

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique

Présenté par : AOUIEUR Abderrehmen et AISSAOUI Toufik

Thème

**Commande sans modèle des bioprocédés :
Application au système AM2**

Soutenu publiquement, le 27 / 09 / 2020 , devant le jury composé de :

M F. ARICHI	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
M B. BENYAHIA	MCA	Université de Tlemcen	Directeur de mémoire
Mme I. DIDI ep BEMMOUSSAT	MCB	ESSA. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M. R MOKHTARI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur
Mme A. GHOUALI ep BEDJAOUI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à nos chers parents qui nous ont éclairé notre chemin et qui nous ont encouragé et soutenu tout au long de nos études.

A tous les membres de nos familles.

A tous nos amis, pour leur soutien aux moments difficiles de notre travail.

Abderrehmen AOUIMER

Toufik AISSAOUI

Remerciements

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à notre Dieu pour avoir données l'esprit et les moyens pour arriver à ce stade de connaissance, nous le prions pour que nous restions fidèles à lui.

Nous exprimons toute notre gratitude à notre encadrant Mr Boumediène BENYAHIA pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi. Il n'a jamais cessé de nous encourager, conseiller et guider pour atteindre nos objectifs scientifiques et éthiques.

Nous tenons à remercier également notre Co-encadrante Mme Ibtissem DIDI ep BENMOUSSAT, à qui nous avons demandé depuis notre deuxième année préparatoire de nous procurer un sujet et de nous mettre en contact avec un encadreur compétant et distingué par ses qualités humaines et professionnelles dans son travail. Sans elle nous n'aurions jamais eu l'honneur de rencontrer le premier dirigeant de notre travail.

Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier le directeur de l'école, M. Boucherit ROUISSAT et l'ancien directeur M. Brahim CHERKI, qui ont veillé à offrir une excellente formation aux élèves de l'école dans les meilleures conditions.

Nous remercions notre cher ami M. Mohamed Radjeb OUDAINIA, qui nous a fourni des conseils moraux, des encouragements et un soutien non seulement dans ce travail mais aussi durant l'université.

Nous tenons également à remercier tous nos collègues d'étude dans notre école pour leur soutien, leur motivation, leurs ambiances et bien sûr le bon temps et les bons souvenirs dans tout notre parcours universitaire.

Nos remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Table des matières

1	Introduction générale	8
2	Traitement des eaux usées par digestion anaérobie	10
2.1	Introduction	10
2.2	Stress hydrique	10
2.2.1	Quelques statistiques de l'UNESCO et de l'OMS sur les eaux usées	11
2.2.2	Traitement biologique des eaux usées	12
2.3	Le principe du traitement biologique	12
2.3.1	Les étapes d'un traitement STEP	13
2.4	La digestion anaérobie	14
2.4.1	Définitions de la digestion anaérobie	14
2.4.2	L'importance et l'avantage de la digestion anaérobie	14
2.4.3	Les étapes de la digestion anaérobie	14
2.4.4	Processus de la digestion anaérobie	16
2.4.5	Les paramètres influents sur le rendement de la digestion anaérobie	16
2.5	Conclusion	17
3	Analyse mathématique du modèle AM2	18
3.1	Introduction	18
3.2	Le modèle ADM1	18
3.3	Le modèle AM2	19
3.4	Équilibres du modèle AM2	21
3.5	Simulation du modèle AM2	22
3.6	Conclusion	28
4	Contrôle sans modèle appliqué sur le AM2	29
4.1	Introduction	29
4.2	Définition de la commande sans modèle	29
4.2.1	Modélisation locale	30
4.3	Principe du contrôle sans modèle	31

4.4	Estimation numérique des dérivées	32
4.4.1	Généralités	32
4.4.2	Estimations des dérivées temporelles selon M. Fliess	32
4.5	Application au modèle AM2	34
4.5.1	Étapes de la commande sans modèle	34
4.5.2	Résultats de simulations	35
4.6	Conclusion	42
5	Conclusion générale	43

Liste des tableaux

3.1	S'il y a lessivage de x_1	21
3.2	S'il n'y a pas lessivage de x_1	22
3.3	Valeurs indicatives des paramètres cinétiques du modèle AM2 et des paramètres de rendement	22
3.4	Valeurs des solutions s_1 et s_2	22
3.5	Conditions initiales du modèle AM2	23
3.6	Valeurs de simulations dans le cas de lessivage de x_1	23
3.7	Valeurs de simulations dans le cas du non lessivage de x_1	25

Table des figures

2.1	Schéma représente le stress hydrique dans le monde	11
2.2	Procédé de traitement biologique des eaux usées par STEP	12
2.3	Schéma représentatif des étapes de la digestion anaérobie	15
3.1	Cinétique de Monod	20
3.2	Cinétique de Haldane	21
3.3	Allure du modèle dans le cas 1.1	23
3.4	Allure du modèle dans le cas 1.2	24
3.5	Allure du modèle dans le cas 1.3	24
3.6	Allure du modèle dans le cas 2.1	25
3.7	Allure du modèle dans le cas 2.2	26
3.8	Allure du modèle dans le cas 2.3	26
3.9	Allure du modèle dans le cas 2.4	27
3.10	Allure du modèle dans le cas 2.5	27
3.11	Allure du modèle dans le cas 2.6	28
4.1	Principe de la modélisation locale	30
4.2	Principe du contrôle sans modèle	31
4.3	Allure de la réponse s_T avec $s_T^* = 1.5$	36
4.4	Allure de la commande D avec $s_T^* = 1.5$	37
4.5	Évolution temporelles de s_1, x_1, s_2 et x_2 avec $s_T^* = 1.5$	37
4.6	Allure de la réponse s_T avec $s_T^* = 4$	38
4.7	Allure de la commande D avec $s_T^* = 4$	39
4.8	Évolution temporelles de s_1, x_1, s_2 et x_2 avec $s_T^* = 4$	39
4.9	Allure de la réponse s_T avec $s_T^* = 15$	40
4.10	Allure de la commande D avec $s_T^* = 15$	41
4.11	Évolution temporelles de s_1, x_1, s_2 et x_2 avec $s_T^* = 15$	41

Chapitre 1

Introduction générale

Ces derniers siècles, le monde a connu un énorme accroissement démographique, la population continue de se multiplier, et de ce fait, l'ONU prévoit un doublement de la population mondiale d'ici 2050. Ce problème démographique s'est accompagné d'un fort développement économique et faute de mal gestion, des ressources ont eu un grand impact négatif sur l'environnement. De plus, les activités humaines ont eu aussi des effets négatifs sur plusieurs niveaux : épuisement des ressources naturelles, érosion de la biodiversité, augmentation de la population, réchauffement climatique. D'après le programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), les menaces les plus graves pour la planète sont le changement climatique, le taux d'extinction des espèces et la diminution de l'eau potable. Pour cela des études sont faites pour trouver les meilleures solutions à ces problèmes. Ainsi, l'une des solutions envisageables pour lutter contre la diminution de l'eau potable est la réutilisation des eaux usées après épuration en agriculture et en industrie. De ce fait, diverses technologies des bioprocédés sont utilisées pour traiter par voie biologique les eaux usées domestiques et industrielles. Deux grands procédés sont mis en œuvre, l'un de *digestion aérobie* et l'autre de *digestion anaérobie*.

Dans ce mémoire nous nous intéressons à la digestion anaérobie qui a plus d'avantages que la digestion aérobie, notamment la production du biogaz (méthane) et la faible quantité de boues produites. L'un des modèles de la digestion anaérobie le plus connu est le modèle ADM1 (Anaerobic Digestion Model N1), mis au point par l'IWA [1] (International Water Association). Le modèle **ADM1** est le modèle le plus complet de la digestion anaérobie, mais malheureusement le plus complexe, et donc non dédié pour faire du contrôle automatique. Dans la littérature, il existe un autre modèle de la digestion anaérobie plus simple, qui décrit le processus en deux étapes : acidogénèse et méthanogénèse. Ce modèle nommé **AM2** (Acidogénèse-Méthanogénèse 2 étapes) a été développé dans le cadre d'un projet de recherche AMOCCO et considère deux processus biologiques et 4 variables d'état principales. Le modèle AM2 a été largement calée sur des données expérimentales et a prouvé son efficacité pour faire du

contrôle automatique du processus aux niveaux de la simulation et de l' expérimental.

Dans le cadre de notre mémoire d'ingénierat, nous proposons d'appliquer sur AM2 un *contrôle sans modèle* développé par M. Fliess [2]. Le principe de ce contrôle consiste à utiliser uniquement des mesures de l'entrée et de la sortie pour calculer la loi de commande.

Ce rapport est constitué de quatre chapitres :

Chapitre 1 : Traitement des eaux usées par digestion anaérobie. Ce chapitre est un chapitre introductif qui présente le problème des eaux usées ainsi que le principe de leur traitement biologique.

Chapitre 2 : Analyse mathématique du modèle AM2. D'abord, nous allons discuter l'intérêt de la modélisation mathématique des bioprocédés. Puis, nous allons présenter le modèle ADM1 de la digestion anaérobie. Ensuite, nous allons introduire le modèle AM2 et nous allons calculer ses points d'équilibres et étudier leur stabilité.

Chapitre 3 : Le contrôle sans modèle. Dans le troisième chapitre, nous allons présenter la théorie du contrôle sans modèle et les calculs qui seront nécessaires pour son élaboration. Pour prouver l'efficacité de ce contrôle, nous allons l'appliquer sur un simple chemostat et on discutera les résultats.

Chapitre 4 : Commande sans modèle du système AM2. Le quatrième chapitre est consacré à l'application du contrôle sans modèle au système AM2. Nous allons montrer les étapes de calcul de la commande et nous discuterons les résultats de simulation. Évidemment, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale et des quelques perspectives.

Chapitre 2

Traitement des eaux usées par digestion anaérobie

2.1 Introduction

Nous pouvons vivre sans abri pendant des mois, sans manger pendant des jours mais, sans eau, la vie est une question d'heures et minutes. C'est pourquoi on va parler dans notre sujet de cette source. L'eau non salée ou bien l'eau douce représente moins de 2.5% de l'eau sur terre. Au cours des années avec l'accroissement démographique très élevé et plusieurs facteurs naturels comme le réchauffement climatique, ce pourcentage diminue avec le temps et devient très rare dans le monde. Alors que toutes les populations du globe terrestre ne disposent pas du même confort. La consommation en eau domestique dans le monde est donc très inégale, d'autant plus importante que le niveau de vie des populations est élevé, les pays industrialisés, qui la gaspillent sans compter, caracolant loin devant les autres nations. Dans ce chapitre on va présenter les techniques de traitement utilisées comme une solution à ce problème : traiter les eaux usées par digestion anaérobie et réutiliser les eaux épurées.

2.2 Stress hydrique

Le stress hydrique signifie une insuffisance d'eau de qualité satisfaisante pour répondre aux besoins humains et d'environnement. Néanmoins, plusieurs populations vivent dans des régions qui font déjà face au stress hydrique comme représente la figure 2.1. Les prévisions pour 2025 est que certains pays de la population mondial vivants dans de telles zones augmenteront de 35%. Soit d'environ 2.8 milliards de personnes. 70% de la consommation d'eau dans le monde est imputable à l'agriculture et la portion de l'eau consommée dans les villes en représente moins d'un quart, voire moins en Afrique. En Asie et dans le Pacifique, l'agriculture représente environ 85% de la consommation d'eau.

Malgré cela, il est démontré que le manque de ressources en eau ne constitue pas une cause majeure de l'insuffisance des systèmes d'alimentation en eau et d'assainissement de la plupart des villes à faibles revenus. Le problème est d'avantage lié à la mauvaise gestion de ces ressources.

D'autre part, le stress hydrique en Algérie occupe la 29e place parmi les pays en situation de stress hydrique élevé selon un classement comportant 44 pays établie par "World Ressources Institue". Cela représente une réelle menace sur la sécurité et la disponibilité de l'eau, notamment pour l'usage domestique.

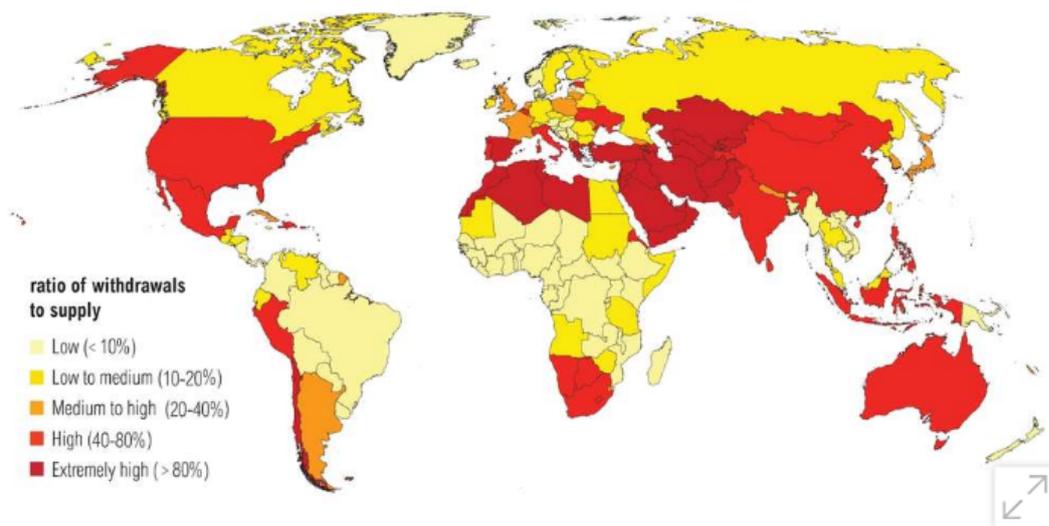


FIGURE 2.1 – Schéma représente le stress hydrique dans le monde

2.2.1 Quelques statistiques de l'UNESCO et de l'OMS sur les eaux usées

- Plus de 80% des égouts des pays en voie de développement se déversent sans traitement, polluant les rivières, les lacs et les zones côtières.
- Les écosystèmes méditerranéens sont diversifiés vulnérables et sensibles aux changements dans les conditions hydrologiques, comme le sud méditerranéen qui risquerait de perdre 60 à 80% de ces espèces.
- L'eau est la première cause de 80% des maladies qui affectent la population mondiale.
- 50% des cas de mortalités sont causées par les eaux usées, parce que la majorité des maladies sont transmises par l'eau.
- Les eaux polluées détériorent les écosystèmes et provoquent même des disparitions des espèces [3].

2.2.2 Traitement biologique des eaux usées

Pour lutter contre le stress hydrique, la véritable solution est bien de faire un traitement biologique des eaux usées et de réutiliser par la suite les eaux épurées dans l'agriculture et l'industrie. Le traitement consiste à éliminer des eaux usées, la matière organique biodégradable (Carbonne), qu'elle soit soluble, ainsi que des composés qui contiennent de l'azote et du phosphore. Le traitement biologique se fait souvent dans des Stations de Traitement et d'Épuration (STEP) comme montré par la figure 2.2. Un tel traitement est efficace même pour les eaux usées industrielles, de par sa simplicité et son faible coût économique d'exploitation.

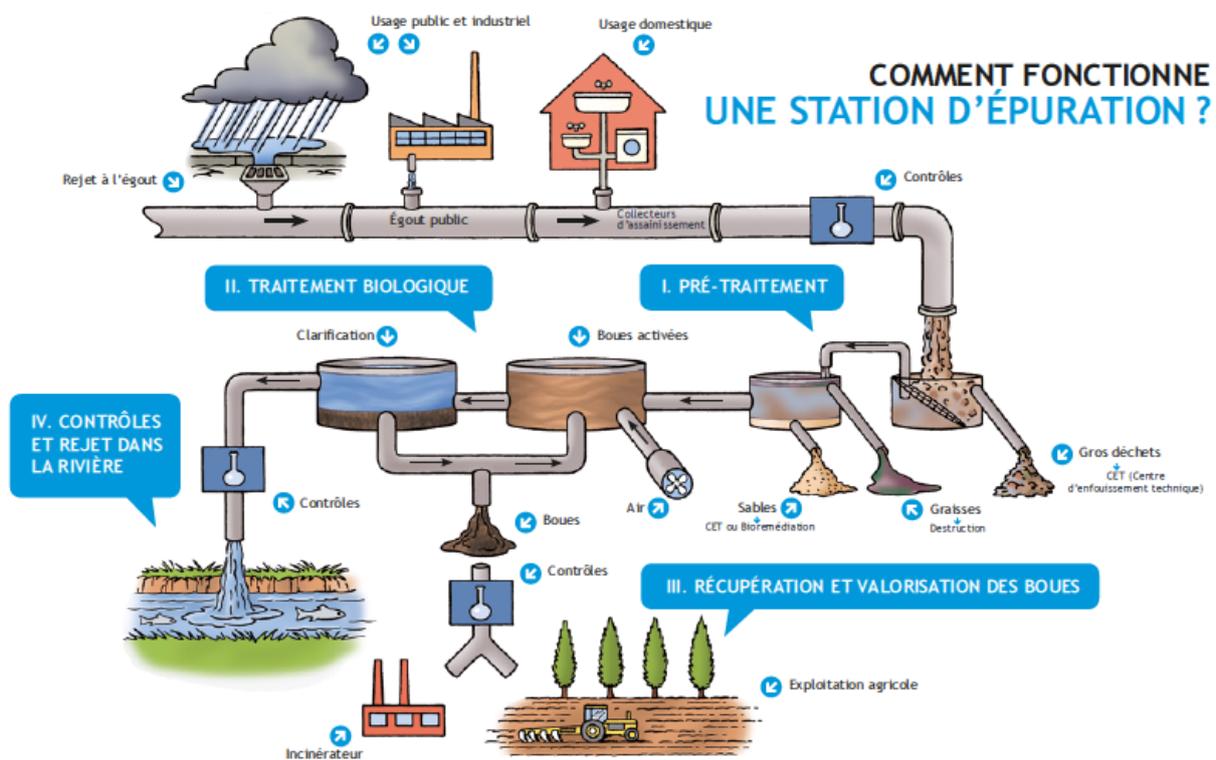


FIGURE 2.2 – Procédé de traitement biologique des eaux usées par STEP

2.3 Le principe du traitement biologique

Mettre en contact la matière à dégrader (matière organique) avec des bactéries épuratrices, dans des conditions environnementales convenables. Ces bactéries vont transformer la matière organique qui à son tour va transformer la pollution en des formes moins polluées afin de respecter les normes de rejets fixés par le règlement. Ce principe comporte quatre étapes : le pré-traitement, le traitement biologique par boues activées, la clarification et le traitement des boues.

2.3.1 Les étapes d'un traitement STEP

Le pré-traitement commence par le dégrillage : séparation des déchets solides les plus gros, retenu par un système de tamis ou de grilles

Le pré-traitement se poursuit par le dessablage - dégraissage : élimination des graisses par flottaison et des matières lourdes par décantation

Le traitement biologique par boues activées : les micro-organismes (bactéries) transforment la pollution dissoute en boues biologiques par une alternance de phase d'aération et de repos dans des bassins. Le traitement biologique est la transformation de la pollution par des bactéries en gaz carbonique, eau traitée et boues

La clarification sépare les boues de l'eau qui, dépolluée à plus de 90 %, est ensuite rejetée dans le milieu naturel.

Le traitement des boues consiste à concentrer la matière organique en filtrant les boues liquides pour obtenir des boues solides plus facilement transportable et stockable.

Les bienfaits du traitement biologique

- Aucun danger pour l'environnement.
- Efficace et bien contrôlé.
- Intéressant d'un point de vue économique.

Les inconvénients du traitement biologique

- Systèmes compliqués (incertain et non linéaire).
- Difficiles à caractérisés (dynamiques variables).
- Manque de capteur et d'actionneurs.
- Coût d'investissement élevé.

Deux grands types de traitement biologique sont utilisés : le traitement aérobie où les bactéries épuratrices ont besoin d'oxygène pour fonctionner et, le traitement anaérobie qui ne peut avoir lieu qu'en absence d'oxygène. Ce dernier traitement s'appelle aussi la *Digestion Anaérobie*, dont la modélisation et le contrôle feront l'objet de notre étude.

2.4 La digestion anaérobie

2.4.1 Définitions de la digestion anaérobie

Le dispositif de production et de récupération de biogaz comprendra principalement un hydrolyseur, un ou plusieurs digesteurs pour réaction, un compteur de gaz et un système qui convertit le biogaz en d'autres formes d'énergie, utilisables pour une digestion anaérobie optimale. L'hydrolyse, l'acidogénèse, l'acétogénèse et la méthanogénèse sont les principales étapes qui constituent le processus classique de digestion anaérobie. Ce dernier présente un métabolisme assez complexe avec plusieurs mécanismes de transformation possibles. Cette espèce est en compétition constante et implique donc une cinétique de croissance avec de nombreuses étapes d'activation et d'inhibition.

2.4.2 L'importance et l'avantage de la digestion anaérobie

- Le biogaz produit peut également remplacer les sources de combustibles fossiles.
- Le traitement est adapté aux déchets solides et aux eaux usées.

2.4.3 Les étapes de la digestion anaérobie

La digestion anaérobie se déroule en 5 étapes principales qui peuvent être séquentielles ou parallèles [4] comme représente la figure 2.3.

- **Désintégration** : c'est une étape non biologique qui fait la transformation de la matière première (déchets ou eaux usées) qui sont appelés aussi macromolécules, en quatre molécules gras qui sont : carbohydrate (Glucide), protéine, lipides et inertes.

Une quantité de 100% de Matières primaires se transforme en : 30% Carbohydrates, 30% Protéine, 30% Lipides, 10% Inertes.

- **Hydrolyse**¹ : étape enzymatique qui mène à hydrolyser les matières organiques complexes en molécules simples par des bactéries comme suit :

Glucide => sucre

Protéine => acides amines

Lipides => AGCL

- **Acidogènes** : les espaces microbiennes qui vont produire des alcools et des acides organiques et des acides gras volatiles ainsi que l'hydrogène et des dioxydes de carbone.

1. Une hydrolyse (du grec hydro : eau et lysis : briser) est une réaction chimique et enzymatique dans laquelle une liaison covalente est rompue par action d'une molécule d'eau.

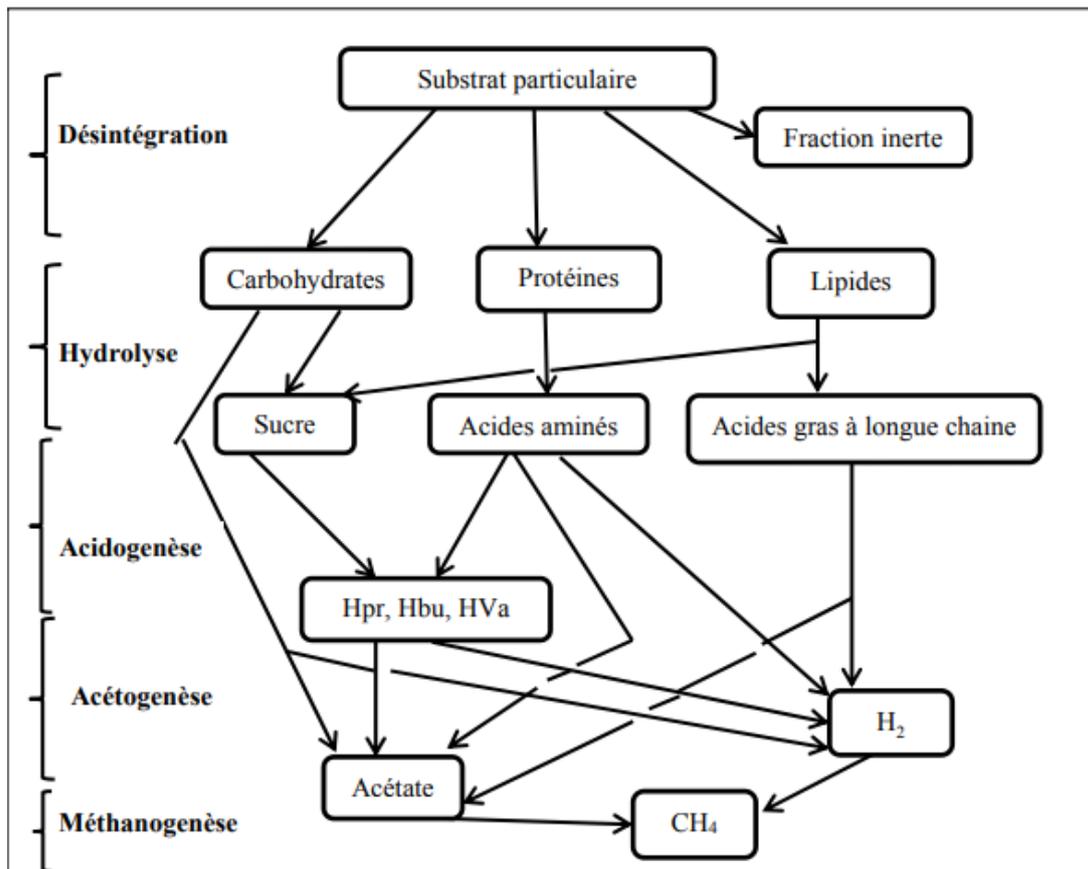


FIGURE 2.3 – Schéma représentatif des étapes de la digestion anaérobie

- **Acétogénèse** : étape d'oxydation et de transformation des composants de l'étape acidogènes en acétate et hydrogène. Ces derniers sont les précurseurs directs du méthane (CH_4).
- **Méthanogènes** : la production du méthane par les deux chemins suivant :
 - Un groupe de micro-organismes dégrade l'acétate
 - Un groupe de micro-organismes dégrade le gaz hydrogène (H_2)

Les réactions chimiques de cette étape sont faites par deux voies différentes qui sont :

Voie hydrogène et dioxyde de carbone (hydrogénophile) :



Voie de l'acétate (acétoclaste) :



2.4.4 Processus de la digestion anaérobie

Les processus de conversion dans la digestion anaérobie peuvent être divisés en deux types principaux selon la nature de transformation de la matière :

- **Biochimique** : ces processus sont normalement catalysés par des enzymes intra ou extra-cellulaires et agissent sur le pool de matière organique disponible. La désintégration des composites (tels que la biomasse morte) en constituants particulières et leur hydrolyse enzymatique ultérieure en monomères solubles extra-cellulaires. La digestion des matières solubles par l'intermédiaire des organismes est intracellulaire et ce processus entraîne la croissance et la décomposition de la biomasse.
- **Physico-chimique** : ces processus ne sont pas biologiques et comprennent l'association/dissociation d'ions et le transfert gaz-liquide. Les précipitations constituent un autre processus physico-chimique, mais elles ne sont pas incluses dans le modèle de la digestion anaérobie [1].

2.4.5 Les paramètres influents sur le rendement de la digestion anaérobie

Le principal facteur pour le déroulement de la méthanisation est l'absence de l'oxygène, mais il existe d'autres paramètres qui détermineront la performance de ce processus et par conséquent la quantité de biogaz produit :

- **La température** : c'est le paramètre fondamental pour les bactéries de la digestion, car il influe directement sur la décomposition de la substance organique et la formation chimique de méthane. Les bactéries anaérobies peuvent se développer entre les 10 et les 65 degrés [5]. Généralement, la digestion anaérobie des déchets organiques se déroule dans deux plages de température : le rang thermophile (entre 41 et 122 degrés) et le rang mésophile (entre 20 et 40 degrés) [6].
- **Le temps de séjour** : c'est un paramètre de fonctionnement et de suivi lors du traitement. On distingue deux types de temps de séjour qui sont :
 - **Temps de séjour hydraulique (TSH)** : correspond à la durée du contact entre l'effluent :

$$TSH = \frac{V}{Q_{in}} = \frac{1}{D}$$

où

V : volume du bioréacteur.

Q_{in} : débit d'entrée.

D : taux de dilution.

- **Temps de séjour solide (TSS)** : correspond à la durée du contact entre les produits organiques solides.

2.5 Conclusion

Le but de ce chapitre est d'introduire le problème des eaux usées rencontré dans différents pays du monde. La véritable solution pour ce problème est d'appliquer le traitement biologique des eaux usées et de réutiliser les eaux épurées. La technologie de digestion anaérobie est une solution prometteuse pour traiter les déchets solides et liquides (eaux usées). Pour bien optimiser le bon fonctionnement d'un système de traitement biologique, il est nécessaire de faire une modélisation mathématique de ce dernier à des fins de contrôle automatique.

Chapitre 3

Analyse mathématique du modèle AM2

3.1 Introduction

Un traitement efficace des eaux usées nécessite un contrôle automatique efficace du système de traitement, ce qui nécessite à son tour un modèle simple d'un point de vue mathématique, mais assez représentatif des variables principales du système. Dans ce chapitre, nous présentons un modèle complexe de la digestion anaérobie nommé ADM1, puis nous introduisons un modèle simplifié appelé AM2 et nous analysons ses équilibres et leur stabilité.

3.2 Le modèle ADM1

La digestion anaérobie est un ensemble de processus par lesquels les micro-organismes décomposent les matières biodégradables en l'absence d'oxygène et produisent du biogaz composé de méthane (CH_4) et de dioxyde de carbone (CO_2), ainsi que des gaz à l'état de traces comme le sulfure d'hydrogène (H_2S) et l'hydrogène (H_2) [6]. Le méthane peut être utilisé comme une source d'énergie renouvelable.

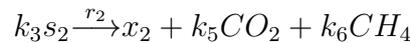
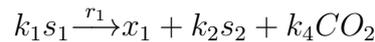
Aujourd'hui, le modèle ADM1 (Anaerobic Digestion Model n1) est reconnu comme un modèle standard par la plupart des digesteurs anaérobies traitant des déchets solides et liquides et, il a été validé sur une large gamme de processus industriels. Néanmoins, l'ADM1 est un modèle phénoménologique décrivant le détail des processus biochimiques de la digestion anaérobie et contient plus de 30 variables d'état et plus de 100 paramètres. D'un point de vue mathématique, il reste un modèle complexe, difficile à analyser et à caractériser analytiquement ses équilibres et leur stabilité. Ceci dit, l'ADM1 n'est pas un modèle adapté pour faire le contrôle automatique du processus, d'où le besoin d'utiliser un modèle de la digestion anaérobie plus simple d'un point de vue mathématique, mais assez représentatif des variables principales du système.

Dans notre travail, le modèle AM2 qui décrit la digestion anaérobie en deux étapes semblerait un modèle candidat pour faire du contrôle.

3.3 Le modèle AM2

Des modèles réduits qui peuvent être utilisés pour le contrôle sont disponibles dans la littérature ; ils comprennent l'AM2 qui est un bon compromis entre la complexité d'un modèle et sa correspondance avec l'information expérimentale disponible. Étant donné que dans plusieurs applications de l'industrie le processus est non linéaire, il est important que cette caractéristique soit préservée. Dans ce sens, l'originalité de notre approche est d'utiliser le modèle AM2 et de conserver les caractéristiques non linéaires et les équations d'équilibre qui sont bien connues en biotechnologie pour arriver à un modèle réduit non linéaire simple. Cette approche utilise évidemment des approches systématiques que nous avons traitées jusqu'à présent.

Le modèle AM2 a été développé dans le cadre du projet Européen AMOCO et comme l'ADM1, il est basé sur la loi de bilan de matières. Ce modèle considère deux processus biologiques (deux étapes), deux substrats et deux populations bactériennes. Dans la première étape d'acidogénèse, la biomasse acidogène x_1 consomme le substrat organique s_1 et produit les acides gras volatiles AGV (s_2) et le CO_2 . Dans la deuxième étape de méthanogénèse, la biomasse méthanogène x_2 consomme les AGV et produit du méthane CH_4 et du dioxyde de carbone CO_2 . Voici les schémas réactionnels définissant le modèle AM2 :



avec r est la vitesse de réaction définie par :

$$r = \mu(\cdot)x$$

Ainsi, en appliquant la loi de bilan de matières, le modèle AM2 s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{s}_1 = D(s_{1in} - s_1) - k_1 \mu_1(s_1)x_1 \\ \dot{x}_1 = (\mu_1(s_1) - D)x_1 \\ \dot{s}_2 = D(s_{2in} - s_2) + k_2 \mu_1(s_1)x_1 - k_3 \mu_2(s_2)x_2 \\ \dot{x}_2 = (\mu_2(s_2) - D)x_2 \end{cases} \quad (3.3.1)$$

Où

s_{1in} : le débit d'entrée de la première biomasse.

s_{2in} : le débit d'entrée de la seconde biomasse.

k_1 , k_2 et k_3 : des constantes stoechiométriques.

μ_1 et μ_2 : les cinétiques de croissances de Monod et de Haldane respectivement, défini par les expressions suivantes :

$$\mu_1(s_1) = \mu_{1max} \frac{s_1}{s_1 + K_1}$$

$$\mu_2(s_2) = \mu_{2max} \frac{s_2}{s_2 + K_2 + \frac{s_2^2}{K_i}}$$

avec

K_1 et K_2 sont des constantes de demi saturation et K_i est la constante d'inhibition.

Pour tracer les allures des deux cinétiques, on prend les valeurs des paramètres mentionnées dans le tableau (3.3).

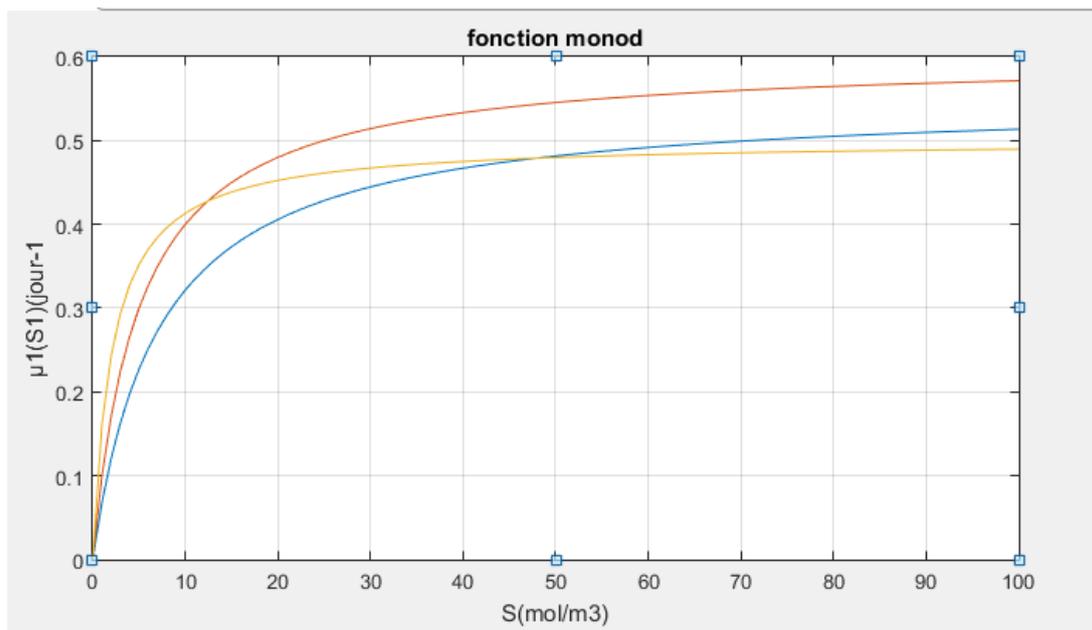


FIGURE 3.1 – Cinétique de Monod

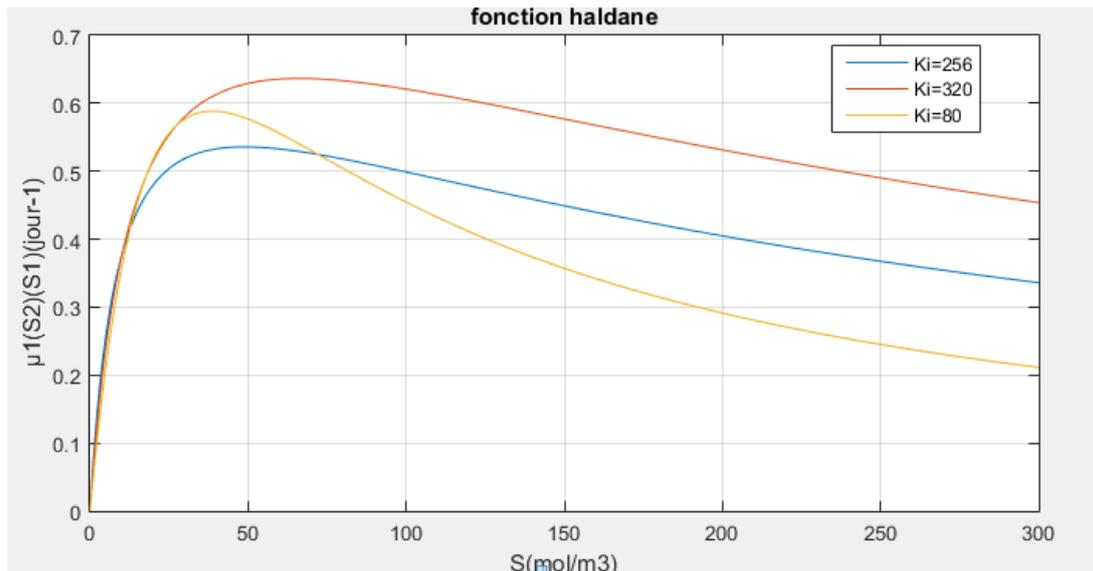


FIGURE 3.2 – Cinétique de Haldane

Remarque 1 D'après le graphe de la cinétique de Haldane le choix de paramètre K_i est très important car quand on fait le choix de K_i très grand cette cinétique tend vers la cinétique Monod.

3.4 Équilibres du modèle AM2

On note un point d'équilibre par la notation suivante :

$$E_i = (s_1^*, x_1^*, s_2^*, x_2^*)$$

Les équilibres s'obtiennent en mettant les dérivées égales à 0, c'est-à-dire

$$\begin{cases} D(s_{1in} - s_1) - k_1\mu_1(s_1)x_1 = 0 \\ (\mu_1(s_1) - D)x_1 = 0 \\ D(s_{2in} - s_2) + k_2\mu_1(s_1)x_1 - k_3\mu_2(s_2)x_2 = 0 \\ (\mu_2(s_2) - D)x_2 = 0 \end{cases}$$

Dans ce type de modèle on obtient 6 points d'équilibres qui sont résumé dans les deux tableaux 3.1 et 3.2 :

$s_{1in} < s_1$	E_0	E_1	E_2
$s_{2in} < s_2^1$	S		
$s_2^1 < s_{2in} < s_2^2$	I	S	
$s_2^2 < s_{2in}$	S	S	I

TABLE 3.1 – S'il y a lessivage de x_1

$s_{1in} > s_1$	E_0	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
$s_{2in}^* < s_2^1$	I			S		
$s_{2in} < s_2^1 < s_{2in}^* < s_2^2$	I			I	S	
$s_{2in} < s_2^1 < s_2^2 < s_{2in}^*$	I			S	S	I
$s_2^1 < s_{2in} < s_{2in}^* < s_2^2$	I	I		S		
$s_2^1 < s_{2in} < s_2^2 < s_{2in}^*$	I	I		I	S	
$s_2^1 < s_2^2 < s_{2in}$	I	I	I	S	S	I

TABLE 3.2 – S'il n'y a pas lessivage de x_1

3.5 Simulation du modèle AM2

Les simulations ont été réalisées en considérant les valeurs des paramètres données dans le tableau 3.3.

Paramètres	Valeurs	Unités
k_1	42.14	Kg COD/Kg x_1
k_2	116.5	mol VFA/Kg x_1
k_3	268	mol VFA/Kg x_2
K_1	7.1	Kg COD/ m^3
K_2	9.28	mol VFA/ m^3
K_i	80	mol VFA/ m^3
m_1	0.5	jour ⁻¹
m_2	0.74	jour ⁻¹
D	0.4	jour ⁻¹

TABLE 3.3 – Valeurs indicatives des paramètres cinétiques du modèle AM2 et des paramètres de rendement

Ces paramètres nous donne les valeurs de s_1^* , s_2^{*1} , s_2^{*2} comme suit :

Paramètres	s_1^*	s_2^{*1}	s_2^{*2}
Valeurs	8.4	55.44	27.05

TABLE 3.4 – Valeurs des solutions s_1 et s_2

Les conditions initiales du modèle AM2 sont supposées strictement positives, donnée dans le tableau 3.6.

Paramètres	$s_1(0)$	$x_1(0)$	$s_2(0)$	$x_2(0)$
Valeurs	2	0.5	20	1

TABLE 3.5 – Conditions initiales du modèle AM2

Dans le cas de lessivage de x_1 , on fixe le $s_{1in} = 5$ qui satisfait la condition $s_{1in} < s_1^*$:

	Conditions	Valeurs numériques	Convergence vers	Figures
Cas 1.1	$s_{2in} < s_2^1$	$s_{2in} = 15$	E_0 (stable)	3.3
Cas 1.2	$s_2^1 < s_{2in} < s_2^2$	$s_{2in} = 40$	E_1 (stable)/ E_0 (instable)	3.4
Cas 1.3	$s_2^2 < s_{2in}$	$s_{2in} = 100$	E_0, E_1 (stable)/ E_2 (instable)	3.5

TABLE 3.6 – Valeurs de simulations dans le cas de lessivage de x_1

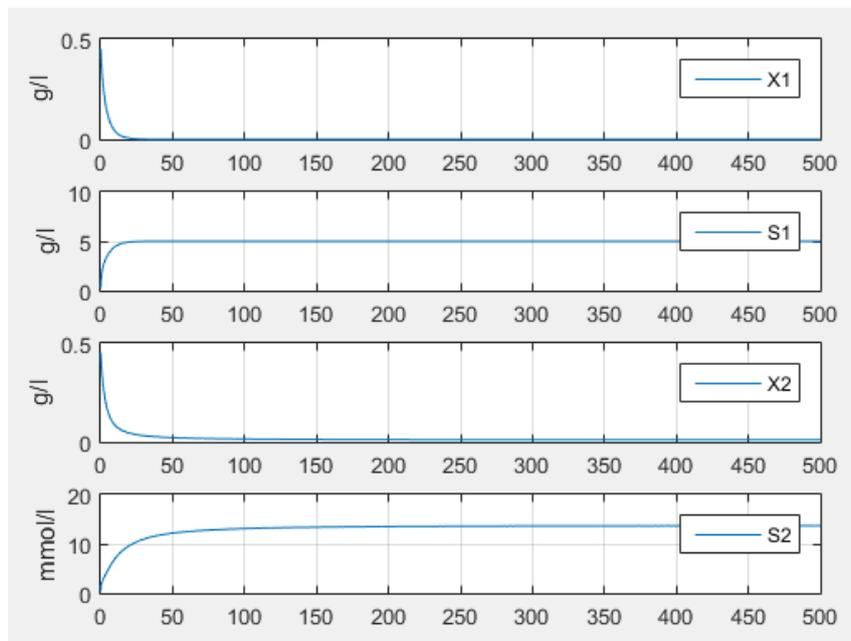


FIGURE 3.3 – Allure du modèle dans le cas 1.1

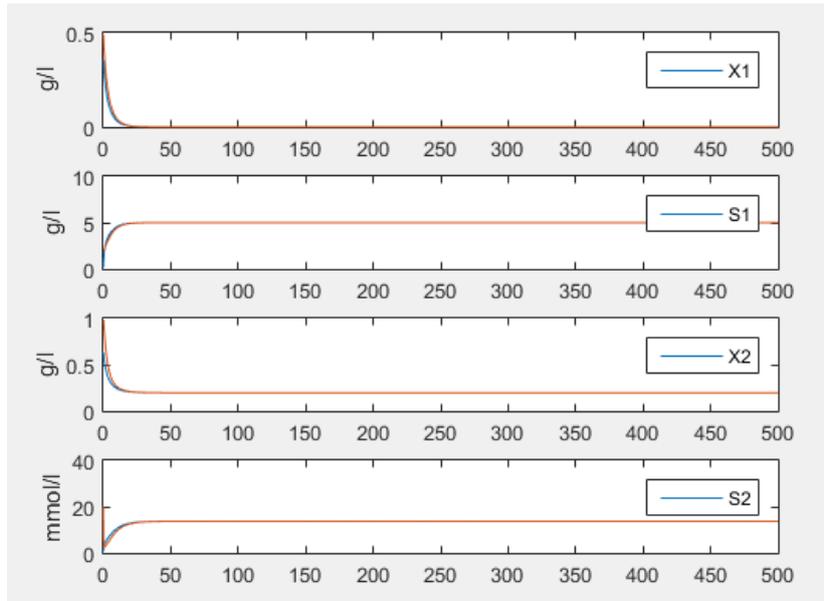


FIGURE 3.4 – Allure du modèle dans le cas 1.2

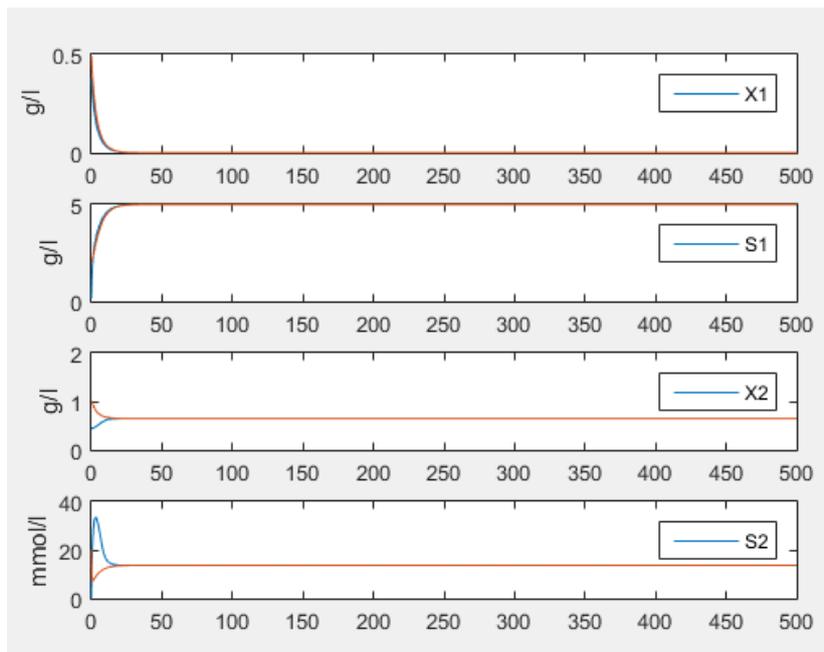


FIGURE 3.5 – Allure du modèle dans le cas 1.3

Dans le cas de lessivage de x_1 , il faut satisfaire la condition $s_{1in} > s_1^*$:

	Conditions	Valeurs numériques	Convergence vers	Figures
Cas 2.1	$s_{2in}^* < s_2^1$	$s_{1in} = 30$ $s_{2in} = 5$ $s_{2in}^* = 9.423$	E_3 (stable) E_0 (instable)	3.6
Cas 2.2	$s_{2in} < s_2^1 < s_{2in}^* < s_2^2$	$s_{2in} = 30$ $s_{2in} = 25$ $s_{2in}^* = 29.423$	E_4 (stable) E_0 (instable) E_3 (instable)	3.7
Cas 2.3	$s_{2in} < s_2^1 < s_2^2 < s_{2in}^*$	$s_{2in} = 50$ $s_{2in} = 20$ $s_{2in}^* = 79.715$	E_4, E_3 (stable) E_0 (instable) E_5 (instable)	3.8
Cas 2.4	$s_2^1 < s_{2in} < s_{2in}^* < s_2^2$	$s_{2in} = 30$ $s_{2in} = 30$ $s_{2in}^* = 34.423$	E_3 (stable) E_0 (instable) E_1 (instable)	3.9
Cas 2.5	$s_2^1 < s_{2in} < s_2^2 < s_{2in}^*$	$s_{2in} = 50$ $s_{2in} = 30$ $s_{2in}^* = 89.71$	E_4 (stable) E_0, E_1, E_3 (instable)	3.10
Cas 2.6	$s_2^1 < s_2^2 < s_{2in}$	$s_{2in} = 30$ $s_{2in} = 100$ $s_{2in}^* = 104.42$	E_4, E_3 (stable) E_0, E_1, E_2 E_5 (instable)	3.11

TABLE 3.7 – Valeurs de simulations dans le cas du non lessivage de x_1

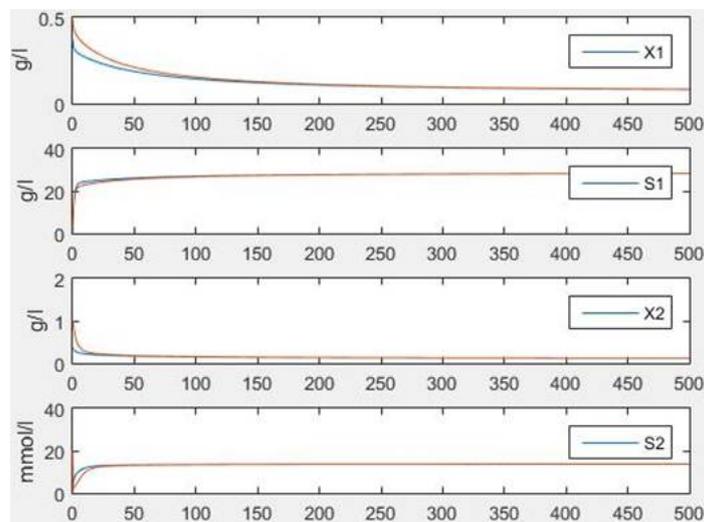


FIGURE 3.6 – Allure du modèle dans le cas 2.1

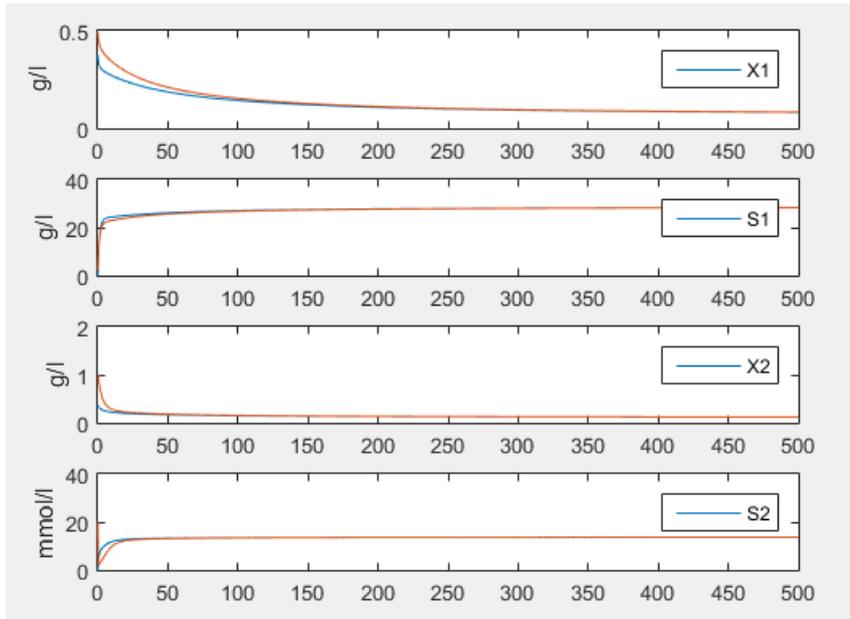


FIGURE 3.7 – Allure du modèle dans le cas 2.2

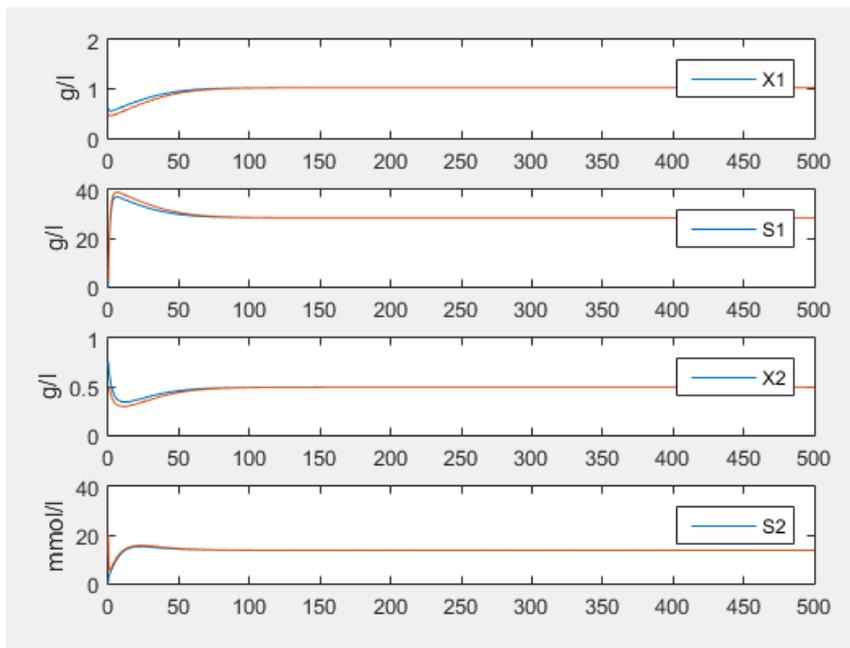


FIGURE 3.8 – Allure du modèle dans le cas 2.3

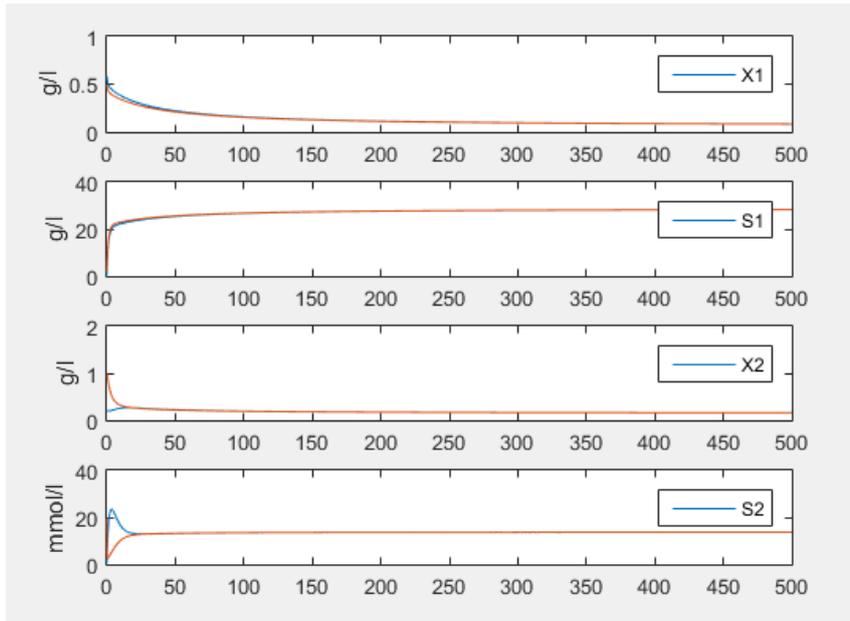


FIGURE 3.9 – Allure du modèle dans le cas 2.4

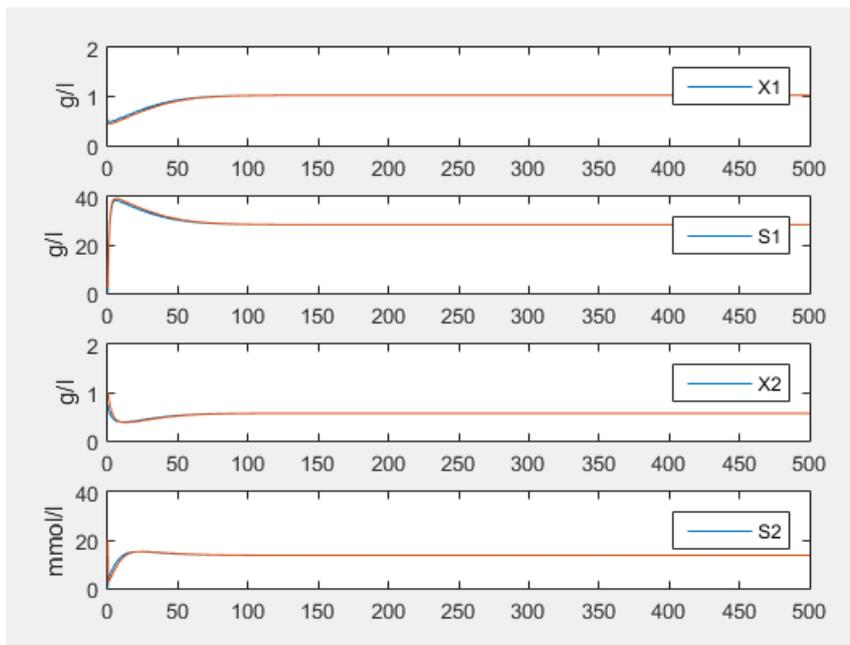


FIGURE 3.10 – Allure du modèle dans le cas 2.5

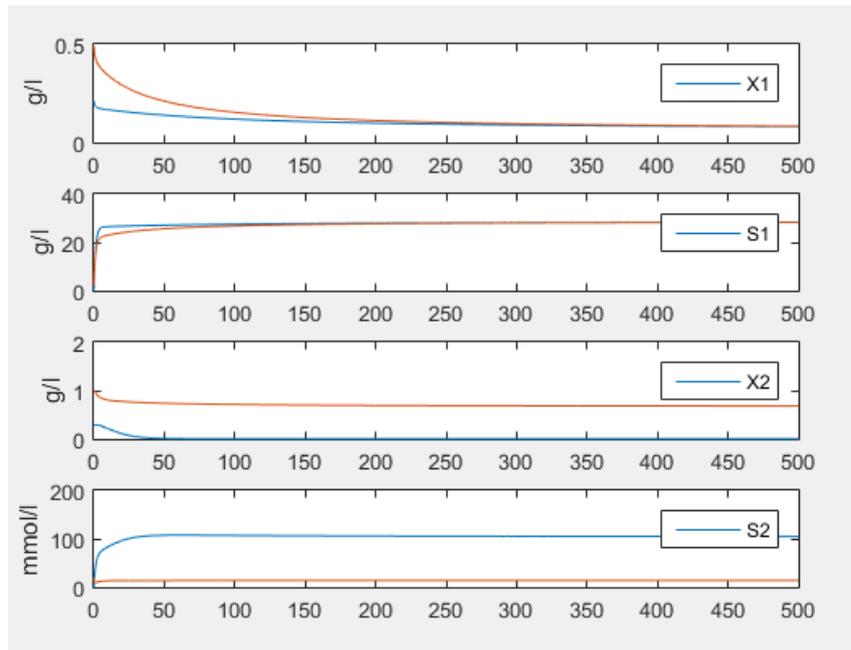


FIGURE 3.11 – Allure du modèle dans le cas 2.6

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre le modèle AM2 est un modèle a 4 dimension, 6 points d'équilibres et plusieurs points de stabilités donc le choix du contrôle doit être bien étudié pour que le système tend toujours vers le point d'équilibre voulu.

Chapitre 4

Contrôle sans modèle appliqué sur le AM2

4.1 Introduction

Les faits suivants sont connus chez tout automaticien :

Écrire un « bon » modèle mathématique d'un processus physique réel, c'est-à-dire non idéalisée, est redoutable, voire impossible. Un modèle est une représentation approximative du réel, obtenu après plusieurs simplifications et négligence de certaines dynamiques. Les correcteurs synthétisés sur la base d'un tel modèle, risqueraient de ne pas correctement fonctionner.

Pour remédier à ce problème, on utilise la commande robuste type H_{∞} par exemple, ou une commande ne tenant pas en compte du modèle, appelée *commande sans modèle*, dont la théorie fait l'objet du présent chapitre.

4.2 Définition de la commande sans modèle

La commande sans modèle est une approche moderne qui est proposée par M. Fliess et *al.* [?], basée uniquement sur les entrées et les sorties du système qu'on veut commander.

La commande sans modèle en réalité est une commande avec un modèle local du premier ordre, qui veut dire un modèle simple valable un court laps de temps sans cesse renouvelé, auquel on applique une commande PI intelligent (iPI) ou PID intelligent (iPID) qu'on peut qualifier par commande universelle [7].

4.2.1 Modélisation locale

Un système physique est décrit par le modèle général entrée/sortie suivant :

$$y^{(n)} = f(t, y, \dot{y}, \dots, y^{(n-1)}, u, \dot{u}, \dots, u^{(m)}) \quad (4.2.1)$$

Où $y(t)$ est la sortie et $u(t)$ représente l'entrée. Il s'agit d'un modèle à base d'équations différentielles d'ordre n .

Un tel modèle est assez compliqué et pourrait être mal connu (paramètres incertains, dynamiques approximées ou négligées, ...). Le système physique réel serait perturbé, les mesures sont souvent bruitées et les entrées sont parfois incertaines.

Pour remédier à ces problèmes, on propose de remplacer le modèle complexe (4.2.2) par un modèle linéaire plus simple, valable sur un court laps de temps décrit par l'équation (4.2.3), appelé modèle ultra-local [?], comme le montre la figure (2.2).

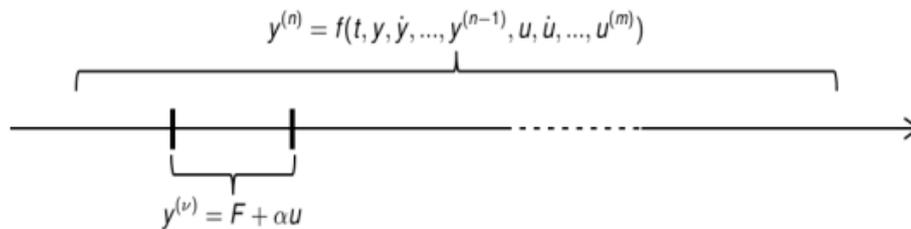


FIGURE 4.1 – Principe de la modélisation locale

$$y^{(\nu)} = F + \alpha u \quad (4.2.2)$$

où

- $\nu \geq 1$, le plus souvent $\nu = 1$ ou $\nu = 2$, sélectionné par le praticien.
- $y^{(\nu)}$ est la dérivée d'ordre ν de la sortie, calculée par un dérivateur numérique.
- u est l'entrée du système.
- α est un paramètre constant non physique qui est choisi par le praticien de sorte que αu et $y^{(\nu)}$ aient le même ordre de grandeur. La valeur de α est obtenue par essai-erreur.
- F est une fonction constante, supposée contenir toute la partie inconnue et perturbée du système (sans différence). Elle est continûment estimée par :

$$F_{est} = y_{est}^{(\nu)} - \alpha u \quad (4.2.3)$$

4.3 Principe du contrôle sans modèle

La commande sans modèle considère deux intervalles de temps comme c'est représenté dans la figure 4.2 Il existe ici, deux types d'intervalles :

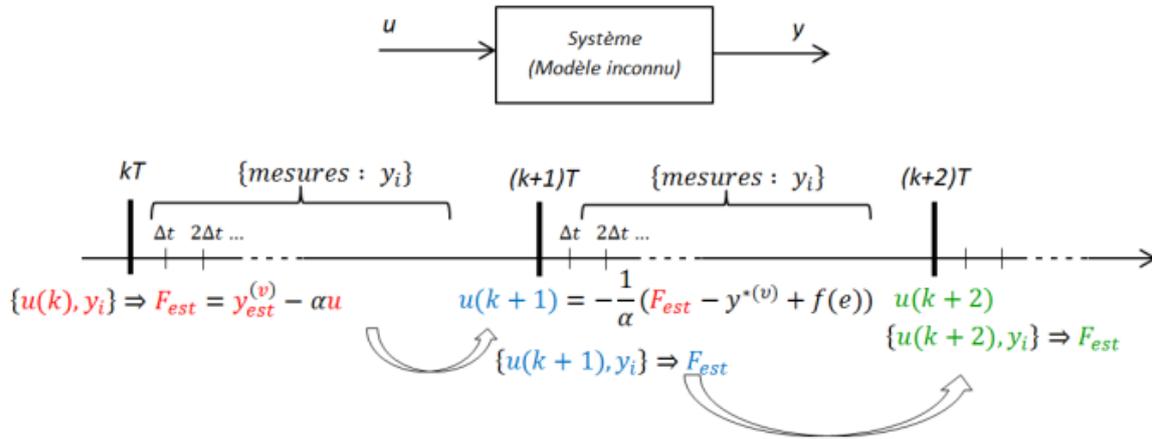


FIGURE 4.2 – Principe du contrôle sans modèle

- Intervalle de commande T : appliquer $u(kT)$, avec T est la période d'échantillonnage (fréquence de mesure).
- Intervalle de mesure Δt : mesurer y_i et estimer $y_{est}^{(\nu)}$.

La loi de commande est donnée à chaque instant kT par :

$$u(kT) = \frac{1}{\alpha} (F_{est} - y^{*(\nu)} + f(e)) \quad (4.3.1)$$

où

- y^* est la trajectoire de référence que la sortie y doit être égale ou proche,
- $f(e)$ est une fonction dépendante de l'erreur $e = y^* - y$.

En combinant les équations (4.2.3) et (4.3.1), on obtient l'équation suivante :

$$e^{(\nu)} + f(e) = 0$$

Nous devons choisir $e^{(\nu)} + f(e) = 0$ de tel sorte la trajectoire y^* soit assuré.

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} e(t) = 0$$

On exploite par exemple le fameux contrôle Proportionnel-Intégral-Dérivé intelligent (i-PID) ajustable.

En résumé, l'algorithme du contrôle sans modèle se résume comme suit :

1. Choisir ν l'ordre de la dérivée de y de l'équation (4.2.2), généralement $\nu = 1$ ou $\nu = 2$.

2. Choisir α tels que F et αu aient le même ordre de grandeur.
3. Choisir la trajectoire de référence y^* .
4. Calculer $F = y^{(\nu)} - \alpha$, après avoir estimé $y^{(\nu)}$.
5. Appliquer un iPID pour le contrôle du système.

$$f(e) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \dot{e}(t)$$

Évidemment, les gains de l'iPID doivent être ajustés.

4.4 Estimation numérique des dérivées

4.4.1 Généralités

La commande sans modèle donnée par l'équation (4.3.1) est basée sur l'estimation de la sortie et de ses dérivées à partir des mesures expérimentales. Le contrôle serait meilleur si on fait une bonne estimation notamment des dérivées. Le calcul de la dérivée par définition semble simple, mais peu précis si le pas de calcul est mal choisi et si la mesure est bruitée. On présente par la suite une technique d'estimation des dérivées proposée par M. Fliess [2], qui donne des résultats très satisfaisants.

4.4.2 Estimations des dérivées temporelles selon M. Fliess

Principes généraux

L'estimation de $F = y^{(\nu)} - \alpha u$ repose sur l'estimation numérique de la dérivée $y^{(\nu)}$. Par définition, la méthode la plus directe pour le calcul d'une dérivée numérique d'un signal $y(t)$ est d'utiliser sa définition :

$$\dot{y}(kT) = \frac{y((k+1)T) - y(kT)}{T}$$

Comme on l'a mentionné plus haut, cette méthode deviendra peu efficace si la mesure y est bruitée, ou si T est mal choisi (assez grand).

Estimation par la méthode de Fliess

Soit la sortie $y(t)$ du système supposée bruitée, sur un ensemble d'intervalles finis dans le temps, nous voulons estimer ces dérivées. Nous supposons que $y(t)$ est un signal polynomial de degré N , qui peut s'écrire par son développement limite de Taylor

au voisinage de zéro, de la manière suivante :

$$y_{(N)}(t) = \sum_{\nu=0}^{\nu=N} y^{(\nu)}(0) \frac{t^{\nu}}{\nu!}$$

où $t \geq 0$, ce développement satisfait l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d^{N+1}}{dt^{N+1}} x_N(t) = 0$$

La Transformée de Laplace de $y_{(N)}(t)$ est donnée par :

$$y_{(N)}(s) = \sum_{\nu=0}^{\nu=N} \frac{y^{(\nu)}(0)}{s^{\nu+1}} \quad (4.4.1)$$

L'objectif consiste à estimer la sortie $y(0)$ et ses dérivées $y^{(\nu)}(0)$.

Deux approches sont proposées :

- Estimation directe.
- Estimation simultanée, à laquelle nous nous intéressons dans ce chapitre.

Estimation simultanée

Développons l'équation (4.4.1) :

$$y_{(N)}(s) = \frac{y(0)}{s} + \frac{\dot{y}(0)}{s^2} + \frac{\ddot{y}(0)}{s^3} + \dots + \frac{y^{(N)}(0)}{s^{N+1}} \quad (4.4.2)$$

Multiplions ensuite les deux membres de l'équation (4.4.2) par s^{N+1} , on obtient :

$$s^{N+1} y_{(N)}(s) = s^N y(0) + s^{N-1} \dot{y}(0) + s^{N-2} \ddot{y}(0) + \dots + y^{(N)}(0)$$

A titre de simplification, prenons $N = 3$, ainsi on aura :

$$s^4 y_{(3)}(s) = s^3 y(0) + s^2 \dot{y}(0) + s \ddot{y}(0) + y^{(3)}(0) \quad (4.4.3)$$

Pour faire apparaître le $y(0)$, il suffit de dériver 3 fois l'équation (4.4.3) :

$$24s y_{(3)}(s) + 36s^2 \dot{y}_{(3)}(s) + 12s^3 \ddot{y}_{(3)}(s) + s^4 y_{(3)}^{(4)}(s) = 6y(0) \quad (4.4.4)$$

Pour faire apparaître les transformées de Laplace des intégrateurs, on multiplie les membres de l'équation (4.4.4) par s^5 , nous obtenons :

$$\frac{24}{s^4} y_{(3)}(s) + \frac{36}{s^3} \dot{y}_{(3)}(s) + \frac{12}{s^2} \ddot{y}_{(3)}(s) + \frac{1}{s} y_{(3)}^{(4)}(s) = \frac{6}{s^5} y(0) \quad (4.4.5)$$

Passons maintenant au domaine temporel (transformée de Laplace inverse), nous obtenons :

$$\begin{aligned} \frac{6T^4}{4!}y(0) = & - \int_0^T \sigma^3 y(\sigma) d\sigma + 12 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \sigma^2 y(\sigma) d\sigma d\sigma_1 - 36 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} \sigma y(\sigma) d\sigma d\sigma_2 d\sigma_1 \\ & + 24 \int_0^T \int_0^{\sigma_1} \int_0^{\sigma_2} \int_0^{\sigma_3} \sigma y(\sigma) d\sigma d\sigma_3 d\sigma_2 d\sigma_1 \end{aligned} \quad (4.4.6)$$

En utilisant, le théorème de Fubini ou Riemann, les intégrales doubles, triples et plus peuvent devenir des intégrales simples, ainsi l'équation (4.4.6) devient :

$$\begin{aligned} \frac{6T^4}{4!}y(0) = & - \int_0^T \sigma^3 y(\sigma) d\sigma + 12 \int_0^T (T - \sigma) \sigma^2 y(\sigma) d\sigma - 36 \int_0^T \frac{(T - \sigma)^2}{2} \sigma y(\sigma) d\sigma \\ & + 24 \int_0^T \frac{(T - \sigma)^3}{3!} y(\sigma) d\sigma \end{aligned} \quad (4.4.7)$$

Enfin, l'estimation de $y(0)$ est obtenue en divisant par $\frac{6T^4}{4!}$. La même procédure peut être appliquée pour estimer des dérivées supérieures.

4.5 Application au modèle AM2

Rappelons que le contrôle de notre système est le taux de dilution D qui représente le rapport du débit d'entrée Q_{in} sur le volume V du bioréacteur. D'un point de vue pratique, nous pouvons diluer ou charger la concentration des composants à l'intérieur du bioréacteur à l'aide du débit Q_{in} à volume constant, soit en jouant sur D .

Nous choisissons de réguler la concentration du substrat total à la sortie du bioréacteur, soit la quantité suivante :

$$y = s_T = s_1 + \frac{k_1}{k_2} s_2$$

Le choix de la consigne S_T^* dépend des objectifs fixés au préalable, comme les normes de rejet par exemple.

4.5.1 Étapes de la commande sans modèle

Pour commencer, nous allons remplacer le modèle AM2 (3.3.1) par le modèle local suivant, qui est monovarié et d'ordre 1 :

$$\dot{y} = \dot{s}_T = F + \alpha D$$

Ce modèle est valable sur un court laps de temps T , que nous fixons lors de la simulation (T est une période d'échantillonnage, de commande). Nous devons choisir aussi le pas d'intégration numérique dt et donc le nombre d'itérations à réaliser dans l'intervalle T . Nous choisissons les valeurs suivantes des paramètres pour élaborer notre commande :

1. Nous optons pour $\alpha = 70$, ce paramètre est choisi par essai-erreur.
2. En ce qui concerne la consigne, nous la choisissons constante, et nous testons le contrôle pour plusieurs valeurs :

$$s_T^* = 1.5, s_T^* = 4, s_T^* = 15$$

3. Le pas d'intégration $dt = 0.08$. Donc, nous faisons 1000 itérations d'intégration dans l'intervalle de commande $T = 80$.
4. Grâce à MATLAB, nous calculons les valeurs numériques de $F = s_T^* - 70D$, en estimant s_T^* par la méthode d'estimation simultanée décrite dans la section précédente.
5. Nous appliquons maintenant le régulateur de type i-PI suivant :

$$u = -\frac{1}{\alpha} \left(F - \dot{s}^* + k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \right)$$

Avec $k_p = 2$ et $k_i = 1$. Le choix de k_p et k_i se fait d'une manière empirique.

4.5.2 Résultats de simulations

Les valeurs des paramètres des cinétiques biologiques et des coefficients stœchiométriques sont données dans le tableau 3.3. Les conditions initiales $s_1(0)$, $x_1(0)$, $s_2(0)$ et $x_2(0)$ sont strictement supérieures à 0. Les concentrations S_{1in} et S_{2in} sont choisies comme suit :

$$S_{1in} = 10, S_{2in} = 50$$

Pour $s_T^* = 1.5$

Sur la figure (4.3) représente la réponse de $s_T(t)$ sur un temps de 80 jours. Nous remarquons bien que la sortie $s_T(t)$ tend vers la consigne $s_T^*(t) = 1.5$ et y reste égale, ce qui montre l'efficacité de la loi de commande utilisée.

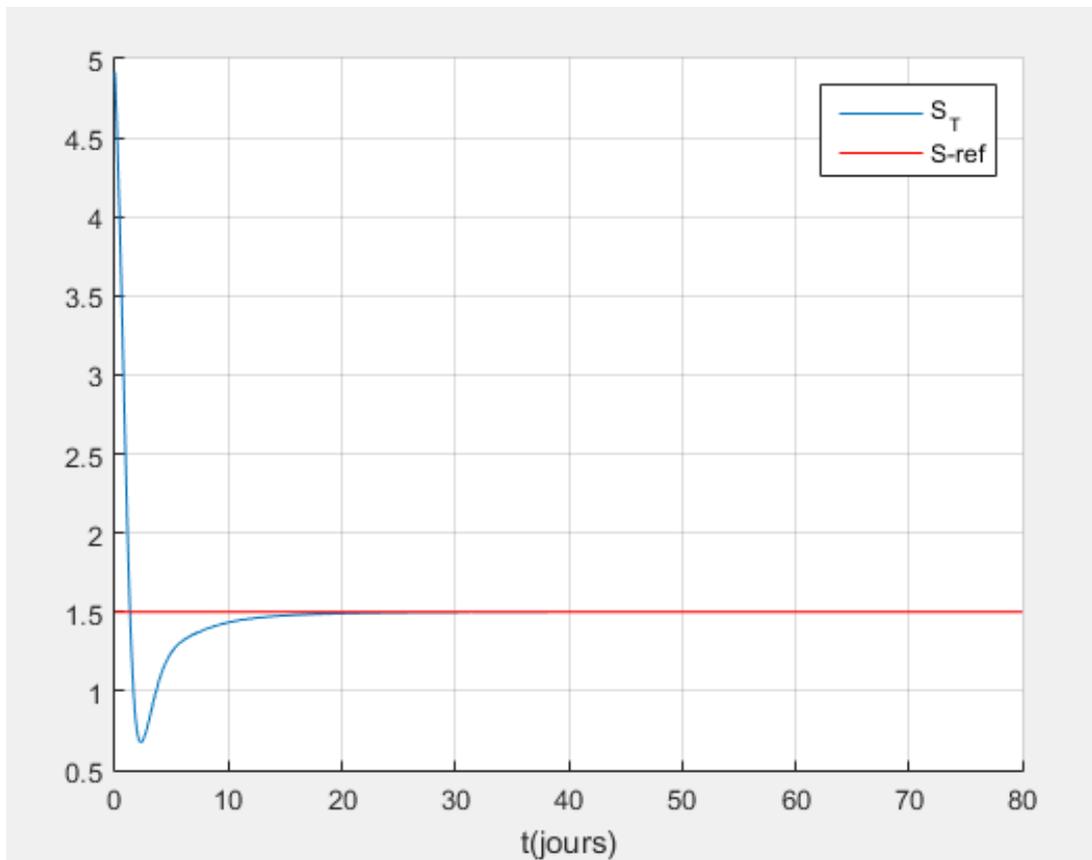


FIGURE 4.3 – Allure de la réponse s_T avec $s_T^* = 1.5$

Quant à la commande représentée par la figure (4.4), nous remarquons qu'elle augmente à partir de sa valeur initiale et tend vers une valeur finale qui permette au système de se stabiliser autour de la consigne.

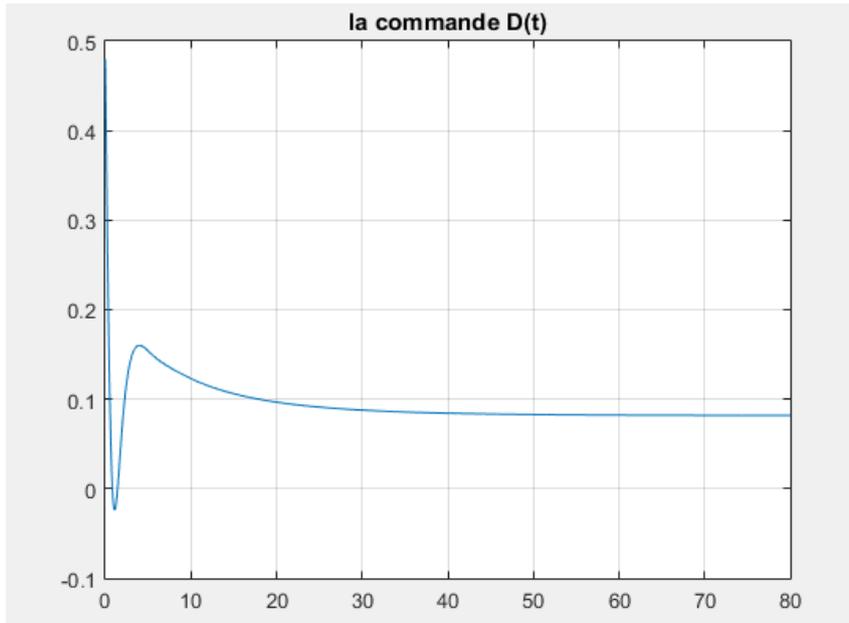


FIGURE 4.4 – Allure de la commande D avec $s_T^* = 1.5$

La biomasse, elle aussi tend vers sa valeur en régime permanent. Il est évident que les évolutions de $x_1(t)$ et $x_2(t)$ par rapport aux évolutions de $s_1(t)$ et $s_2(t)$ sont inversement proportionnelles comme le montre la figure (4.5).

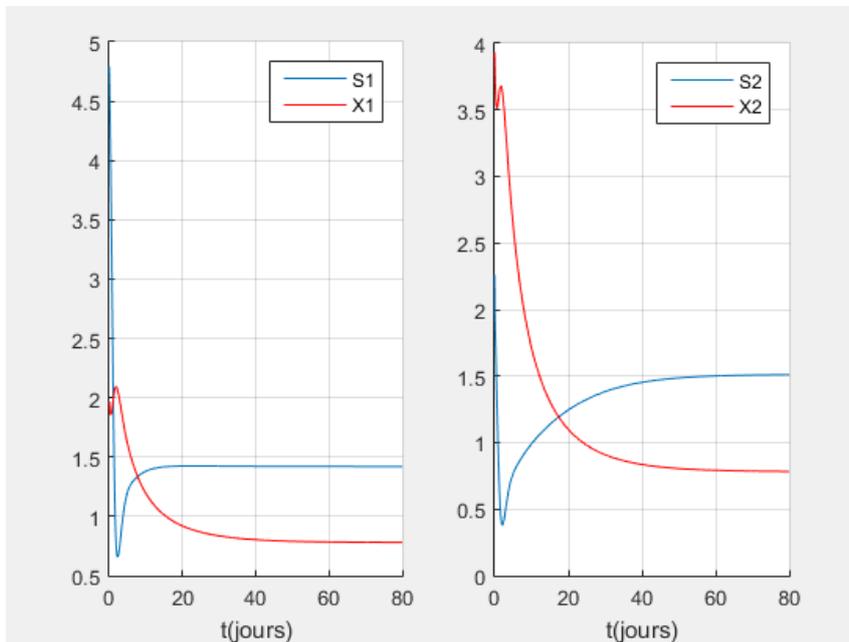


FIGURE 4.5 – Évolution temporelle de s_1 , x_1 , s_2 et x_2 avec $s_T^* = 1.5$

Pour $s_T^* = 4$

Sur la figure (4.6) représente la réponse de $s_T(t)$ sur un temps de 80 jours. Nous remarquons aussi bien que la sortie $s_T(t)$ tend vers la consigne $s_T^*(t) = 4$ et y reste égale, ce qui montre l'efficacité de la loi de commande utilisée.

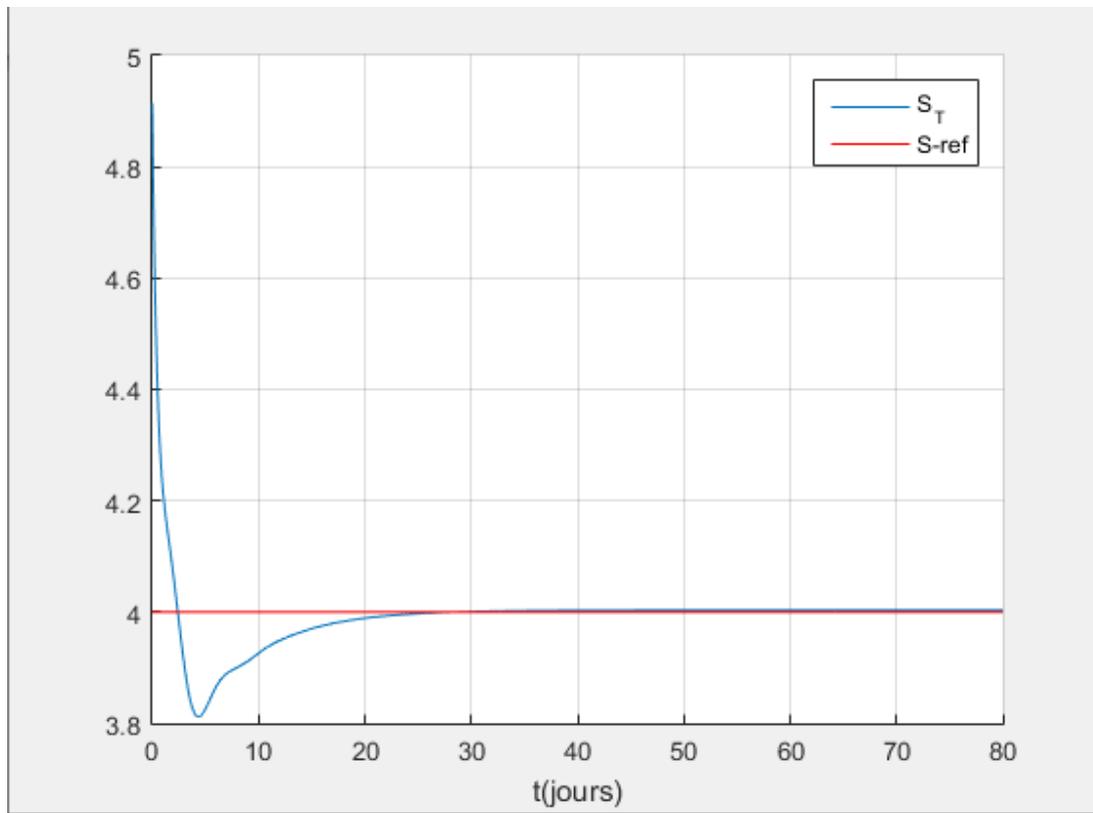


FIGURE 4.6 – Allure de la réponse s_T avec $s_T^* = 4$

Quant à la commande représentée par la figure (4.7), nous remarquons qu'elle diminue à partir de sa valeur 0.55 et tend vers une valeur finale 0.178 qui permette au système de se stabiliser autour de la consigne.

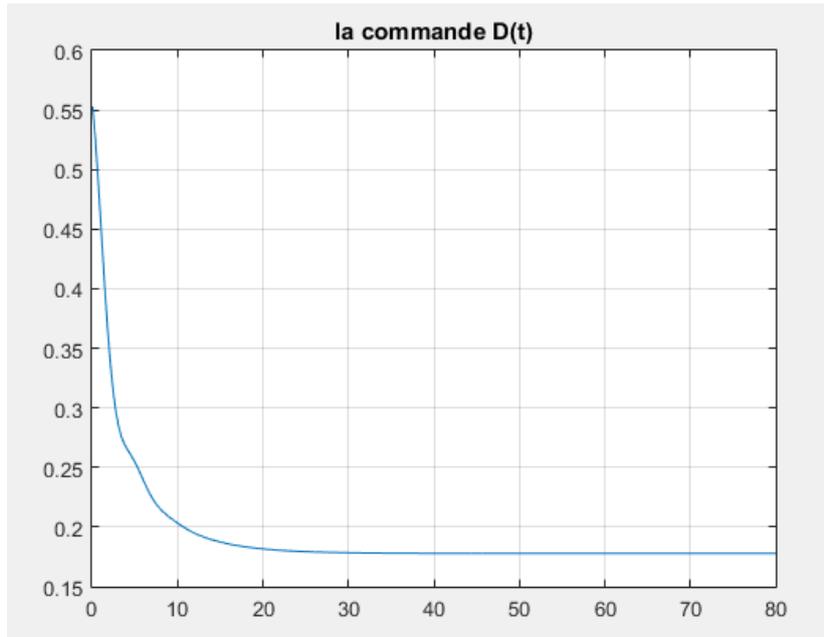


FIGURE 4.7 – Allure de la commande D avec $s_T^* = 4$

La biomasse, elle aussi tend vers sa valeur en régime permanent. Il est évident que $s_1(t)$ reste élevée quand $x_1(t)$ diminue, comme le montre la figure (4.8). La même constatation peut être faite pour $s_2(t)$ et $x_2(t)$.

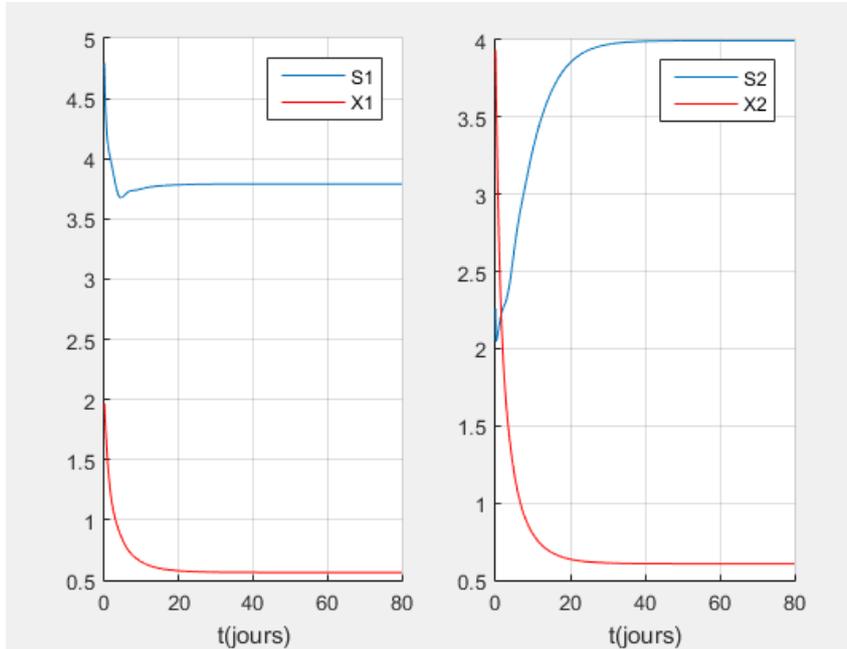


FIGURE 4.8 – Évolution temporelles de s_1 , x_1 , s_2 et x_2 avec $s_T^* = 4$

Pour $s_T^* = 15$

Nous décidons de tester à quel niveau le contrôle peut réguler la sortie de notre système à des concentrations élevées. Notons ici, que le but est de pousser le contrôle à un fonctionnement extrême et non pas de maintenir s_T à une concentration de base.

Malheureusement, le contrôle n'a pas pu ramener s_T à la consigne choisie $s_T^* = 15$, comme le montre la figure (4.9). Ceci démontre que la commande a une limitation, dépendant peut être du fonctionnement extrême du système. En fait, la concentration totale s_T maximale montre que le système peut atteindre la quantité suivante :

$$s_{Tmax} = s_{1in} + \frac{k1}{k2}s_{2in} = 12.6g/L$$

De ce fait, le régulateur ne peut en aucun cas forcer la sortie du système s_T à suivre une consigne supérieur à s_{Tmax} .

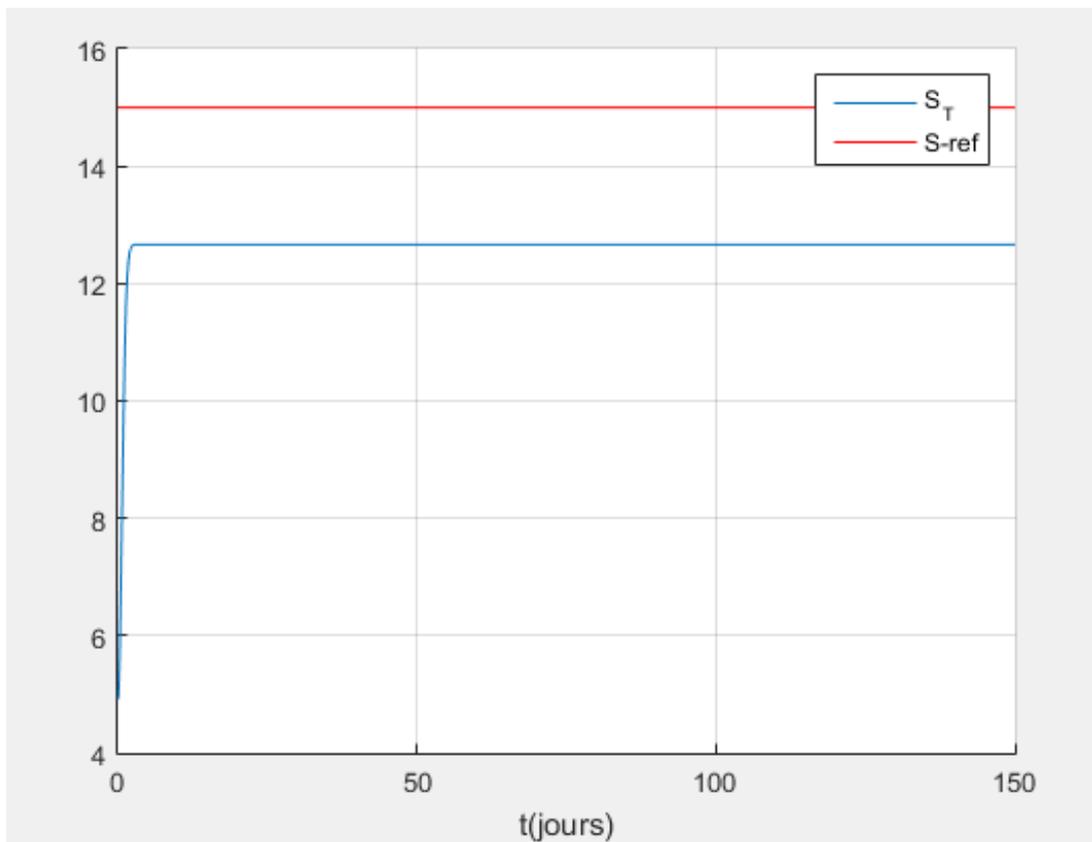


FIGURE 4.9 – Allure de la réponse s_T avec $s_T^* = 15$

Évidemment, le contrôle D dans ce cas diverge comme le montre la figure (4.10), car le contrôleur ne cesse d'envoyer au système une commande croissante sans jamais réussir à atteindre $s_T^* = 15$.

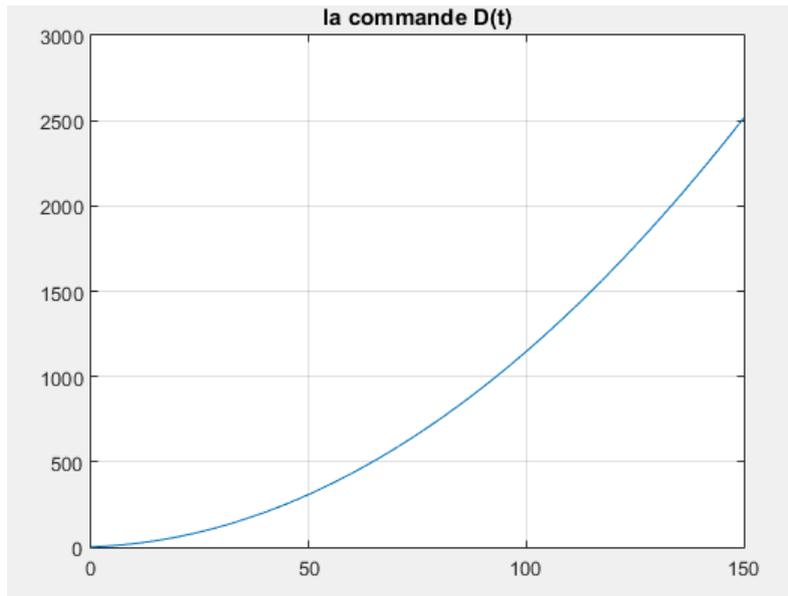


FIGURE 4.10 – Allure de la commande D avec $s_T^* = 15$

Il est clair que dans ce cas, les deux populations bactériennes x_1 et x_2 se lessivent et tendent vers des concentrations nulles, tandis que les substrats s_1 et s_2 tendent respectivement vers leurs concentrations d'entrée s_{1in} et s_{2in} , comme c'est illustré dans la figure (4.11).

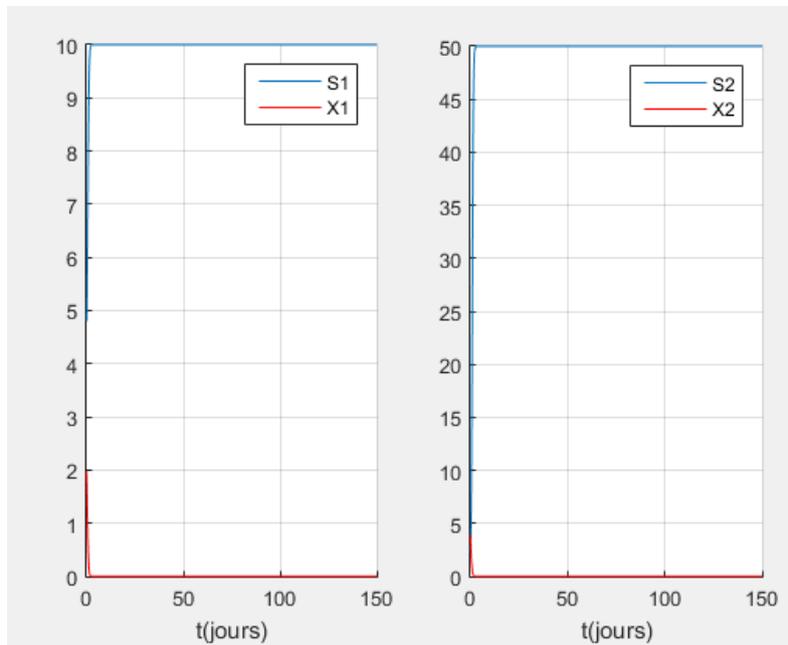


FIGURE 4.11 – Évolution temporelles de s_1 , x_1 , s_2 et x_2 avec $s_T^* = 15$

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie du contrôle sans modèle proposé par M. Fliess. Nous avons aussi montré comment estimer la sortie et ses dérivées numériquement par les techniques de M. Fliess. Nous avons ensuite appliqué le contrôle sans modèle au système AM2 et nous l'avons testé pour plusieurs consignes. Nous avons bien constaté que la sortie régulée s_T a convergé vers les consignes qui ont été choisis dans la plage de valeurs possible de s_T^* . Une convergence vers la consigne et une meilleure précision obtenues en simulation, sont des résultats très encourageants pour appliquer le contrôle sans modèle sur un digesteur expérimental. Nous devons préciser que ce type de contrôle repose sur un bon choix des paramètres, notamment α , l'intervalle de commande T et le pas Δt .

Chapitre 5

Conclusion générale

La pression sur les ressources en eau conventionnelles augmente à cause des surexploitations et, les rejets des eaux usées municipales et industrielles sont de plus en plus importants au point où les milieux récepteurs deviennent saturés. Il est extrêmement urgent de réserver les eaux douces pour l'eau potable, de traiter les eaux usées et de les réutiliser après épuration en industrie et en agriculture. La technologie de digestion anaérobie est une meilleure alternative pour remédier au problème des eaux usées. En effet, les bioréacteurs anaérobies appelés digesteurs anaérobies ou encore méthaniseurs permettent un bon traitement des eaux usées, une faible production de boue en sortie et une récupération du biogaz, pouvant être utilisé comme source d'énergie. Comme tout système physique, les bioréacteurs anaérobies nécessitent d'être modélisés, supervisés et contrôlés. Un des modèles les plus complets de la digestion anaérobie est le modèle ADM1, qui est malheureusement non utilisable pour faire du contrôle automatique. Le modèle AM2 est un autre modèle de la digestion anaérobie, simple d'un point de vue mathématique et dédié aux applications du contrôle automatique.

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons appliqué un contrôle sans modèle au système AM2. Nous avons présenté dans un premier lieu l'analyse du modèle AM2 et, nous avons étudié ses équilibres et leur stabilité. Dans un second temps, nous avons introduit la théorie du contrôle sans modèle basée uniquement sur les mesures entrées/sorties. Finalement, nous avons élaboré des simulations sous Matlab pour tester ce contrôle sur AM2. Les résultats obtenus sont satisfaisants et montrent l'efficacité de la loi de commande calculée. Plusieurs perspectives peuvent être pensées :

1. L'application du contrôle sans modèle au système complexe ADM1,
2. synthèse du contrôle sur la base de AM2 et application à ADM1,
3. tester la robustesse de la loi de commande sous plusieurs conditions de fonctionnement et, comparaisons des résultats avec d'autres lois de commande, notamment celles dites robustes.

Bibliographie

- [1] J.B. COPP, H. SPANJERS et P.A. VANROLLEGHEM, *Respirometry in control of the activated sludge process : benchmarking control strategies*, IWA publishing, 2002.
- [2] C. JOIN, E. DELALEAU et M. FLIESS, *n résultat intrigant en commande sans modèle*, arXiv preprint arXiv : 1711.02877, 2017.
- [3] B. BENYAHIA, *Automatique des Bioprocédés Application aux bioprocédés de traitement des eaux usées*, cours, Laboratoire d'automatique, université de Tlemcen, 2018.
- [4] W. ARRAS, *Étude expérimentale et modélisation de la digestion anaérobie des matières organiques résiduelles dans des conditions hyperthermophiles*, Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, 2017.
- [5] T. ABBASI, S.M. TAUSEEF et S.A. ABBASI, *Anaerobic digestion for global warming control and energy generation—An overview*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, vol. 16(5), pages 3228-3242, 2012.
- [6] O. NIETO, R. CHRISTIAN, et al., *Valorisation par digestion anaérobie des déchets organiques ménagers de la ville de Cuenca*, Équateur, 2019.
- [7] Z. DIB, *Commande sans modèle d'un Bioréacteur*, magister en Automatique, Université de Tlemcen, 2013.