



HAL
open science

Observation adaptative des systèmes singuliers

Marouane Alma

► **To cite this version:**

Marouane Alma. Observation adaptative des systèmes singuliers. Automatique / Robotique. Université de Lorraine, 2024. tel-04710863

HAL Id: tel-04710863

<https://hal.science/tel-04710863v1>

Submitted on 26 Sep 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Observation adaptative des systèmes singuliers

HDR

soutenance prévue le 20 septembre 2024

pour l'obtention d'une

Habilitation à Diriger des Recherches de l'Université de Lorraine

(mention automatique, traitement du signal et des images)

par

ALMA Marouane

Composition du jury

<i>Présidents :</i>	THEILLIOL Didier	Professeur des universités, CRAN, Université de Lorraine
<i>Rapporteurs :</i>	SENAME Olivier	Professeur des universités, GIPSA-Lab, Grenoble INP
	FARZA Mondher	Professeur des universités, LIS, Université de Caen Normandie
	MALTI Rachid	Professeur des universités, IMS-Lab, Université de Bordeaux
<i>Examineurs :</i>	AITOUFROUKH-MAMMAR Naima	Maître de conférences HDR, IBISC, Université Paris Saclay
	VOOS Holger	Professeur des universités, SnT, Université du Luxembourg
	ASTORGA ZARAGOZA Carlos Manuel	Professeur des universités, CENIDET, Mexique
	DAROUACH Mohamed	Professeur des universités émérite, CRAN, Université de Lorraine

Mis en page avec la classe thesul.

Remerciements

Je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu tout le long de ces dernières années pour l'accomplissement de ce travail, qu'il s'agisse de collègues à l'IUT de Longwy ou du laboratoire CRAN.

Ce travail est dédié à mon défunt père ainsi qu'à toute ma famille. Je vous aime !

Table des matières

Introduction générale	ix
Curriculum Vitae détaillé	1
Lettre de recommandation et d'engagement du parrain scientifique	5
Partie I Synthèse des activités	9
Chapitre 1 Activités d'enseignement	11
1.1 Enseignements assurés	11
Chapitre 2 Responsabilités pédagogiques et administratives	17
Chapitre 3 Rayonnement national et international	21
Chapitre 4 Activités de recherche	25
4.1 Problématiques traitées et Contributions scientifiques apportées	25
4.1.1 Observateurs dynamiques généralisés et leur application aux grands systèmes	27
4.1.2 Modélisation, observation et commande de procédés de diges- tion anaérobie	31
4.1.3 Observation et commande non-linéaire d'un manipulateur ro- botique actionné par des câbles en alliage à mémoire de forme .	35
4.1.4 Observateurs adaptatifs des systèmes LPV	37
4.1.5 Conception d'observateurs non-linéaires en utilisant des tech- niques de relaxation LMI	40
4.1.6 Synthèse d'observateurs pour les systèmes singuliers non-linéaires à paramètres variants	43

4.1.7	Encadrements de stages Master	44
Chapitre 5 Liste des publications personnelles		45
5.1	Articles de revues scientifiques	45
5.2	Articles de conférences internationales avec comité de lecture	49
5.3	Chapitres d'ouvrages collectifs	57
 Partie II Observateurs adaptatifs pour les systèmes singuliers		59
 Chapitre 1 Notions préliminaires sur les systèmes singuliers		63
1.1	Introduction	63
1.2	Propriétés structurelles des systèmes singuliers	65
1.2.1	Régularité	65
1.2.2	Equivalence entre systèmes singuliers	66
1.2.3	Réponse temporelle	67
1.2.4	Observabilité des systèmes singuliers	69
1.3	Conclusion	71
 Chapitre 2 Synthèse d'observateurs adaptatifs pour des systèmes singuliers linéaires		73
2.1	Introduction	73
2.2	Synthèse d'observateurs adaptatifs	75
2.2.1	En utilisant une transformation algébrique	75
2.2.2	Observateur d'ordre réduit	85
2.2.3	Extension aux systèmes à entrées inconnues	92
2.3	Conclusion	93
 Chapitre 3 Synthèse d'observateurs adaptatifs pour une classe de systèmes singuliers non-linéaires		95
3.1	Introduction	95
3.1.1	Notions préliminaires	96
3.2	Formulation de la problématique	97
3.3	Synthèse d'un observateur adaptatif et analyse de la convergence	98
3.3.1	Paramétrisation de l'observateur adaptatif non-linéaire	103

3.4 Conclusion	110
Chapitre 4 Perspectives scientifiques	111
4.1 Introduction	111
4.2 Contexte	112
4.3 Thématiques de recherche	112
4.3.1 Observation adaptative de systèmes singuliers non linéaires . . .	112
4.3.2 Observation et commande de systèmes interconnectés de réac- teurs anaérobies	113
4.3.3 Commande et observation des systèmes nonlinéaires à para- mètres variants	114
4.3.4 Etudes théoriques autour des observateurs et de la commande basée observateurs	115
Bibliographie	117

Introduction générale

Ce document est une synthèse de mes activités professionnelles depuis mon recrutement en tant que maître de conférences à l'IUT Henri Poincaré de Longwy, composante de l'Université de Lorraine en 2012.

Je commence ce document, dans la partie I, par la présentation de mon curriculum vitae détaillé, incluant mes informations personnelles, une description de mes activités d'enseignement, une vue générale sur mes activités de recherche, ainsi que mes différentes responsabilités administratives. J'exposerai également les différentes codirections de thèses que j'ai pu mener autour des thématiques suivantes :

- Synthèse d'observateurs dynamiques généralisés ;
- Modélisation, observation et commande de systèmes de digestion anaérobie pour la production de biogaz ;
- Observation et commande de manipulateurs faits d'alliages à mémoire de forme ;
- Observation adaptative de systèmes LPV ;
- Recherche de techniques de synthèse d'observateurs pour la relaxation des LMI.

La suite dans la partie II sera réservée à mes activités de recherche autour de la synthèse d'observateurs adaptatifs pour les systèmes algébro-différentiels. Ceci me permettra de mettre en avant mes différentes contributions issues de mes travaux personnels et de coencadrements de thèses.

Je terminerai par l'exposition de certaines perspectives résumant mes projets scientifiques futurs.

Table des figures

4.1 Réseau de méthaniseurs	114
--------------------------------------	-----

Curriculum Vitae détaillé

État civil

Marouane ALMA

Coordonnées personnelles :

16, rue de nichefontaine
54920 Villers La Montagne, France
Tél. : +33(0)9 51378414 ou +33(0)6 69112847
E-mail : marouane.alma@univ-lorraine.fr
Né le 01/06/1984 à Azzaba en Algérie
Marié, un enfant de 07 ans

Coordonnées professionnelles :

186, rue de lorraine
54400 Cosnes et Romain, France
Tél. : +33(0)3 72749946 ou +33(0)7 86627163
E-mail : marouane.alma@univ-lorraine.fr

Fonctions

Maître de conférences à l'Université de Lorraine depuis le 1er septembre 2012.

Recherche

Centre de Recherche en Automatique de Nancy CRAN UMR 7039 CNRS
Département CID (Contrôle Identification Diagnostic)
Projet MODEL

Enseignements

Département GEII (Génie Électrique et Informatique Industrielle) de l'IUT Henri Poincaré de Longwy

Diplômes universitaires

20 Mai 2011 Titre de **Docteur** de l'Université de Grenoble

Spécialité Automatique et Productique

Sujet de thèse *Rejet adaptatif de perturbations en contrôle actif de vibrations*

Laboratoire d'accueil GIPSA-Lab

Directeur de Thèse Ioan Doré Landau
Codirecteur de Thèse John Jairo Martinez Molina

Jury

Luc Dugard	Président du jury	DR CNRS, GIPSA-Lab, Grenoble
Alireza Karimi	Rapporteur	Maître d'enseignement et de recherche, EPFL Lausanne, Suisse
Rogelio Lozano	Rapporteur	DR CNRS, Heudiasyc, Compiègne
Mathieu Noé	Examineur	Ingénieur R&D, Paulstra Vibrachoc, Evry

Juin 2007 **Master** Recherche en Automatique/Productique,
GIPSA-Lab, Grenoble-INP (ENSIEG)

Juin 2006 **Ingénieur** en Automatique à l'ENP Alger, Algérie

Thématiques de recherche

- Depuis 2007 Rejet de perturbations en contrôle actif de vibrations/bruits :
- *Identification paramétrique en Boucle ouverte et fermée*
- *Commandes adaptatives directes et indirectes*
- Depuis 2012 Synthèse d'observateurs dynamiques généralisés :
- *Proposition d'une nouvelle structure d'observateurs généralisant les observateurs proportionnel et proportionnel intégral*
- *Synthèse d'observateurs généralisés H_∞*
- *Synthèse d'observateurs pour des systèmes LPV et NLPV*
- Depuis 2012 Synthèse d'observateurs adaptatifs pour les systèmes singuliers linéaires et non-linéaires
- Depuis 2013 Etudes des procédés de digestion anaérobie pour l'amélioration de la production de Biogaz :
- *Modélisation mathématique et proposition de nouveaux modèles*
- *Synthèse d'observateurs pour les grandeurs non mesurables*
- *Synthèse de commandes pour optimiser la production de Biogaz*

Production scientifique

- 23 articles de revues scientifiques
- 50 publications en conférences internationales
- 2 chapitres dans des ouvrages collectifs
- 5 publications en conférences nationales

Co-encadrements

- 1 participation active à l'encadrement d'une thèse soutenue en 2015
- 4 co-directions de thèses à 50% soutenues en 2017, 2019, 2020 et 2023, respectivement
- 2 co-directions de thèses à 50% sont en cours
- 2 encadrements de stages de Master

Responsabilités

- Depuis juin 2018, chef du département Génie Électrique et Informatique Industrielle de l'IUT de Longwy
- Responsable de l'organisation du 46ème colloque pédagogique national GEII en 2019
- Responsable de la Licence professionnelle Hydraulique Industrielle durant 2 ans de 2012 à 2014
- Coorganisateur d'un Benchmark international sur le contrôle actif de vibrations de 2011 à 2014

Lettre de recommandation et d'engagement du parrain scientifique



Professeur Mohamed Darouach
CRAN-CNRS UMR 7039, Université de Lorraine,
IUT de Longwy, 186 Rue de Lorraine,
54400 Cosnes-et-Romain, France
Phone : +33(0)3-72-74-99-17
Fax : +33(0)3-82-39-62-91
e-mail: mohamed.darouach@univ-lorraine.fr

Cosnes et Romain, le 20 juin 2023

Lettre de recommandation et d'engagement de Monsieur Marouane Alma

C'est avec un grand plaisir que je recommande la candidature de Monsieur Marouane Alma à la présentation de son Habilitation à Diriger des Recherches (HDR).

Monsieur Marouane Alma est arrivé au CRAN en septembre 2012 après avoir soutenue sa thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble en 2011 sur le « rejet adaptatif de perturbations en contrôle actif de vibrations ». Depuis septembre 2012 il est Maître de Conférences à l'IUT de Longwy Université de Lorraine et effectue ses recherches au CRAN.

De 2012 à 2014 il a assuré la responsabilité de la Licence professionnelle Hydraulique Industrielle. Il est actuellement Chef de département Génie Electrique et Informatique Industrielle, responsabilité qu'il assure depuis 2018. Ses qualités d'enseignant, de responsable de Licence et du département sont très appréciées par les étudiants et par l'ensemble de ses collègues du département. Ses qualités humaines sont très appréciées par l'ensemble du personnel de l'IUT.

Ses activités pédagogiques couvrent un large spectre d'enseignements allant de l'automatique et l'informatique industrielle aux automates programmables. Compte tenu de son cursus universitaire, un diplôme d'ingénieur de l'Ecole Polytechnique d'Alger, un doctorat sur la commande adaptative sous la direction du Professeur Ioan Doré Landau, Monsieur Marouane a tous les atouts pour dispenser des enseignements de valeur du niveau BUT au niveau Master.

CENTRE DE
RECHERCHE EN
AUTOMATIQUE DE
NANCY



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

CRAN UMR 7039
Université de Lorraine, IUT Henri Poincaré de Longwy
186, Rue de Lorraine
54400 Cosnes et Romain, France
Tél : 00-33-(0)3-72-74-99-17
mohamed.darouach@univ-lorraine.fr

Au niveau recherche, Monsieur Marouane Alma a une activité très soutenue malgré ses responsabilités administratives. Depuis son arrivée au CRAN il a travaillé sur les problèmes de synthèse des observateurs, de la commande basée observateurs et de la commande robuste. Dans ce cadre il a co-encadré avec brio 4 thèses de doctorat de l'Université de Lorraine et actuellement co-encadre deux thèses. Il a aussi encadré deux stages de Master. Ces travaux lui ont permis de publier 18 articles de revues internationales avec comité de lecture, plus de 40 communications dans des congrès internationaux avec comité de lecture et 5 dans des conférences nationales avec comité de lecture. Il a aussi publié deux chapitre d'ouvrage. Au niveau valorisation de la recherche Monsieur Marouane Alma a participé à 3 projets et participe à un projet ANR. Je tiens à signaler que j'ai eu beaucoup de plaisir à travailler avec Monsieur Marouane Alma, sa culture scientifique et son sérieux lui ont permis d'aborder des nouvelles thématiques de recherche par rapport à son travail de thèse. Il maîtrise les concepts des systèmes algébro-différentiels, les problèmes d'observateurs et plus particulièrement les observateurs adaptatifs. Son projet de recherche s'inscrit dans la continuité de ses travaux et il est en adéquation avec les projets d'automatique du CRAN.

Compte tenu de tout le travail réalisé par Monsieur Marouane Alma que ça soit au niveau enseignement, au niveau recherche et au niveau responsabilités administratives et collectives, je considère que Monsieur Marouane Alma présente toutes les qualités pour être habilité à diriger des recherches et je soutiens très fortement sa candidature à présenter ses travaux pour l'obtention du diplôme d'HDR de l'Université de Lorraine.

Professeur Mohamed Darouach



Première partie
Synthèse des activités

1

Activités d'enseignement

Mes enseignements s'effectuent à l'IUT Henri Poincaré de Longwy, composante de l'Université de Lorraine dans laquelle j'ai été recruté en tant que maître de conférences en 2012. J'interviens essentiellement au sein du département Génie Électrique et Informatique Industrielle.

Ce département forme des techniciens supérieurs technologues en 3 ans (depuis septembre 2021, 2 ans auparavant), permettant la délivrance du diplôme de Bachelor Universitaire de Technologie "B.U.T" en Génie Électrique et Informatique Industrielle. À l'issue de la première année, les étudiants s'orientent vers un des trois parcours : Automatismes et Informatique Industrielle (AII), Electricité et Maîtrise de l'Énergie (EME) ou Electronique et Systèmes Embarqués (ESE).

Le volume horaire global de mes enseignements tourne généralement autour de 280h équivalent TD par an que j'assume essentiellement en première année du B.U.T GEII ainsi que dans deux licences professionnelles (LP).

Dans ce qui suit, je détaillerai les activités pédagogiques dans lesquelles j'interviens ou je suis intervenu par le passé.

1.1 Enseignements assurés

Enseignements assurés en 1ère année du B.U.T GEII :

Auto1 : Automatismes de base

- *Volume horaire* : 6h de Cours, 14h de TD \times 2 groupes, 20h de TP \times 4 groupes.

- *Taux de couverture* : 100% des Cours, TD et TP.

- *Objectifs* :

- Convertir un nombre décimal en un nombre codé en binaire ou en hexadécimal et inversement ;
- Décomposer une fonction logique en blocs combinatoires (logigrammes) ;
- Ecrire une table de vérité à partir d'un besoin client simple et d'en déduire les équations logiques ;
- Mettre en oeuvre un logigramme simple à l'aide d'un logiciel approprié et vérifier son action sur une unité de traitement ;
- Enumérer les principes de base d'un automate ;
- Décrire le fonctionnement des pré-actionneurs et actionneurs (électriques, pneumatiques, hydrauliques. . .) ;
- Identifier les parties commande, opérative et supervision d'un système automatisé ;
- Programmer un automate avec un langage simple ;
- Lire un schéma de câblage et expliquer l'intégration de l'automate dans celui-ci.

- *Contenu* :

- Codages des nombres utilisés en automatisme ;
- Fondements de l'algèbre de Boole ;
- Modélisation des fonctions usuelles combinatoires ;
- Principe ou constitution de base des automates (alimentation, CPU, E/S TOR) ;
- Présentation PO/PC/PS (uniquement Boutons Poussoirs, interrupteurs et voyants pour la PS) ;
- Fonctionnement de pré-actionneurs et actionneurs ;
- Intégration de l'automate dans un schéma de câblage (câblage d'E/S TOR, voyants, relais, distributeurs) ;
- Programmation ou simulation d'un automate avec un langage simple (langage à contacts, blocs fonction, logigramme, langage textuel).

Info1 : Informatique

- *Volume horaire* : 42h de TP \times 4 groupes.
- *Taux de couverture* : 50% des TP.
- *Objectifs* :
 - Concevoir l'algorithme d'un programme simple à partir d'un cahier des charges ;
 - Coder un algorithme dans un langage évolué en respectant les bonnes pratiques (indentation, commentaires,...) ;
 - vérifier le bon fonctionnement d'un programme par rapport aux exigences d'un cahier des charges.
- *Contenu* :
 - Initiation à l'algorithmique ;
 - Base de la programmation dans un langage évolué ;
 - Bonnes pratiques de codage (nommage des variables et des fonctions, indentation, commentaires,...) ;
 - Familiarisation avec un outil de développement intégré ;
 - Utilisation d'une méthode et d'un outil de mise au point (débugueur, procédure de test, ...).

SAE1.01 : Situation d'Apprentissage et d'Évaluation

- *Volume horaire* : 30h de TP \times 4 groupes + 42h \times 4 groupes en autonomie.
- *Taux de couverture* : 50% des TP + encadrement en autonomie.
- *Objectifs* :
 - Concevoir une enceinte régulée en température en tout ou rien construite autour d'un kit Microcontrôleur ;
 - Réaliser la partie matérielle de l'enceinte ;
 - Programmer et tester la régulation demandée ;

- vérifier le bon fonctionnement d'un dispositif réalisé.

- *Contenu* :

- Réalisation de l'analyse fonctionnelle du projet ;
- Réalisation des diagrammes SysML ;
- Réalisation de cartes électroniques ;
- Assemblage et programmation ;
- Vérification et test de l'enceinte thermostatée.

Enseignements assurés en LP Hydraulique Industrielle :

API : Automatismes Industriels

- *Volume horaire* : 6h de Cours, 8h de TD, 12h de TP × 2 groupes.

- *Taux de couverture* : 100% des Cours, TD et TP.

- *Objectifs* :

- Analyser une architecture d'un système automatisé ;
- Structurer un système logique à l'aide des fonctions de base combinatoires et séquentielles ;
- Développer la partie commande d'un système automatisé à partir d'une unité de traitement en utilisant un langage approprié ;
- Réaliser l'interfaçage et le branchement des entrées-sorties de la partie opérative d'un système automatisé ;
- Vérifier le fonctionnement d'un système automatisé simple ;
- Proposer des modifications simples de programme pour respecter un cahier des charges.

- *Contenu* :

- Architecture des systèmes automatisés en local ;
- Unité de traitement et mode de fonctionnement ;
- Capteurs industriels, les technologies, les branchements des E/S (PNP, NPN, 4-20mA, 0-10V, codeurs) ;

- Interfaçage des E/S ;
- Programmation Grafset, machine à états et des langages de l'IEC 61131-3 ;
- Utilisation des outils de simulation et de débogage pour vérification.

Informatique : Outils logiciels pour l'automatique

- *Volume horaire* : 10h de TP \times 2 groupes.
- *Taux de couverture* : 100% des TP.
- *Objectifs* :
 - Réaliser des calculs simples sur un logiciel scientifique (Matlab) ;
 - Créer des scripts matlab et programmer des algorithmes simples ;
 - Apprendre à utiliser la boîte à outils réservée à l'automatique.
- *Contenu* :
 - Introduction à Matlab ;
 - Calculs mathématiques simples sur Matlab ;
 - Déclaration et Analyse des comportements dynamiques des systèmes en boucle ouverte ;
 - Synthèse de régulateurs (P, PI, PID) pour des systèmes hydrauliques.

Enseignements assurés en LP Génie Climatique et Froid Industriel :

CDS : Comportement Dynamique des Systèmes

- *Volume horaire* : 8h de cours, 8h de TP \times 2 groupes.
- *Taux de couverture* : 100% des TP.
- *Objectifs* :
 - Elaborer un schéma de transfert ;
 - Identifier un système dans son environnement ;

- Analyser les performances statiques et dynamiques d'un système asservi ;
- Comprendre les principes de correction des systèmes asservis.

- *Contenu* :

- Notions de système et de schéma fonctionnel ;
- Introduction à la modélisation, fonction de transfert ;
- Systèmes élémentaires, analyses temporelle et fréquentielle, notion de stabilité ;
- Identification des systèmes par les méthodes déduites de l'analyse ;
- Systèmes asservis (régulation et asservissement), performances (stabilité, précision, rapidité) ;
- Etude qualitative des actions P, I et D.

2

Responsabilités pédagogiques et administratives

Chef du département GEII de l'IUT de Longwy

Je suis depuis le 1er septembre 2018 élu pour un mandat de 3 ans comme chef du département GEII de l'IUT Henri Poincaré de Longwy (réélu en 2021).

Le département est composé de 16 enseignants permanents (3 Pr, 10 Mcf, 1 PRAG, 2 PRCE), un technicien pédagogique, une secrétaire du département ainsi que plusieurs intervenants vacataires (doctorants et industriels).

Mes principales missions sont :

- Gestion du personnel ;
- Maintien d'une cohésion pédagogique ;
- Gestion de la dotation financière du département ;
- Promotion des formations ;
- Amélioration des conditions d'accueil et de travail des étudiants et des enseignants ;
- Participation aux différentes réunions nationales autour de notre spécialité à travers l'ACD GEII ;
- Préparation du dossier d'évaluation du département.

Membre de l'équipe de direction et du conseil de l'institut

À travers ma responsabilité au département, je suis membre de l'équipe de direction, et également membre "non-votant" du conseil de l'institut. Ces deux missions me permettent de participer aux échanges concernant les différentes orientations à prendre pour le bien de notre institut. Je suis donc le premier relais entre la direction de l'IUT et le personnel du département.

Responsable de la Licence Professionnelle Hydraulique Industrielle

J'ai été de 2012 à 2014, responsable de la licence professionnelle Hydraulique Industrielle, hébergée au département GEII de l'IUT de Longwy. Mes principales missions étaient :

- Gestion du personnel ;
- Réalisation des emplois du temps ;
- Traitement des dossiers de candidatures des étudiants ;
- Maintien d'une cohésion pédagogique ;
- Recherche d'intervenants industriels en tant que vacataires ;
- Promotion de la formation ;
- Organisation des conseils de perfectionnement de la formation (un conseil par an).

Organisateur du Colloque National GEII

J'ai été responsable de l'organisation de la 46ème édition du colloque national pédagogique GEII. Ce colloque s'est déroulé du 21 au 24 Mai 2019, accueillant plus de 150 collègues de tous les 51 départements GEII de France. Plusieurs thématiques pédagogiques ont été traitées et analysées lors de cet événement. Je peux citer la place des jumeaux numériques et de la cobotique en GEII, ainsi que les différents objets connectés (IoT). Une commission sur l'enseignement de l'anglais et en anglais dans notre spécialité a également eu lieu.

De plus, un salon d'exposants professionnels, composé de 30 entreprises s'est tenu en marge de ce colloque, permettant aux participants de prendre

connaissance des nouveautés technologiques dans les différents domaines en lien avec le GEII.

Membre de commissions pour la réforme du DUT → B.U.T

Depuis 2018, je suis membre actif de la commission nationale de l'assemblée des chefs de départements GEII (ACD GEII) pour le suivi et la mise en place de la réforme universitaire permettant la création du diplôme de B.U.T. En effet, j'ai participé à la mise en place des référentiels de compétences, d'évaluations et de formation de ce nouveau diplôme.

Depuis janvier 2021, je suis membre de la commission "Informatique embarquée", chargée de l'élaboration du programme national de cette thématique. Je me suis également intéressé aux travaux de la commission "Automatismes" afin d'apporter ma contribution, du moment que j'interviens aussi dans ces enseignements.

3

Rayonnement national et international

Comités éditoriaux

Comités de conférences internationales

- Je suis depuis 2017 membre du **Conference Editorial Board** (CEB) de l'IEEE Control System Society, et éditeur associé des conférences organisées dont CDC et ACC,
- Je suis depuis 2016 membre de l'International Program Committee (IPC) de l'International Conference on Systems and Control (ICSC),
- Je suis depuis 2018 membre du Technical Program Committee (TPC) de l'International Conference on Information Technology and Applications (ITA),
- Je suis membre du Scientific Program Committee (SPC) de l'International Conference on Electrical Engineering and Control Applications.

Comités de revues scientifiques

J'ai été deux fois éditeur invité (Guest editor) dans la revue European Journal of Control (EJCON).

Participations dans des projets scientifiques

- ArtISM_o : Intelligent Estimation Algorithms for Smart Mobility
 - Type de projet : ANR

- Période : 2021 - 2024
- Responsable scientifique : Ali ZEMOUCHE
- Qualité : Participant dans la partie "Estimation et Observation"
- Robotique Mobile
 - Type de projet : FNR au Luxembourg
 - Période : 2016 - 2020
 - Responsable scientifique : Holger VOOS / Mohamed DAROUACH
 - Qualité : Participant dans la partie "Commande et Observation"
 - Doctorante recrutée dans le cadre du projet : Mme Serket QUINTANAR GUZMÁN en 2015
- Contrôle distribué et gestion de l'énergie des procédés de production de biogaz (Energie - Environnement)
 - Type de projet : FNR au Luxembourg
 - Période : 2013 - 2018
 - Responsable scientifique : JOACHIM HANSON
 - Qualité : Participant dans la partie "Modélisation, Commande et Observation des réacteurs anaérobies"
 - Doctorante recrutée dans le cadre du projet : Mme Khadidja CHAIB DRAA en 2013

Séminaires scientifiques

Séminaire au sein de l'équipe Robs&Cox du CRAN

- *Titre* : Contrôle adaptatif actif de vibrations/bruit
- *Public* : Chercheurs, enseignants chercheurs, doctorants de l'équipe
- *Date* : 22 Novembre 2012
- *Résumé* : Ce séminaire traitait des stratégies de commandes adaptatives, pour le rejet actif de perturbations en contrôle actif de vibrations et de bruit. En première partie, le rejet de perturbations sinusoïdales

et multi-sinusoïdales inconnues a été présenté en utilisant des lois de commandes adaptatives directes et indirectes en contre réaction. En deuxième partie, des algorithmes adaptatifs pour l'atténuation de perturbations bandes larges par action anticipatrices « feedforward » ont été exposés et analysés.

Séminaire au laboratoire CRAN

- *Titre* : Synthèse d'observateurs adaptatifs pour une classe de systèmes singuliers linéaires
- *Public* : Chercheurs, enseignants chercheurs, doctorant du CRAN
- *Date* : 16 Mai 2014
- *Résumé* : Le problème de synthèse d'observateurs a été largement étudié depuis de nombreuses années, et ceci est dû au fait que l'estimation des états d'un système est généralement requise, que ce soit pour des fins de commande ou de diagnostic. Lorsqu'une partie des paramètres du système est aussi inconnue, avoir recours à une estimation conjointe de l'état et des paramètres en utilisant des observateurs adaptatifs, peut être nécessaire.

D'un autre côté, un bon nombre de procédés sont décrits par des systèmes singuliers ou algèbro-différentiels tels que les procédés chimiques, électriques ou mécaniques. Bien que de nombreux résultats d'observateurs adaptatifs soient disponibles pour les systèmes standards, il n'existe que peu de travaux pour les systèmes singuliers.

Lors de cette présentation, j'ai fait une synthèse de certains travaux effectués dans le cadre de la synthèse d'observateurs adaptatifs pour une classe de systèmes singuliers linéaires.

Séminaire à l'ISFATES

- *Titre* : Commande optimale pour des systèmes de production d'énergie électrique.
- *Public* : Étudiants de l'Institut Supérieur Franco-Allemand de Techniques, d'Économie et de Sciences (ISFATES)

- *Date* : 10 Décembre 2020
- *Résumé* : Le problème de l'intermittence de la production de l'énergie électrique pour les dispositifs des énergies renouvelables (EnR) se pose de plus en plus de nos jours. L'optimisation de la production de cette énergie quand elle est disponible devient essentielle ainsi que son stockage. Lors de ce séminaire, des techniques de commandes optimales afin d'optimiser la production électrique, appliquées sur des modèles d'éoliennes ont été présentées et illustrées à travers des simulations réalistes.

4

Activités de recherche

Sommaire

4.1 Problématiques traitées et Contributions scientifiques apportées	25
4.1.1 Observateurs dynamiques généralisés et leur application aux grands systèmes	27
4.1.2 Modélisation, observation et commande de procédés de digestion anaérobie	31
4.1.3 Observation et commande non-linéaire d'un manipulateur robotique actionné par des câbles en alliage à mémoire de forme	35
4.1.4 Observateurs adaptatifs des systèmes LPV	37
4.1.5 Conception d'observateurs non-linéaires en utilisant des techniques de relaxation LMI	40
4.1.6 Synthèse d'observateurs pour les systèmes singuliers non-linéaires à paramètres variants	43
4.1.7 Encadrements de stages Master	44

4.1 Problématiques traitées et Contributions scientifiques apportées

Après mon recrutement au sein de l'équipe Rob&Cox du département CID du laboratoire CRAN, je me suis intéressé aux différentes problématiques et axes forts des collègues. C'est dans cet état d'esprit que j'ai été amené à co-encadrer des thèses et mener des travaux de recherches en collaborations avec plusieurs membres de l'équipe. Ceci m'a permis d'élargir mon

spectre de connaissances et ainsi pouvoir travailler sur plusieurs thématiques de recherche.

Dans la suite de ce chapitre, je vais lister les différents co-directions de thèses et encadrements de stages de Master en présentant les problématiques et les contributions scientifiques apportées.

4.1.1 Observateurs dynamiques généralisés et leur application aux grands systèmes

Thèse 1 : M. Nan GAO

Dates : Du 01/03/2012 au 29/06/2015

Directeur de thèse :

- M. Mohamed DAROUACH

Co-encadrant de thèse :

- M. Marouane ALMA

Jury :

Mohammed M'SAAD	Président du jury	Professeur, Ecole Nationale Supérieure de Caen
Olivier SENAME	Rapporteur	Professeur, Grenoble-INP
Driss BOUTAT	Rapporteur	Professeur, INSA Centre Val de Loire
Holger VOOS	Examineur	Professeur, Université du Luxembourg

L'idée principale de ce travail était de généraliser les observateurs usuels de type proportionnel (PO) et proportionnel intégral (PIO) pour les systèmes linéaires, en proposant une structure générale avec plus de degrés de liberté.

Ce travail a été mené en co-encadrant la thèse de M. Nan GAO sous la direction de M. Mohamed DAROUACH. Nous avons été amenés à proposer des méthodes de synthèse d'observateurs H_∞ pour les systèmes continus et échantillonnés dans le but d'atténuer les effets de perturbations sur les états estimés. Ce travail a été par la suite étendu aux systèmes incertains, puis aux systèmes interconnectés incertains.

Systèmes linéaires continus

Soit le système suivant :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + D_1\omega(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D_2\omega(t)\end{aligned}\tag{4.1}$$

L'observateur généralisé proposé est de la forme :

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Fz(t) + Jy(t) + Tu(t) + Mv(t) \\ \dot{v}(t) &= Pz(t) + Qy(t) + Gv(t) \\ \hat{x}(t) &= Rz(t) + Sy(t)\end{aligned}\tag{4.2}$$

L'objectif était donc l'obtention des différentes matrices de l'observateur afin d'assurer la convergence de l'erreur d'estimation $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ vers 0 en l'absence de perturbation ainsi que la minimisation de l'effet de cette dernière au sens H_∞ sur le signal d'erreur $e(t)$ en sa présence.

L'avantage de cette structure est qu'elle permet de garantir une erreur statique nulle et d'améliorer le comportement de l'observateur en régime transitoire.

Les détails de synthèse, de paramétrisation et de calculs des différentes matrices de l'observateur sont à retrouver dans [26]. La solution est donnée à travers la résolution d'une inégalité matricielle linéaire (LMI).

Il est facilement remarquable que cet observateur (4.2) généralise l'observateur proportionnel sous les conditions suivantes :

- $M = 0$; $P = 0$; $Q = 0$; $G = 0$.

ainsi que l'observateur proportionnel intégral en prenant :

- $P = -CR$; $Q = I - CS$; $G = 0$.

Systèmes linéaires échantillonnés

De même que pour les systèmes continus, la même structure d'observateurs a été utilisée dans le cas échantillonné sur des systèmes de la forme :

$$\begin{aligned}x_d(k+1) &= A_d x_d(k) + B_d u_d(k) + D_{1d} \omega_d(k) \\ y_d(k) &= C_d x_d(k) + D_{2d} \omega_d(k)\end{aligned}\tag{4.3}$$

L'observateur dynamique généralisé proposé est donné par :

$$\begin{aligned}z_d(k+1) &= F_d z_d(k) + J_d y_d(k) + T_d u_d(k) + M_d v_d(k) \\ v_d(k+1) &= P_d z_d(k) + Q_d y_d(k) + G_d v_d(k) \\ \hat{x}_d(k) &= R_d z_d(k) + S_d y_d(k)\end{aligned}\tag{4.4}$$

Les détails de synthèse sont également à retrouver dans la thèse de M. Gao [26]. Des conditions similaires que celles données pour les systèmes continus permettent l'obtention des cas particuliers d'observateurs proportionnel et proportionnel intégral.

Systèmes incertains

La synthèse a été ensuite généralisée pour le cas d'une classe de systèmes incertains donnée par :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= (A + \Delta A)x(t) + Bu(t) + D_1\omega(t) \\ y(t) &= Cx(t) + D_2\omega(t)\end{aligned}\tag{4.5}$$

où ΔA est une matrice inconnue représentant un paramètre d'incertitude variant, pouvant s'écrire sous la forme :

$$\Delta A = \mathcal{M}\mathcal{F}(t)\mathcal{N}\tag{4.6}$$

avec les matrices \mathcal{M} et \mathcal{N} connues et $\mathcal{F}(t)$ satisfaisant la condition suivante :

$$\mathcal{F}^T(t)\mathcal{F}(t) \leq I\tag{4.7}$$

L'observateur (4.2) a été utilisé. Les détails de synthèse sont donnés dans [22].

Observateur généralisé décentralisé pour les systèmes interconnectés

Dans un dernier temps, la synthèse d'observateurs dynamiques généralisés a été adaptée aux systèmes interconnectés incertains de la forme :

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= (A_i + \Delta A_i)x_i(t) + B_iu_i(t) + D_{1i}\omega_i(t) + h_i(t, x) \\ y_i(t) &= C_ix_i(t) + D_{2i}\omega_i(t)\end{aligned}\tag{4.8}$$

avec les $h_i(t, x)$ qui représentent les interactions du i -ème sous système avec les $n - 1$ sous systèmes restants. Elles sont supposées satisfaire la contrainte quadratique suivante :

$$h_i^T(t, x)h_i(t, x) \leq a_i^2x^T H_i^T H_i x\tag{4.9}$$

L'incertitude ΔA_i est supposée satisfaire les mêmes conditions que dans le cas précédent à savoir :

$$\Delta A_i = \mathcal{M}_i\mathcal{F}_i(t)\mathcal{N}_i\tag{4.10}$$

avec les matrices \mathcal{M}_i et \mathcal{N}_i connues et \mathcal{F}_i satisfaisant la condition suivante :

$$\mathcal{F}_i^T(t)\mathcal{F}_i(t) \leq I \quad (4.11)$$

Un observateur généralisé sous la forme suivante a été considéré pour chaque sous système :

$$\begin{aligned} \dot{z}_i(t) &= F_i z_i(t) + J_i y_i(t) + T_i u_i(t) + M_i v_i(t) \\ \dot{v}_i(t) &= P_i z_i(t) + Q_i y_i(t) + G_i v_i(t) \\ \hat{x}_i(t) &= R_i z_i(t) + S_i y_i(t) \end{aligned} \quad (4.12)$$

Les détails de la synthèse ainsi que des résultats de simulations peuvent être consultés dans [27].

Les contributions sus-citées ont fait l'objet de publications dans des revues et actes de conférences internationales.

Je continue a collaborer avec M. Gao qui occupe actuellement un poste d'enseignant chercheur au sein de l'université de Chang'an en Chine.

4.1.2 Modélisation, observation et commande de procédés de digestion anaérobie

Thèse 2 : Mme Khadidja CHAIB DRAA

Dates : Du 01/07/2013 au 07/07/2017

Directeur de thèse :

- M. Mohamed DAROUACH

Co-encadrant de thèse :

- M. Marouane ALMA

Directeur de thèse de l'Université du Luxembourg :

- M. Holger VOOS

Jury :

Joachim HANSEN	Président du jury	Maître de conférences, Université du Luxembourg
Ping ZHANG	Rapporteur	Professeur, Université technique de Kaiserslautern
Driss BOUTAT	Rapporteur	Professeur, INSA Centre Val de Loire

Cette thématique a surgi suite à une collaboration avec des collègues de l'université du Luxembourg. Le but était de travailler sur des procédés de digestion anaérobie afin d'optimiser la production de biogaz.

La digestion anaérobie est un procédé permettant de transformer les déchets organiques en énergie utile, telle que le biogaz. Ce procédé fait intervenir des organismes vivants dont le comportement spécifique est fortement non-linéaire et naturellement instable. Ainsi, l'objet de cette thèse porte sur la modélisation de ce système complexe et la synthèse d'observateurs et de lois de commande afin d'améliorer le fonctionnement du procédé dans les stations de production de biogaz.

Pour ce faire, une première étape de modélisation mathématique formelle de ces procédés était nécessaire. Avec Mme Khadidja Chaib Draa, une étude approfondie a été réalisée permettant l'obtention d'un modèle général complet. Cette étude a permis de réfléchir à la proposition d'une modification améliorative aux modèles existants dans la littérature, en considérant le rajout de nouvelles entrées de commande. En effet, il a été remarqué que l'ajout de substrats stimulants (acides et alcanité) en entrée permettait d'améliorer la quantité de biogaz produite. De même l'ajout d'une quantité de sels de carbonates ou d'autres bases permet d'éliminer des quantités de CO_2 et donc améliorer la qualité du biogaz produit et réduire l'empreinte carbone de ce procédé.

Par la suite et sur la base du modèle mathématique obtenu, différents observateurs ont alors été étudiés afin de surmonter le manque de capteurs fiables, autonomes et bon marché. Enfin et concernant la commande du procédé, une commande basée observateur pour le suivi d'une trajectoire de référence a été proposée.

Voici les principales contributions de la thèse de Mme Chaib Draa :

Modélisation de la digestion anaérobie

Dans le but d'avoir un modèle mathématique le plus représentatif possible des processus de digestion anaérobie, une étude bibliographique et d'analyse a été réalisée. Il en est sorti que le modèle communément connu par l'appellation *AM2* (Acidogenesis Methanogenesis, 2 steps model) était le mieux adapté.

À partir de ce modèle, l'idée de combiner deux caractéristiques connues dans la littérature, à savoir l'ajout d'acides et alcanités afin d'augmenter la quantité de biogaz produit, et l'ajout de bases pour améliorer la qualité du biogaz en réduisant la quantité de CO_2 émise, simultanément à deux endroits distincts du digesteur nous a paru très intéressante. Les détails de ce résultat peuvent être consultés dans [25].

Synthèse d'observateurs

Après que l'identification des paramètres du modèle non linéaire résultant soit traitée, ainsi que l'analyse de la positivité et la bornitude des variables d'état, il était clair que certains états du système étaient très difficilement mesurables suite au manque de capteurs fiables, autonomes et bon marché. Par conséquent, l'utilisation d'observateurs a été plus que nécessaire.

Différents observateurs ont alors été étudiés. En effet, deux observateurs ont été développés, le premier dit invariant et le second non-linéaire de la même forme que l'observateur d'Arcak [37].

En outre, dans le but d'avoir un observateur robuste aux perturbations à énergie finie, un critère H_∞ est considéré. Une extension de cette méthodologie est également proposée pour les systèmes échantillonnés ainsi qu'aux systèmes avec sorties non linéaires.

Pour la synthèse de ces différents observateurs, le théorème des accroissements finis est appliqué afin de transformer la dynamique non-linéaire de l'erreur d'estimation en un système linéaire à paramètres variants. La condition de Lipschitz ainsi qu'une fonction classique de Lyapunov sont alors utilisées afin d'avoir des conditions de stabilité sous forme d'Inégalités Matricielles Linéaires (LMI). Enfin, dans le but d'améliorer la faisabilité de ces dernières, une reformulation de l'inégalité de Young a été introduite [18].

Les détails de ces résultats peuvent être consultés dans [11, 9, 21].

Lois de commande

La dernière partie de cette thèse a été consacrée à la synthèse d'une loi de commande permettant le suivi d'une trajectoire donnée pour la production de biogaz. En prenant en compte la disponibilité partielle du vecteur d'état, un observateur d'état exponentiel non-linéaire est introduit dans la synthèse de la loi de commande. Ainsi, une commande basée observateur est obtenue. L'analyse de stabilité du système en boucle fermée avec observateur est alors effectuée en utilisant le lemme de Barbalat.

Les détails de ces résultats peuvent être consultés dans [\[10\]](#).

4.1.3 Observation et commande non-linéaire d'un manipulateur robotique actionné par des câbles en alliage à mémoire de forme

Thèse 3 : Mme Serket QUINTANAR GUZMÁN

Dates : Du 01/07/2015 au 07/06/2019

Directeurs de thèse :

- M. Mohamed DAROUACH
- M. Marouane ALMA

Directeur de thèse de l'Université du Luxembourg :

- M. Holger VOOS

Jury :

Jean-Régis HADJI	Président du jury	Professeur, Université du Luxembourg
Carlos Manuel ASTORGA	Rapporteur	Professeur, CENIDET, Cuernavaca
Antoine FERREIRA	Rapporteur	Professeur, INSA Centre Val de Loire

Cette thèse a été menée en cotutelle avec l'université du Luxembourg. Le sujet a été proposé suite à l'intérêt grandissant de l'utilisation de drones volants ou véhicules autonomes aériens, dans divers domaines d'application dont l'agriculture, le transport et la logistique. De plus l'ajout d'un bras manipulateur au véhicule augmenterait significativement le panel d'applications possibles. Malheureusement, les restrictions sur la charge transportable possible nous obligent à développer et utiliser des bras manipulateurs légers. Cette thèse propose l'utilisation d'un bras robotisé en alliages à mémoire de forme (SMA).

Bien que les fils SMA représentent une excellente alternative aux actionneurs conventionnels pour les applications légères, ils impliquent également une dynamique hautement non-linéaire, ce qui les rend difficilement contrôlables. Ce travail propose des lois de commande et étudie leur mise en oeuvre

expérimentale pour l'asservissement et la régulation du bras robotisé léger proposé.

Voici les principales contributions de la thèse de Mme Quintanar Guzman :

Modélisation du comportement des câbles en SMA

Dans le but d'avoir un modèle mathématique fiable, une modélisation du comportement physique des câbles en SMA est effectuée puis validée expérimentalement. Le modèle obtenu décrit la dynamique du bras manipulateur léger du point de vue mécatronique. Ce bras est testé avec trois contrôleurs distincts avec retour de sortie pour le contrôle de la position angulaire, à savoir un régulateur PID, un en mode glissant et une commande adaptative. Ces lois de commande ont été validées expérimentalement selon différents scénarios.

Synthèse d'observateur à entrée inconnue

Afin de proposer une loi de commande par retour d'état et vu l'impossibilité de mesurer tout l'état du système, un observateur d'état à entrée inconnue a été développé. Pour ce faire, un modèle observable sans commutation avec une entrée inconnue est dérivé du modèle initial. Ce modèle considère comme entrée inconnue le taux de fraction de martensite, ce qui permet d'éliminer les termes générateurs de commutations.

À partir de ce nouveau modèle, un observateur à entrée inconnue, basé sur le filtre de Kalman étendu et sur l'observateur à mode glissant est proposé. Il permet l'estimation simultanée de l'état et de l'entrée inconnue. Cet observateur a été initialement validé en simulation puis sur la plateforme expérimentale selon différents scénarios.

Loi de commande basée observateur

Une fois la synthèse d'observateur finalisée et validée, une synthèse d'une loi de commande basée observateur a été proposée. Cette commande a été validée en simulation puis expérimentalement selon différents scénarios (régulation, suivi de trajectoires, suivi de trajectoires avec différentes charges).

Les détails de ces résultats peuvent être consultés dans [19, 17, 16]

4.1.4 Observateurs adaptatifs des systèmes LPV

Thèse 4 : M. Abraham Jashiel PÈREZ ESTRADA

Dates : Du 01/10/2017 au 06/05/2020

Directeur de thèse :

- M. Mohamed DAROUACH

Co-encadrant de thèse :

- M. Marouane ALMA

Directrice de thèse du CENIDET au Mexique :

- Mme Gloria lilia OSORIO GORDILLO

Jury :

Holger VOOS	Président du jury	Professeur, Université du Luxembourg
Mondher FARZA	Rapporteur	Professeur, Université de Caen
Olivier SENAME	Rapporteur	Professeur, Grenoble-INP
Gloria Lilia OSORIO	Examineur	Professeur, CENIDET, Cuernavaca
Victor Hugo OLIVARES	Examineur	Professeur, CENIDET, Cuernavaca

Cette thématique a été explorée dans le cadre d'une collaboration avec des collègues du CENIDET (Centre National de Recherche Technologique), au Mexique. M. Perez a proposé dans un premier temps un observateur généralisé pour les systèmes LPV polytopiques pouvant donc se mettre sous la forme :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \sum_{i=1}^{\tau} \mu_i(\rho(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \tag{4.13}$$

où

$$\sum_{i=1}^{\tau} \mu_i(\rho(t)) = 1, \quad 0 \leq \mu_i(\rho(t)) \leq 1 \quad (4.14)$$

L'observateur proposé est donné par :

$$\begin{aligned} \dot{\zeta}(t) &= \sum_{i=1}^{\tau} \mu_i(\rho(t)) (N_i \zeta(t) + H_i v(t) + F_i y(t) + J_i u(t)) \\ \dot{v}(t) &= \sum_{i=1}^{\tau} \mu_i(\rho(t)) (S_i \zeta(t) + L_i v(t) + M_i y(t)) \\ \hat{x}(t) &= P \zeta(t) + Q y(t) \end{aligned} \quad (4.15)$$

L'objectif est donc de retrouver toutes les matrices de l'observateur afin que l'erreur $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$, tende vers 0 en l'absence de perturbations, ainsi que la minimisation de l'effet de perturbations à énergie finie au sens H_∞ sur le signal d'erreur quand elles sont présentes. Dans un second temps, cette synthèse a été élargie aux systèmes LPV polytopiques échantillonnés.

Les détails de synthèse, de paramétrisation et de calculs des différentes matrices de ces observateurs sont à retrouver dans la thèse de M. Perez Estrada [8]. La solution est donnée à travers la résolution d'un ensemble d'inégalités matricielles linéaires (LMI).

Une fois validées, ces techniques ont été élargies aux systèmes en présence d'entrées inconnues (voir [15]).

Dans ces approches, le paramètre ρ était supposé connu. Dans le cas contraire, un observateur généralisé adaptatif, permettant l'estimation simultanée de l'état et du paramètre variant a été proposé et constitue une des principales contributions de la thèse de M. Perez Estrada.

Le système considéré est donc de la même structure que celui décrit en (4.13).

L'observateur adaptatif proposé est donné par :

$$\begin{aligned}
 \dot{\zeta}(t) &= \sum_{i=1}^{\tau} \mu_i(\hat{\rho}(t))(N_i\zeta(t) + H_iv(t) + F_iy(t) + J_iu(t)) \\
 \dot{v}(t) &= \sum_{i=1}^{\tau} \mu_i(\hat{\rho}(t))(S_i\zeta(t) + L_iv(t) + M_iy(t)) \\
 \dot{\hat{\rho}}(t) &= \sum_{i=1}^{\tau} \mu_i(\hat{\rho}(t))(K_{o,i}(C\hat{x}(t) - y(t)) + \alpha_i\hat{\rho}(t)) \\
 \hat{x}(t) &= P\zeta(t) + Qy(t)
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

Cette synthèse a été validée sur un modèle d'un moteur à courant continu. Tous les détails peuvent être consultés dans la thèse de M. Perez Estrada [8] ainsi que dans [13].

Finalement, une approche de synthèse d'une loi de commande tolérante aux défauts a été considérée. Elle propose une méthode d'estimation des défauts et le calcul de la commande basée observateur.

Les contributions sus-citées ont fait l'objet de publications dans des revues et actes de conférences internationales.

4.1.5 Conception d'observateurs non-linéaires en utilisant des techniques de relaxation LMI

Thèse 5 : M. Shivaraj MOHITE

Dates : Du 01/10/2020 au 20/12/2023

Directeurs de thèse :

- M. Ali ZEMOUCHE
- M. Marouane ALMA

Jury :

Dalil ICHALAL	Président du jury	Professeur, Université d'Evry
Patrizia BAGNERINI	Rapporteur	Professeur, Université, de Gènes
Taous-Meriem LALEG	Rapporteur	Chargé de recherche, INRIA
Catherine BONNET	Examineur	directeur de recherche, INRIA
Fan ZHANG	Examineur	Maître de conférences, Université Sun Yat-Sen
Michel ZASADZINSKI	Examineur	Professeur, Université, de Lorraine
Mohamed ZERROUGUI	Invité	Maître de conférences, Université Aix-Marseille

La synthèse d'observateurs non-linéaires via des approches LMI est très répandue dans la communauté automatique. Améliorer donc la faisabilité des ces LMI reste donc un défi majeur. L'objectif de cette thèse rentre donc dans ce cadre.

Les travaux présentés dans [20] ont permis d'introduire de nouveaux degrés de liberté et donc améliorer la faisabilité de la LMI obtenue en se basant sur la propriété de Lipschitz reformulée et d'une nouvelle variante de l'inégalité de Young. Cette approche permet d'introduire une matrice multiplicatrice blocs-diagonale. Le but était donc de continuer à chercher des méthodes avec une meilleure faisabilité des LMI obtenues.

Les principales contributions de la thèse de M. Mohite sont :

Etablissement de nouvelles conditions LMI :

L'un des principaux résultats de cette thèse est le développement de nouvelles conditions LMI basées sur l'introduction d'une matrice multiplicatrice. Les conditions sont formulées en intégrant ce multiplicateur nouvellement introduit avec une approche LPV bien établie et une propriété de Lipschitz reformulée. En raison de l'utilisation judicieuse du multiplicateur proposé, les conditions LMI obtenues contiennent un nombre supplémentaire de variables de décision par rapport aux approches LMI existantes [31, 29, 20]. Les variables de décision supplémentaires étendent la région de faisabilité des LMI à résoudre.

l'Applicabilité de la méthode proposée :

L'approche LMI développée est appliquée dans divers exemples de contrôle, comme suit :

1. L'approche LMI basée sur l'introduction d'une matrice multiplicatrice développée est utilisée pour concevoir un observateur \mathcal{H}_∞ amélioré pour estimer l'état de systèmes non linéaires affectés par des perturbations externes au niveau de leurs dynamiques et leurs sorties. Les conditions LMI établies permettent une meilleure atténuation du bruit que les méthodes existantes de [20, 29, 31], comme le montrent des exemples numériques présentés.
2. Ensuite, pour les systèmes non linéaires avec des non-linéarités non globalement Lipschitziennes, affectés par des perturbations, l'observateur proposé dans [7] a été adapté en utilisant la nouvelle approche LMI développée pour l'estimation d'état. Les conditions LMI obtenues sont formulées en utilisant la notion d'ISS. L'utilisation de cette méthode relaxe l'hypothèse principale des non-linéarités Lipschitziennes globales requises lors des problèmes de conception d'observateur non linéaire.
3. Enfin, la nouvelle condition LMI est utilisée pour une stabilisation basée observateur d'une classe de systèmes non linéaires. En raison du déploiement délibéré de ces outils mathématiques dans la formulation LMI, les conditions résultantes sont améliorées et moins conservatrices que celles présentées dans [23, 34, 12].

Le déploiement des observateurs proposés dans plusieurs applications de véhicules autonomes :

La méthodologie de synthèse formulée, basé sur la relaxation de LMI est utilisée et testés sur des modèles de véhicules autonomes, pour l'estimation d'états pour un modèle longitudinal, le suivi de véhicules et l'estimation de l'angle de dérapage. Cela aide à valider les performances de l'observateur proposé sur des applications pratiques.

Tous les détails de ces contributions se trouvent dans la thèse de M. Shivaraj ainsi que dans nos différents articles scientifiques ([5, 2, 3, 6, 4]).

4.1.6 Synthèse d'observateurs pour les systèmes singuliers non-linéaires à paramètres variants

Thèse 6 : (en cours) M. Israel Isaac ZETINA RIOS

Dates : à partir du 14/01/2021. Soutenance prévue premier semestre 2024

Directeurs de thèse :

- M. Mohamed DAROUACH

- M. Marouane ALMA

Directrice de thèse du CENIDET au Mexique :

- Mme Gloria lilia OSORIO GORDILLO

Objectifs de la thèse :

- Synthèse d'observateurs généralisés pour les systèmes singuliers non-linéaires à paramètres variants (NLPV),
- Estimation de fautes sur des systèmes NLPV,
- Synthèse d'observateurs adaptatifs généralisés pour les systèmes singuliers NLPV.

4.1.7 Encadrements de stages Master

Stage1 : Vuong TRINH

Conencadrant : M. Ioan Doré LANDAU, Laboratoire GIPSA-Lab

Sujet : active vibration control by combined feedforward and feedback compensation

Dates : du 01/02/2014 au 30/06/2014

Stage2 : Willian RIBEIRO DE PAULA

Sujet : Commande robuste d'un système de contrôle actif de bruit. Participation à la mise en oeuvre d'une plateforme expérimentale

Dates : du 01/02/2021 au 31/07/2021

5

Liste des publications personnelles

Sommaire

5.1	Articles de revues scientifiques	45
5.2	Articles de conférences internationales avec comité de lecture	49
5.3	Chapitres d'ouvrages collectifs	57

5.1 Articles de revues scientifiques

- 1 Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA et Ali ZEMOUCHE. “Towards Enhancing Nonlinear Observers for Lipschitz System : Exploiting the Matrix Multipliers-based LMIs”. In : *International Journal of Robust and Nonlinear Control* (2024).
- 2 Isaac Israel ZETINA-RIOS, Gloria Lilia OSORIO-GORDILLO, Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Carlos Manual ASTORGA-ZARAGOZA. “Fault estimation for a class of nonlinear algebro-differential parameter-varying systems”. In : *European Journal of Control* 79 (2024), p. 101087. ISSN : 0947-3580. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2024.101087>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S094735802400147X>.

- 3 Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Harouna Souley ALI. “Adaptive observer design for a class of nonlinear descriptor systems”. In : *Automatica* 155 (2023), p. 111143. ISSN : 0005-1098. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111143>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109823003035>.
- 4 Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA et Ali ZEMOUCHE. “Observer-Based Stabilization of Lipschitz Nonlinear Systems by Using a New Matrix-Multiplier-Based LMI Approach”. In : *IEEE Control Systems Letters* 7 (2023), p. 3723-3728. DOI : [10.1109/LCSYS.2023.3341549](https://doi.org/10.1109/LCSYS.2023.3341549).
- 5 Isaac Israel ZETINA-RIOS, Gloria Lilia OSORIO-GORDILLO, Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Rodolpho Amalio VARGAS-MÉNDEZ. “State estimation strategy for a class of nonlinear algebro-differential parameter-varying systems”. In : *International Journal of Systems Science* 54.16 (2023), p. 3085-3097. DOI : [10.1080/00207721.2023.2268240](https://doi.org/10.1080/00207721.2023.2268240). URL : <https://doi.org/10.1080/00207721.2023.2268240>.
- 6 Khadidja CHAIB DRAA, Ali ZEMOUCHE, Marouane ALMA, Holger VOOS et Mohamed DAROUACH. “A discrete-time nonlinear state observer for the anaerobic digestion process”. In : *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 29.5 (mars 2019), p. 1279-1301. DOI : [10.1002/rnc.4434](https://doi.org/10.1002/rnc.4434). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02054242>.
- 7 Khadidja CHAIB DRAA, Ali ZEMOUCHE, Marouane ALMA, Holger VOOS et Mohamed DAROUACH. “A nonlinear observer-based trajectory tracking method applied to an anaerobic digestion process”. In : *Journal of Process Control* 75 (mars 2019), p. 120-135. DOI : [10.1016/j.jprocont.2018.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2018.12.001). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02054280>.
- 8 Khadidja CHAIB DRAA, Ali ZEMOUCHE, Marouane ALMA, Holger VOOS et Mohamed DAROUACH. “Nonlinear observer-based control with application to an anaerobic digestion process”. In : *European Journal of Control* 45 (jan. 2019), p. 74-84. DOI : [10.1016/j.ejcon.2018.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2018.09.012). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01903329>.
- 9 Abraham Jashiel PEREZ-ESTRADA, Gloria Lilia OSORIO GORDILLO, Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Victor Hugo OLIVARES-PEREGRINO. “Generalized dynamic observers for quasi-LPV systems

-
- with unmeasurable scheduling functions”. In : *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 28.17 (nov. 2018), p. 5262-5278. DOI : [10.1002/rnc.4309](https://doi.org/10.1002/rnc.4309). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01962614>.
- 10 Abraham-Jashiel PÉREZ-ESTRADA, Gloria-Lilia OSORIO-GORDILLO, Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Víctor-Hugo OLIVARES-PEREGRINO. “ H_∞ generalized dynamic unknown inputs observer design for discrete LPV systems. Application to wind turbine”. In : *European Journal of Control* 44 (nov. 2018), p. 40-49. DOI : [10.1016/j.ejcon.2018.09.013](https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2018.09.013). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01933913>.
 - 11 Ali ZEMOUCHE, Abdel AITOUCHE, Marouane ALMA et Souad BEZZAOUCHA-REBAI. “Advanced control and observer design for nonlinear systems via LMIs”. In : *European Journal of Control* 44 (nov. 2018), p. 1-2. DOI : [10.1016/j.ejcon.2018.10.004](https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2018.10.004). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01933911>.
 - 12 Mohamed DAROUACH, Francesco AMATO et Marouane ALMA. “Functional observers design for descriptor systems via LMI : Continuous and discrete-time cases”. In : *Automatica* 86 (déc. 2017), p. 216-219. DOI : [10.1016/j.automatica.2017.08.016](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2017.08.016). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01643741>.
 - 13 Nan GAO, Mohamed DAROUACH, Marouane ALMA et Holger VOOS. “New unified H_∞ dynamic observer design for linear systems with unknown inputs”. In : *Automatica* 65 (mars 2016), p. 43-52. DOI : [10.1016/j.automatica.2015.10.052](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.10.052). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01253328>.
 - 14 Marouane ALMA et Mohamed DAROUACH. “Adaptive observers design for a class of linear descriptor systems”. In : *Automatica* 50.2 (fév. 2014), p. 578-583. DOI : [10.1016/j.automatica.2013.11.036](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.11.036). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00922599>.
 - 15 Nan GAO, Mohamed DAROUACH, Marouane ALMA et Holger VOOS. “ H_∞ decentralized dynamic-observer-based control design for large-scale nonlinear interconnected systems”. In : *Transaction on IoT and Cloud Computing* 2.2 (2014), p. 47-67. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01164147>.

- 16 Ioan Doré LANDAU, Tudor-Bogdan AIRIMITOAIÉ et Marouane ALMA. “IIR Youla-Kucera parametrized adaptive feedforward compensators for active vibration control with mechanical coupling”. In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 21.3 (mai 2013), p. 765-779. DOI : [10.1109/TCST.2012.2194714](https://doi.org/10.1109/TCST.2012.2194714). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00673716>.
- 17 Marouane ALMA, Ioan Doré LANDAU et Tudor-Bogdan AIRIMITOAIÉ. “Adaptive feedforward compensation algorithms for AVC systems in presence of a feedback controller”. In : *Automatica* 48.5 (2012), p. 982-985. DOI : [10.1016/j.automatica.2012.02.015](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.02.015). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00673708>.
- 18 Ioan Doré LANDAU, Tudor-Bogdan AIRIMITOAIÉ et Marouane ALMA. “A Youla–Kucera parametrized adaptive feedforward compensator for active vibration control with mechanical coupling”. In : *Automatica* 48.9 (sept. 2012), p. 2152-2158. DOI : [10.1016/j.automatica.2012.05.066](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.05.066). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02156535>.
- 19 John Jairo MARTINEZ MOLINA et Marouane ALMA. “Improving playability of Blu-ray disc drives by using adaptive suppression of repetitive disturbances”. In : *Automatica* 48.4 (avr. 2012). DOI : [10.1016/j.automatica.2012.01.016](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2012.01.016). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01250319>.
- 20 Marouane ALMA, John Jairo MARTINEZ MOLINA, Ioan Doré LANDAU et Gabriel BUCHE. “Design and Tuning of Reduced Order H-infinity Feedforward Compensators for Active Vibration Control”. In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 20.4 (2011), p. 554-561. DOI : [10.1109/TCST.2011.2119485](https://doi.org/10.1109/TCST.2011.2119485). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00576671>.
- 21 Ioan Doré LANDAU, Marouane ALMA et Tudor-Bogdan AIRIMITOAIÉ. “Adaptive feedforward compensation algorithms for active vibration control with mechanical coupling”. In : *Automatica* 47.10 (2011), p. 2185-2196. DOI : [10.1016/j.automatica.2011.08.015](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2011.08.015). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00597558>.
- 22 Ioan Doré LANDAU, Marouane ALMA, Aurelian CONSTANTINESCU, John Jairo MARTINEZ MOLINA et M. NOÉ. “Adaptive regulation–Rejection of unknown multiple narrow band disturbances (a review on algorithms

- and applications)”. In : *Control Engineering Practice* 19.10 (oct. 2011). Equipe SLR, p. 1168-1181. DOI : [10.1016/j.conengprac.2011.06.005](https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2011.06.005). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00669464>.
- 23 Ioan Doré LANDAU, Marouane ALMA, John Jairo MARTINEZ MOLINA et Gabriel BUCHE. “Adaptive Suppression of Multiple Time-Varying Unknown Vibrations Using an Inertial Actuator”. In : *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 19.6 (2011), p. 1327-1338. DOI : [10.1109/TCST.2010.2091641](https://doi.org/10.1109/TCST.2010.2091641). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00576680>.

5.2 Articles de conférences internationales avec comité de lecture

- 1 Shengya MENG, Fanwei MENG, Fan ZHANG, Marouane ALMA, Madjid HADDAD et Ali ZEMOUCHE. “Nonlinear observer design for vehicle lateral load transfer ratio estimation”. In : *American control conference, ACC 2024*. Toronto, Canada, juill. 2024. URL : <https://hal.science/hal-04561496>.
- 2 Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA et Ali ZEMOUCHE. “An LMI-based observer design method for a class of nonlinear systems”. In : *22nd European Control Conference, ECC 2024*. Stockholm, Sweden, juin 2024. URL : <https://hal.science/hal-04613003>.
- 3 Isaac Israel ZETINA-RIOS, Marouane ALMA, Gloria Lilia OSORIO-GORDILLO, Mohamed DAROUACH et Carlos ASTORGA-ZARAGOZA. “Parameter Estimation Based on Generalized Adaptive Observer for a Class of Linear Algebraic-Differential Parameter-Varying Systems”. In : *10th International Conference on Control, Decision and Informations Technologies CoDIT 2024*. Valletta, Malta, juin 2024.
- 4 Denakpo Jenius CODJIA, Latifa BOUTAT-BADDAS, Marouane ALMA, Madjid HADDAD et Ali ZEMOUCHE. “Vehicle Rollover Index Estimation Using a Nonlinear Unknown Input Observer”. In : *31st Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2023*. Limassol, Cyprus, juin 2023.

- 5 Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA, Madjid HADDAD et Ali ZEMOUCHE. “LMI-Based \mathcal{H}_∞ observer design for nonlinear Lipschitz system”. In : *22nd IFAC World Congress 2023*. Yokohama, Japan, juill. 2023. URL : <https://hal.science/hal-04016027>.
- 6 Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA, Madjid HADDAD et Ali ZEMOUCHE. “State estimation of longitudinal vehicle model using \mathcal{H}_∞ LMI-based nonlinear observer”. In : *31st Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2023*. Limassol, Cyprus, juin 2023. URL : <https://hal.science/hal-04080686>.
- 7 Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA et Ali ZEMOUCHE. “Design of a nonlinear observer for a class of locally Lipschitz systems by using input-to-state stability : An LMI approach”. In : *62nd IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2023*. Marina Bay Sands, Singapore, déc. 2023. URL : <https://hal.science/hal-04171967>.
- 8 Isaac Israel ZETINA-RIOS, Marouane ALMA, Gloria Lilia OSORIO-GORDILLO, Mohamed DAROUACH et Carlos ASTORGA-ZARAGOZA. “Generalized Adaptive Observer Design for a Class of Linear Algebro-Differential Systems”. In : *IEEE 11th International Conference on Systems and Control, ICSC 2023*. Sousse, Tunisia, sept. 2023.
- 9 Damien GUILBERT, Marouane ALMA, Latifa BOUTAT-BADDAS, Hugues RAFARALAHY et Michel ZASADZINSKI. “Modeling and control of alkaline and PEM electrolyzers”. In : *12th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE2022*. Iasi, Romania, oct. 2022. URL : <https://hal.science/hal-03905300>.
- 10 Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA et Ali ZEMOUCHE. “A New Matrix Multiplier-Based LMI Approach for Nonlinear Observers”. In : *2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2022, p. 91-96. DOI : [10.1109/MED54222.2022.9837273](https://doi.org/10.1109/MED54222.2022.9837273).
- 11 Shivaraj MOHITE, Ali ZEMOUCHE, Madjid HADDAD, Marouane ALMA, Cédric DELATTRE et N.M. SINGH. “ H_∞ switched-gain based observer vs nonlinear transformation based observer for a vehicle tracking model”. In : *3rd IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems, MICNON 2021*. Published in IFAC-PapersOnLine, 54(14) :126-131, 2021. Tokyo, Japan, sept. 2021. DOI : [10.1016/j](https://doi.org/10.1016/j).

-
- [ifacol.2021.10.340](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03468355). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03468355>.
- 12 Abraham Jashiel PÉREZ-ESTRADA, Gloria Lilia OSORIO-GORDILLO, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Adaptive observer design for LPV systems”. In : *3rd IFAC Workshop on Linear Parameter Varying Systems, LPVS 2019*. Published in IFAC-PapersOnLine, 52(28) :140-145, 2019. Eindhoven, Netherlands, nov. 2019. DOI : [10.1016/j.ifacol.2019.12.361](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.361). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02977430>.
 - 13 Marouane ALMA, Harouna SOULEY ALI et Mohamed DAROUACH. “Adaptive observer design for linear descriptor systems”. In : *American Control Conference, ACC 2018*. Milwaukee, WI, United States, juin 2018. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01742221>.
 - 14 Khadidja Chaib DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA, Ali ZEMOUCHE et Mohamed DAROUACH. “LMI-based trajectory tracking for a class of nonlinear systems with application to an anaerobic digestion process”. In : *American Control Conference, ACC 2018*. Milwaukee, WI, United States, juin 2018. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01742225>.
 - 15 Nan GAO, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Dynamic observer design for a class of nonlinear systems”. In : *3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, IAEAC 2018*. Chongqing, China, oct. 2018. DOI : [10.1109/IAEAC.2018.8577940](https://doi.org/10.1109/IAEAC.2018.8577940). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02977435>.
 - 16 Serket QUINTANAR-GUZMAN, Somasundar KANNAN, Holger VOOS, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Adaptive control for a lightweight robotic arm actuated by a shape memory alloy wire”. In : *16th International Conference on New Actuators, ACTUATOR 2018*. Bremen, Germany, juin 2018. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01937155>.
 - 17 Serket QUINTANAR-GUZMAN, Somasundar KANNAN, Holger VOOS, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Experimental validation of adaptive control for a shape memory alloy actuated lightweight robotic arm”. In : *Conference on Smart Materials, Adaptive Structures*

- and Intelligent Systems, ASME SMASIS 2018. San Antonio, United States, sept. 2018. DOI : [10.1115/SMASIS2018-8165](https://doi.org/10.1115/SMASIS2018-8165). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01937172>.
- 18 Khadidja CHAIB DRAA, Marouane ALMA, Holger VOOS, Ali ZEMOUCHE et Mohamed DAROUACH. “LMI-Based invariant like nonlinear state observer for anaerobic digestion model”. In : *25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017*. Valletta, Malta, juill. 2017. DOI : [10.1109/med.2017.7984197](https://doi.org/10.1109/med.2017.7984197). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01567358>.
- 19 Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA, Ali ZEMOUCHE et Mohamed DAROUACH. “An LMI-based H_∞ discrete-time non linear state observer design for an anaerobic digestion model”. In : *20th IFAC World Congress, IFAC 2017*. Toulouse, France, juill. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01567351>.
- 20 Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA, Ali ZEMOUCHE et Mohamed DAROUACH. “LMI-based \mathcal{H}_∞ nonlinear state observer design for anaerobic digestion model”. In : *25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017*. Valletta, Malta, juill. 2017. DOI : [10.1109/med.2017.7984196](https://doi.org/10.1109/med.2017.7984196). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01567357>.
- 21 Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA, Ali ZEMOUCHE et Mohamed DAROUACH. “LMI-based discrete-time nonlinear state observer for an anaerobic digestion model”. In : *6th International Conference on Systems and Control, ICSC 2017*. Batna, Algeria, mai 2017. DOI : [10.1109/icosc.2017.7958714](https://doi.org/10.1109/icosc.2017.7958714). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01567354>.
- 22 Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA, Ali ZEMOUCHE et Mohamed DAROUACH. “Observer-based trajectory tracking for anaerobic digestion process”. In : *14th International Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD 2017*. Bucarest, Romania, nov. 2017, p. 1-6. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01683627>.
- 23 Nan GAO, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “ H_∞ dynamic observer design for linear discrete-time systems”. In : *20th IFAC World Congress, IFAC 2017*. Toulouse, France, juill. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01565641>.

-
- 24 Abraham Jashiel PEREZ-ESTRADA, Gloria Lilia OSORIO GORDILLO, Mohamed DAROUACH, Marouane ALMA et Victor Hugo OLIVARES-PEREGRINO. “Generalized dynamic observer design for discrete LPV systems with parameter dependent Lyapunov functions”. In : *14th International Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD 2017*. Bucarest, Romania, nov. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02133920>.
- 25 Serket QUINTANAR-GUZMAN, Somasundar KANNAN, Holger VOOS, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Observer design for light-weight robotic arm actuated by Shape Memory Alloy (SMA) wire”. In : *14th International Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD 2017*. Bucharest, Romania, nov. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02133912>.
- 26 Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA et Mohamed DAROUACH. “Invariant observer applied to anaerobic digestion model”. In : *21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. Berlin, Germany, sept. 2016. DOI : [10.1109/ETFA.2016.7733706](https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733706). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01418765>.
- 27 Harouna SOULEY ALI, Michel ZASADZINSKI, Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Mohammed EL GANAOUI. “Application de la commande prédictive pour la conception de bâtiments intelligents : état de l’art et perspectives”. In : *Congrès National de la Recherche en IUT, CNRIUT’2016*. Nantes, France, juin 2016. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01317103>.
- 28 Marouane ALMA, Harouna SOULEY ALI, Mohamed DAROUACH et Nan GAO. “An H_∞ observer design for linear descriptor systems”. In : *American Control Conference, ACC 2015*. Chicago, IL, United States, juill. 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01141204>.
- 29 Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA et Mohamed DAROUACH. “Adaptive control of the methane flow rate in biogas plants”. In : *3rd IEEE Conference Control, Engineering and Information Technology, CEIT 2015*. IEEE. Tlemcen, Algeria, mai 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01242711>.

- 30 Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA et Mohamed DAROUACH. “Linearizing control of biogas flow rate and quality”. In : *20th Conference Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2015*. Luxembourg, Luxembourg, sept. 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01242712>.
- 31 Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “A formal modeling framework for anaerobic digestion systems”. In : *17th International Conference on Modelling and Simulation, UKSim 2015*. Cambridge, United Kingdom, mars 2015. DOI : [10.1109/UKSim.2015.68](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01572204). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01572204>.
- 32 Mohammed EL GANAOU, Jean-Luc DESHAYES, Harouna SOULEY ALI, Angel SCIPIONI, Mohamed DAROUACH, Marouane ALMA et Michel ZASADZINSKI. “Bâtiment durable : approche combinée thermique, électrique, automatique et socio-économique à l’IUT Henri Poincaré de Longwy”. In : *Congrès National de la Recherche en IUT, CNRIUT 2015*. Epinal, France, mars 2015, CD-ROM. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01242691>.
- 33 Nan GAO, Mohamed DAROUACH, Marouane ALMA et Holger VOOS. “Decentralized dynamic-observer-based control for large scale nonlinear uncertain systems”. In : *American Control Conference, ACC 2015*. Chicago, IL, United States, juill. 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01141196>.
- 34 Harouna SOULEY ALI, Michel ZASADZINSKI, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “An H_∞ LPV control for a class of LPV systems using a descriptor approach : Application to a wind turbine model”. In : *1st IFAC Workshop on Linear Parameter Varying systems, LPVS 2015*. IFAC. Grenoble, France, oct. 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01242684>.
- 35 Nan GAO, Mohamed DAROUACH, Marouane ALMA et Holger VOOS. “ H_∞ decentralized dynamic-observer-based control for large-scale uncertain nonlinear systems”. In : *2nd International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT’14*. Metz, France, nov. 2014. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01097724>.

-
- 36 Nan GAO, Mohamed DAROUACH, Holger VOOS et Marouane ALMA. “Hinf dynamic observer design for linear time invariant systems”. In : *53rd Conference on decision and Control, CDC 2014*. Los Angeles, United States, déc. 2014. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01080247>.
- 37 Nan GAO, Mohamed DAROUACH, Holger VOOS et Marouane ALMA. “Robust unified H_∞ dynamic observer design for uncertain systems”. In : *33rd Chinese Control Conference, CCC 2014*. Nanjing, China, juill. 2014. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01253330>.
- 38 Ioan Doré LANDAU, Tudor-Bogdan AIRIMITOAIIE, Abraham CASTELLANOS SILVA et Marouane ALMA. “Adaptive active vibration isolation – A control perspective”. In : *4ième Colloque Francophone Analyse Vibratoire Expérimentale*. Sous la dir. de Roger SERRA. T. 20. MATEC Web of Conferences : 4ième Colloque Francophone Analyse Vibratoire Expérimentale, AVE 2014. Blois, France : EDP Sciences, nov. 2014, p. 04001. DOI : [10.1051/mateconf/20152004001](https://doi.org/10.1051/mateconf/20152004001). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01237933>.
- 39 Kannan SOMASUNDAR, Marouane ALMA, Miguel OLIVARES-MENDEZ et Holger VOOS. “Adaptive control of aerial manipulation vehicle”. In : *International Conference on Control System, Computing and Engineering, ICCSCE 2014*. Penang, Malaysia, nov. 2014. DOI : [10.1109/ICCSCE.2014.7072729](https://doi.org/10.1109/ICCSCE.2014.7072729). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01253329>.
- 40 Harouna SOULEY ALI, Marouane ALMA et Mohamed DAROUACH. “Controllers design for two interconnected systems via unbiased observers”. In : *19th IFAC World Congress, IFAC'14*. Cape Town, South Africa, août 2014. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01059246>.
- 41 Tudor-Bogdan AIRIMITOAIIE, Ioan Doré LANDAU, Luc DUGARD, Marouane ALMA, Abraham CASTELLANOS SILVA, Gabriel BUCHE et Mathieu NOE. “Algorithme de commande par action anticipatrice adaptative et contre-réaction fixe pour le contrôle actif de vibrations en présence de couplage mécanique interne”. In : *4èmes Journées Démonstrateurs 2013*. Angers, France, juin 2013, n/c. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00818201>.

- 42 Harouna SOULEY ALI, Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Cédric DELATTRE. “Design of unbiased functional observers for interconnected discrete-time delay systems”. In : *International Conference on Systems and Control, ICSC 2013*. Alger, Algeria, oct. 2013, CDROM. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00920190>.
- 43 Marouane ALMA, Ioan Doré LANDAU et Tudor-Bogdan AIRIMITOAIIE. “Hybrid adaptive feedforward-feedback compensation algorithms for active vibration control systems”. In : *CDC 2011 - ECC 2011 - 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando, Floride, United States, déc. 2011, paper ThA10.3. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00673722>.
- 44 Ioan Doré LANDAU, Tudor-Bogdan AIRIMITOAIIE et Marouane ALMA. “A Youla-Kucera parametrized adaptive feedforward compensator for active vibration control”. In : *IFAC WC 2011 - 18th IFAC World Congress*. Milan, Italy, août 2011, p. 3427-3432. DOI : <https://doi.org/10.3182/20110828-6-IT-1002.00475>. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00576691>.
- 45 Ioan Doré LANDAU, Tudor-Bogdan AIRIMITOAIIE et Marouane ALMA. “An IIR Youla-Kucera parametrized adaptive feedforward compensator for active vibration control with mechanical coupling”. In : *CDC 2011 - ECC 2011 - 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*. Orlando, Floride, United States, déc. 2011, paper ThA10.4. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00673728>.
- 46 Ioan Doré LANDAU, Tudor-Bogdan AIRIMITOAIIE et Marouane ALMA. “Comparison of two approaches for adaptive feedforward compensation in active vibration control with mechanical coupling”. In : *MED 2011 - 19th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Corfou, Greece, juin 2011, accepté. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00597705>.
- 47 Marouane ALMA, Ioan Doré LANDAU, John Jairo MARTINEZ MOLINA et Gabriel BUCHE. “Suppression adaptative de vibrations en utilisant un actionneur inertiel”. In : *CIFA 2010 - 6ème Conférence Internationale Francophone d’Automatique*. Nancy, France, juin 2010, p. 41. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00567431>.

- 48 Ioan Doré LANDAU et Marouane ALMA. “An adaptive feedforward compensation algorithm for active vibration control”. In : *CDC 2010 - 49th IEEE Conference on Decision and Control*. Atlanta, Georgie, United States, déc. 2010, p. 3626-3631. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00576031>.
- 49 Ioan Doré LANDAU, Marouane ALMA, John Jairo MARTINEZ MOLINA et Gabriel BUCHE. “Direct adaptive suppression of multiple unknown vibrations using an inertial actuator”. In : *CDC 2010 - 49th IEEE Conference on Decision and Control*. Atlanta, Georgie, United States, déc. 2010, p. 1743-1748. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00567487>.
- 50 Ioan Doré LANDAU, Aurelian CONSTANTINESCU et Marouane ALMA. “Adaptive regulation - Rejection of unknown multiple narrow band disturbances”. In : *MED 2009 - 17th Mediterranean Conference on Control and Automation*. Thessaloniki, Greece, juin 2009. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00384511>.
- 51 Gildas BESANCON, Alina VODA et Marouane ALMA. “Observateur et amplification paramétrique pour mesure de force faible”. In : *CIFA 2008 - Conférence Internationale Francophone d'Automatique*. Bucarest, Roumanie, sept. 2008, p. -. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00348371>.
- 52 Gildas BESANCON, Alina VODA et Marouane ALMA. “On observer-based estimation enhancement by parametric amplification in a weak force measurement device”. In : *CDC 2008 - 47th IEEE Conference on Decision and Control*. Cancun, Mexico, déc. 2008, p. -. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00353532>.

5.3 Chapitres d'ouvrages collectifs

- 1 Khadidja Chaib DRAA, Ali ZEMOUCHE, Marouane ALMA, Holger VOOS et Mohamed DAROUACH. “Control of anaerobic digestion process”. In : *New Trends in Observer-based Control : A practical guide to process and engineering applications*. Sous la dir. d'Olfa BOUBAKER, Quanmin

- ZHU, Magdi S. MAHMOUD, José RAGOT, Hamid Reza KARIMI et Jorge DÁVILA. T. 2. Academic Press, avr. 2019, p. 99-135. DOI : [10.1016/B978-0-12-817034-2.00017-4](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817034-2.00017-4). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02421813>.
- 2 Mohamed DAROUACH, Ibrahima NDOYE, Marouane ALMA et Harouna SOULEY ALI. “Optimal filtering for discrete-time differential algebraic systems”. In : *Control Theory : Perspectives, Applications and Developments*. Systems Science Series. Nova Science Publishers, 2015, p. 113-124. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01294015>.
- 3 Gildas BESANCON, Alina VODA et Marouane ALMA. “Observateur et amplification paramétrique pour mesure de force faible”. In : *Automatique Avancée et Informatique Appliquée*. Sous la dir. de P. BORNE, F. FILIP, M. BENREJEB et D. POPESCU. Academia Româna, 2009, p. 61-66. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00391079>.

Deuxième partie

Observateurs adaptatifs pour les systèmes singuliers

Introduction

Les travaux présentés dans cette partie ont pour objectif la synthèse d'observateurs adaptatifs pour l'estimation de l'état et de paramètres de systèmes singuliers. Dans un premier temps, j'introduis les systèmes singuliers ou algébro-différentiels en précisant certaines propriétés qui leurs sont associées. Par la suite, je présente nos récents travaux dans la thématique de la synthèse d'observateurs adaptatifs pour les systèmes singuliers linéaires et nonlinéaires, publiés essentiellement dans [28, 14, 24, 1]. Je terminerai par certaines directions à développer.

Les systèmes algébro-différentiels représentent une extension des systèmes dynamiques linéaires conventionnels. Alors que les systèmes classiques se concentrent exclusivement sur les relations dynamiques, les systèmes singuliers incorporent également des équations algébriques. Cette extension permet d'intégrer des éléments statiques dans la modélisation. Ceci permet la conservation de la signification physique des variables d'état, d'où leur appellation de "systèmes descripteurs" en anglais.

Cette caractéristique importante a conduit plusieurs équipes de chercheurs automaticiens à s'intéresser à cette classe de systèmes depuis les travaux de Luenberger [53] et [52], de Dai [44] et de Darouach [43] et [39], etc.

Au cours des dernières décennies, de nombreux concepts de la théorie de la commande des systèmes dynamiques ont été étendus pour les systèmes singuliers. Ceci allant de la commande ([48], [47]) à la synthèse d'observateurs ([40] et [39]) ainsi que bien d'autres travaux. De plus, des méthodes basées sur la résolution d'inégalités linéaires matricielles (LMI, pour Linear Matrix Inequality) ont été également développées pour la synthèse de correcteurs et d'observateurs pour cette catégorie de systèmes.

Dans la suite du manuscrit, je présente nos travaux de synthèse d'observateurs adaptatifs pour l'estimation simultanée de l'état et de paramètres inconnus. Ceci pourrait avoir comme objectif une estimation de l'état et des paramètres d'un système singulier dans le cadre d'une identification en temps réel, la détection de défauts ou pour des fins de commande et d'analyse.

1

Notions préliminaires sur les systèmes singuliers

Sommaire

1.1	Introduction	63
1.2	Propriétés structurelles des systèmes singuliers	65
1.2.1	Régularité	65
1.2.2	Equivalence entre systèmes singuliers	66
1.2.3	Réponse temporelle	67
1.2.4	Observabilité des systèmes singuliers	69
1.3	Conclusion	71

1.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à l'introduction aux systèmes singuliers en définissant et examinant leurs propriétés structurelles telles que la régularité, l'équivalence, la réponse temporelle, la causalité et l'observabilité.

La modélisation d'un processus physique complexe commence généralement par le choix de ses entrées et sorties, par les variables utilisées pour sa description, et par le choix des grandeurs permettant d'agir sur son évolution. Ces variables, appelées variables d'état et de commande sont choisies, dans la mesure du possible, pour avoir une signification physique (tension, intensités, position, vitesse, accélération, etc). Une fois les variables choisies, les relations mathématiques les liant sont dictées par les lois de comportement du système considéré. Ces relations peuvent être dynamiques (i.e. équations différentielles pour les systèmes continus ou équations aux différences pour

les systèmes échantillonnés), ou statiques. Ceci nous permet d'avoir la représentation généralisée suivante :

$$\begin{aligned} f(\dot{x}(t), x(t), u(t), y(t)) &= 0 \\ g(x(t), u(t), y(t)) &= 0 \end{aligned} \quad (1.1)$$

où $x(t) \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de commande et $y(t) \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur des sorties mesurées. Dans le cas linéaire, le système (1.1) devient :

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1.2)$$

où les matrices E , A , B , C et D sont réelles, constantes et de dimensions compatibles avec les dimensions de $x(t)$, $u(t)$ et $y(t)$. Les dérivées de plusieurs variables d'état peuvent intervenir dans une même relation, de ce fait, la matrice E n'a pas nécessairement une structure diagonale. d'autre part, par définition, toutes les relations de comportement n'étant pas nécessairement dynamiques, la matrice E n'est pas nécessairement de plein rang ligne.

Il n'est pas restrictif de considérer nul le terme de transfert direct de la commande vers la sortie, représenté ici par la matrice D . En effet, il suffit d'augmenter le vecteur d'état en y incluant $u(t)$ pour obtenir le système suivant :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ u \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & -I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= [C \quad D] \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1.3)$$

Dans la suite, ce terme direct D sera omis.

L'étude des systèmes algébro-différentiels ou descripteurs a motivé une activité de recherche soutenue depuis les années 70. Ce formalisme permet l'analyse, l'observation et le contrôle de systèmes dont la représentation d'état usuelle n'est pas satisfaisante. Il s'agit essentiellement de systèmes dont les relations statiques sont tout simplement ignorées et non prises en compte et les systèmes dont la matrice E n'est tout simplement pas inversible ou inversible avec un risque de mauvais conditionnement des matrices $E^{-1}A$ ou $E^{-1}B$.

Dans ce manuscrit, on s'intéresse plus particulièrement aux systèmes descripteurs dans lesquels la matrice E est toujours considérée singulière, i.e. $\text{rang}(E) = q < n$.

1.2 Propriétés structurelles des systèmes singuliers

1.2.1 Régularité

Définition 1.2.1 *Le système singulier linéaire (1.2) a une réponse unique pour une entrée suffisamment différentiable et une condition initiale donnée, si et seulement si le faisceau matriciel (E, A) est régulier.*

Définition 1.2.2 *Le faisceau matriciel (E, A) est dit régulier, si et seulement si $\det(sE - A) \neq 0$, ou de manière équivalente s'il existe un scalaire $\alpha \in \mathbb{C}$ tel que $\det(\alpha E - A) \neq 0$, où s représente la variable de Laplace.*

Le lemme suivant [50] permet de vérifier la régularité de la paire (E, A) :

Lemme 1.2.1 *Les propositions suivantes sont équivalentes :*

1. *La paire (E, A) est régulière.*
2. *Soit $X_0 = \text{Ker}A$, et $X_i = \{x : Ax \in EX_{i-1}\}$, nous avons alors $\text{Ker}E \cap X_i = 0$ pour $i \geq 1$.*
3. *Il existe deux matrices régulières Q et P telles que :*

$$QEP = \begin{bmatrix} I_{n_1} & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix}, \quad QAP = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ 0 & I_{n_2} \end{bmatrix}$$

où $n_1 + n_2 = n = \dim(x)$, la matrice $A_1 \in \mathbb{R}^{n_1 \times n_1}$, et la matrice $N \in \mathbb{R}^{n_2 \times n_2}$ est nilpotente d'indice h (i.e. $N^h = 0, N^{h-1} \neq 0$).

4. *La matrice $F(k) \in \mathbb{R}^{kn \times (k+1)n}$ est de plein rang ligne pour $k \geq 1$, avec :*

$$F(k) = \begin{bmatrix} E & A & & & \\ & E & A & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & E & A \end{bmatrix}$$

1.2.2 Equivalence entre systèmes singuliers

Soit le système de la forme (1.2) suivant :

$$\begin{aligned} \tilde{E}\dot{\tilde{x}}(t) &= \tilde{A}\tilde{x}(t) + \tilde{B}u(t) \\ y(t) &= \tilde{C}\tilde{x}(t) \end{aligned} \quad (1.4)$$

les deux systèmes (1.2) et (1.4) sont dits équivalents s'il existe deux matrices de passage non singulières P et Q telles que :

$$x = P\tilde{x}, \quad QEP = \tilde{E}, \quad QAP = \tilde{A}, \quad QB = \tilde{B} \quad \text{et} \quad CP = \tilde{C}$$

Les relations d'équivalence telles que la réflexivité, la transitivité et la symétrie sont facilement vérifiables du moment que les matrices de passage sont inversibles.

Equivalence par décomposition de Kronecker-Weierstrass

Pour tout système de la forme (1.2), il existe deux matrices de passage Q et P , telles que ce système est équivalent au système composé suivant :

$$\dot{x}_1 = A_1x_1 + B_1u \quad (1.5)$$

$$y_1 = C_1x_1$$

$$N\dot{x}_2 = x_2 + B_2u \quad (1.6)$$

$$y_2 = C_2x_2$$

$$y = y_1 + y_2 \quad (1.7)$$

où $x_1 \in \mathbb{R}^{n_1}$, $x_2 \in \mathbb{R}^{n_2}$, $n_1 + n_2 = n$, et la matrice N est nilpotente d'indice h . Les systèmes (1.5) et (1.6) sont respectivement appelés sous-système lent et sous-système rapide. En effet, le premier est causal et sa dynamique est déterminée par les valeurs propres de A_1 et le second est non causal et sa réponse à une entrée continue peut être discontinue.

Equivalence par décomposition en valeurs singulières

Pour toute matrice $E \in \mathbb{R}^{n \times n}$, il existe deux matrices régulières Q et P telles que $QEP = \begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$. En considérant le système (1.2), le fait que

$P^{-1}x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$, en appliquant les matrices de passage Q et P à la matrice E , nous obtenons le système équivalent suivant :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + B_1u \\ 0 &= A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u \\ y &= C_1x_1 + C_2x_2 \end{aligned} \quad (1.8)$$

où $QAP = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}$, $QB = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$, $CP = [C_1 \ C_2]$, avec $x_1 \in \mathbb{R}^r$ et $x_2 \in \mathbb{R}^{n-r}$.

Il est clair que cette décomposition permet la séparation des parties dynamique et statique d'un système.

1.2.3 Réponse temporelle

Soit un système singulier de la forme (1.2), avec une paire (E, A) régulière. Mis sous la forme de *Kronecker – Weierstrass* il est défini par les équations (1.5), (1.6) et (1.7) où $x_1 \in \mathbb{R}^{n_1}$, $x_2 \in \mathbb{R}^{n_2}$, $n = n_1 + n_2$ et N est nilpotente d'indice h .

Le système lent (1.5) est un système usuel standard ayant une réponse temporelle définie pour tout signal d'entrée $u(t)$ connue sur $[0, t]$, et toute condition initiale x_{10} par :

$$y_1(t) = C_1 e^{A_1 t} x_{10} + C_1 \int_0^t e^{A_1(t-\tau)} B_1 u(\tau) d\tau \quad (1.9)$$

Intéressons nous maintenant à la réponse temporelle du système rapide (1.6). Considérons que le signal d'entrée $u(t)$ est $(h-1)$ fois continûment différentiable, soit $u(t) \in C^{h-1}$. En pré-multipliant la première relation (1.6) par N et en dérivant $(h-1)$ fois, on obtient :

$$\begin{aligned} N\dot{x}_2(t) &= x_2(t) + B_2u(t) \\ N^2\dot{x}_2^{(2)}(t) &= N\dot{x}_2(t) + NB_2\dot{u}(t) \\ &\vdots \\ N^k x_2^{(k)}(t) &= N^{k-1} x_2^{(k-1)}(t) + N^{k-1} B_2 u^{(k-1)}(t) \\ &\vdots \\ N^{h-1} x_2^{(h-1)}(t) &= N^{h-2} x_2^{(h-2)}(t) + N^{h-2} B_2 u^{(h-2)}(t) \\ 0 &= N^{h-1} x_2^{(h-1)}(t) + N^{h-1} B_2 u^{(h-1)}(t) \end{aligned}$$

En additionnant ces équations, nous obtenons facilement l'expression de la solution $x_2(t)$ comme suit :

$$x_2(t) = - \sum_{k=0}^{h-1} N^k B_2 u^{(k)}(t) \quad (1.10)$$

ce qui donne la réponse temporelle suivante :

$$y_2(t) = - \sum_{k=0}^{h-1} C_2 N^k B_2 u^{(k)}(t) \quad (1.11)$$

Nous pouvons à présent donner la réponse temporelle du système (1.2) :

$$x(t) = P \begin{bmatrix} I_{n_1} \\ 0 \end{bmatrix} \left(e^{A_1 t} x_{10} + \int_0^t e^{A_1(t-\tau)} B_1 u(\tau) d\tau - \sum_{k=0}^{h-1} N^k B_2 u^{(k)}(t) \right) \quad (1.12)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (1.13)$$

Pour $t \rightarrow 0^+$ la relation (1.12) impose la condition suivante sur la condition initiale

$$x(0^+) = P \begin{bmatrix} I_{n_1} \\ 0 \end{bmatrix} \left(x_{10} - \sum_{k=0}^{h-1} N^k B_2 u^{(k)}(0^+) \right) \quad (1.14)$$

Les conditions initiales vérifiant cette contrainte sont dites "admissibles". On en déduit que le système a une trajectoire unique sous la réserve que la condition initiale soit admissible et que le signal de commande $u(t)$ soit $(h-1)$ fois continûment différentiable.

Un deuxième point de vue a été introduit par [49] et [47], permettant de s'affranchir des hypothèses sur $u(t)$ et sur les conditions initiales. Pour ce faire, nous appliquons la transformée de Laplace au sous-système rapide (1.6) :

$$x_2(s) = (sN - I_{n_2})^{-1} (Nx_2(0) + B_2 u(s)) = - \sum_{k=0}^{h-1} N^k s^k (Nx_2(0) + B_2 u(s))$$

puis la transformée inverse, et nous obtenons :

$$x_2(t) = - \sum_{k=0}^{h-1} N^{k+1} \delta^{(k)}(t) x_2(0) - \sum_{k=0}^{h-1} N^k B_2 u^{(k)}(t) \quad (1.15)$$

pour toute condition initiale $x_2(0)$ et tout signal d'entrée $u(t)$, $(h - 1)$ fois continûment différentiable. Avec $\delta(t)$ représentant l'impulsion de Dirac.

Ce formalisme permet d'étudier les systèmes présentant des sauts où la condition initiale n'est pas admissible. Dans ce cas, le premier terme de la réponse (1.15) permet de ramener le système à un état admissible. Généralement, ces sauts peuvent être dangereux et indésirables pour la sécurité du système considéré. Nous pouvons donc distinguer les systèmes impulsifs et les systèmes non impulsifs via le lemme suivant [30] :

Lemme 1.2.2 *Les propositions suivantes sont équivalentes*

- La paire (E, A) est non impulsive.
- La matrice N de la forme de Kronecker-Weierstrass est nulle.
- La matrice A_{22} de la forme en décomposition en valeurs singulières est de rang plein.
- $\deg |sE - A| = \text{rang}(E)$.
- $\text{rang} \begin{bmatrix} E & A \\ 0 & E \end{bmatrix} - \text{rang}(E) = n$.

Il est à noter qu'un système non impulsif peut être décrit par une fonction de transfert qui ne comporte que des termes causaux, tandis que la fonction de transfert d'un système impulsif contient des termes polynomiaux en s .

1.2.4 Observabilité des systèmes singuliers

L'observabilité se définit par la possibilité de reconstruire l'état d'un système à partir de la connaissance de ses entrées et sorties. À la différence des systèmes usuels classiques, l'observabilité des systèmes algébro-différentiels se décompose en deux grandes parties : la *R-observabilité* et l'*impulse observabilité*.

Définition 1.2.3 (L'observabilité). *Le système (1.2) est dit observable si la condition initiale x_0 peut être déterminée de manière unique à partir de $u(t)$ et $y(t)$ pour tout $t \geq 0$.*

Le théorème suivant donne les conditions de vérification de l'observabilité d'un système singulier et de ses sous systèmes lent et rapide associés.

dit R -observable si tout état de l'espace atteignable peut être déterminé de manière unique à partir de la connaissance des entrées et sorties.

Théorème 1.2.2 *Les propositions suivantes sont équivalentes :*

- Le système (1.2) est R -observable ;
- Le système lent (1.5) est observable ;
- $\text{rang} \begin{bmatrix} sE - A \\ C \end{bmatrix} = n, \forall s \in \mathbb{C} \text{ et } s \text{ fini ;}$

Définition 1.2.5 (Imp-observabilité). *Le système (1.2) est dit Impulse-observable si les termes impulsifs de l'état peuvent être déterminés de manière unique à partir des entrées et sorties.*

Théorème 1.2.3 *Les propositions suivantes sont équivalentes :*

- Le système (1.2) est impulse-observable ;
- Le sous système rapide (1.6) est observable ;
- $\ker \left(\begin{bmatrix} C_2^T & N^T C_2^T & \dots & (N^{h-1})^T & C_2^T \end{bmatrix}^T \right) \cap \text{Im}(N) = \{0\} ;$
- $\text{rang} \begin{bmatrix} A & E \\ E & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rang}E.$

Après ces définitions et théorèmes, nous constatons que l'observabilité des systèmes singuliers implique la R -observabilité et l'Imp-observabilité. La R -observabilité permet de vérifier l'observabilité du système lent (1.5), et l'Imp-observabilité permet de vérifier l'observabilité du système rapide (1.6).

1.3 Conclusion

Ce chapitre a introduit les concepts fondamentaux nécessaires à l'analyse et à l'observation des systèmes algébro-différentiels. Il est important de noter que la principale distinction entre les systèmes usuels et les systèmes singuliers réside dans la possibilité de non-causalité de ces derniers. Cette différence conduit à la nécessité de redéfinir la notion d'observabilité. Les chapitres à venir ont pour objectif d'étendre certains résultats établis pour

les systèmes usuels à la classe plus générale des systèmes singuliers. Dans le chapitre suivant, je présenterai les résultats de mes travaux concernant la synthèse d'observateurs adaptatifs, permettant une estimation simultanée de l'état et de certains paramètres inconnus pour des systèmes singuliers linéaires. Par la suite, ces résultats seront généralisés à une classe de systèmes algébro-différentiels non-linéaires.

2

Synthèse d'observateurs adaptatifs pour des systèmes singuliers linéaires

Sommaire

2.1	Introduction	73
2.2	Synthèse d'observateurs adaptatifs	75
2.2.1	En utilisant une transformation algébrique	75
2.2.2	Observateur d'ordre réduit	85
2.2.3	Extension aux systèmes à entrées inconnues	92
2.3	Conclusion	93

2.1 Introduction

Le problème de la synthèse d'observateurs a été un domaine de recherche très actif au cours des dernières décennies pour la communauté automatique. Cela s'explique par le fait que l'estimation de l'état est généralement nécessaire pour le contrôle et le diagnostic lorsque tous les états du système ne sont pas disponibles. Lorsque tous ou partie des paramètres sont également inconnus, ils peuvent être estimés, sous certaines conditions, en utilisant une estimation conjointe de l'état et des paramètres par des observateurs adaptatifs. Pour les systèmes standards, il existe de nombreux résultats sur la synthèse des observateurs adaptatifs (voir [45], [41], [38], [33] et les références qui s'y trouvent).

Concernant les systèmes descripteurs ou singuliers précédemment introduits, pour lesquels la représentation standard de l'espace d'état n'est pas

applicable, cette problématique de l'estimation conjointe des états et paramètres est également posée. En effet, ces systèmes sont généralement rencontrés dans des procédés chimiques, minéraux, électriques et mécaniques [43], [52], [32], [46], et même dernièrement dans des procédés biologiques complexes, pour lesquels l'accès à l'information en temps réel n'est pas toujours possible (paramètres et états difficilement mesurables).

La synthèse d'observateurs pour les systèmes descripteurs linéaires a été largement traitée, et il existe de nombreux résultats sur la synthèse d'observateurs d'ordre plein ou réduit. Cependant, contrairement aux systèmes standards où le problème de synthèse d'observateurs adaptatifs a été largement étudié, il n'existe que très peu de résultats sur la synthèse d'observateurs adaptatifs pour les systèmes singuliers [42].

L'objectif de ce chapitre est de proposer deux nouvelles méthodes de synthèse d'observateurs adaptatifs pour une classe de systèmes descripteurs linéaires. Nous considérons en plus de l'estimation de l'état, l'estimation de paramètres constants inconnus. Les conditions de l'existence de ces observateurs sont également dérivées, et comme dans [36], la stabilité et la convergence des algorithmes proposés sont présentées.

Considérons le système descripteur linéaire invariant dans le temps suivant :

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \psi(t)\theta \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.1)$$

où $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^k$ et $y(t) \in R^p$ sont respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrée et le vecteur de sortie. Le vecteur $\theta \in R^l$ est le vecteur de paramètres inconnus supposé constant.

$E \in R^{m \times n}$, $A \in R^{m \times n}$, $B \in R^{m \times k}$, et $C \in R^{p \times n}$ sont des matrices constantes connues. $\psi(t) \in R^{m \times l}$ est une matrice de signaux connus, on suppose qu'elle est différentiable par morceaux et que $\psi(t)$ et sa dérivée $\dot{\psi}(t)$ sont uniformément bornées dans le temps.

Nous supposons que : $\text{rang } E = r < n$, et sans perte de généralité : $\text{rang } C = p$.

Comme mentionné précédemment, le problème traité dans ce chapitre est la synthèse d'observateurs pour l'estimation simultanée de l'état $x(t)$ et des paramètres constants θ à partir des signaux connus $u(t)$, $y(t)$ et $\psi(t)$.

Tout le long de ce chapitre, nous allons considérer les deux hypothèses

suivantes :

Hypothèse 2.1.1 *Le système (2.1) est observable ou son équivalent :*

- *Le système (2.1) est R -observable $\iff \text{rang} \begin{bmatrix} sE - A \\ C \end{bmatrix} = n, \forall s \in \mathbb{C}$ et s fini et*
- *Le système (2.1) est Imp-observable $\iff \text{rang} \begin{bmatrix} A & E \\ E & 0 \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + \text{rang}E$.*

Hypothèse 2.1.2 *Soit $\gamma(t) \in \mathbb{R}^{n \times l}$ une matrice de signaux, générée par le système linéaire stable suivant :*

$$\dot{\gamma}(t) = N\gamma(t) + \chi(t) \quad (2.2)$$

Le signal $\chi(t)$ est une excitation persistente pour ce système s'il existe deux constantes positives δ et t_1 , et une matrice symétrique définie positive $\Lambda \in \mathbb{R}^{q \times q}$ telle que, pour tout t , l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\int_t^{t+t_1} \gamma^T(\tau) C^T \Lambda C \gamma(\tau) d\tau \geq \delta I \quad (2.3)$$

Remarque 2.1.1 *La condition d'excitation persistence (2.3) est une condition récurrente qu'on retrouve régulièrement dans des problèmes d'identification paramétrique.*

2.2 Synthèse d'observateurs adaptatifs

Cette section est dédiée à la synthèse d'observateurs adaptatifs pour le système (2.1), suivant deux méthodes distinctes :

2.2.1 En utilisant une transformation algébrique

Etant donné que $\text{rang } E = r$, il existe une matrice non singulière P telle que :

$$PE = \begin{bmatrix} E^* \\ 0 \end{bmatrix}, PA = \begin{bmatrix} A^* \\ A_1^* \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$PB = \begin{bmatrix} B^* \\ B_1^* \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad P\psi(t) = \begin{bmatrix} \psi^*(t) \\ \psi_1^*(t) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

avec $E^* \in \mathbb{R}^{r \times n}$ et $\text{rang} E^* = r$.

et

$$Pw(t) = \begin{bmatrix} w^*(t) \\ w_1^*(t) \end{bmatrix}; \quad (2.6)$$

Suivant [44], le système (2.1) est un système restreint équivalent à :

$$\begin{aligned} E^* \dot{x}(t) &= A^* x(t) + B^* u(t) + \psi^*(t)\theta + w^*(t) \\ y^*(t) &= C^* x(t) + \psi_2^*(t)\theta + v^*(t) \end{aligned} \quad (2.7)$$

où

$$y^*(t) = \begin{bmatrix} -B_1^* u(t) \\ y(t) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^q$$

$$C^* = \begin{bmatrix} A_1^* \\ C \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{q \times n}$$

et

$$\psi_2^*(t) = \begin{bmatrix} \psi_1^*(t) \\ 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{q \times l},$$

$$v^*(t) = \begin{bmatrix} w_1^*(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^q,$$

avec $q = m + p - r$.

Alors, en utilisant les transformations ci-dessus, nous pouvons prouver que la condition de l'impulse-observabilité est équivalente à :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} E^* \\ C^* \end{bmatrix} = n \quad (2.8)$$

du fait que E^* est une matrice de rang plein ligne.

Il s'ensuit qu'il existe une matrice non singulière $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ telle que :

$$\begin{aligned} aE^* + bC^* &= I_n \\ cE^* + dC^* &= 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

Notre objectif est de concevoir un observateur adaptatif d'ordre fixe n de la forme :

$$\begin{aligned}\dot{z}(t) &= Nz(t) + L_1 y_2^*(t) + L_2 y_2^*(t) + Gu(t) + (a + Kc)\psi^*(t)\hat{\theta}(t) + \Upsilon(t)\dot{\hat{\theta}}(t) \\ \hat{x}(t) &= z(t) + by_2^*(t) + Kdy_2^*(t) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= \Gamma\gamma^T(t)C^T\Sigma(y(t) - \hat{y}(t))\end{aligned}\quad (2.10)$$

où $\hat{x}(t)$, $\hat{\theta}(t)$ sont les estimations de $x(t)$ et $\theta(t)$ respectivement, avec :

$$\begin{aligned}y_2^*(t) &= y^*(t) - \psi_2^*(t)\hat{\theta}(t) \\ \hat{y} &= C\hat{x}(t)\end{aligned}\quad (2.11)$$

et N , L_1 , L_2 , G , K , $\Upsilon(t)$ et $\gamma(t)$ sont des matrices inconnues de dimensions appropriées, qui doivent être déterminées de telle sorte que $\hat{x}(t)$ et $\hat{\theta}(t)$ convergent vers $x(t)$ et θ , respectivement.

Considérons maintenant le cas où le système (2.1) est exempt de bruit, c'est-à-dire $w(t) = 0$ et $v(t) = 0$. Il en résulte que : $w^*(t) = 0$ et $v^*(t) = 0$.

nous pouvons alors définir les deux erreurs d'estimation $e_1(t)$ et $e_2(t)$ telles que :

$$\begin{aligned}e_1(t) &= x(t) - \hat{x}(t) \\ e_2(t) &= \theta - \hat{\theta}(t)\end{aligned}\quad (2.12)$$

À partir des équations ci-dessus, $y_2^*(t)$ peut être écrit comme suit :

$$y_2^*(t) = C^*x(t) + \psi_2^*(t)e_2(t)\quad (2.13)$$

En utilisant (2.7), (2.9) et (2.10), il est facile de montrer que l'erreur d'estimation d'état est donnée par :

$$\begin{aligned}e_1(t) &= x(t) - \hat{x}(t) \\ &= (a + Kc)E^*x(t) - z(t) - (b + Kd)\psi_2^*(t)e_2(t)\end{aligned}\quad (2.14)$$

Sa dérivée est :

$$\begin{aligned}\dot{e}_1 &= Ne_1 + [(a + Kc)A^* - N(a + Kc)E^* - L_1C^* - L_2C^*]x \\ &\quad + [(a + Kc)B^* - G]u - [(b + Kd)\psi_2^* - \Upsilon]\dot{e}_2 \\ &\quad + [(a + Kc)\psi^* - L_1\psi_2^* - L_2\psi_2^* + N(b + Kd)\psi_2^* - (b + Kd)\dot{\psi}_2^*]e_2\end{aligned}\quad (2.15)$$

Remarque 2.2.1 L'hypothèse 2.1.1 est équivalente à la détectabilité de la paire $(aA^*, \begin{bmatrix} cA^* \\ C^* \end{bmatrix})$. Dans ce cas, deux matrices α et β peuvent être déterminées telles que : $aA^* + \begin{bmatrix} \alpha & \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cA^* \\ C^* \end{bmatrix}$ est une matrice stable.

Nous pouvons maintenant proposer le théorème suivant :

Théorème 2.2.1 Soit $\Gamma \in \mathbb{R}^{l \times l}$ une matrice symétrique définie positive. Sous les hypothèses 2.1.1 et 2.1.2, et pour θ constant, l'observateur adaptatif décrit dans (2.10) est un observateur adaptatif exponentiel global pour le système descripteur (2.1) avec :

$$G = (a + Kc)B^* \quad (2.16)$$

$$L_1 = N(b + Kd) \quad (2.17)$$

et la matrice N définie par :

$$N = aA^* + \begin{bmatrix} K & -L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cA^* \\ C^* \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

est calculée par placement des pôles, puisque la paire $(aA^*, \begin{bmatrix} cA^* \\ C^* \end{bmatrix})$ est détectable à partir de l'hypothèse 2.1.1 et la remarque 2.2.1, en choisissant ses valeurs propres.

La matrice de signaux $\Upsilon(t)$ est obtenue en filtrant linéairement $\begin{bmatrix} \psi^*(t) \\ \psi_2^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P\psi(t) \\ 0 \end{bmatrix}$ à travers :

$$\dot{\Upsilon}(t) = N\Upsilon(t) + \begin{bmatrix} (a + Kc) & -(L_1 + L_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi^*(t) \\ \psi_2^*(t) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

et la matrice de signaux $\gamma(t)$ est donnée par :

$$\gamma(t) = \Upsilon(t) - (b + Kd)\psi_2^*(t) \quad (2.20)$$

ou à partir de l'équation (2.2) avec :

$$\chi(t) = \begin{bmatrix} -(a + Kc) & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi^*(t) \\ \psi_2^*(t) \end{bmatrix} + (b + Kd)\dot{\psi}_2^*(t) \quad (2.21)$$

Preuve 2.2.1 La clé de la démonstration consiste à définir la combinaison linéaire suivante de $e_1(t)$ et $e_2(t)$:

$$\eta(t) = e_1(t) + [(b + Kd)\psi_2^*(t) - \Upsilon(t)]e_2(t) \quad (2.22)$$

alors nous avons :

$$\dot{\eta} = \dot{e}_1 + [(b + Kd)\dot{\psi}_2^* - \dot{\Upsilon}]e_2 + [(b + Kd)\psi_2^* - \Upsilon]\dot{e}_2 \quad (2.23)$$

en insérant (2.15) dans (2.23), nous obtenons :

$$\begin{aligned} \dot{\eta} = & N\eta + [(a + Kc)A^* - N(a + Kc)E^* - L_1C^* - L_2C^*]x \\ & + [(a + Kc)\psi^* - L_1\psi_2^* - L_2\psi_2^* + N\Upsilon - \dot{\Upsilon}]e_2 \\ & + [(a + Kc)B^* - G]u \end{aligned} \quad (2.24)$$

La réduction de (2.24) à l'équation homogène :

$$\dot{\eta}(t) = N\eta(t) \quad (2.25)$$

fournit les matrices G, K, L_1, L_2, N et $\Upsilon(t)$ telles que :

$$G = (a + Kc)B^* \quad (2.26)$$

$$\dot{\Upsilon} = N\Upsilon + \begin{bmatrix} (a + Kc) & -(L_1 + L_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi^* \\ \psi_2^* \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

et

$$(a + Kc)A^* - N(a + Kc)E^* - L_1C^* - L_2C^* = 0 \quad (2.28)$$

en utilisant (2.9), l'équation (2.28) devient :

$$(a + Kc)A^* - N(I_n - bC - KdC^*) - L_1C^* - L_2C^* = 0 \quad (2.29)$$

ou

$$N = (a + Kc)A^* - L_2C^* + [N(b + Kd) - L_1]C^* \quad (2.30)$$

Pour :

$$L_1 = N(b + Kd) \quad (2.31)$$

nous obtenons

$$N = aA^* + \begin{bmatrix} K & -L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} cA^* \\ C^* \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

qui doit être une matrice stable.

En utilisant l'hypothèse 2.1.1, les matrices K et L_2 peuvent être déterminées à partir du problème standard de synthèse d'observateurs.

Le premier résultat de la démonstration est que, puisque $\Upsilon(t)$ est généré par (2.27) et avec les choix ci-dessus des matrices G , K , L_1 et L_2 , le système (2.24) générant $\eta(t)$ est globalement exponentiellement stable et donc $\eta(t)$ converge vers 0 avec une convergence globale et exponentielle.

Maintenant, puisque le vecteur de paramètres θ est constant, nous avons :

$$\dot{\theta} = 0 \quad (2.33)$$

et

$$\dot{e}_2 = \dot{\theta} - \hat{\theta} \quad (2.34)$$

$$= -\Gamma\gamma^T C^T \Sigma(y - \hat{y}) \quad (2.35)$$

En utilisant (2.1) et (2.11) nous obtenons :

$$\dot{e}_2(t) = -\Gamma\gamma^T(t)C^T\Sigma C e_1(t) \quad (2.36)$$

ensuite en insérant $e_1(t)$ de (2.22) dans (2.36), ceci conduit à :

$$\dot{e}_2 = -\Gamma\gamma^T C^T \Sigma C [\eta + [\Upsilon - (b + Kd)\psi_2^*]e_2] \quad (2.37)$$

en choisissant $\gamma(t)$ de l'équation (2.20), l'équation (2.37) devient :

$$\dot{e}_2 = -\Gamma\gamma^T C^T \Sigma C [\eta + \gamma e_2] \quad (2.38)$$

En regardant la partie homogène du système (2.38) :

$$\dot{e}_2 = -\Gamma\gamma^T C^T \Sigma C \gamma e_2 \quad (2.39)$$

Comme $\begin{bmatrix} \psi^*(t) \\ \psi_2^*(t) \end{bmatrix}$ et $\dot{\psi}_2^*(t)$ sont bornés, $\gamma(t)$ généré à partir du système exponentiellement stable (2.2) est également borné. À partir de la condition d'excitation persistante (2.3), on peut facilement prouver la stabilité exponentielle globale du système (2.39).

De la convergence exponentielle de $\eta(t)$ et la stabilité du système (2.39), on obtient la convergence globale et exponentielle vers 0 de $e_2(t)$ généré à partir du système (2.38) (voir [36] pour plus de détails).

Enfin, de $\eta(t) \rightarrow 0$, $e_2(t) \rightarrow 0$ et du fait que $\gamma(t)$ est borné, nous concluons que $e_1(t) = \eta(t) + \gamma(t)e_2(t) \rightarrow 0$, avec une convergence globale et exponentielle. Cela complète la démonstration du théorème.

Les résultats présentés supposent que $m + p = r + q > n$.
Lorsque $m + p = r + q = n$, il existe toujours une matrice non singulière $\begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}$ telle que :

$$aE^* + bC^* = I_n \quad (2.40)$$

Ce qui nous emmène au corollaire suivant :

Corollaire 2.2.1 *Dans le cas où $m + p = r + q = n$, sous la condition (2.8), l'observateur proposé (2.10) devient :*

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Nz(t) + L_1 y_2^*(t) + L_2 y_2^*(t) + Gu(t) + a\psi^* \hat{\theta} + \Upsilon(t) \dot{\hat{\theta}}(t) \\ \hat{x}(t) &= z(t) + b y_2^*(t) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= \Gamma \gamma^T(t) C^T \Sigma (y(t) - \hat{y}(t)) \end{aligned} \quad (2.41)$$

avec :

$$\begin{aligned} L_1 &= Nb \\ N &= aA^* - L_2 C^* \end{aligned} \quad (2.42)$$

Dans ce cas, N est de Hurwitz si et seulement si $\text{rang} \begin{bmatrix} sE^* - A^* \\ C^* \end{bmatrix} = n, \forall s \in \mathbb{C}, \text{Re}(s) \geq 0$.

Preuve 2.2.2 *La matrice $\begin{bmatrix} E^* \\ C^* \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ étant inversible, il en résulte qu'il existe une matrice non singulière $\begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}$ telle que :*

$$aE^* + bC^* = I_n \quad (2.43)$$

Dans ce cas, $c = 0$ et $d = 0$.

Selon la démonstration ci-dessus, nous déduisons que les nouvelles valeurs de L_1 , L_2 et N sont données par :

$$\begin{aligned} L_1 &= Nb \\ N &= aA^* - L_2 C^* \end{aligned} \quad (2.44)$$

Pour que N soit stable, la paire (C^*, aA^*) doit être détectable, ce qui est équivalent à :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} sI - aA^* \\ C^* \end{bmatrix} = n, \forall s \in \mathbb{C}, \text{Re}(s) \geq 0.$$

Maintenant, nous avons :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} sE^* - A^* \\ C^* \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} a & sb \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} sE^* - A^* \\ C^* \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} sI - aA^* \\ C^* \end{bmatrix}$$

Ainsi : (C^*, aA^*) est détectable $\Leftrightarrow \text{rank} \begin{bmatrix} sE^* - A^* \\ C^* \end{bmatrix} = n, \forall s \in \mathbb{C}, \text{Re}(s) \geq 0$.

Convergence pour les systèmes descripteurs bruités

Considérons le système bruité 2.1, tel que : $w(t) \neq 0$ and $v(t) \neq 0$. Dans ce cas, $y_2^*(t)$ peut être redéfini comme suit :

$$y_2^*(t) = C^*x(t) + \psi_2^*(t)e_2(t) + v^*(t) \quad (2.45)$$

À partir de (2.7), (2.9), et (2.10), il est facile de montrer que l'erreur d'estimation d'état est donnée par :

$$\begin{aligned} e_1(t) &= x(t) - \hat{x}(t) \\ &= (a + Kc)E^*x(t) - z(t) - (b + Kd)\psi_2^*(t)e_2(t) - (b + Kd)v^*(t) \end{aligned} \quad (2.46)$$

Nous pouvons établir le théorème suivant.

Théorème 2.2.2 *Sous les hypothèses 2.1.1 et 2.1.2 et pour un vecteur constant θ :*

1. *Si les bruits $w(t)$ et $v(t)$ dans le système (2.1) sont bornés, c'est-à-dire que $w^*(t)$ et $v^*(t)$ sont également bornés, alors les erreurs d'estimation d'état et de paramètre de l'observateur adaptatif (2.10), $e_1 = x - \hat{x}$ et $e_2 = \theta - \hat{\theta}$, sont également bornées.*
2. *De plus, si ces bruits, $w(t)$ et $v(t)$, ont une moyenne nulle pour tout t et sont indépendants de $\gamma(t)$ et $\psi(t)$, alors les moyennes des erreurs d'estimation d'état et de paramètre, $\mathbb{E}e_1(t)$ et $\mathbb{E}e_2(t)$, convergent exponentiellement vers zéro.*

Preuve 2.2.3 *Nous pouvons définir l'erreur de transformation $\epsilon(t)$ comme suit :*

$$\epsilon(t) = TE^*x(t) - z(t) \quad (2.47)$$

Satisfaisant :

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}(t) &= N\epsilon(t) + [TA^* - NTE^* - L_1C^* - L_2C^*]x(t) \\ &\quad + [TB^* - G]u(t) + T\psi^*(t)\theta - (a + Kc)\psi^*(t)\hat{\theta}(t) \\ &\quad - (L_1 + L_2)\psi_2^*(t)e_2(t) + \Upsilon(t)\dot{e}_2(t) - (L_1 + L_2)v^*(t) + Tw^*(t)\end{aligned}\quad (2.48)$$

En prenant : $T = a + Kc$, nous obtenons :

$$\begin{aligned}\dot{\epsilon}(t) &= N\epsilon(t) + [(a + Kc)A^* - N(a + Kc)E^* - (L_1 + L_2)C^*]x(t) \\ &\quad + [(a + Kc)B^* - G]u(t) + (a + Kc)\psi^*(t)e_2(t) \\ &\quad - (L_1 + L_2)\psi_2^*(t)e_2(t) + \Upsilon(t)\dot{e}_2(t) - (L_1 + L_2)v^*(t) + Tw^*(t)\end{aligned}\quad (2.49)$$

En utilisant (2.26) et (2.28), l'équation (2.49) devient :

$$\dot{\epsilon} = N\epsilon + [(a + Kc)\psi^* - (L_1 + L_2)\psi_2^*]e_2 + \Upsilon\dot{e}_2 - (L_1 + L_2)v^*(t) + Tw^*(t) \quad (2.50)$$

D'autre part, on peut facilement prouver que :

$$e_1(t) = \epsilon(t) - (b + Kd)\psi_2^*(t)e_2(t) - (b + Kd)v^*(t) \quad (2.51)$$

1. De manière similaire à la démonstration du Théorème 2.2.1, nous définissons un signal intermédiaire :

$$\eta(t) = \epsilon(t) - \alpha e_2(t) \quad (2.52)$$

En utilisant (2.48), nous obtenons :

$$\begin{aligned}\dot{\eta}(t) &= N\eta(t) + [(a + Kc)\psi^*(t) - (L_1 + L_2)\psi_2^*(t) - N\alpha(t) + \dot{\alpha}(t)]e_2(t) \\ &\quad + [\Upsilon(t) + \alpha(t)]\dot{e}_2 + (a + Kc)w^*(t) - (L_1 + L_2)v^*(t)\end{aligned}\quad (2.53)$$

En choisissant $\alpha(t) = -\Upsilon(t)$, et en utilisant (2.27), nous obtenons :

$$\dot{\eta}(t) = N\eta(t) - (L_1 + L_2)v^*(t) + (a + Kc)w^*(t) \quad (2.54)$$

Comme la partie homogène de (2.54) est exponentiellement stable, η est bornée lorsque les bruits $w^*(t)$ et $v^*(t)$ sont bornés.

Maintenant, considérons la dynamique des erreurs de paramètres :

$$\dot{e}_2(t) = -\Gamma\gamma^T C^T \Sigma C e_1(t) - \Gamma\gamma^T C T \Sigma v(t) \quad (2.55)$$

En insérant $e_1(t)$ de (2.51), on obtient

$$\begin{aligned} \dot{e}_2(t) &= -\Gamma\gamma^T C^T \Sigma C [\epsilon - (b + Kd)\psi_2^* e_2 - (b + Kd)v^*(t)] - \Gamma\gamma^T C^T \Sigma v(t) \\ &= -\Gamma\gamma^T C^T \Sigma C [\eta + \gamma e_2 - (b + Kd)v^*(t)] - \Gamma\gamma^T C^T \Sigma v(t) \end{aligned} \quad (2.56)$$

Comme la matrice variant dans le temps $\gamma(t)$ est bornée, et la partie homogène de (2.56) est exponentiellement stable, alors $e_2(t)$ est également borné, puisque $v(t)$, $v^*(t)$ et $\eta(t)$ sont bornés.

Puisque $\eta(t)$ et $e_2(t)$ sont bornés, alors :

$$\epsilon(t) = \eta(t) - \Upsilon(t)e_2(t) \quad (2.57)$$

est également borné.

à partir de (2.51) et de la bornitude de $e_2(t)$, $v^*(t)$ et $\epsilon(t)$, alors $e_1(t)$ est borné.

2. En appliquant l'espérance mathématique des deux côtés de (2.54) et (2.56), nous obtenons :

$$\mathbb{E} \frac{d\eta}{dt} = \mathbb{E} N \eta(t) + \mathbb{E} [-(L_1 + L_2)v^*(t) + (a + Kc)w^*(t)] \quad (2.58)$$

$$\mathbb{E} \frac{de_2}{dt} = -\mathbb{E} \Gamma \gamma^T C^T \Sigma C [\eta + \gamma e_2 - (b + Kd)v^*(t)] - \mathbb{E} \Gamma \gamma^T C^T \Sigma v(t) \quad (2.59)$$

Nous pouvons maintenant échanger l'ordre entre l'espérance et la dérivée pour obtenir

$$\frac{d\mathbb{E}\eta}{dt} = N\mathbb{E}\eta(t) + [-(L_1 + L_2)\mathbb{E}v^*(t) + (a + Kc)\mathbb{E}w^*(t)] \quad (2.60)$$

$$\frac{d\mathbb{E}e_2}{dt} = -\Gamma\gamma^T C^T \Sigma C [\mathbb{E}\eta + \gamma\mathbb{E}e_2 - (b + Kd)\mathbb{E}v^*(t)] - \Gamma\gamma^T C^T \Sigma \mathbb{E}v(t) \quad (2.61)$$

En utilisant les hypothèses que $\mathbb{E}v(t) = 0$, $\mathbb{E}w(t) = 0$ et $\mathbb{E}v^*(t) = 0$, et qu'ils sont indépendants de $\gamma(t)$, $\Upsilon(t)$, $\psi^*(t)$ et $\psi_2^*(t)$, il en résulte que les comportements de $\mathbb{E}\eta(t)$ et $\mathbb{E}e_2(t)$ sont exactement les mêmes que ceux de $\eta(t)$ et $e_2(t)$ dans le cas déterministe. Par conséquent, en utilisant les mêmes arguments, $\mathbb{E}\eta(t)$, $\mathbb{E}e_2(t)$, $\mathbb{E}\epsilon(t)$ et $\mathbb{E}e_1(t)$ convergent vers zéro, tous avec une convergence exponentielle.

Nous pouvons maintenant énoncé l'algorithme nous permettant d'avoir les matrices de l'observateur (2.10)

Algorithme

1. Déterminer les matrices P et $\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$;
2. Déterminer les matrices K et L_2 par placement de pôles ;
3. Calculer la matrice L_1 à l'aide de l'équation (2.17) ;
4. Calculer en temps réel les matrices de signaux $\Upsilon(t)$ et $\gamma(t)$ en utilisant (2.27) et (2.20), respectivement.

2.2.2 Observateur d'ordre réduit

Considérons le système singulier (2.1). Etant donné que $\text{rang} E < n$, il existera toujours une matrice de rang plein ligne E^\perp telle que :

$$E^\perp E = 0 \quad (2.62)$$

Dans cette section, nous utiliserons donc cette matrice orthogonale dans notre synthèse. Suivant (2.62), le système (2.1) est équivalent à :

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \psi(t)\theta \\ \begin{bmatrix} -E^\perp Bu(t) \\ y(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} E^\perp \psi \\ 0 \end{bmatrix} \theta \end{aligned} \quad (2.63)$$

Notre objectif est donc la synthèse d'un observateur adaptatif de la forme :

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Nz + J \left(\begin{bmatrix} -E^\perp Bu(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E^\perp \psi \\ 0 \end{bmatrix} \hat{\theta}(t) \right) + \\ &\quad Hu(t) + T\psi\hat{\theta}(t) + \Upsilon\dot{\hat{\theta}}(t) \\ \hat{x}(t) &= Pz(t) + F \left(\begin{bmatrix} -E^\perp Bu(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E^\perp \psi \\ 0 \end{bmatrix} \hat{\theta}(t) \right) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= \Gamma\gamma(t)^T C^T \Lambda (y(t) - C\hat{x}(t)) \end{aligned} \quad (2.64)$$

où $\hat{x}(t)$ et $\hat{\theta}(t)$ sont les estimations respectives de $x(t)$ et θ .

Les matrices $N, J, H, T, P, F, \Upsilon(t)$ et $\gamma(t)$ sont inconnues avec des dimensions appropriées, qui doivent être déterminées de telle manière que $\hat{x}(t)$ et $\hat{\theta}(t)$ convergent vers $x(t)$ et θ , respectivement. Γ et Λ sont des matrices

symétriques définies positives utilisées pour ajuster la vitesse d'évolution de $\hat{\theta}(t)$.

Les erreurs d'estimation sont définies, comme pour la section précédente, par l'équation (2.12). Nous pouvons maintenant énoncer le théorème suivant :

Théorème 2.2.3 *Soit $\Gamma \in \mathbb{R}^{l \times l}$ une matrice symétrique définie positive quelconque. Sous les hypothèses 2.1.1 et 2.1.2, et pour un θ constant, l'observateur adaptatif décrit dans (2.64) est un observateur adaptatif exponentiel global pour le système descripteur 2.1 si et seulement s'il existe une matrice T telle que :*

$$H = TB \quad (2.65)$$

$$NTE + J \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = TA \quad (2.66)$$

$$PTE + F \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = I_n \quad (2.67)$$

et N est une matrice stable.

La matrice des signaux $\Upsilon(t)$ est obtenue en filtrant linéairement $\psi(t)$ à travers :

$$\dot{\Upsilon}(t) = N\Upsilon(t) + T\psi(t) - J \begin{bmatrix} E^\perp \psi(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

La matrice $\gamma(t)$ est donnée par les équations 2.2 avec :

$$\chi(t) = \left[(NF - J) \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} + T \right] \psi(t) - F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\psi}(t) \quad (2.69)$$

ou par :

$$\gamma(t) = P\Upsilon(t) - F \begin{bmatrix} E^\perp \psi(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.70)$$

Preuve 2.2.4 *Définissons l'erreur de transformation $\epsilon(t)$ comme suit :*

$$\epsilon(t) = TEx(t) - z(t) \quad (2.71)$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}(t) &= N\epsilon(t) - (NTE - TA + J \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix})x(t) \\ &\quad - J \begin{bmatrix} E^\perp \psi(t) \\ 0 \end{bmatrix} + (TB - H)u(t) \\ &\quad + T\psi(t)(\theta - \hat{\theta}(t)) - \Upsilon(t)\dot{\hat{\theta}}(t) \end{aligned} \quad (2.72)$$

En utilisant (2.65) et (2.66), nous pouvons obtenir :

$$\dot{\epsilon}(t) = N\epsilon(t) + (T - J \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix})\psi(t)e_2(t) + \Upsilon(t)\dot{e}_2(t) \quad (2.73)$$

De même que pour le théorème (2.2.1), l'étape clé de la démonstration consiste à définir la combinaison linéaire entre les signaux d'erreurs, à savoir ici $\epsilon(t)$ et $e_2(t)$:

$$\eta(t) = \epsilon(t) - \Upsilon(t)e_2(t) \quad (2.74)$$

alors, nous obtenons après dérivation :

$$\dot{\eta}(t) = \dot{\epsilon}(t) - \dot{\Upsilon}(t)e_2(t) - \Upsilon(t)\dot{e}_2(t) \quad (2.75)$$

En insérant (2.72) dans (2.75), nous obtenons :

$$\begin{aligned} \dot{\eta}(t) &= N\eta(t) + (NTE - TA + J \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix})x(t) + (TB - H)u(t) \\ &+ \left((T - J \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix})\psi(t) + N\Upsilon(t) - \dot{\Upsilon}(t) \right) e_2(t) \end{aligned} \quad (2.76)$$

De (2.65), (2.66) et de l'équation linéaire (2.68), l'équation (2.76) est réduite à sa partie homogène :

$$\dot{\eta}(t) = N\eta(t) \quad (2.77)$$

ce qui donne les conditions (2.65), (2.66) et (2.68).

La matrice N doit être une matrice stable pour assurer la convergence de $\eta(t)$ vers 0.

Le premier résultat de la démonstration est que, puisque $\Upsilon(t)$ est généré par (2.68) et sous les conditions ci-dessus pour les matrices N , T et J , le système (2.76) qui génère $\eta(t)$ est globalement exponentiellement stable, donc $\eta(t)$ converge vers 0 avec une convergence globale et exponentielle.

Maintenant, puisque le vecteur de paramètres θ est constant, nous avons :

$$\dot{\theta} = 0 \quad (2.78)$$

et

$$\begin{aligned} \dot{e}_2(t) &= \dot{\theta} - \dot{\hat{\theta}}(t) \\ &= -\Gamma\gamma^T C^T \Lambda(y(t) - C\hat{x}(t)) \\ &= -\Gamma\gamma^T C^T \Lambda C e_1(t) \end{aligned} \quad (2.79)$$

D'autre part, en choisissant :

$$PTE + F \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = I_n$$

nous pouvons facilement prouver que :

$$e_1(t) = P\epsilon(t) - F \begin{bmatrix} E^\perp \psi(t) \\ 0 \end{bmatrix} e_2(t) \quad (2.80)$$

Ensuite, en remplaçant $\epsilon(t)$ par (2.22), et en utilisant (2.80) dans (2.36), nous obtenons :

$$\dot{e}_2(t) = -\Gamma\gamma^T(t)C^T\Lambda C \left[P\eta(t) + [P\Upsilon(t) - F \begin{bmatrix} E^\perp \psi(t) \\ 0 \end{bmatrix}]e_2(t) \right] \quad (2.81)$$

En choisissant $\gamma(t)$ comme dans (2.70), l'équation (2.81) devient :

$$\dot{e}_2(t) = -\Gamma\gamma^T(t)C^T\Lambda C [P\eta(t) + \gamma(t)e_2(t)] \quad (2.82)$$

En examinant la partie homogène du système (2.82), on obtient :

$$\dot{e}_2(t) = -\Gamma\gamma^T(t)C^T\Lambda C\gamma(t)e_2(t) \quad (2.83)$$

Comme $\psi(t)$ et $\dot{\psi}(t)$ sont bornés, $\gamma(t)$ généré à partir du système exponentiellement stable (2.2) est également borné. À partir de la condition d'excitation persistante (2.3), et puisque Γ et Λ sont positifs, la stabilité exponentielle globale du système (2.83) peut être facilement prouvée.

De la convergence exponentielle de $\eta(t)$ et du système (2.83), nous obtenons la convergence globale et exponentielle vers 0 de $e_2(t)$ généré par le système (2.82).

Maintenant, à partir de $\eta(t) \rightarrow 0$, $e_2(t) \rightarrow 0$ et du fait que $\Upsilon(t)$ est borné, nous concluons que $\epsilon(t) = \eta(t) + \Upsilon(t)e_2(t)$ converge vers 0, avec une convergence globale et exponentielle.

Enfin, à partir de la convergence de $e_2(t)$ et $\epsilon(t)$ vers 0, et de (2.80), la convergence globale et exponentielle de $e_1(t) \rightarrow 0$ est garantie.

Paramétrisation de l'observateur

Considérons les équations (2.66) et (2.67). Ces deux équations peuvent être écrites de manière compacte comme suit :

$$\begin{bmatrix} N & J \\ P & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TA \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.84)$$

Cette équation a une solution si et seulement si :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \\ TA \\ I_n \end{bmatrix} = n \quad (2.85)$$

L'objectif de cette section est de calculer les matrices de l'observateur N, J, P, F et T . À partir de l'équation (2.67), nous obtenons l'équation suivante :

$$[P \ F] \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = I_n \quad (2.86)$$

La condition nécessaire et suffisante pour que (2.86) ait une solution est que

$$\text{rang} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = n \quad (2.87)$$

Maintenant, soit une matrice $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$ arbitraire de rang plein ligne telle que :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = \text{rang} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = n \quad (2.88)$$

Alors il existe toujours une matrice K telle que :

$$\begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -K \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

ou de manière équivalente $TE = R - K \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix}$, puisque $\begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix}$ est de rang plein colonne.

Par conséquent, l'équation (2.89) devient :

$$[P \ F] \begin{bmatrix} I & -K \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = I_n \quad (2.90)$$

La solution générale de l'équation (2.90) est donnée par :

$$[P \ F] = [\Sigma^+ - Z [I - \Sigma\Sigma^+]] \begin{bmatrix} I & K \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

où $\Sigma = \begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix}$, et Σ^+ est l'inverse généralisé de Σ qui satisfait : $\Sigma\Sigma^+\Sigma = \Sigma$.

De cette solution, on obtient :

$$\begin{aligned} P &= [P \ F] \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} = \alpha_1 - Z\beta_1, \\ F &= [P \ F] \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} = \alpha_2 - Z\beta_2, \end{aligned} \quad (2.92)$$

où

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \Sigma^+ \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, & \alpha_2 &= \Sigma^+ \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix}, \\ \beta_1 &= [I - \Sigma\Sigma^+] \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, & \beta_2 &= [I - \Sigma\Sigma^+] \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.93)$$

Avec ces résultats, et étant donné que les erreurs sont indépendantes de P et F , nous pouvons prendre le cas particulier de $Z = 0$ pour notre synthèse, ce qui donne $P = \alpha_1$ et $F = \alpha_2$.

Une fois que les matrices P et F sont calculées, il reste à calculer N , J et T .

À partir de $TE = R - K \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix}$, l'équation suivante est obtenue :

$$[T \ K] \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = R \quad (2.94)$$

qui a une solution puisque :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \\ R \end{bmatrix} = \text{rang} \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} \quad (2.95)$$

Dans ce cas, une solution est

$$T = R \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, K = R \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (2.96)$$

D'autre part, l'équation (2.66) peut être reformulée comme suit :

$$N(R - K \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix}) + J \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = TA \quad (2.97)$$

ou

$$[N \quad K_1] \Sigma = \Theta \quad (2.98)$$

avec $K_1 = J - NK$ et $\Theta = TA$ et la solution générale est donnée par :

$$[N \quad K_1] = \Theta \Sigma^+ - Z_1(I - \Sigma \Sigma^+)$$

ou

$$N = \alpha_3 - Z_1 \beta_1, K_1 = \alpha_4 - Z_1 \beta_3 \quad (2.99)$$

où

$$\alpha_3 = \Theta \Sigma^+ \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \alpha_4 = \Theta \Sigma^+ \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \text{ et } \beta_3 = (I - \Sigma \Sigma^+) \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (2.100)$$

et la matrice J est donnée par :

$$J = \alpha_5 - Z_1 \beta_2 \quad (2.101)$$

avec :

$$\alpha_5 = \Theta \Sigma^+ \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix} \quad (2.102)$$

Enfin, le problème de conception de l'observateur se réduit à déterminer la matrice Z_1 de manière à ce que le système (2.77) soit stable.

En utilisant (3.60), il est facile de démontrer que le système (2.77) est asymptotiquement stable si et seulement s'il existe une matrice symétrique définie positive Y_1 et une matrice Y_2 telles que la LMI (Inégalité Matricielle Linéaire) suivante soit satisfaite :

$$[\alpha_3^T Y_1 - \beta_1^T Y_2^T + Y_1 \alpha_3 - Y_2 \beta_1] < 0 \quad (2.103)$$

où $Z_1 = Y_1^{-1} Y_2$.

Nous sommes maintenant en mesure de donner l'algorithme de synthèse suivant :

Algorithme

1. Choisir la matrice R respectant les conditions (2.88) et (2.95) ;
2. Calculer T et K depuis l'équation (2.96) ;
3. Calculer les matrices $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \beta_1, \beta_2$ et β_3 ;
4. Obtenir Z_1 à partir de la LMI (2.103) ;
5. Calculer les différentes matrices de l'observateur $N, J; P$ et F ;
6. Calculer en temps réel les matrices de signaux $\Upsilon(t)$ et $\gamma(t)$ en utilisant (2.68) et (2.70), respectivement.

De même que pour la première méthode, l'analyse sur la bornitude de l'erreur ainsi que la convergence de leurs moyennes en cas de présence de bruits sur l'état et la sortie reste globalement la même pour cette section.

2.2.3 Extension aux systèmes à entrées inconnues

Considérons le précédent système singulier (2.1) sujet à des entrées inconnues, donné par :

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + \psi(t)\theta + Gd(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (2.104)$$

où $d(t)$ est une entrée inconnue. La matrice $G \in \mathbb{R}^{m \times l}$ est connue. L'objectif est donc la synthèse d'un observateur adaptatif en présence de cette entrée inconnue.

En considérant l'état étendu $X(t)$ défini par :

$$X(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ d(t) \end{bmatrix} \quad (2.105)$$

Le système étendu suivant est donc obtenu :

$$\begin{aligned} E_1\dot{X}(t) &= A_1X(t) + Bu(t) + \psi(t)\theta \\ y(t) &= C_1X(t) \end{aligned} \quad (2.106)$$

qui est dans la même forme du système originel (2.1) ; avec :

$$E_1 = \begin{bmatrix} E & 0 \end{bmatrix}; A_1 = \begin{bmatrix} A & G \end{bmatrix}; C_1 = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}$$

Les résultats obtenus précédemment s'utilisent donc directement sur ce système (2.106), ce qui permet d'estimer $x(t)$, θ et l'entrée inconnue $d(t)$.

2.3 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la synthèse d'observateurs adaptatifs pour des systèmes singuliers linéaires. Deux approches ont été proposées avec des analyses de stabilité et de convergence pour chacune d'entre elles. Les observateurs proposés permettent d'avoir une estimation simultanée de l'état et des paramètres ainsi que des entrées inconnues, sous certaines conditions algébriques et d'excitation persistente. Les résultats ont été également étendus aux systèmes affectés par des bruits sur l'état et les sorties assurant la bornitude des erreurs ainsi que la convergence vers 0 de leurs moyennes.

3

Synthèse d'observateurs adaptatifs pour une classe de systèmes singuliers non-linéaires

Sommaire

3.1	Introduction	95
3.1.1	Notions préliminaires	96
3.2	Formulation de la problématique	97
3.3	Synthèse d'un observateur adaptatif et analyse de la convergence	98
3.3.1	Paramétrisation de l'observateur adaptatif non-linéaire	103
3.4	Conclusion	110

3.1 Introduction

Le présent chapitre est dédié à l'extension du précédent pour le cas d'une classe de systèmes singuliers non-linéaires. En effet, l'objectif est toujours l'estimation simultanée de l'état et de certains paramètres du système. Comme mentionné précédemment, les systèmes singuliers sont très présents en pratique, essentiellement dans les procédés chimiques, biologiques ou robotiques. Ces procédés sont connus pour être souvent non-linéaires [43], [32]. De même que pour les systèmes linéaires, la synthèse d'observateurs adaptatifs a été largement étudiée pour les systèmes non-linéaires standards [38].

Peu de résultats sont aujourd'hui présents dans la littérature pour la synthèse d'observateurs adaptatifs pour les systèmes singuliers non-linéaires.

Nous avons décidé dans le travail présenté dans ce chapitre de prendre en considération une classe de systèmes nonlinéaires assez répandue dans la pratique.

Dans la suite de ce chapitre le système est considéré observable.

3.1.1 Notions préliminaires

Avant de traiter le problème de ce chapitre, il est important de considérer les résultats suivants qui seront utilisés par la suite :

Lemme 3.1.1 *Soient \mathbb{U} et \mathbb{V} deux matrices réelles. L'inégalité suivante est satisfaite :*

$$\mathbb{U}^T \mathbb{V} + \mathbb{V}^T \mathbb{U} \leq \mu \mathbb{U}^T \mathbb{U} + \frac{1}{\mu} \mathbb{V}^T \mathbb{V} \quad (3.1)$$

pour tout scalaire $\mu > 0$.

Maintenant, considérons l'équation de Diophantine suivante :

$$\mathcal{A}\mathcal{X} - \mathcal{Y}\mathcal{B} = \mathcal{C} \quad (3.2)$$

où $\mathcal{A} \in R^{m \times k}$, $\mathcal{B} \in R^{l \times n}$ et $\mathcal{C} \in R^{m \times n}$. nous avons donc le théorème suivant donné dans [51] :

Théorème 3.1.1 *L'équation (3.2) possède une solution $\mathcal{X} \in R^{k \times n}$, $\mathcal{Y} \in R^{m \times l}$ si et seulement si*

$$(I - \mathcal{A}\mathcal{A}^+) \mathcal{C} (I - \mathcal{B}^+ \mathcal{B}) = 0 \quad (3.3)$$

Si tel est le cas, la solution générale de (3.2) est donnée par :

$$\mathcal{X} = \mathcal{A}^+ \mathcal{C} + \mathcal{A}^+ \mathcal{Z} \mathcal{B} + (I - \mathcal{A}^+ \mathcal{A}) \mathcal{W} \quad (3.4)$$

$$\mathcal{Y} = -(I - \mathcal{A}\mathcal{A}^+) \mathcal{C} \mathcal{B}^+ + \mathcal{Z} - (I - \mathcal{A}\mathcal{A}^+) \mathcal{Z} \mathcal{B} \mathcal{B}^+ \quad (3.5)$$

avec $\mathcal{W} \in R^{k \times n}$ et $\mathcal{Z} \in R^{m \times l}$, des matrices arbitraires.

\mathcal{A}^+ représente l'inverse généralisé de \mathcal{A} satisfaisant $\mathcal{A}\mathcal{A}^+ \mathcal{A} = \mathcal{A}$.

3.2 Formulation de la problématique

Considérons maintenant le système descripteur non linéaire suivant :

$$\begin{aligned} E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Df(x, u)\theta \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3.6)$$

où $x \in R^n$, $u \in R^k$ et $y \in R^p$ sont respectivement le vecteur d'état, le vecteur d'entrée et le vecteur de sortie. Le vecteur $\theta \in R^l$ est le vecteur de paramètres inconnus supposé constant. $E \in R^{m \times n}$, $A \in R^{m \times n}$, $B \in R^{m \times k}$, $D \in R^{m \times n_f}$ et $C \in R^{p \times n}$ sont des matrices constantes connues. Nous supposons que : $\text{rang}(E) = r < n$ et, sans perte de généralité : $\text{rang}(C) = p$.

La non-linéarité $f(x, u) \in R^{n_f \times l}$ satisfait la condition de Lipschitz, c'est-à-dire que pour $x_1 \in R^n$, $x_2 \in R^n$ et $\lambda_1 \in R^+$, nous avons :

$$\|f(x_1, u) - f(x_2, u)\| \leq \lambda_1 \|(x_1 - x_2)\| \quad (3.7)$$

et elle est supposée différentiable par morceau.

Le vecteur des paramètres inconnus θ est borné de la manière suivante :

$$\|\theta\|_2 \leq \lambda_2 \quad (3.8)$$

Comme indiqué ci-dessus, le problème traité dans ce chapitre est l'estimation simultanée de $x(t)$ et θ à partir des signaux mesurés $u(t)$ et $y(t)$ et la connaissance de l'expression de $f(x, u)$.

À partir des équations (3.6) et la définition et l'existence de E^\perp , nous obtenons :

$$-E^\perp Bu(t) = E^\perp Ax(t) + E^\perp Df(x, u)\theta \quad (3.9)$$

L'équation (3.9) nous permet d'obtenir une sortie supplémentaire pour le système (3.6).

En tenant compte de l'équation (3.9), considérons l'observateur adaptatif suivant :

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Nz(t) + J \left(\begin{bmatrix} -E^\perp Bu(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E^\perp Df(\hat{x}, u) \\ 0 \end{bmatrix} \hat{\theta}(t) \right) + \\ &\quad Hu(t) + TDf(\hat{x}, u)\hat{\theta}(t) \\ \hat{x}(t) &= Pz(t) + F \left(\begin{bmatrix} -E^\perp Bu(t) \\ y(t) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E^\perp Df(\hat{x}, u) \\ 0 \end{bmatrix} \hat{\theta}(t) \right) \\ \dot{\hat{\theta}}(t) &= L(\hat{x}, u)(y(t) - \hat{y}(t)) \end{aligned} \quad (3.10)$$

où $\hat{x}(t)$, $\hat{\theta}(t)$ sont les estimations de $x(t)$ et θ , respectivement.

Remarque 3.2.1 *L'équation (3.10) peut être considérée comme une généralisation des observateurs adaptatifs considérés dans le cas standard et dans le cas des systèmes singuliers linéaires (voir chapitre précédent).*

Les matrices de l'observateur N, J, H, T, P, F , et le gain de matrice d'adaptation $L(\hat{x}, u)$ sont de dimensions appropriées. L'objectif est de déterminer ces matrices afin d'assurer la convergence de $\hat{x}(t)$ et $\hat{\theta}(t)$ vers $x(t)$ et θ , respectivement.

3.3 Synthèse d'un observateur adaptatif et analyse de la convergence

Considérons les deux erreurs d'estimation $e_1(t)$ et $e_2(t)$ définies comme suit :

$$\begin{aligned} e_1(t) &= x(t) - \hat{x}(t) \\ e_2(t) &= \theta - \hat{\theta}(t) \end{aligned} \quad (3.11)$$

Le théorème suivant donne les conditions d'existence de l'observateur (3.10) :

Théorème 3.3.1 *Le système (3.10) est un observateur adaptatif pour le système (3.6) s'il existe une matrice T telle que :*

$$H = TB \quad (3.12)$$

$$NTE + J \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = TA \quad (3.13)$$

$$PTE + F \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = I_n \quad (3.14)$$

sont satisfaites, et le système singulier suivant (3.15) est stable :

$$\underbrace{\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\mathbb{E}} \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\epsilon} \\ \dot{e}_1 \end{bmatrix}}_{\dot{\xi}} = \underbrace{\begin{bmatrix} N & 0 \\ P & -I \end{bmatrix}}_{\mathbb{A}} \underbrace{\begin{bmatrix} \epsilon \\ e_1 \end{bmatrix}}_{\xi} + \underbrace{\begin{bmatrix} T - J \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \\ -F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix}}_{\mathbb{B}} D \Delta g \quad (3.15)$$

$$\dot{e}_2(t) = -L(\hat{x}, u) C e_1(t) \quad (3.16)$$

avec :

$$\Delta g = f(x)\theta - f(\hat{x})\hat{\theta} \quad (3.17)$$

Preuve 3.3.1 Définissons l'erreur de transformation $\epsilon(t)$ comme suit :

$$\epsilon(t) = TE x(t) - z(t) \quad (3.18)$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}(t) = & N\epsilon(t) + \left(TA - NTE - J \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} \right) x(t) \\ & + TDf(x, u)\theta - TDf(\hat{x}, u)\hat{\theta}(t) + (TB - H)u(t) \\ & - J \left(\begin{bmatrix} E^\perp Df(x, u) \\ 0 \end{bmatrix} \theta - \begin{bmatrix} E^\perp Df(\hat{x}, u) \\ 0 \end{bmatrix} \hat{\theta}(t) \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

En utilisant les équations (3.12) et (3.13), la dynamique de l'erreur $\dot{\epsilon}(t)$ est indépendante linéairement de $x(t)$ et $u(t)$, et peut être obtenue comme suit :

$$\dot{\epsilon}(t) = N\epsilon(t) + (T - J \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix}) D \left(f(x, u)\theta - f(\hat{x}, u)\hat{\theta}(t) \right) \quad (3.20)$$

D'autre part, à partir des équations (3.10), (3.18) et (3.11), nous avons :

$$\begin{aligned} e_1(t) = & P\epsilon(t) + \left(I - PTE - F \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} \right) x(t) \\ & - F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} D \left(f(x, u)\theta - f(\hat{x}, u)\hat{\theta}(t) \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

En utilisant la condition (3.14), nous obtenons :

$$e_1(t) = P\epsilon(t) - F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} D \left(f(x, u)\theta - f(\hat{x}, u)\hat{\theta}(t) \right) \quad (3.22)$$

Pour simplifier la lecture, nous notons : $f(x, u) = f(x)$ et $f(\hat{x}, u) = f(\hat{x})$ dans le reste du chapitre.

Les équations (3.20), (3.22) et la troisième équation de (3.10), conduisent au système descripteur (3.15), qui doit être stable. Cela complète la preuve.

Maintenant, nous allons étudier la stabilité du système (3.15).

Le théorème suivant donne les conditions de stabilité de Lyapunov :

Théorème 3.3.2 *Sous l'hypothèse du théorème 3.3.1 et la condition d'excitation persistante suivante :*

$\exists \gamma_0, \gamma_1, \delta > 0$ tels que :

$$\gamma_0 I \geq \int_{t_0}^{t_0+\delta} \mathbb{B} f(x(\tau)) f(x(\tau))^T \mathbb{B}^T d\tau \geq \gamma_1 I \quad (3.23)$$

pour tout t_0 , alors le système singulier (3.15) est stable et l'erreur d'estimation des paramètres converge vers 0, si la loi d'adaptation des paramètres $\dot{e}_2(t)$ est définie comme suit :

$$\dot{e}_2(t) = -\frac{1}{\rho} f(\hat{x})^T \mathbb{B}^T X \xi(t) \quad (3.24)$$

et si la LMI suivante est satisfaite :

$$\begin{pmatrix} \mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A} + \mu \lambda & X^T \mathbb{B} \\ \mathbb{B}^T X & -\mu I \end{pmatrix} < 0 \quad (3.25)$$

Preuve 3.3.2 *Nous présenterons la preuve en trois parties :*

Partie A - Stabilité de Lyapunov :

Considérons maintenant la fonction de Lyapunov candidate suivante :

$$V = \xi^T \mathbb{E}^T X \xi + \rho e_2^T e_2 \quad (3.26)$$

avec $\mathbb{E}^T X = X^T \mathbb{E} \geq 0$.

Sa dérivée est donnée par :

$$\dot{V} = \xi^T (\mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A}) \xi + \Delta g^T \mathbb{B}^T X \xi + \xi^T X^T \mathbb{B} \Delta g + 2\rho e_2^T \dot{e}_2 \quad (3.27)$$

On peut facilement constater que :

$$\Delta g = \Delta f \theta + f(\hat{x}) e_2 \quad (3.28)$$

avec :

$$\Delta f = f(x) - f(\hat{x}) \quad (3.29)$$

ensuite \dot{V} devient :

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \xi^T (\mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A}) \xi + \theta^T \Delta f^T \mathbb{B}^T X \xi + \xi^T X^T \mathbb{B} \Delta f \theta + \\ & 2\rho e_2^T \dot{e}_2 + 2e_2^T f(\hat{x})^T \mathbb{B}^T X \xi \end{aligned} \quad (3.30)$$

En utilisant le Lemme 3.1.1, avec $\mathbb{U} = \Delta f \theta$ et $\mathbb{V} = \mathbb{B}^T X \xi$, nous obtenons l'inégalité suivante :

$$\theta^T \Delta f^T \mathbb{B}^T X \xi + \xi^T X^T \mathbb{B} \Delta f \theta \leq \mu \theta^T \Delta f^T \Delta f \theta + \frac{1}{\mu} \xi^T X^T \mathbb{B} \mathbb{B}^T X \xi \quad (3.31)$$

Dans ce cas, en utilisant (3.27), nous obtenons :

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \xi^T (\mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A}) \xi + \mu \theta^T \Delta f^T \Delta f \theta + \frac{1}{\mu} \xi^T X^T \mathbb{B} \mathbb{B}^T X \xi + \\ & 2\rho e_2^T \dot{e}_2 + 2e_2^T f(\hat{x})^T \mathbb{B}^T X \xi \end{aligned} \quad (3.32)$$

D'autre part, de la condition de Lipschitz (3.7) nous avons :

$$\Delta f^T \Delta f \leq \lambda_1^2 e_1^T e_1 \quad (3.33)$$

Et de la bornitude de la norme de θ , nous obtenons :

$$\theta^T \Delta f^T \Delta f \theta \leq \lambda_1^2 \lambda_2 e_1^T e_1 \quad (3.34)$$

Et en notant que $e_1 = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \xi$, nous avons :

$$\theta^T \Delta f^T \Delta f \theta \leq \xi^T \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1^2 \lambda_2 I \end{bmatrix} \xi \quad (3.35)$$

Ensuite, de l'équation (3.32) nous obtenons l'inégalité suivante :

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \xi^T (\mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A} + \frac{1}{\mu} X^T \mathbb{B} \mathbb{B}^T X + \mu \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1^2 \lambda_2 I \end{bmatrix}) \xi + \\ & 2\rho e_2^T \dot{e}_2 + 2e_2^T f(\hat{x})^T \mathbb{B}^T X \xi \end{aligned} \quad (3.36)$$

Maintenant, nous pouvons déterminer la loi d'adaptation à partir de cette inégalité en fixant :

$$2\rho e_2^T \dot{e}_2 + 2e_2^T f(\hat{x})^T \mathbb{B}^T X \xi = 0 \quad (3.37)$$

Pour satisfaire cette équation indépendamment de e_2 , nous devons avoir :

$$\dot{e}_2 = -\frac{1}{\rho} f(\hat{x})^T \mathbb{B}^T X \xi = -\frac{1}{\rho} f(\hat{x})^T C_1 e_1 \quad (3.38)$$

où $C_1 \in \mathbb{R}^{n_f \times n}$ et réside dans les lignes de C , ou d'une manière équivalente, il existe une matrice M de dimension appropriée, telle que $C_1 = MC$. De l'équation (3.38) nous obtenons la contrainte suivante :

$$\mathbb{B}^T X \xi = C_1 e_1 = C_1 \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix} \xi \quad (3.39)$$

ce qui implique que :

$$\mathbb{B}^T X = [0 \ C_1] \quad (3.40)$$

et en utilisant la troisième équation de (3.10) nous obtenons :

$$\dot{\hat{\theta}}(t) = L(\hat{x}, u)(y - \hat{y}) = \frac{1}{\rho} f(\hat{x})^T M (y - \hat{y}) \quad (3.41)$$

En utilisant (3.41), l'inégalité (3.36) se réduit à :

$$\dot{V} \leq \xi^T \left(\mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A} + \frac{1}{\mu} X^T \mathbb{B} \mathbb{B}^T X + \mu \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1^2 \lambda_2 I \end{bmatrix} \right) \xi \quad (3.42)$$

Pour rendre \dot{V} semi-définie négative, nous obtenons finalement l'inégalité suivante :

$$\left(\mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A} + \frac{1}{\mu} X^T \mathbb{B} \mathbb{B}^T X + \mu \lambda \right) < 0 \quad (3.43)$$

$$\text{avec : } \lambda = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1^2 \lambda_2 I \end{bmatrix}$$

Et en utilisant le complément de Schur, l'inégalité (3.43) devient :

$$\begin{bmatrix} \mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A} + \mu \lambda & X^T \mathbb{B} \\ \mathbb{B}^T X & -\mu I \end{bmatrix} < 0 \quad (3.44)$$

Partie B - Convergence de ξ :

Soit ζ tel que

$$\left(\mathbb{A}^T X + X^T \mathbb{A} + \frac{1}{\mu} X^T \mathbb{B} \mathbb{B}^T X + \mu \lambda \right) \leq -\zeta I \quad (3.45)$$

alors : $\dot{V} \leq -\zeta \xi^T \xi$

Après intégration et en utilisant le lemme de Barbalat [35], $\xi \rightarrow 0$ sous la condition (3.45).

Partie C - Convergence de e_2 :

En utilisant le résultat de la partie précédente, nous avons :

$$\int_0^\infty \dot{\xi} dt = \lim_{t \rightarrow +\infty} \xi(t) - \xi(0) = -\xi(0)$$

qui est fini. $\dot{\xi}$ est uniformément continue, donc, par le lemme de Barbalat [35], $\dot{\xi} \rightarrow 0$, cela implique que : $[\mathbb{B}f(x)\theta - \mathbb{B}f(\hat{x})\hat{\theta}] \rightarrow 0$.

Étant donné que $\hat{x} \rightarrow x$ et $\|f(x) - f(\hat{x})\| < \lambda_1 \|x - \hat{x}\|$, il est facile de prouver que : $\mathbb{B}f(x)(\theta - \hat{\theta}) \rightarrow 0$.

Cela conduit à la condition d'excitation persistante (3.23) pour garantir que $\theta - \hat{\theta} \rightarrow 0$, ce qui complète la preuve du Théorème 3.3.2.

La section suivante présente la paramétrisation de toutes les matrices de l'observateur satisfaisant toutes les contraintes et garantissant l'inégalité (3.25).

3.3.1 Paramétrisation de l'observateur adaptatif non-linéaire

Dans cette section, je présenterai une méthode pour la synthèse de l'observateur adaptatif (3.10).

Considérons les équations (3.13) et (3.14). Ces deux équations peuvent être écrites sous une forme compacte comme suit :

$$\begin{bmatrix} N & J \\ P & F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} TA \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

Cette équation a une solution si et seulement si :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \\ TA \\ I_n \end{bmatrix} = n$$

L'objectif de cette section est de paramétrer et de calculer toutes les matrices d'observation N, J, P, F, T et M .

À partir de l'équation (3.14), nous obtenons l'équation suivante :

$$[P \ F] \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = I_n \quad (3.47)$$

La condition nécessaire et suffisante pour que (3.47) ait une solution est

que

$$\text{rang} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = n \quad (3.48)$$

Maintenant, soit la matrice $R \in \mathbb{R}^{n \times n}$ une matrice arbitraire de rang plein telle que :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = \text{rang} \begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = n \quad (3.49)$$

Il existera toujours une matrice paramètre K telle que :

$$\begin{bmatrix} TE \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & -K \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

ou équivalente $TE = R - K \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix}$, puisque $\begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix}$ est de rang plein.

Par conséquent, l'équation (3.47) devient :

$$[P \ F] \begin{bmatrix} I & -K \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = I_n \quad (3.51)$$

La solution générale de (3.51) est donnée par :

$$[P \ F] = [\Sigma^+ - Z [I - \Sigma \Sigma^+]] \begin{bmatrix} I & K \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

où $\Sigma = \begin{bmatrix} R \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix}$, et Σ^+ est l'inverse généralisée de Σ qui satisfait $\Sigma \Sigma^+ \Sigma = \Sigma$.

À partir de cette solution, nous obtenons :

$$\begin{aligned} P &= [P \ F] \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} = \alpha_1 - Z\beta_1, \\ F &= [P \ F] \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} = \alpha_2 - Z\beta_2, \end{aligned} \quad (3.53)$$

où

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= \Sigma^+ \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, & \alpha_2 &= \Sigma^+ \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix}, \\ \beta_1 &= [I - \Sigma\Sigma^+] \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix} \text{ et } \beta_2 = [I - \Sigma\Sigma^+] \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.54)$$

Selon ces résultats, et puisque les erreurs sont indépendantes de P et F , nous pouvons prendre le cas particulier de $Z = 0$ à des fins pratiques, et donc $P = \alpha_1$ et $F = \alpha_2$.

Une fois les matrices P et F calculées, il reste à déterminer N , J , T et M .

À partir de $TE = R - K \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix}$, on dérive l'équation suivante :

$$[T \quad K] \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = R \quad (3.55)$$

qui a une solution car :

$$\text{rank} \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \\ R \end{bmatrix} = \text{rank} \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

Dans ce cas, une solution est

$$T = R \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, K = R \begin{bmatrix} E \\ E^\perp A \\ C \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

D'autre part, l'équation (3.13) peut être réécrite comme :

$$N(R - K \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix}) + J \begin{bmatrix} E^\perp A \\ C \end{bmatrix} = TA \quad (3.58)$$

ou

$$[N \quad K_1] \Sigma = \Theta \quad (3.59)$$

où $K_1 = J - NK$ et $\Theta = TA$.

La solution générale est donnée par :

$$\begin{bmatrix} N & K_1 \end{bmatrix} = \Theta \Sigma^+ - Z_1(I - \Sigma \Sigma^+)$$

ou

$$N = \alpha_3 - Z_1 \beta_1, K_1 = \alpha_4 - Z_1 \beta_3 \quad (3.60)$$

où :

$$\alpha_3 = \Theta \Sigma^+ \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, \alpha_4 = \Theta \Sigma^+ \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \text{ et } \beta_3 = (I - \Sigma \Sigma^+) \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

et la matrice J est donnée par :

$$J = \alpha_5 - Z_1 \beta_2 \quad (3.62)$$

avec :

$$\alpha_5 = \Theta \Sigma^- \begin{bmatrix} K \\ I \end{bmatrix}. \quad (3.63)$$

Les matrices T, P et F étant connues, le problème de conception de l'observateur se réduit à la détermination de M et Z_1 pour calculer N et J .

Afin de déterminer les matrices M et Z_1 , considérons la procédure suivante.

Tout d'abord, définissons la matrice X telle que $X = Y\mathbb{E} + \mathbb{E}^{\perp T}Q$, où : $Y = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 \\ 0 & Y_2 \end{bmatrix} > 0$, la matrice $Q = [Q_1 \quad Q_2]$ avec Q_1 et Q_2 des matrices de dimensions appropriées, et $\mathbb{E}^{\perp}\mathbb{E} = 0$.

On peut facilement voir que : $\mathbb{E}^T X = X^T \mathbb{E} = \mathbb{E}^T Y \mathbb{E} \geq 0$.

Ensuite, l'inégalité (3.25) devient :

$$\begin{pmatrix} \mathbb{A}^T Y \mathbb{E} + \mathbb{A}^T \mathbb{E}^{\perp T} Q + \mathbb{E}^T Y^T \mathbb{A} + Q^T \mathbb{E}^{\perp} \mathbb{A} + \mu \lambda & \mathbb{E}^T Y^T \mathbb{B} + Q^T \mathbb{E}^{\perp} \mathbb{B} \\ \mathbb{B}^T Y \mathbb{E} + \mathbb{B}^T \mathbb{E}^{\perp T} Q & -\mu I \end{pmatrix} < 0 \quad (3.64)$$

De l'équation (3.40), on a :

$$\begin{aligned} \mathbb{B}^T X &= [0 \quad C_1] \\ &= D^T [T^T Y_1 - [E^{\perp T} 0] J^T Y_1 - [E^{\perp T} 0] F^T Q_1 - [E^{\perp T} 0] F^T Q_2] \end{aligned} \quad (3.65)$$

ce qui conduit à :

$$Q_2^T F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} D = C_1^T \quad (3.66)$$

et

$$\left[Y_1^T T - Y_1^T J \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} - Q_1^T F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \right] D = 0 \quad (3.67)$$

Après avoir remplacé toutes les matrices de 3.64 par leurs expressions, et en tenant compte des contraintes (3.66) et (3.67), nous obtenons l'inégalité suivante :

$$\begin{pmatrix} N^T Y_1 + Y_1^T N + P^T Q_1 + Q_1^T P & P^T Q_2 - Q_1^T & 0 \\ Q_2^T P - Q_1 & -Q_2 - Q_2^T + \mu \lambda_1^2 \lambda_2 I & C_1^T \\ 0 & C_1 & -\mu I \end{pmatrix} < 0 \quad (3.68)$$

Considérons les contraintes (3.66) et (3.67) indépendamment.

L'équation (3.66) peut être écrite comme suit :

$$Q_2^T F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} D = C^T M^T \quad (3.69)$$

ou de manière équivalente

$$Q_2^T \bar{\Sigma}_1 - C^T M^T = 0 \quad (3.70)$$

avec :

$$\bar{\Sigma}_1 = F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} D \quad (3.71)$$

qui est une équation de Diophantine, correspondant à $\mathcal{C} = 0$ dans l'équation (3.2) et dans l'équation (3.3) du Théorème 3.1.1.

En utilisant les résultats du Théorème 3.1.1, on peut obtenir les expressions suivantes de M et Q_2 :

$$M^T = C^{T+} Z_2 \bar{\Sigma}_1 + (I - C^{T+} C^T) Z_3 \quad (3.72)$$

$$Q_2^T = Z_2 - (I - C^T C^{T+}) Z_2 \bar{\Sigma}_1 \bar{\Sigma}_1^+ \quad (3.73)$$

où les matrices arbitraires Z_2 et Z_3 doivent être calculées automatiquement pour assurer la convergence et la stabilité de l'observateur (3.10).

En considérant que T et F sont connues, et en utilisant l'expression de J de (3.62), l'équation (3.67) devient :

$$\begin{aligned} & \left[Y_1^T T - Y_1^T (\alpha_5 - Z_1 \beta_2) \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} - Q_1^T F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \right] D = 0 \\ & \left[Y_1^T \left(T - \alpha_5 \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \right) + \Omega_{11}^T \beta_2 \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} - Q_1^T F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \right] D = 0 \end{aligned}$$

Qui peut être écrite de manière compacte comme suit :

$$\begin{bmatrix} Y_1^T & \Omega_{11}^T & Q_1^T \end{bmatrix} \bar{\Sigma}_2 = 0 \quad (3.74)$$

$$\text{avec : } \bar{\Sigma}_2 = \begin{bmatrix} T - \alpha_5 \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \\ \beta_2 \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \\ -F \begin{bmatrix} E^\perp \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} D$$

où $\Omega_{11}^T = Y_1^T Z_1$.

Cette équation a toujours une solution donnée par :

$$\begin{bmatrix} Y_1^T & \Omega_{11}^T & Q_1^T \end{bmatrix} = \bar{Z}_1 (I - \bar{\Sigma}_2 \bar{\Sigma}_2^+) \quad (3.75)$$

avec :

$Y_1^T = \bar{Z}_1 \bar{\beta}_1$, $\Omega_{11}^T = \bar{Z}_1 \bar{\beta}_2$ et $Q_1^T = \bar{Z}_1 \bar{\beta}_3$. où

$$\bar{\beta}_1 = (I - \bar{\Sigma}_2 \bar{\Sigma}_2^+) \begin{bmatrix} I \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{\beta}_2 = (I - \bar{\Sigma}_2 \bar{\Sigma}_2^+) \begin{bmatrix} 0 \\ I \\ 0 \end{bmatrix}, \bar{\beta}_3 = (I - \bar{\Sigma}_2 \bar{\Sigma}_2^+) \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix}$$

Notre objectif est alors de déterminer les matrices \bar{Z}_1 et Z_1 afin de calculer toutes les matrices de l'observateur. Cela est réalisé par le théorème suivant :

Théorème 3.3.3 *Sous l'hypothèse 2.1.1 et la condition d'excitation persistante (3.23), l'observateur (3.10) est un observateur adaptatif pour le système (3.6) s'il existe une matrice positive $Y = \begin{bmatrix} Y_1 & 0 \\ 0 & Y_2 \end{bmatrix} > 0$, les matrices \bar{Z}_1 et Z_2 telles que la LMI suivante est vérifiée :*

$$\begin{pmatrix} (1,1) & (2,1)^T & 0 \\ (2,1) & (2,2) & C^T C^{T+} Z_2 \bar{\Sigma}_1 \\ 0 & \bar{\Sigma}_1^T Z_2^T C^+ C & -\mu I \end{pmatrix} < 0 \quad (3.76)$$

avec :

$$\begin{aligned}
 (1, 1) &= \bar{Z}_1 [\bar{\beta}_1 \alpha_3 - \bar{\beta}_2 \beta_1 + \bar{\beta}_3 P] + [\bar{\beta}_1 \alpha_3 - \bar{\beta}_2 \beta_1 + \bar{\beta}_3 P]^T \bar{Z}_1^T \\
 (2, 1) &= [Z_2 - (I - C^T C^{T+}) Z_2 \bar{\Sigma}_1 \bar{\Sigma}_1^+] P - \bar{\beta}_3^T \bar{Z}_1^T \\
 (2, 2) &= - [Z_2 - (I - C^T C^{T+}) Z_2 \bar{\Sigma}_1 \bar{\Sigma}_1^+]^T + \\
 &\quad [Z_2 - (I - C^T C^{T-}) Z_2 \bar{\Sigma}_1 \bar{\Sigma}_1^+] + \mu \lambda_1^2 \lambda_2 I
 \end{aligned} \tag{3.77}$$

Une fois que \bar{Z}_1 et Z_2 sont obtenus, Y_1 et Ω_{11} sont calculés.

Ensuite, Z_1 est calculé en utilisant : $Z_1 = Y_1^T \Omega_{11}^{-1} Y_1$.

On peut facilement voir que la LMI ne dépend pas de Z_3 en raison du produit $C^T M^T$. Par conséquent, ce paramètre peut être choisi arbitrairement.

Preuve 3.3.3 Selon le Théorème 3.3.1 et en remplaçant toutes les expressions de notre paramétrisation dans l'inégalité (3.68), on peut facilement obtenir la LMI (3.76), ce qui complète la preuve.

Les différentes étapes de la synthèse de l'observateur adaptatif peuvent être résumées dans l'algorithme suivant :

Algorithme

Sous la condition d'observabilité, les matrices de l'observateur adaptatif peuvent être obtenues en suivant les étapes suivantes :

1. Choisir la matrice R selon les conditions (3.49) et (3.56) ;
2. Choisir le paramètre ρ ;
3. Calculer T et K à partir de (3.57), P et F à partir de (3.53) ;
4. Calculer les matrices α_i , β_i et $\bar{\beta}_i$;
5. Obtenir \bar{Z}_1 et Z_2 en résolvant la LMI (3.76), et en déduire Z_1 ;
6. Calculer les matrices M , N et J .

Remarque 3.3.1 De même que pour le cas linéaire, l'observateur adaptatif proposé peut être utilisé sur le système sujet à différents bruits, suivant :

$$\begin{aligned}
 E\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + Df(x, u)\theta + w(t) \\
 y(t) &= Cx(t) + v(t)
 \end{aligned} \tag{3.78}$$

où $w(t)$ et $v(t)$ sont des bruits supposés de moyennes nulles et indépendants des autres signaux du système.

On peut facilement prouver que les erreurs d'estimation de l'état et des paramètres de l'observateur (3.10) sont également bornées, et leurs moyennes $\mathbb{E}(e_1(t))$ et $\mathbb{E}(e_2(t))$ convergent exponentiellement vers 0.

Remarque 3.3.2 *Il est clair que le cas du système linéaire peut être facilement obtenu en remplaçant la non-linéarité $Df(x, u)$ par une matrice connue D_1 et en conservant la même structure d'observateur et la même procédure de synthèse. Les résultats seront similaires à ceux présentés dans le chapitre précédent. De plus, la non-linéarité dans le modèle a un impact direct sur la partie de paramétrisation de l'observateur, ce qui conduit également à une nouvelle procédure basée sur une nouvelle formulation LMI.*

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une nouvelle approche pour la synthèse d'un observateur adaptatif pour une classe de systèmes descripteurs non linéaires a été proposée. Le problème de synthèse de l'observateur a été résolu à partir d'une solution d'une inégalité matricielle (LMI). Cette LMI a été obtenue après une paramétrisation des contraintes algébriques. Une analyse de stabilité et de convergence des erreurs d'état et de paramètres a été également présentée pour garantir l'efficacité de l'approche. Cette solution peut être très importante et utile pour des cas pratiques sur lesquels, je compte me pencher dans le futur.

4

Perspectives scientifiques

Sommaire

4.1	Introduction	111
4.2	Contexte	112
4.3	Thématiques de recherche	112
4.3.1	Observation adaptative de systèmes singuliers non linéaires	112
4.3.2	Observation et commande de systèmes interconnectés de réacteurs anaérobies	113
4.3.3	Commande et observation des systèmes nonlinéaires à paramètres variants	114
4.3.4	Etudes théoriques autour des observateurs et de la commande basée observateurs	115

4.1 Introduction

Les chapitres précédents ont présenté mes travaux menés et responsabilités assurées depuis ma nomination en tant que maître de conférences. Ces perspectives permettront d'éclairer le lecteur sur les principales thématiques de recherche à approfondir ou à explorer dans les années à venir. Ces choix sont guidés par la modeste expérience acquise ces dernières années, c'est donc tout naturellement qu'on les trouve dans la continuité de ce qui a été réalisé et présenté précédemment.

4.2 Contexte

À la suite de ma nomination en tant que maître de conférences à l'université de lorraine, j'ai intégré l'équipe Robs&Coptx (puis COSysNL et actuellement MODEL) du département CID (Contrôle, Identification et Diagnostic) du laboratoire CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy). Ayant travaillé durant ma thèse sur l'identification et la régulation adaptative ainsi que sur l'analyse et la stabilité des algorithmes utilisés, j'ai entamé mon intégration au sein de l'équipe en travaillant sur les observateurs adaptatifs des systèmes singuliers. Ce choix a été fait suite aux différents travaux des membres de l'équipe sur les systèmes singuliers ainsi que leurs présences de plus en plus accrues dans différents processus et domaines (procédés chimiques, robotiques, mécaniques, électriques et biologiques).

Dans un second temps, je me suis intéressé à d'autres thématiques toujours en lien avec la théorie de l'estimation, à savoir la synthèse d'observateurs dynamiques généralisés pour les systèmes interconnectés, les systèmes LPV et les systèmes singuliers, la modélisation, observation et commande de procédés chimiques dans les réacteurs anaérobies et dernièrement, la relaxation de conditions LMI pour l'observation de systèmes non-linéaires.

Dans la prochaine section, je présente les thématiques de recherche que je voudrais explorer ou continuer à traiter dans l'avenir.

4.3 Thématiques de recherche

4.3.1 Observation adaptative de systèmes singuliers non linéaires

Je compte continuer à travailler sur la synthèse d'observateurs adaptatifs des systèmes singuliers non-linéaires. L'intérêt pour moi est d'élargir le spectre des non-linéarités considérées.

Soit le système singulier suivant :

$$E\dot{x} = f(x, u, \omega) + g(x, u, \theta) \quad (4.1)$$

$$y = h(x, u, v) \quad (4.2)$$

Ces systèmes généralisés sont présents dans différents domaines d'application.

Pour répondre à cette problématique, je ferai appel aux différents résultats déjà obtenus sur la synthèse d'observateurs adaptatifs des systèmes singuliers

ainsi que sur la synthèse d'observateurs non-linéaires. L'objectif est donc l'estimation simultanée de l'état et des paramètres constants ou variables du système (identification) ou pour la détection de défauts.

Ces thématiques me paraissent très intéressantes. En effet, l'estimation de paramètres variants tout en estimant l'état, reste un défi assez complexe pour les systèmes singuliers et un challenge intéressant dû à leur présence dans des systèmes pratiques d'intérêt grandissant.

De plus, il me paraît important d'élargir les travaux à d'autres types de nonlinéarités. Il est par exemple intéressant de se pencher sur les nonlinéarités non-monotones, qu'elles soient dans la dynamique ou présentes au niveau des sorties. Ces nonlinéarités sont de plus en plus présentes en pratique. On les retrouve essentiellement dans la robotique, les systèmes électriques de recharge de batteries ainsi que dans les véhicules autonomes. Les premiers travaux à mener sont l'adaptation des travaux déjà présents dans la littérature pour les systèmes singuliers et essayer de proposer de nouvelles techniques de synthèse dans un second temps.

4.3.2 Observation et commande de systèmes interconnectés de réacteurs anaérobies

Cette thématique de travail pourrait être considérée comme une suite de la thèse de Mme Chaib Draa soutenue en 2017 et sera menée en collaboration avec des collègues de l'université du Luxembourg.

Les réacteurs anaérobies, également connus sous le nom de méthaniseurs sont de plus en plus utilisés, principalement en Allemagne et au Luxembourg, et devraient bientôt l'être en France. Cette tendance se concrétise également par l'utilisation de méthaniseurs locaux au niveau des quartiers ou des cités. L'idée est de considérer l'interconnexion de ces réacteurs et de proposer des observateurs et lois de commande centralisées ou décentralisées afin d'optimiser la production de biogaz, son stockage et sa distribution dans les différents circuits de chauffage ou vers des unités de production d'électricité (voir figure 4.1).

Ces systèmes sont d'actualité et présentent des problématiques très intéressantes pour la communauté automatique. Ils impliquent la prise en compte de fortes non-linéarités, de systèmes positifs (où les variables d'état sont toutes positives), et de systèmes interconnectés. L'objectif est de dé-

velopper des méthodes et des techniques d'observation et de surveillance (diagnostic, pronostic) avancées pour ces systèmes, ainsi que des stratégies de commande efficaces pour maximiser la production de biogaz et optimiser sa distribution vers les différentes applications (utilisation pour le chauffage, production d'électricité, stockage...).

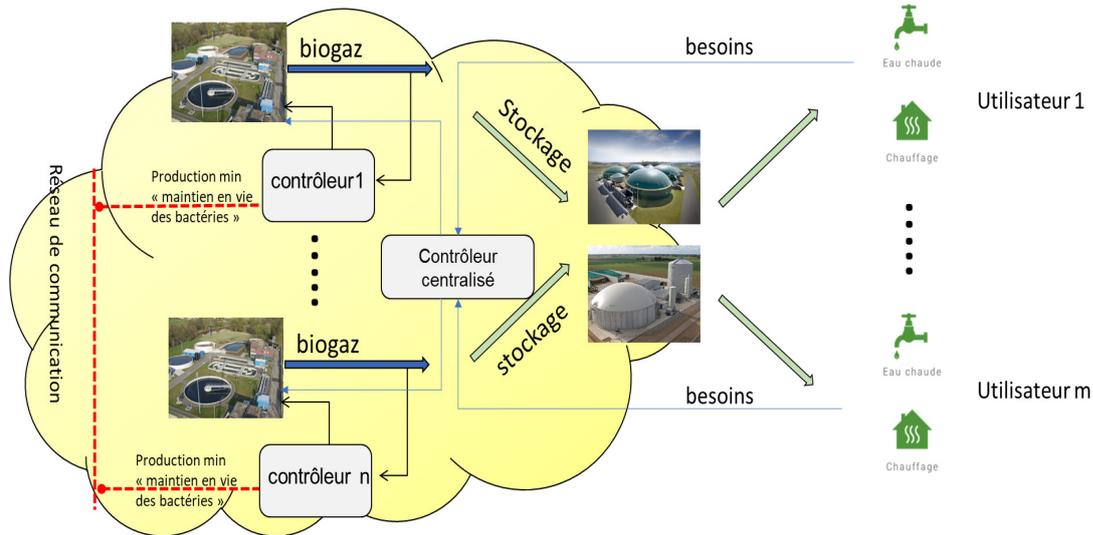


FIGURE 4.1 – Réseau de méthaniseurs

Les travaux de recherche dans cette direction visent à contribuer au développement et à l'expansion de l'utilisation des réacteurs anaérobies locaux en fournissant des outils et des approches novatrices pour l'observation et la commande de ces systèmes interconnectés. Cela permettra d'optimiser l'efficacité énergétique, de favoriser l'utilisation des énergies renouvelables et de promouvoir une gestion durable des ressources énergétiques. Les résultats obtenus dans ce domaine pourraient avoir un impact significatif sur l'industrie de la méthanisation et contribuer à la transition vers une économie plus verte et plus durable.

4.3.3 Commande et observation des systèmes nonlinéaires à paramètres variants

Cette thématique sera menée en collaboration avec une équipe du CENIDET (Centre National de Recherche Technologique) du Mexique. Depuis quelques années, plusieurs thèses ont été codirigées entre collègues de l'équipe, dont moi-même, et des collègues du CENIDET. L'objectif est de consolider cette collaboration existante et continuer à travailler autour des

problématiques de l'observation et de la commande des systèmes non-linéaires à paramètres variants. Il est important à mes yeux que ces travaux soient validés sur des plateformes expérimentales existantes ou à mettre en place (smart grids, échangeurs thermiques...).

Les échanges et le travail sont continus entre les deux équipes. Des collègues du CENIDET sont annuellement invités dans nos locaux et nous travaillerons sur la possibilité de monter des projets d'excellence conjointement.

4.3.4 Etudes théoriques autour des observateurs et de la commande basée observateurs

En plus des différents éléments cités ci-dessus, il m'est très important de continuer à mener des études théoriques autour des observateurs et de la commande basée observateurs. Ceci se manifeste par des travaux sur la réduction d'ordre des observateurs et l'étude de leur robustesse par l'exploration de leurs caractéristiques fréquentielles ainsi que par l'évaluation de la possibilité d'adaptation de différentes paramétrisations possibles, type « Paramétrisation de Youla », afin d'assurer un rejet optimal des effets des perturbations sur l'estimation.

Je voudrais également continuer les travaux menés sur la relaxation des conditions LMI et améliorer leurs faisabilités pour la synthèse d'observateurs et de lois de commande basées observateurs.

Bibliographie

- [1] Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Harouna Souley ALI. “Adaptive observer design for a class of nonlinear descriptor systems”. In : *Automatica* 155 (2023), p. 111143. ISSN : 0005-1098. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2023.111143>. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109823003035>.
- [2] Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA, Madjid HADDAD et Ali ZEMOUCHE. “LMI-Based \mathcal{H}_∞ observer design for nonlinear Lipschitz system”. In : *22nd IFAC World Congress 2023*. Yokohama, Japan, juill. 2023. URL : <https://hal.science/hal-04016027>.
- [3] Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA, Madjid HADDAD et Ali ZEMOUCHE. “State estimation of longitudinal vehicle model using \mathcal{H}_∞ LMI-based nonlinear observer”. In : *31st Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2023*. Limassol, Cyprus, juin 2023. URL : <https://hal.science/hal-04080686>.
- [4] Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA et Ali ZEMOUCHE. “Design of a nonlinear observer for a class of locally Lipschitz systems by using input-to-state stability : An LMI approach”. In : *62nd IEEE Conference on Decision and Control, CDC 2023*. Marina Bay Sands, Singapore, déc. 2023. URL : <https://hal.science/hal-04171967>.
- [5] Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA et Ali ZEMOUCHE. “Observer-Based Stabilization of Lipschitz Nonlinear Systems by Using a New Matrix-Multiplier-Based LMI Approach”. In : *IEEE Control Systems Letters* 7 (2023), p. 3723-3728. DOI : [10.1109/LCSYS.2023.3341549](https://doi.org/10.1109/LCSYS.2023.3341549).
- [6] Shivaraj MOHITE, Marouane ALMA et Ali ZEMOUCHE. “A New Matrix Multiplier-Based LMI Approach for Nonlinear Observers”. In : *2022 30th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. 2022, p. 91-96. DOI : [10.1109/MED54222.2022.9837273](https://doi.org/10.1109/MED54222.2022.9837273).

- [7] Ali ZEMOUCHE et Rajesh RAJAMANI. “Observer Design for Non-Globally Lipschitz Nonlinear Systems Using Hilbert Projection Theorem”. In : *IEEE Control Systems Letters* 6 (2022), p. 2581-2586.
- [8] Abraham Jashiel PEREZ ESTRADA. “Observateurs adaptatifs des systèmes LPV : application à la commande et au diagnostic”. 2020LORR0069. Thèse de doct. 2020. URL : <http://www.theses.fr/2020LORR0069/document>.
- [9] Khadidja CHAIB DRAA, Ali ZEMOUCHE, Marouane ALMA, Holger VOOS et Mohamed DAROUACH. “A discrete-time nonlinear state observer for the anaerobic digestion process”. In : *International Journal of Robust and Nonlinear Control* 29.5 (mars 2019), p. 1279-1301. DOI : [10.1002/rnc.4434](https://doi.org/10.1002/rnc.4434). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02054242>.
- [10] Khadidja CHAIB DRAA, Ali ZEMOUCHE, Marouane ALMA, Holger VOOS et Mohamed DAROUACH. “A nonlinear observer-based trajectory tracking method applied to an anaerobic digestion process”. In : *Journal of Process Control* 75 (mars 2019), p. 120-135. DOI : [10.1016/j.jprocont.2018.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2018.12.001). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02054280>.
- [11] Khadidja CHAIB DRAA, Ali ZEMOUCHE, Marouane ALMA, Holger VOOS et Mohamed DAROUACH. “Nonlinear observer-based control with application to an anaerobic digestion process”. In : *European Journal of Control* 45 (jan. 2019), p. 74-84. DOI : [10.1016/j.ejcon.2018.09.012](https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2018.09.012). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01903329>.
- [12] K. CHAIB-DRAA, A. ZEMOUCHE, M. ALMA, H. VOOS et M. DAROUACH. “A nonlinear observer-based trajectory tracking method applied to an anaerobic digestion process”. In : *Journal of Process Control* 75 (2019), p. 120-135.
- [13] Abraham Jashiel PÉREZ-ESTRADA, Gloria Lilia OSORIO-GORDILLO, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Adaptive observer design for LPV systems”. In : *3rd IFAC Workshop on Linear Parameter Varying Systems, LPVS 2019*. Published in IFAC-PapersOnLine, 52(28) :140-145, 2019. Eindhoven, Netherlands, nov. 2019. DOI : [10.1016/j.ifacol.2019.12.361](https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.12.361). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02977430>.

-
- [14] Marouane ALMA, Harouna SOULEY ALI et Mohamed DAROUACH. “Adaptive observer design for linear descriptor systems”. In : *American Control Conference, ACC 2018*. Milwaukee, WI, United States, juin 2018. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01742221>.
- [15] Abraham-Jashiel PÉREZ-ESTRADA, Gloria-Lilia OSORIO-GORDILLO, Marouane ALMA, Mohamed DAROUACH et Víctor-Hugo OLIVARES-PEREGRINO. “ H_∞ generalized dynamic unknown inputs observer design for discrete LPV systems. Application to wind turbine”. In : *European Journal of Control* 44 (nov. 2018), p. 40-49. DOI : [10.1016/j.ejcon.2018.09.013](https://doi.org/10.1016/j.ejcon.2018.09.013). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01933913>.
- [16] Serket QUINTANAR-GUZMAN, Somasundar KANNAN, Holger VOOS, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Adaptive control for a lightweight robotic arm actuated by a shape memory alloy wire”. In : *16th International Conference on New Actuators, ACTUATOR 2018*. Bremen, Germany, juin 2018. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01937155>.
- [17] Serket QUINTANAR-GUZMAN, Somasundar KANNAN, Holger VOOS, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Experimental validation of adaptive control for a shape memory alloy actuated lightweight robotic arm”. In : *Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, ASME SMASIS 2018*. San Antonio, United States, sept. 2018. DOI : [10.1115/SMASIS2018-8165](https://doi.org/10.1115/SMASIS2018-8165). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01937172>.
- [18] Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA, Ali ZEMOUCHE et Mohamed DAROUACH. “LMI-based \mathcal{H}_∞ nonlinear state observer design for anaerobic digestion model”. In : *25th Mediterranean Conference on Control and Automation, MED 2017*. Valletta, Malta, juill. 2017. DOI : [10.1109/med.2017.7984196](https://doi.org/10.1109/med.2017.7984196). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01567357>.
- [19] Serket QUINTANAR-GUZMAN, Somasundar KANNAN, Holger VOOS, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “Observer design for lightweight robotic arm actuated by Shape Memory Alloy (SMA) wire”. In : *14th International Workshop on Advanced Control and Diagnosis, ACD*

2017. Bucharest, Romania, nov. 2017. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02133912>.
- [20] Ali ZEMOUCHE, Rajesh RAJAMANI, Gridsada PHANOMCHOENG, Bou-laid BOULKROUNE, Hugues RAFARALAHY et Michel ZASADZINSKI. “Circle criterion-based \mathcal{H}_∞ observer design for Lipschitz and monotonic nonlinear systems—Enhanced LMI conditions and constructive discussions”. In : *Automatica* 85 (2017), p. 412-425.
- [21] Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Marouane ALMA et Mohamed DAROUACH. “Invariant observer applied to anaerobic digestion model”. In : *21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. Berlin, Germany, sept. 2016. DOI : [10.1109/ETFA.2016.7733706](https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733706). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01418765>.
- [22] Nan GAO, Mohamed DAROUACH, Marouane ALMA et Holger VOOS. “New unified H_∞ dynamic observer design for linear systems with unknown inputs”. In : *Automatica* 65 (mars 2016), p. 43-52. DOI : [10.1016/j.automatica.2015.10.052](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.10.052). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01253328>.
- [23] A ZEMOUCHE, Mohamed ZERROUGUI, Bou-laid BOULKROUNE, Fazia BEDOUHENE, H SOULEY-ALI et Michel ZASADZINSKI. “ \mathcal{H}_∞ observer-based stabilization for Lipschitz nonlinear systems”. In : *2016 European Control Conference (ECC)*. IEEE. 2016, p. 2017-2022.
- [24] Marouane ALMA, Harouna SOULEY ALI, Mohamed DAROUACH et Nan GAO. “An H_∞ observer design for linear descriptor systems”. In : *American Control Conference, ACC 2015*. Chicago, IL, United States, juill. 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01141204>.
- [25] Khadidja CHAIB DRAA, Holger VOOS, Mohamed DAROUACH et Marouane ALMA. “A formal modeling framework for anaerobic digestion systems”. In : *17th International Conference on Modelling and Simulation, UKSim 2015*. Cambridge, United Kingdom, mars 2015. DOI : [10.1109/UKSim.2015.68](https://doi.org/10.1109/UKSim.2015.68). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01572204>.

-
- [26] Nan GAO. “Observateurs dynamiques et commande des systèmes : application aux systèmes de grande dimension”. 2015LORR0081. Thèse de doct. 2015. URL : <http://www.theses.fr/2015LORR0081/document>.
- [27] Nan GAO, Mohamed DAROUACH, Marouane ALMA et Holger VOOS. “Decentralized dynamic-observer-based control for large scale nonlinear uncertain systems”. In : *American Control Conference, ACC 2015*. Chicago, IL, United States, juill. 2015. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01141196>.
- [28] Marouane ALMA et Mohamed DAROUACH. “Adaptive observers design for a class of linear descriptor systems”. In : *Automatica* 50.2 (fév. 2014), p. 578-583. DOI : [10.1016/j.automatica.2013.11.036](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.11.036). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00922599>.
- [29] Michelle CHONG, Romain POSTOYAN, Dragan NEŠIĆ, Levin KUHLMANN et Andrea VARSAVSKY. “A robust circle criterion observer with application to neural mass models”. In : *Automatica* 48.11 (2012), p. 2986-2989.
- [30] Guang-Ren DUAN. *Analysis and Design of Descriptor Linear Systems*. T. 23. Jan. 2010. ISBN : 978-1-4419-6396-3. DOI : [10.1007/978-1-4419-6397-0](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6397-0).
- [31] Ali ZEMOUCHE et Mohamed BOUTAYEB. “A unified \mathcal{H}_∞ adaptive observer synthesis method for a class of systems with both Lipschitz and monotone nonlinearities”. In : *Systems & Control Letters* 58.4 (2009), p. 282-288.
- [32] P LIU, Q ZHANG, X YANG et L YANG. “Passivity and Optimal Control of Descriptor Biological Complex Systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 53.Special Issue (jan. 2008), p. 122-125. ISSN : 0018-9286. DOI : [10.1109/TAC.2007.911341](https://doi.org/10.1109/TAC.2007.911341).
- [33] G. BESANÇON, J. DE LEON-MORALES et O. HUERTA-GUEVARA. “On adaptive observers for state affine systems”. In : *International Journal of Control* 79.6 (2006), p. 581-591. DOI : [10.1080/00207170600552766](https://doi.org/10.1080/00207170600552766). eprint : <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00207170600552766>. URL : <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207170600552766>.
- [34] Wen-Hua CHEN. “Disturbance observer based control for nonlinear systems”. In : *IEEE/ASME transactions on mechatronics* 9.4 (2004), p. 706-710.

- [35] H. K. KHALIL. *Nonlinear systems; 3rd ed.* The book can be consulted by contacting : PH-AID : Wallet, Lionel. Upper Saddle River, NJ : Prentice-Hall, 2002. URL : <https://cds.cern.ch/record/1173048>.
- [36] Q. ZHANG. “Adaptive observer for multiple-input-multiple-output (MIMO) linear time-varying systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 47.3 (mars 2002), p. 525-529. ISSN : 0018-9286. DOI : [10.1109/9.989154](https://doi.org/10.1109/9.989154).
- [37] Murat ARCAK et Petar KOKOTOVIĆ. “Nonlinear observers : a circle criterion design and robustness analysis”. In : *Automatica* 37.12 (2001), p. 1923-1930. ISSN : 0005-1098. DOI : [https://doi.org/10.1016/S0005-1098\(01\)00160-1](https://doi.org/10.1016/S0005-1098(01)00160-1). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005109801001601>.
- [38] G BESANÇON. “Remarks on nonlinear adaptive observer design”. In : *Systems and Control Letters* 41.4 (2000), p. 271-280. ISSN : 0167-6911. DOI : [10.1016/S0167-6911\(00\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0167-6911(00)00065-7). URL : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167691100000657>.
- [39] M. DAROUACH et M. BOUTAYEB. “Design of observers for descriptor systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 40.7 (juill. 1995), p. 1323-1327. ISSN : 0018-9286. DOI : [10.1109/9.400467](https://doi.org/10.1109/9.400467).
- [40] M. HOU et P.C. MULLER. “Design of a class of Luenberger observers for descriptor systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 40.1 (1995), p. 133-136. DOI : [10.1109/9.362885](https://doi.org/10.1109/9.362885).
- [41] R. MARINO et P. TOMEI. “Adaptive observers with arbitrary exponential rate of convergence for nonlinear systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 40.7 (juill. 1995), p. 1300-1304. ISSN : 0018-9286. DOI : [10.1109/9.400471](https://doi.org/10.1109/9.400471).
- [42] Y. UETAKE. “Adaptive observer for continuous descriptor systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 39.10 (oct. 1994), p. 2095-2100. ISSN : 0018-9286. DOI : [10.1109/9.328803](https://doi.org/10.1109/9.328803).
- [43] M. DAROUACH et M. ZASADZINSKI. “Data reconciliation in generalized linear dynamic systems”. In : *AIChE Journal* 37.2 (1991), p. 193-201. ISSN : 1547-5905. DOI : [10.1002/aic.690370205](https://doi.org/10.1002/aic.690370205). URL : <http://dx.doi.org/10.1002/aic.690370205>.

-
- [44] L. DAI. *Singular Control Systems*. Secaucus, NJ, USA : Springer-Verlag New York, Inc., 1989. ISBN : 0387507248.
- [45] G. BASTIN et M.R. GEVERS. “Stable adaptive observers for nonlinear time-varying systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 33.7 (juill. 1988), p. 650-658. ISSN : 0018-9286. DOI : [10.1109/9.1273](https://doi.org/10.1109/9.1273).
- [46] F.L. LEWIS. “A survey of linear singular systems”. English. In : *Circuits, Systems and Signal Processing* 5 (1 1986), p. 3-36. ISSN : 0278-081X. DOI : [10.1007/BF01600184](https://doi.org/10.1007/BF01600184). URL : <http://dx.doi.org/10.1007/BF01600184>.
- [47] D. COBB. “Descriptor variable systems and optimal state regulation”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 28.5 (1983), p. 601-611. DOI : [10.1109/TAC.1983.1103283](https://doi.org/10.1109/TAC.1983.1103283).
- [48] DANIEL COBB. “Feedback and pole placement in descriptor variable Systems†”. In : *International Journal of Control* 33.6 (1981), p. 1135-1146. DOI : [10.1080/00207178108922981](https://doi.org/10.1080/00207178108922981). eprint : <https://doi.org/10.1080/00207178108922981>. URL : <https://doi.org/10.1080/00207178108922981>.
- [49] G. VERGHESE, B. LEVY et T. KAILATH. “A generalized state-space for singular systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 26.4 (1981), p. 811-831. DOI : [10.1109/TAC.1981.1102763](https://doi.org/10.1109/TAC.1981.1102763).
- [50] E. YIP et R. SINCOVEC. “Solvability, controllability, and observability of continuous descriptor systems”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 26.3 (1981), p. 702-707. DOI : [10.1109/TAC.1981.1102699](https://doi.org/10.1109/TAC.1981.1102699).
- [51] J. K. BAKSALARY et R. KALA. “The matrix equation $AX - YB = C$ ”. In : *Linear Algebra and its Applications* 25 (1979), p. 41-43. ISSN : 0024-3795. DOI : [https://doi.org/10.1016/0024-3795\(79\)90004-1](https://doi.org/10.1016/0024-3795(79)90004-1). URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0024379579900041>.
- [52] David G. LUENBERGER. “Non-linear descriptor systems”. In : *Journal of Economic Dynamics and Control* 1.3 (1979), p. 219-242. URL : <http://ideas.repec.org/a/eee/dyncon/v1y1979i3p219-242.html>.
- [53] D. LUENBERGER. “Dynamic equations in descriptor form”. In : *IEEE Transactions on Automatic Control* 22.3 (1977), p. 312-321. DOI : [10.1109/TAC.1977.1101502](https://doi.org/10.1109/TAC.1977.1101502).