ \dot{\xi} = -K \text{sign}(\sigma) + \dot{d} \end{cases} \quad (\text{V.7})$$

V.2.2 Analyse de la stabilité

Compte tenu de l'Eq. (V.7), ce système peut être considéré comme un système non autonome. Donc, son analyse de la stabilité exige l'introduction des concepts de base de la stabilité uniforme dans l'analyse des caractéristiques du système [73]. La stabilité uniforme du système non autonome Eq. (V.7) peut être montrée en utilisant le théorème suivant :

Théorème 1. *Le système donné par les Eqs. (V.2) et (V.3) sous l'entrée de contrôle Eq. (V.4) est globalement uniformément asymptotiquement stable si les conditions suivantes sont maintenues :*

$$\begin{cases} p_2 > 1, p_3 = \frac{1+p_2}{c} \text{ and } p_1 > \frac{cp_2^2}{p_2-1} \\ \theta = \frac{2p_3 + p_2p_1 + 2p_3(p_3 - 2p_2)c}{2p_1p_3 - p_2^2} \\ K = \frac{p_1 + p_2\theta}{2p_3} \end{cases} \quad (\text{V.8})$$

Preuve.

Définissons un nouvel état de la variable ζ :

$$\zeta = \left[|\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma), \xi \right]^T = [\zeta_1, \zeta_2]^T \quad (\text{V.9})$$

Et considérons la fonction candidat de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} \zeta^T P \zeta, \quad P = \begin{bmatrix} p_1 & -p_2 \\ -p_2 & p_3 \end{bmatrix} \quad (\text{V.10})$$

Où p_1, p_2 et p_3 sont des constantes positives. Cette fonction de Lyapunov est différentiable presque partout. Si les paramètres p_i sont choisis de manière à ce que les inégalités $p_1 > 0, p_3 > 0$

et $p_1 p_3 - p_{22} > 0$ soient satisfaites, alors $V(\zeta)$ est positif défini et radialement non lié, ou :

$$\frac{1}{2} \lambda_{\min} [P] \|\zeta\|_2^2 \leq V(\zeta) \leq \frac{1}{2} \lambda_{\max} [P] \|\zeta\|_2^2 \quad (\text{V.11})$$

où $\lambda_{\min}[\bullet]$ représente l'opération consistant à prendre la plus petite/plus grande valeur propre de la matrice $[\bullet]$ et $\|\zeta\|_2$ indique la norme euclidienne du vecteur ζ .

Le dérivé temporel de la fonction dans Eq. (V.10) le long des solutions du système dans Eq. (V.7) est :

$$\dot{V} = \xi^T P \dot{\xi} \quad (\text{V.12})$$

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} |\sigma|^2 \left[\zeta^T Q_0 \zeta + d(-p_2 \zeta_1^2 + p_3 \zeta_1 \zeta_2) \text{sign}(\sigma) \right] \quad (\text{V.13})$$

où

$$Q_0 = \begin{bmatrix} p_1 \theta - p_2 K & -p_1 - p_2 \theta + 2p_3 K \\ -p_1 - p_2 \theta + 2p_3 K & p_2 \end{bmatrix} \quad (\text{V.14})$$

En outre, compte tenu de la bornitude des incertitudes du modèle, c'est-à-dire : $|d| \leq c$ (Proposition 1), nous pouvons trouver :

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} |\sigma|^2 \zeta^T Q_1 \zeta \quad (\text{V.15})$$

avec

$$Q_1 = \begin{bmatrix} p_1 \theta - p_2 K - (p_3 - 2p_2)c & -p_1 - p_2 \theta + 2p_3 K \\ -p_1 - p_2 \theta + 2p_3 K & p_2 - p_3 c \end{bmatrix} \quad (\text{V.16})$$

Maintenant, en mettant $Q_1 = I_{2 \times 2}$, et considérant $P > 0$, on obtient les relations :

$$\left\{ \begin{array}{l} p_2 > 1, p_3 = \frac{1+p_2}{c} \text{ and } p_1 > \frac{cp_2^2}{p_2-1} \\ \theta = \frac{2p_3 + p_2p_1 + 2p_3(p_3 - 2p_2)c}{2p_1p_3 - p_2^2} \\ K = \frac{p_1 + p_2\theta}{2p_3} \end{array} \right. \quad (\text{V.17})$$

En utilisant le fait que :

$$|\sigma|^{\frac{1}{2}} \leq \|\zeta\|_2 \leq \frac{V^{\frac{1}{2}}}{\lambda_{\min}[P]} \quad (\text{V.18})$$

Nous obtenons :

$$\dot{V} \leq -\Phi V^{\frac{1}{2}} \quad (\text{V.19})$$

Avec

$$\Phi = \frac{\lambda_{\min}^{\frac{1}{2}}[P] \lambda_{\min}[Q_1]}{\lambda_{\max}[P]} \quad (\text{V.20})$$

Enfin, les inégalités des Eqs. (V.11), (V.19) et (V.12) prouvent que le système Eqs. (V.2- V.4) est globalement uniformément asymptotiquement stable [73].

V.3 Conception de contrôle utilisant un algorithme adaptatif de super twisting

Les principaux avantages d'un SMC sont la réponse dynamique rapide et la robustesse du système en boucle fermée, qui peut être atteint en utilisant une fonction discontinue et un gain de contrôle élevé. Cependant, pour concevoir un contrôleur SMC, il est nécessaire de connaître les limites d'incertitude, ce qui est une tâche difficile du point de vue pratique. Cela est compensé par une augmentation et une surestimation des gains du contrôleur. Néanmoins, les gains élevés

augmentent le broutement [89]. Afin de résoudre ce problème, les auteurs dans [113] ont suggéré un algorithme de super twisting adaptatif (ASTA) où les gains du contrôleur sont adaptés dynamiquement aux changements de paramètres dû aux perturbations externes et aux incertitudes du système, qui peut réduire le broutement à l'état stable. La principale différence entre les stratégies classiques de super twisting et de super twisting adaptative est que dans ce dernier, l'algorithme de contrôle force la variable de glissement à un chemin prédéfini de la surface de glissement. La stratégie globale ASTA est représentée à la Figure. V. 1. Le gain K est adapté à la sortie en mode glissant selon la proposition donnée par les équations IV.13 et IV.14 du chapitre précédant.

Cette loi d'adaptation Eqs. IV.13 et IV.14 garantit l'existence d'un véritable mode de glissement en temps fini qui préserve les principales caractéristiques de la STA proposée en Eqs. (V.4- V.8).

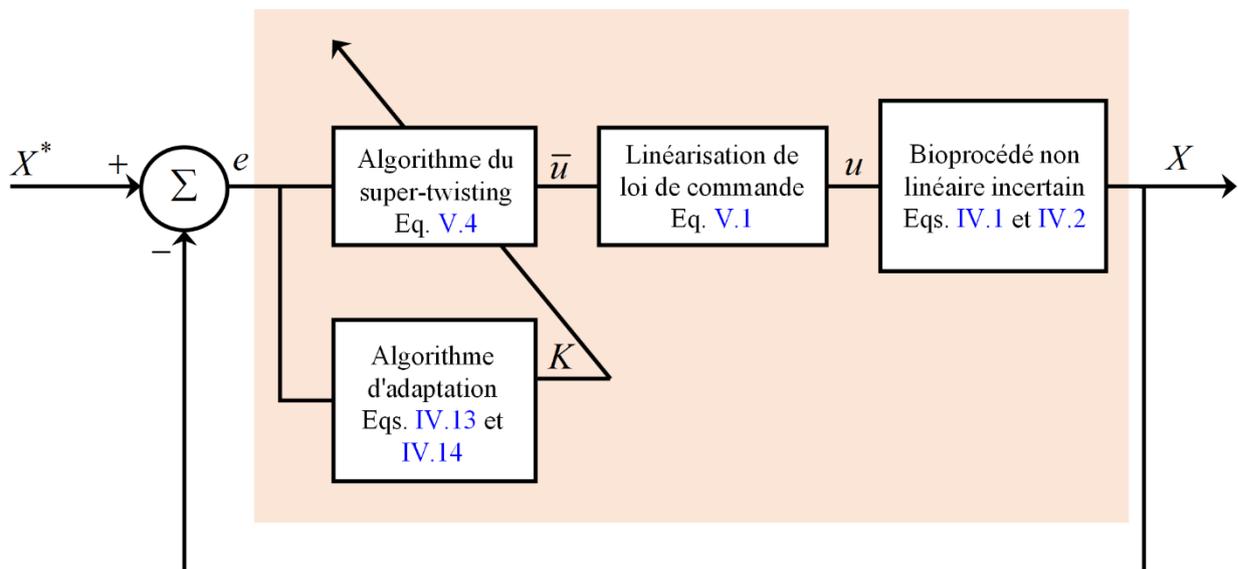


Figure. V.1. Structure de contrôle de la stratégie ASTA pour un bioprocédé non linéaire.

V.4 Résultats et discussion

Les performances de la STA et de la ASTA proposée, présentées respectivement aux sections 3 et 4, ont été examinées au moyen de tests numériques faisant référence au modèle de bioprocédé incertain défini comme suit :

$$\begin{cases} \dot{X} = \hat{\mu}(S)X - \hat{D}X \\ \dot{S} = -\hat{K}_1\hat{\mu}(S)X - \hat{D}S + u \\ e = X - X^* \end{cases} \quad (\text{V.21})$$

où

$$\hat{\mu}(S) = \mu + \delta\mu \quad (\text{V.22})$$

$$\hat{D} = D + \delta D \quad (\text{V.23})$$

$$\hat{K}_1 = K_1 + \delta K \quad (\text{24})$$

Où, μ , D et K_1 sont les paramètres nominaux du système. $\hat{\mu}$, \hat{D} et \hat{K}_1 sont les paramètres incertains, qui peuvent être obtenus dans des cas pratiques à partir d'une méthode d'identification hors ligne ou estimés en ligne au moyen d'une méthode adaptative [124]. $\delta(\cdot)$ sont des paramètres délimités inconnus introduits ici pour modéliser les incertitudes paramétriques. Les valeurs des paramètres nominaux ont été choisies identiques à celles données dans [110] : $\mu^* = 2.1 \text{ h}^{-1}$, $K_M = 10 \text{ g/l}$, $D = 0.2 \text{ h}^{-1}$, $K_1 = 12$.

La tâche de contrôle simulée considère le problème de la stabilisation de l'erreur e à zéro afin de minimiser la concentration de biomasse X à la valeur de référence constante prédéterminée X^* tout en empêchant les valeurs négatives dans la conception de contrôle. L'objectif principal des tests de simulation est de comparer les performances de trois contrôleurs :

- 1) Le contrôleur de mode glissant de premier ordre classique basé sur la méthode de contrôle équivalente avec gain fixe ($K=8$) défini comme suit :

$$\begin{aligned} u(t) = & \hat{K}_1\hat{\mu}(S)X - \frac{(\hat{\mu}(S) - \hat{D})^2}{\mu'(S)} - \frac{1}{\mu'(S)X} \cdot (\lambda(\hat{\mu}(S) - \hat{D})X \\ & + K \text{sign}(\lambda(X - C) + (\hat{\mu}(S) - \hat{D})X)) \end{aligned} \quad (\text{V.25})$$

- 2) Le contrôleur de super twisting en mode glissant de deuxième ordre basé sur le gain fixe donné par l'Eq. (V.4), où les paramètres de contrôle sont fixés dans ce cas comme $\theta = 101,03$ et $K = 8,00$.

- 3) L'algorithme de super twisting adaptatif, qui a été proposé dans le présent document, où les

paramètres de contrôle sont choisis conformément à l'Eq. (IV.13).

Les Figures V. 2-4 représentent le comportement du système sous la SMC classique et les algorithmes de super twisting du gain fixe, lorsque l'on considère les paramètres du modèle sont exactement connus ; c.-à-d. $\delta\alpha = 0$, $\alpha = \{D, K, \mu\}$. Ces résultats montrent que lorsque les paramètres du système sont exactement connus, les performances de la technique classique SMC sont meilleures que la STA en termes de taux de convergence, d'erreur d'équilibre et le phénomène de broutement. Le zoom de la Figure. V. 2 met en évidence le haut niveau de précision de la régulation de l'algorithme SMC conventionnel par rapport à l'approche STA. On peut également noter la convergence rapide de l'algorithme SMC conventionnel. Ces résultats peuvent être interprétés du fait que, contrairement à la STA, l'algorithme SMC classique contient une partie continue, l'équivalent, qui accélère la convergence des états du système à la surface de glissant correspondant. De plus, soutenir la loi de contrôle discontinu avec une loi continue permet de réduire le niveau d'incertitudes. Cela permet d'interpréter clairement la différence entre les signaux de commande dans les figures V.3 et V. 4. La meilleure connaissance des paramètres du système est difficile dans de nombreux cas pratiques. Ainsi, un deuxième essai a été effectué en tenant compte des incertitudes paramétriques.

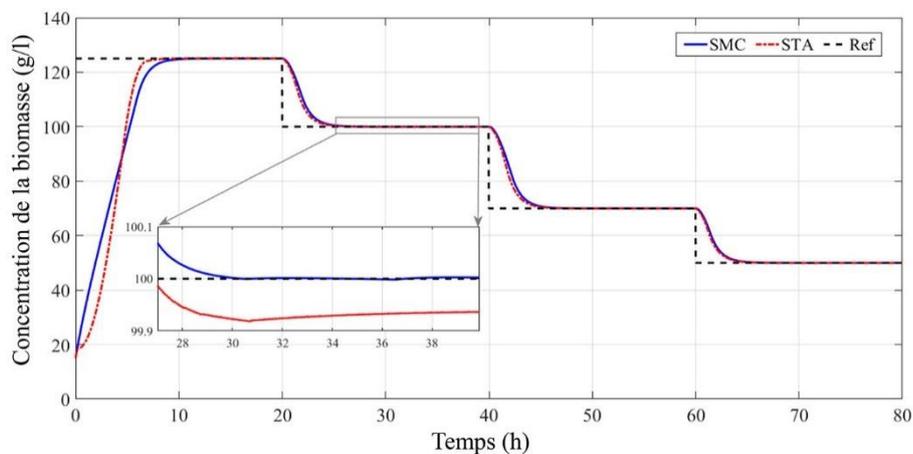


Figure. V. 2. Évolution de la concentration de la biomasse avec SMC et STA.

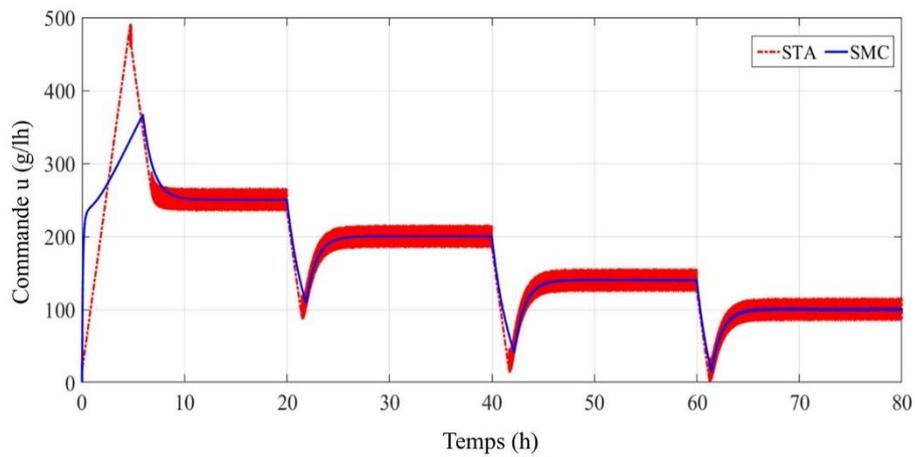


Figure. V. 3. Le signal de commande pour le SMC et le STA.

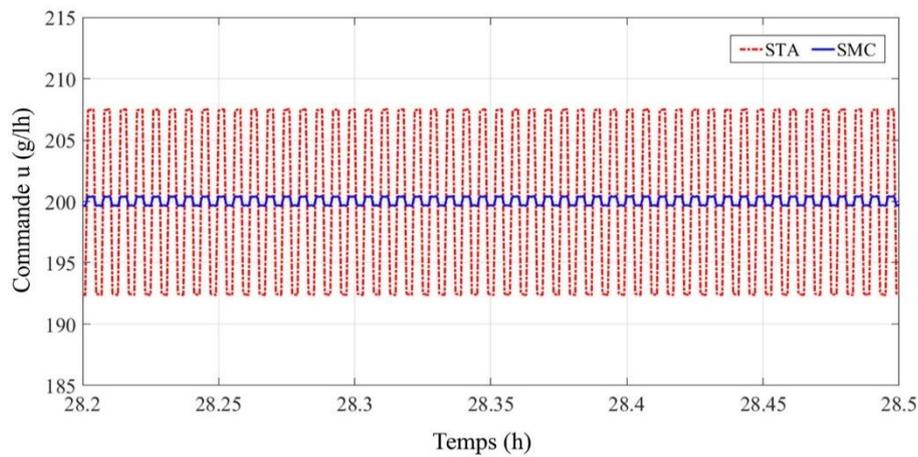


Figure. V. 4. Zoom du signal de commande pour le SMC et le STA.

Les Figures. V. 5-8 montrent les performances des contrôleurs ci-dessus en tenant compte des incertitudes liées aux paramètres, c'est-à-dire $\delta\alpha \neq 0$, $\alpha = \{D, K, \mu\}$. Comme on l'a vu, les résultats obtenus mettent en évidence la sensibilité du contrôleur de mode glissant classique aux incertitudes des paramètres, en raison du temps de réponse très long, par rapport à la réponse du contrôleur de twisting, qui caractérise la réponse du contrôleur. La STA conserve les mêmes performances que lors du test précédent, réponse rapide et relativement précise.

Les Figures V. 7 et V. 8 montrent les entrées de contrôle appliquées au système à l'aide des contrôleurs SMC et super twisting. On peut noter l'important phénomène de broutement qui caractérise la STA qui est un grave problème même dans la mise en œuvre pratique du contrôleur SMC. En outre, les résultats de la simulation (Figure. V. 8) prouvent que de grandes incertitudes

conduisent à l'instabilité du système considéré par la SMC classique, alors qu'elle conserve les mêmes performances sous la STA, ce qui prouve la robustesse de l'algorithme de contrôle de super twisting. La principale conclusion des essais est l'insensibilité de la STA proposée aux incertitudes paramétriques.

Cependant, les phénomènes de broutement demeurent le principal inconvénient de la STA en raison de la grande et haute fréquence des signaux de commande dans les Figures V. 3-4 et V. 6-7.

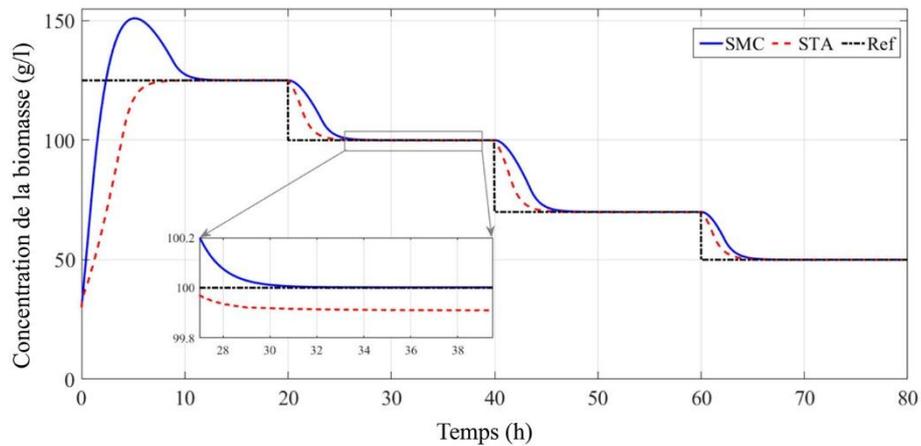


Figure. V. 5. Evolution de la concentration de la biomasse avec SMC et STA dans le cas incertain.

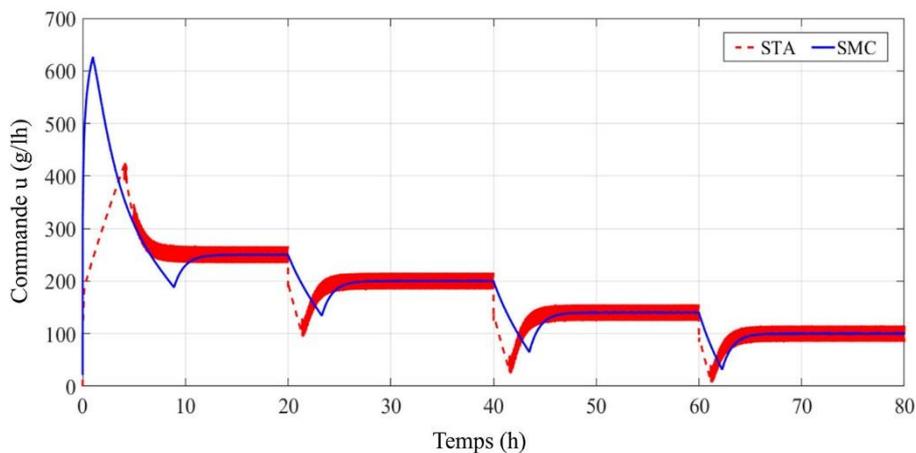


Figure. V. 6. Le signal de commande pour le SMC et le STA dans le cas incertain.

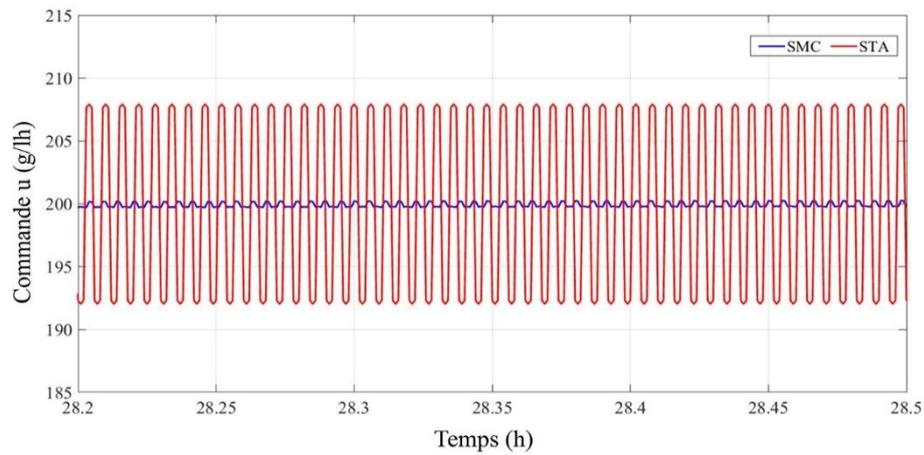


Figure. V. 7. Zoom du signal de commande pour le SMC et le STA dans le cas incertain.

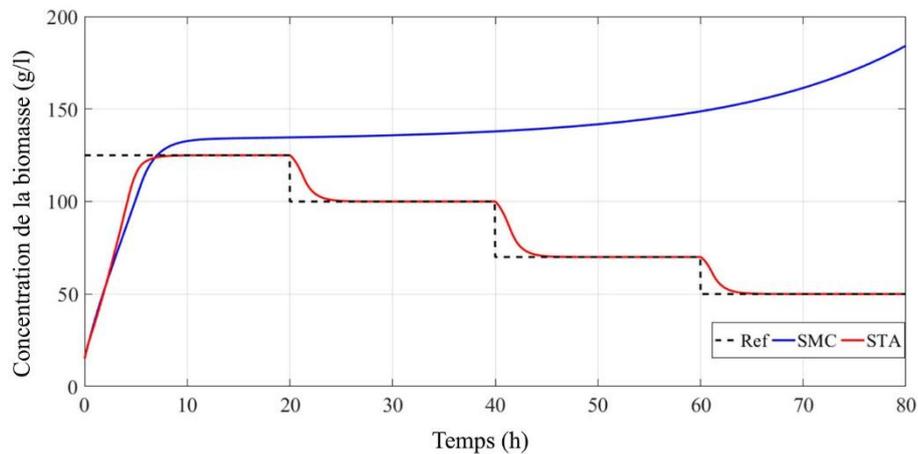


Figure. V. 8. Evolution de la concentration de biomasse avec SMC et STA dans le cas de perturbation incertaine avec grande perturbation.

Comme mentionné précédemment, une approche pour minimiser les phénomènes de broutement est d'introduire un SMC avec un gain adaptatif comme proposé dans Eqs. IV.13 et IV.14. Une étude comparative entre la STA à gain fixe et la STA adaptative proposée est présentée dans les figures V. 9 à V. 11. L'évolution temporelle du gain de contrôle adaptatif est illustrée à la fig. V. 12. Comme le montre la Figure. V. 9, l'algorithme de contrôle adaptatif proposé conserve les meilleures performances en termes de temps de réponse, et la précision de la régulation, qui assure l'existence d'un vrai mode de glissement dans le voisinage de la surface de glissant choisi. Les figures V. 10 et V. 11 montrent que l'adaptation des gains de contrôle permet une réduction significative des phénomènes de broutement dans le signal d'entrée de contrôle.

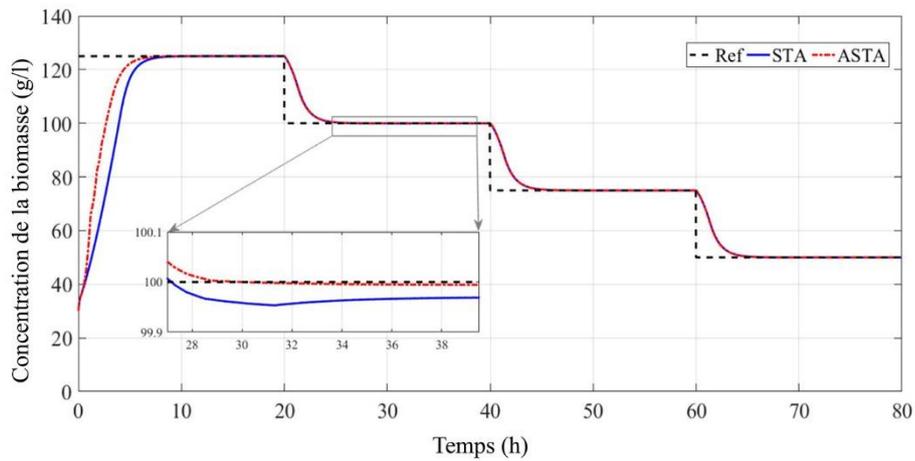


Figure. V. 9. Évolution de la concentration de la biomasse avec STA et ASTA dans le cas incertain.

En outre, on peut noter que l'algorithme de contrôle proposé conduit le système à son état souhaité sans la connaissance ni des paramètres dynamiques du système ni des limites des incertitudes.

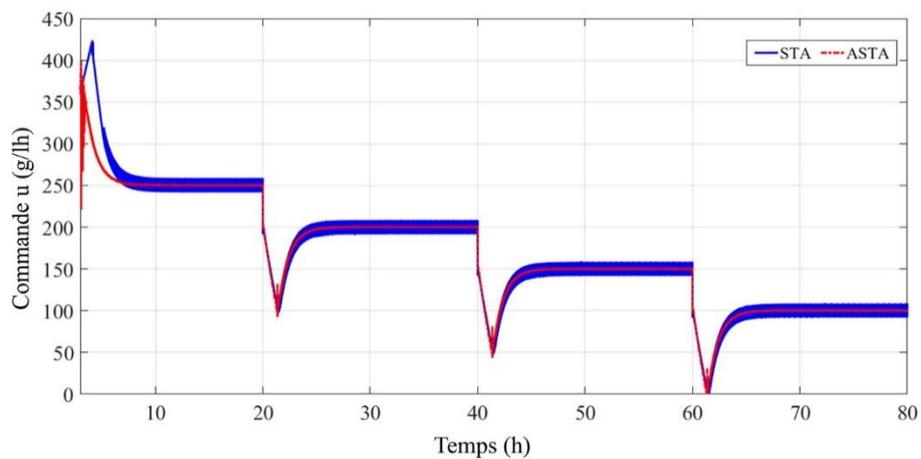


Figure. V. 10. Le signal de commande du STA et de l'ASTA dans le cas incertain.

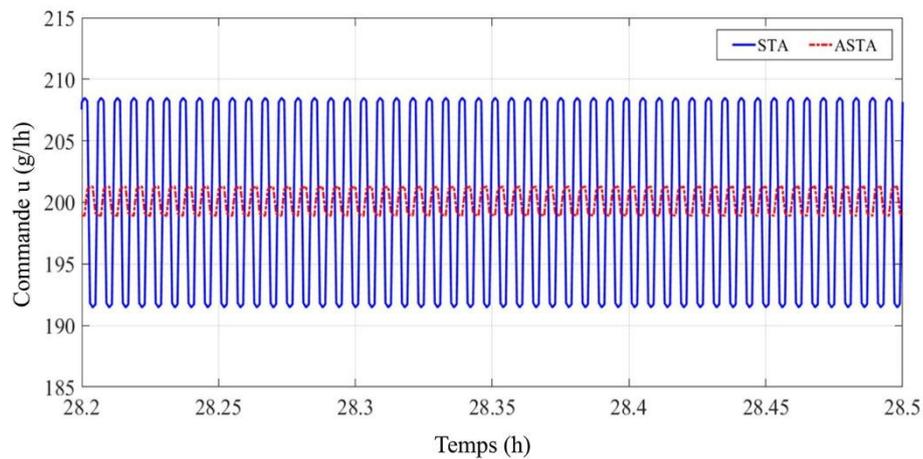


Figure. V. 11. Zoom du signal de commande du STA et de l'ASTA dans le cas incertain.

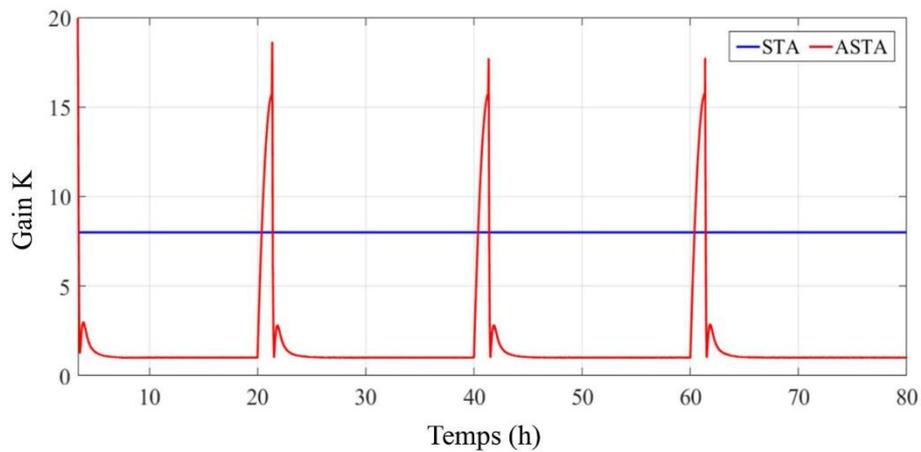


Figure. V. 12. Variation du gain pour le STA et l'ASTA.

V.5 Conclusion

Un algorithme adaptatif de super twisting (ASTA) – un algorithme spécial de techniques de contrôle du mode glissant de deuxième ordre – a été développé dans ce chapitre pour le contrôle d'un processus biotechnologique placé à l'intérieur d'un bioréacteur en cuve agitée continue (CSTB). Compte tenu des incertitudes structurées et non structurées inconnues, les paramètres de contrôle optimaux de la STA classique sont adaptés dynamiquement pour assurer l'établissement de temps fini d'un mode de glissement réel. Des tests numériques ont été présentés pour illustrer l'efficacité de l'approche proposée. Comparée à la STA classique et à l'approche SMC équivalente, la méthodologie proposée garantit les meilleures performances du comportement bioprocédé biotechnologique en termes de stabilité du système, temps de réponse, de rejet des perturbations et de réduction des entrées de contrôle.

Conclusion générale

Des ressources naturelles surexploitées et un environnement extrêmement pollué, sont les tristes répercussions du développement industriel du monde. Face à cette situation critique, il est urgent d'instaurer des politiques plus rationnelles, suffisamment saines pour préserver notre planète. Dans ce sens, le traitement des déchets avant de les rejeter en milieux récepteurs, est devenu une obligation.

La digestion anaérobie est une technologie prometteuse du traitement des déchets organiques par voie biologique. Elle permet aussi de produire du biogaz, valorisable en énergie renouvelable, équivalente aux énergies fossiles (carburant, charbon, ...).

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse, au problème de la conception de contrôleurs robustes basés sur une approche avancée « la commande par mode glissant », pour un bioprocédé de digestion anaérobie, dans le but d'améliorer sa performance.

Notre première problématique était le suivi du profil de référence de la concentration de certains polluants pour un bioprocédé de digestion anaérobie. Pour cela, nous avons synthétisé des lois de commande par mode glissant d'ordre un. Ceux-ci sont connus pour leur robustesse vis-à-vis des incertitudes. En effet, après avoir introduit le concept de base de cette commande ainsi que le choix de la surface de glissement, nous avons décrit les différentes étapes pour la construction de la commande par mode glissant d'ordre un. Ensuite nous avons souligné le problème majeur de cette commande qui est le broutement. Pour éliminer, ou du moins diminuer ce phénomène, nous avons présenté une commande adaptative par mode glissant afin de régler les gains d'une façon dynamique et de réduire de plus le broutement. Ces lois de commande ont été implémentées sur l'environnement MATLAB®. Les résultats de simulation ont montrés une bonne performance des algorithmes utilisés pour le problème de poursuite.

Notre deuxième problématique était la commande de la digestion anaérobie en présence des incertitudes. Dans ce contexte, nous avons introduit la commande par modes glissants d'ordre deux ainsi que certaines notions essentielles. Les modes glissants d'ordre deux se distinguent par rapport à ceux d'ordre un, par leurs aptitude à conserver la robustesse. Un algorithme du super-twisting a été proposé dans un premier temps pour la commande du bioprocédé. En outre, une loi

d'adaptation était introduite dans une deuxième étape pour définir de manière appropriée les gains de commutation de l'algorithme de super-twisting. L'algorithme d'adaptation proposé consiste à concevoir des gains de commande dynamiquement adaptés qui assurent l'établissement, dans un temps fini, d'un mode de glissement de second ordre réel. Les résultats de simulation obtenus ont montrés les principaux avantages de l'utilisation de l'algorithme du super-twisting avec des gains adaptatifs, c'est-à-dire, un niveau élevé de précision de la régulation et l'amélioration de la robustesse du système contre les perturbations externes et les incertitudes du modèle toute en minimisant le temps de réponse. Cette approche permet également de réduire les phénomènes de broutement qui limitent l'aspect pratique des techniques SMC conventionnelles.

Les travaux développés dans cette thèse mènent à plusieurs perspectives pour des futurs travaux tels que :

- La première à court terme, consiste à appliquer des méthodes de contrôle à d'autres modèles tout en étudiant la différence qui existe entre les différents modèles.
- La deuxième à moyen terme, consiste à implémenter les algorithmes développés sur l'ADM1 pour valider les travaux et tester l'efficacité des lois de commandes.
- Une troisième piste de recherche consiste à prendre en considération les variations des paramètres des modèles de biomasse. On peut également introduire un aspect de sécurité en insérant une surveillance des défauts pour le système dans le but d'une défaillance.

Bibliographie

- [1] Appels, L., Lauwers, J., Degève, J., Helsens, L., Lievens, B., Willems, K., ... & Dewil, R. (2011). Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4295-4301.
- [2] Ghosh, S. (1997, May). Anaerobic digestion for renewable energy and environmental restoration. In *The 8th International Conference on Anaerobic Digestion*, Sendai International Center, Sendai, Japan, Ministry of Education Japan.
- [3] Angelidaki, I., Ellegaard, L., & Ahring, B. K. (2003). Applications of the anaerobic digestion process. In *Biomethanation II* (pp. 1-33). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [4] H. Bouchareb, S. Semcheddine, M.N.Harmas, K.N.M'sirdi et A. Naamane, Virtual Sensors to Drive Anaerobic Digestion under a Synergetic Controller, *Energies* 2019, 12(3), 430.
- [5] Yu, L., Wensel, P. C., Ma, J., & Chen, S. (2013). Mathematical modeling in anaerobic digestion (AD). *J Bioremed Biodeg S*, 4(2).
- [6] Benyahia, B. (2012). Modélisation et observation des bioprocédés à membranes: Application à la digestion anaérobie (Doctoral dissertation, Université Montpellier 2 (Sciences et Techniques); Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen).
- [7] Susa, M. S. R. (2005). Etude d'un bioréacteur anaérobie à membranes immergées pour le traitement des eaux résiduaires (Doctoral dissertation, Uniandes).
- [8] A. Ghouali. Analyse et contrôle optimal d'un bioréacteur de digestion anaérobie. *Algerie / France: université de Tlemcen/université de Montpellier*, pp. 23-24-25, 2015.
- [9] Lachance, M. P., Pelletier, F., Lemay, S., & Eng, P. (2010). Développer un cadre d'analyse et identifier l'intérêt technico-économique de produire du biogaz à la ferme dans un contexte québécois.
- [10] Ostrem, K., & Themelis, N. J. (2004). Greening waste: Anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes. *Earth Engineering Center Columbia University*, 6-9.
- [11] Zaher, U., Cheong, D. Y., Wu, B., & Chen, S. (2007). Producing energy and fertilizer from organic municipal solid waste. *Department of Biological Systems Engineering, Washington State University*.
- [12] Juanga, J. P. (2005). Optimizing dry anaerobic digestion of organic fraction of municipal

- solid waste. Asian Institute of Technology.
- [13] Mumme, J., Linke, B., & Tölle, R. (2010). Novel upflow anaerobic solid-state (UASS) reactor. *Bioresource technology*, 101(2), 592-599.
- [14] Moletta, R. (2011). *Le traitement des déchets*. Éd. Tec & Doc/Lavoisier.
- [15] Olivier, F. (2003). *Tassement des déchets en CSD de classe II: du site au modèle* (Doctoral dissertation).
- [16] Kothari, R., Pandey, A. K., Kumar, S., Tyagi, V. V., & Tyagi, S. K. (2014). Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. *Renewable and sustainable energy reviews*, 39, 174-195.
- [17] Montero, B., Garcia-Morales, J. L., Sales, D., & Solera, R. (2008). Evolution of microorganisms in thermophilic-dry anaerobic digestion. *Bioresource technology*, 99(8), 3233-3243.
- [18] Horiuchi, J. I., Shimizu, T., Tada, K., Kanno, T., & Kobayashi, M. (2002). Selective production of organic acids in anaerobic acid reactor by pH control. *Bioresource technology*, 82(3), 209-213.
- [19] Damien, A. (2004). *Guide du traitement des déchets*. Paris: Dunod.
- [20] Balet, J. M. (2008). *Aide-mémoire de gestion des déchets-2ème édition*. Hachette.
- [21] Liu, D., Liu, D., Zeng, R. J., & Angelidaki, I. (2006). Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. *Water research*, 40(11), 2230-2236.
- [22] Moletta, R. (2008). *Méthanisation de la biomasse*.
- [23] P.L. McCarty. *Anaerobic waste treatment fundamentals. part one : Chemistry and microbiology*. PUBLIC WORKS, 95 :107–112, 1964.
- [24] Hicham Siboukeur. *Contribution à la production du biogaz à partir des boues de la station d'épuration de la ville de Hassi R'mel*. Algerie: Ecole Nationale Polytechnique, pp. 36; 39, 2010.
- [25] R. Braun. *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses* , chap. Anaerobic digestion : a multi-faceted process for energy, environmental, management and rural development. Springer , pp. 335–416, 2007.
- [26] D.Sow. *Contribution à l'étude expérimentale et à la modélisation de la digestion anaérobie de Euphorbia tirucalli et d'autres plantes à latex Sahélienne*. France: Ecole Centrale Paris, pp. 210, 1993.

-
- [27] I. Tou, S. Igoud, A. Touzi. Production de Biométhane à Partir des Déjections Animales. *Energ. Ren. : Production et Valorisation – Biomasse*, vol.11, pp. 103-108, 2001.
- [28] Rakotoniaina Volana Astérie. Co-méthanisation des déchets fermiers et alimentaires : expérimentation et modélisation. FRANCE: Université de La Réunion, pp. 06; 23-26; 34-37, 2012.
- [29] J.Hess. Modélisation de la qualité du biogaz produit par un fermenteur méthanogène et stratégie de régulation en vue de sa valorisation. France: Université de Nice - Sophia Antipolis, pp. 65-70, 2007.
- [30] D. Dochain and collectif. *Automatique des bioprocédés*. Hermès, 2001.
- [31] G. Lyberatos and I.V. Skiadas. Modelling of anaerobic digestion - a review. *Global Nest : the Int. J.*, 1(2) :63–76, 1999.
- [32] IWA. Anaerobic digestion model no. 1 (ADM1). Technical report. IWA Task Group for Mathematical Modeling of Anaerobic Digestion Processes, 2001.
- [33] B. Fezzani and R. Ben Cheikh. Implementation of iwa anaerobic digestion model no. 1 (adm1) for simulating the thermophilic anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with olive mill solid waste in a semi-continuous tubular digester. *Chemical Engineering Journal*, 141 :75–88, 2008.
- [34] O. Bernard, Z. Hadj-Sadock, D. Dochain, A. Genovesi, and J.P. Steyer. Dynamical model development and parameter identification for an anaerobic wastewater treatment process. *Biotechnology and Bioengineering*, 75 :424–438, 2001.
- [35] N. S. Panikov. *Microbial Growth Kinetics*, Chapman & Hall, 1984.
- [36] J. E. Bailey and D. F. Ollis. *Biochemical engineering fundamentals*. vol. McGraw-Hill Chemical Engineering Series, McGraw-Hill, second edition édition, 1986.
- [37] J. Monod, *Recherches sur la croissance des cultures bactériennes*, Hermann & cie, 1942.
- [38] S. P. Graef and J. F. Andrews. Stability and control of anaerobic digestion. *Journal WPCF*, vol. 46, no 4, p. 666–683, April 1974.
- [39] G. Bastin and D. Dochain. *On-line estimation and adaptive control of bioreactors*. Elsevier, 1990.
- [40] O. Bernard. *Mathematical Control Theory*, chap. Mass Balance Modelling of Bioprocesses. p. 769–812, No 2 de « ICTP Lecture comments », Summer School on Mathematical Control Theory, 2002.
-

-
- [41] J. F. Andrews. A Mathematical Model for the Continuous Culture of Microorganisms Utilizing Inhibitory Substrates. *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 10, no 6, p. 707–723, 1968.
- [42] S. P. Graef and J. F. Andrews. Mathematical modeling and control of anaerobic digestion. *Dans Water*, vol. 70 de AIChE Symposium Series, 1973.
- [43] X. J. Sinechal, M. J. Installe and E.-J. Nyns. Differentiation between acetate and higher volatile acids in the modeling of the anaerobic biomethanation process. *Biotechnology Letters*, vol. 1, no 8, p. 309–314, 1979.
- [44] D. T. Hill and C. L. Barth. A dynamic model for simulation of animal waste digestion. *Journal WPCF*, vol. 10, p. 2129–2143, 1977.
- [45] Mosey. Mathematical modelling of the anaerobic digestion process : regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile acids from glucose. *Water Science and Technology*, vol. 15, p. 209–232, 1983.
- [46] G. Campion, G. Bastin, and B. D'AndrCa-Novel. Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots. p. 462-469, 1993.
- [47] D. J. Costello, P. F. Greenfield and P. L. LEE. Dynamic Modelling of a Single stage High-Rate Anaerobic Reactor-ii. Model Verification. *Water Research*, vol. 25, no 7, p. 859–871, 1991a.
- [48] M. Ruzicka. An extension of the Mosey model. *Water Research*, vol. 10, p. 2440–2446, 1996.
- [49] 43 S. Kalyuzhnyi, V. Fedorovich, P. Lens, L. H. Pol and G. Lettinga. Mathematical modelling as a tool to study population dynamics between sulfate reducing and methanogenic bacteria. mai 1999. *Biodegradation*, vol. 9, p. 187–199, 1998.
- [50] 44 S. V. Kalyuzhnyi and V. V. Fedorovich. Mathematical modelling of competition between sulphate reduction and methanogenesis in anaerobic reactors. *Bioresource Technology*, vol. 65, p. 227–242, 1998.
- [51] S. V. Kalyuzhnyi, M. A. Gladchenko, V. I. sklyar, Y. S. Kizimenko and S. S. Scherbakov. Psychrophilic one- and two-step systems for pre-treatment of winery waste . *Water Science and Technology*, vol. 44, no 4, p. 23–31, 2001a.
- [52] V. Kalyuzhnyi, M. A. Gladchenko, V. I. Sklyar, O. V. Kurakova and S. S. Shcherbakov. The UASB treatment of winery wastewater under submesophilic and psychrophilic conditions . *Environmental Technology*, vol. 21, p. 919–925, 2000b.
-

-
- [53] L. Mailleret, O. Bernard and J.-P. Steyer. Robust regulation of anaerobic digestion process. *Water Science and Technology*, vol. 48, no 6, p. 87–94, 2003
- [54] S. Sinha, P. Bose, M. Jawed, S. John and V. Tare. Application of Neural Network for Simulation of Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor. *Biotechnology & Bioengineering*, vol. 77, no 7, p. 807–814, 2002.
- [55] A. Karama, O. B. A. Genovesi, D. Dochain, A. Benhammou and J.-P. Steyer. Hybrid modelling of anaerobic wastewater treatment processes. *Water Science and Technology*, vol. 43, no 1, p. 43–50, 2001.
- [56] V. B. Vasiliev, V. A. Vavilin, S. V. Rytow and A. V. Ponomarev. Simulation model of anaerobic digestion of organicmatter by a microorganism consortium : Basic equations. *Water Resource*, vol. 20, p. 633–643, 1993.
- [57] P. L. Mccarty and F. E. Mosey. Modelling of anaerobic digestion processes (a discussion of concepts). *Water Science and Technology*, vol. 24, no 8, p. 17–33, 1991.
- [58] H. N. Gaval, I. Angelidaki and B. H. Ahring, *Biomethanation I*, vol. 81 de *Advances in Biochemical Engineering and Biotechnology*, chap. Kinetics and Modeling of Anaerobic Digestion Process, p. 57–93, Springer Berlin / Heidelberg, 2002.
- [59] IWA (coordinateur), *The First International Workshop on the IWA Anerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)* , 2005.
- [60] C. Rosen, D. Vrecko, K. V. Gernaey, M. N. Pons & U. Jeppsson. Implementing adm1 for plant-wide benchmark simulations in matlab/simulink. *Water Science and Technology*, vol. 54, no 4, p. 11–9, 2006.
- [61] E. I. P. Volcke, K. V. G. D. Vrecko, U. Jeppsson, M. C. M. Van Loosdrecht and P. A. Vanrolleghem. Plant-wide (bsm2) evaluation of reject water treatment with a sharon-anammox process. *Water Science and Technology*, vol. 54, no 8, p. 93–100, 2006.
- [62] A. Zaatri, N. Kacem Chaouche and M. Karaali. Etude de bioréacteurs anaérobies expérimentaux pour la production de méthane. *Revue des Energies Renouvelables* , vol. 14, N° 2, pp. 291 – 300, 2011.
- [63] O. Bernard, B. chachuat, A. Hélias and J. Rodriguez. Can we assess the model complexity for a bioprocess ? Theory and example of the anaerobic digestion process . *Water Science and Technology*, vol. 53, no 1, p. 85–92, 2006a.
-

- [64] Wang, H. P., Kalchev, B., Tian, Y., Simeonov, I., Christov, N., & Vasseur, C. (2011, June). Composed Adaptive Control for a second-order nonlinear model of a biotechnological process. In 2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED) (pp. 1140-1143). IEEE.
- [65] Wang, H. H., Krstić, M., & Bastin, G. (1999). Optimizing bioreactors by extremum seeking. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 13(8), 651-669.
- [66] Kravaris, C., & Savoglidis, G. (2012). Tracking the singular arc of a continuous bioreactor using sliding mode control. *Journal of the Franklin Institute*, 349(4), 1583-1601.
- [67] Ramjug-Ballgobin, R., Rugooputh, H. C. S., Busawon, K., & Binns, R. (2015, December). Observer-based control for biomass regulation in wastewater treatment plants. In 2015 International Conference on Computing, Communication and Security (ICCCS) (pp. 1-5). IEEE.
- [68] Helton, J. W., & Merino, O. (1998). *Classical Control Using H-Infinity Methods: An Introduction to Design*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [69] Raković, S. V. (2016). Model predictive control: classical, robust, and stochastic [bookshelf]. *IEEE Control Systems Magazine*, 36(6), 102-105.
- [70] Başar, T., & Bernhard, P. (2008). *H-infinity optimal control and related minimax design problems: a dynamic game approach*. Springer Science & Business Media.
- [71] Astrom, K. J., & Wittenmark, B. (1995). *Adaptive control*, 2nd edn. Addison-Wesley. Reading.
- [72] Filatov, N. M., & Unbehauen, H. (2004). *Adaptive dual control: Theory and applications* (Vol. 302). Springer Science & Business Media.
- [73] Slotine, J. J. E., & Li, W. (1991). *Applied nonlinear control* (Vol. 199, No. 1). Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall.
- [74] Utkin, V. I. (1992). *Sliding Mode Control and Optimization*. Springer,.
- [75] Emelyanov, S. V. (1993). High order sliding modes in control systems. *Differential equations*, 29, 1627-1647.
- [76] Sira-Ramirez, H. (1988). Differential geometric methods in variable-structure control. *International Journal of Control*, 48(4), 1359-1390.
- [77] Utkin, V. I. (1978). *Sliding modes and their applications in variable structure systems*. Mir, Moscow.
- [78] Utkin, V., Guldner, J., & Shijun, M. (1999). *Sliding mode control in electro-mechanical*

- systems (Vol. 34). CRC press.
- [79] DeCarlo, R. A., Zak, S. H., & Matthews, G. P. (1988). Variable structure control of nonlinear multivariable systems: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 76(3), 212-232.
- [80] Fridman, L., & Levant, A. (2002). Sliding mode control in engineering.
- [81] Bühler, H. (1986). Réglage par mode de glissement. PPUR presses polytechniques.
- [82] Boiko, I., Fridman, L., Pisano, A., & Usai, E. (2007). Analysis of broutement in systems with second-order sliding modes. *IEEE transactions on Automatic control*, 52(11), 2085-2102.
- [83] Burton, J. A., & Zinober, A. S. (1986). Continuous approximation of variable structure control. *International journal of systems science*, 17(6), 875-885.
- [84] Laghrouche, S. (2004). Commande par modes glissants d'ordre supérieur: théorie et applications (Doctoral dissertation, Nantes).
- [85] Bartolini, G., Ferrara, A., Levant, A., & Usai, E. (1999). On second order sliding mode controllers. In *Variable structure systems, sliding mode and nonlinear control* (pp. 329-350). Springer, London.
- [86] Young, K. D. (1999). Variable structure systems, sliding mode and nonlinear control (Vol. 247). Ü. Özgüner (Ed.). London: Springer.
- [87] Levant, A., & Fridman, L. (2004). Robustness issues of 2-sliding mode control. *Variable structure systems: from principles to implementation*, 66, 131.
- [88] Plestan, F., Shtessel, Y., Bregeault, V., & Poznyak, A. (2010). New methodologies for adaptive sliding mode control. *International journal of control*, 83(9), 1907-1919.
- [89] Shtessel, Y., Taleb, M., & Plestan, F. (2012). A novel adaptive-gain supertwisting sliding mode controller: Methodology and application. *Automatica*, 48(5), 759-769.
- [90] Utkin, V. I., & Chang, H. C. (2009). Sliding mode control on electro-mechanical systems. *Mathematical problems in Engineering*, 8.
- [91] Utkin, V. I., & Lee, H. (2006, August). The chattering analysis. In *2006 12th International Power Electronics and Motion Control Conference* (pp. 2014-2019). IEEE.
- [92] Bartolini, G., Pisano, A., Punta, E., & Usai, E. (2003). A survey of applications of second-order sliding mode control to mechanical systems. *International Journal of control*, 76(9-10), 875-892.
- [93] Fridman, L., & Levant, A. (2002). Higher order sliding modes. *Sliding mode control in engineering*, 11, 53-102. [91]S. Laghrouche, F. Plestan, and A. Glumineau. Higher order

- sliding mode control based on integral sliding mode. *Automatica*, 43(3) :531–537, 2007.
- [94] S. Laghrouche, F. Plestan, and A. Glumineau. Higher order sliding mode control based on integral sliding mode. *Automatica*, 43(3) :531–537, 2007.
- [95] Laghrouche, S., Plestan, F., Glumineau, A., & Boisliveau, R. (2003, June). Robust second order sliding mode control for a permanent magnet synchronous motor. In *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, 2003. (Vol. 5, pp. 4071-4076). IEEE.
- [96] Levant, A. (2001). Universal single-input-single-output (SISO) sliding-mode controllers with finite-time convergence. *IEEE transactions on Automatic Control*, 46(9), 1447-1451.
- [97] Levant A., (2007). Principles of 2-sliding mode design. *Automatica*, 43(4), 576–586,
- [98] Pisano, A., Davila, A., Fridman, L., & Usai, E. (2008). Cascade control of PM DC drives via second-order sliding-mode technique. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(11), 3846-3854.
- [99] Boutalbi, O., (2014). Commande par mode glissant du second ordre d'un portique à trois dimensions. Mémoire de Magistère, Université Ferhat ABBAS - Sétif 1,.
- [100] Parvat, B. J., & Ratnaparkhi, S. D. (2015). A Second Order Sliding Mode Controller Applications in Industrial Process. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 19(4).
- [101] Levant, A. (1993). Sliding order and sliding accuracy in sliding mode control. *International journal of control*, 58(6), 1247-1263.
- [102] Lewis, F. L., & Lewis, F. L. (1986). *Optimal estimation: with an introduction to stochastic control theory* (pp. 88-94). New York: Wiley.
- [103] Bartolini, G., Ferrara, A., & Usai, E. (1998). Chattering avoidance by second-order sliding mode control. *IEEE Transactions on automatic control*, 43(2), 241-246.
- [104] Kunusch, C., Puleston, P., & Mayosky, M. (2012). *Sliding-Mode control of PEM fuel cells*. Springer Science & Business Media.
- [105] Levant, A. (1998). Robust exact differentiation via sliding mode technique. *automatica*, 34(3), 379-384
- [106] Smaoui, M., Brun, X., & Thomasset, D. (2005). Etude d'un différentiateur robuste via modes glissants d'ordre supérieur: Application en électropneumatique.
- [107] Bartolini, G., Levant, A., Plestan, F., Taleb, M., & Punta, E. (2013). Adaptation of sliding modes. *IMA Journal of Mathematical Control and Information*, 30(3), 285-300.
- [108] Mareels, I. (1984). A simple selftuning controller for stably invertible systems. *Systems*

- & Control Letters, 4(1), 5-16.
- [109] Ioannou, P., & Fidan, B. (2006). Adaptive control tutorial. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [110] Bouyahia, S., Semcheddine, S., Talbi, B., Boutalbi, O., & Terchi, Y. (2019). An adaptive super-twisting sliding mode algorithm for robust control of a biotechnological process. *International Journal of Dynamics and Control*, 1-11.
- [111] Ryan, E. P. (1991). A universal adaptive stabilizer for a class of nonlinear systems. *Systems & Control Letters*, 16(3), 209-218.
- [112] Kochalummootil, J., Shtessel, Y. B., Moreno, J. A., & Fridman, L. (2011, December). Adaptive twist sliding mode control: a Lyapunov design. In *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference* (pp. 7623-7628). IEEE.
- [113] Utkin, V. I., & Poznyak, A. S. (2013). Adaptive sliding mode control with application to super-twist algorithm: Equivalent control method. *Automatica*, 49(1), 39-47.
- [114] Taleb, M., Levant, A., & Plestan, F. (2013). Pneumatic actuator control: Solution based on adaptive twisting and experimentation. *Control Engineering Practice*, 21(5), 727-736.
- [115] Young, K. D., Utkin, V. I., & Ozguner, U. (1999). A control engineer's guide to sliding mode control. *IEEE transactions on control systems technology*, 7(3), 328-342.
- [116] Sira-Ramirez, H., & Llanes-Santiago, O. (1994). Dynamical discontinuous feedback strategies in the regulation of nonlinear chemical processes. *IEEE Transactions on control systems technology*, 2(1), 11-21.
- [117] Fossas, E., Ros, R. M., & Fabregat, J. (2001). Sliding mode control in a bioreactor model. *Journal of mathematical chemistry*, 30(2), 203-218.
- [118] Tham, H. J., Ramachandran, K. B., & Hussain, M. A. (2003). Sliding mode control for a continuous bioreactor. *Chemical and biochemical engineering quarterly*, 17(4), 267-275.
- [119] Hristozov, I., Pencheva, T., Huell, D., Klockow, C., Hitzmann, B., & Tzonkov, S. (2005). Implementation of Sliding Mode Controller with Boundary Layer for *Saccharomyces cerevisiae* Fed-batch Cultivation. *International Journal Bioautomation*, 2, 49.
- [120] Stanchev, S. P. (2003, June). A variant of an (combined) adaptive controller design introducing sliding regime in Lyapunov derivative. In *Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003*. (Vol. 1, pp. 909-914). IEEE.
- [121] Bouyahia, S., Semcheddine, S., Talbi, B., & Boutalbi, O. (2020). High-performance Control for a Nonlinear Biotechnological Process Based-on Adaptive Gain Sliding Mode Strategy.

- International Journal Bioautomation, 24(2), 103.
- [122] Bastin, G. (2013). *On-line estimation and adaptive control of bioreactors* (Vol. 1). Elsevier.
- [123] Lee, H., & Utkin, V. I. (2007). Chattering suppression methods in sliding mode control systems. *Annual reviews in control*, 31(2), 179-188.
- [124] Selișteanu, D., Petre, E., & Răsvan, V. B. (2007). Sliding mode and adaptive sliding-mode control of a class of nonlinear bioprocesses. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 21(8-9), 795-822.
- [125] Plestan, F., Shtessel, Y., Brégeault, V., & Poznyak, A. (2013). Sliding mode control with gain adaptation—Application to an electropneumatic actuator. *Control Engineering Practice*, 21(5), 679-688.
- [126] Amet, L., Ghanes, M., & Barbot, J. P. (2012, December). HOSM control under quantization and saturation constraints: Zig-Zag design solutions. In *2012 IEEE 51st IEEE conference on decision and control (CDC)* (pp. 5494-5498). IEEE.
- [127] Emel'Yanov, S. V., Korovin, S. K., & Levantovskii, L. V. (1986). Higher-order sliding modes in binary control systems. *SPhD*, 31, 291.

ملخص: في هذه الأطروحة ، تم تطوير تحكم قوي في وضع الانزلاق مع قانون توليف قابل للتكيف من أجل عملية تقانة حيوية غير خطية ، والتي تحدث داخل مفاعل حيوي مستمر للدبابات (CSTB). تم تصميم خوارزمية التواء الفائقة (STA) أولاً لتحقيق متانة عالية والحفاظ على التقارب السريع بدقة عالية. تكمن ميزة هذا النهج في أن إجراء التصميم الخاص به مستقل عن المعرفة السابقة بالقيمة الحدية لعدم اليقين والاضطرابات. ومع ذلك ، STA لديه عيب يوفر إثارة في حلقة التحكم. للتغلب على هذا العيب ، تم تطوير خوارزمية توليف تكيفية لضبط قانون التحكم STA دون تبديل التردد وتخفيف ظاهرة الإثارة غير المرغوب فيها. ثم ، يمكن الحصول على المتانة على الرغم من عدم اليقين غير المعروف والاضطرابات الخارجية للعملية غير الخطية. بالإضافة إلى ذلك ، يتم اشتقاق دليل رسمي على الاستقرار المقارب الكلي الموحد على أساس معيار Lyapunov لعملية الحلقة المغلقة. تظهر العديد من نتائج المحاكاة أن الخوارزمية المقترحة (ASTA) تضمن نفس الأداء مثل STA في ظل الاضطرابات الخارجية وعدم اليقين حدودي ، ولكن مع أقل الإثارة ويوضح أيضاً تحسينات الأداء الشاملة.

كلمات مفتاحية : عملية التكنولوجيا الحيوية غير الخطية ؛ فائقة التواء تحكم وضع انزلاق ، التحكم التكيفي ، والاستقرار.

Résumé : Dans Cette thèse, une commande par mode glissant robuste avec une loi de réglage adaptatif est développée pour un processus biotechnologique non linéaire, qui se déroule à l'intérieur d'un bioréacteur en cuve agitée continue (CSTB). Un algorithme de super twisting (STA) est d'abord conçu pour obtenir une robustesse élevée et pour préserver une convergence rapide avec une précision élevée. L'avantage de cette approche est que sa procédure de conception est indépendante de la connaissance préalable de la valeur limite des incertitudes et des perturbations. Cependant, la STA a un inconvénient qui fournit un chattering dans la boucle de contrôle. Afin de surmonter cet inconvénient, un algorithme de réglage adaptatif est développé pour ajuster la loi de contrôle STA sans commutation de fréquence et d'atténuer le phénomène de chattering indésirable. Ensuite, la robustesse peut être obtenue malgré l'existence d'incertitudes inconnues et de perturbations externes pour le processus non linéaire. En outre, une preuve formelle de la stabilité asymptotique uniforme globale basée sur le critère Lyapunov du processus en boucle fermée est dérivée. Plusieurs résultats de simulation montrent que l'algorithme (ASTA)proposé garantit les mêmes performances que la STA sous perturbation externe et incertitude paramétrique, mais, avec moins de chattering et illustre aussi les améliorations de performance globales.

Mots Clés : Procédé biotechnologique non linéaire; contrôle de mode glissant super-twisting, contrôle adaptatif, stabilité.

Abstract:

In this thesis, a robust super-twisting sliding mode control with adaptive tuning law is developed for a nonlinear biotechnological process, which takes place inside a continuous stirred tank bioreactor (CSTB). A super-twisting algorithm (STA) is firstly designed to obtain high robustness as well as preserve fast convergence with high accuracy. The benefit of this approach is that its design procedure is independent of the prior knowledge of the bound value of the uncertainties and perturbations. However, the STA has a drawback that provides a chattering in the control loop. In order to overcome this drawback, an adaptive tuning algorithm is developed to adjust the STA control law without frequency switching and alleviate the undesired chattering phenomenon. Then, the robustness can be achieved despite the existence of the unknown uncertainties and external perturbations for the nonlinear process. In addition, a formal proof of the global uniform asymptotic stability based on Lyapunov criterion of the closed-loop process is derived. Several simulation results show that the proposed adaptive super-twisting algorithm (ASTA) guarantees the performance of the STA under external disturbance and parametric uncertainty with less chattering and illustrate the overall performance improvements.

Key Words : Nonlinear biotechnological process; super-twisting sliding mode control, adaptive control, stability.