جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

كلية العلوم والتقنيات فاس
FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE FÈS

N° d'ordre : 49/2023

Centre des Etudes Doctorales : Sciences et Techniques et Sciences Médicales
Formation Doctorale : Sciences de l'ingénieur, Sciences Physiques, Mathématiques et Informatique
Discipline : Sciences de l'Ingénieur
Spécialité* : Mécatronique
Laboratoire : Techniques Industrielles

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

Développement d'une méthode de diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides

Préparée par : Mr ABBOUDI Ayman

Soutenue le 08/07/2023 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
HAMEDI L'habib	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Président
DEROUICH Aziz	PES	Ecole Supérieure de Technologie de Fès	Rapporteur & Examinateur
MOUHSEN Ahmed	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Settat	Rapporteur & Examinateur
SOULHI Aziz	PES	Ecole Nationale Supérieure des Mines de Rabat	Rapporteur & Examinateur
ENNADI Abdelali	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Examinateur
BELMAJDOUB Fouad	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Directeur de thèse

Remerciements

Cette page est la dernière écrite dans cette thèse. Toutefois, sa grandeur et sa portée transcendante la propulsent en tête de file, à la place d'honneur qu'elle mérite.

Tel un ballet harmonieux, la réussite de ce travail est le fruit de la collaboration et de la contribution de ces âmes valeureuses qui m'ont soutenu, encouragé et accompagné. A mon sens, la finalité d'une thèse ne réside pas seulement dans la valeur scientifique qu'elle apporte, mais aussi dans le renforcement des liens humains et de l'esprit d'équipe qu'elle engendre. Fier d'être entouré d'un tel cercle de personnes, j'ai appris de leur persévérance, de leur ténacité et de leur dévouement, une leçon inestimable de solidarité et de convivialité.

Je commence par Monsieur BELMAJDOUB Fouad, qui était plus qu'un professeur d'enseignement supérieur mais également un coach qui m'a motivé, orienté et encadré. Je tiens à le remercier chaleureusement pour ses conseils, son engagement et sa disponibilité, qui ont été autant de phares éclairant le chemin de ma réussite.

Je remercie également Monsieur El HAMMOUMI Mohammed, directeur de notre laboratoire « Techniques Industrielles » pour ses efforts et son aide.

Mes remerciements vont aussi aux membres de jury qui ont accepté de sacrifier de leurs précieux temps pour évaluer cette thèse. J'adresse mes remerciements à :

- Professeur HAMEDI L'habib;
- Professeur MOUHSEN Ahmed;
- Professeur SOULHI Aziz;
- Professeur DEROUICH Aziz;
- Professeur ENNADI Abdelali;

Je termine par ceux que les mots ne peuvent pas les décrire et que les remerciements ne peuvent pas les suffire, je pense à mes parents, mon frère et ma sœur. Leur amour et leur encouragement étaient les piliers inébranlables de ma progression, et je ne saurais assez les remercier pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Je suis éternellement reconnaissant pour leur présence dans ma vie et pour tout l'amour qu'ils m'ont donné.

Résumé

La technologie est en plein évolution et les systèmes qui lui sont associés sont de plus en plus sophistiqués. La plupart des systèmes actuels sont des systèmes dynamiques qui combinent des aspects continus et discrets, et qui réagissent dans des différentes disciplines, telles que la mécanique, l'électrique et l'hydraulique. Une complexité qui nécessite une couche de diagnostic puissante capable de détecter les erreurs dans tout type de dynamiques et dans tous les domaines.

L'objectif de ce travail est l'élaboration d'une nouvelle méthode de diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides apte à détecter et isoler les défauts capteurs, et en même temps capable d'identifier et d'anticiper les dégradations du système avant qu'elles se manifestent en défauts.

Nous avons utilisé le Bond Graph hybride comme outil de modélisation grâce à son langage unifié et sa capacité à détecter les erreurs du modèle. Dans le cadre de notre approche de diagnostic, nous avons également utilisé les observateurs comme capteurs analytiques, leur but était d'estimer l'état du système et remplacer les capteurs physiques.

Par ailleurs, nous avons intégré les cartes de contrôles dans le processus d'anticipation des défauts. Dès qu'une petite dégradation de performance est détectée, le capteur concerné est identifié avant que l'erreur ne se présente réellement. Les cartes de contrôles utilisent les résidus issus des observateurs pour détecter les fluctuations anormales et avertir de la dégradation du capteur.

La méthode proposée se base sur un algorithme intelligent qui rassemble les données des différents outils, les analyse et les exploite pour prendre la bonne décision. Une décision qui aidera à son tour dans le développement de la fiabilité, la sécurité et la maintenabilité des systèmes.

Mots clés : Systèmes mécatroniques hybrides ; Diagnostic ; Bond Graph ; Observateurs ; Cartes de contrôle.

Abstract

The technology is in full evolution and the systems associated with it are more and more sophisticated. Most of today's systems are dynamic systems that combine continuous and discrete aspects, and react in different disciplines, such as mechanical, electrical, and hydraulic. A complexity that requires a robust diagnostic layer able to detect errors in any type of dynamic and any type of domain.

The aim of this work is the development of a new diagnosis method for hybrid mechatronic systems able to detect and isolate sensor faults and at the same time in a position to identify and anticipate system degradations before the occurrence of faults.

We have used hybrid Bond Graph as a modeling tool thanks to its unified language and its capability to detect model errors. Observers have also been used as analytical sensors; their purpose has been the estimation of the system state and the replacement of physical sensors.

Furthermore, we have integrated control charts into the fault anticipation process. Once a small performance degradation is detected, the affected sensor is identified before the occurrence of the fault. The control charts use the residuals from observers to detect abnormal fluctuations and warn of sensor degradation.

The proposed method is based on an intelligent algorithm that gathers the data from the different tools, analyzes it and uses it to make the right decision. A decision that will in turn help in the development of reliability, safety, and maintainability of systems.

Keywords: Hybrid mechatronic systems; Diagnosis; Bond Graph; Observers; Control charts.

Sommaire

LISTE DES TABLEAUX **11**

LISTE DES ABREVIATIONS **12**

INTRODUCTION GENERALE **13**

CHAPITRE 1 : PRESENTATION DES SYSTEMES MECATRONIQUES HYBRIDES **15**

INTRODUCTION **16**

I LES SYSTEMES MECATRONIQUES **17**

I.1 DEFINITIONS LIEES A LA MECATRONIQUE 17
I.2 DIFFERENTES APPLICATIONS DE LA MECATRONIQUE 19

II LES SYSTEMES DYNAMIQUES HYBRIDES (SDH) **20**

II.1 SYSTEMES CONTINUS 20
II.2 SYSTEMES A EVENEMENTS DISCRETS 21
II.3 SYSTEMES DYNAMIQUES HYBRIDES 22
II.4 LES DIFFERENTES CLASSES DES SDH 23
II.4.1 Systèmes continus commandés par un système à événements discrets (systèmes à commutations) *23*
II.4.2 Systèmes continus qui comportent des discontinuités *24*
II.4.3 Systèmes comportant des éléments discrets et continus *25*
II.4.4 Systèmes continus pour lesquels des dynamiques discrètes sont introduites par abstraction *26*
II.4.5 Systèmes discrets pour lesquels des dynamiques continues sont introduites par abstraction *28*

III ANALYSE DE LA TENDANCE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE DES SYSTEMES **29**

III.1 CYCLE DE VIE D'UN AXE DE RECHERCHE 29
III.2 ANALYSE DE LA TENDANCE DES SYSTEMES MECATRONIQUES HYBRIDES 30

CONCLUSION **32**

CHAPITRE 2 : MODELISATION DES SYSTEMES MECATRONIQUES HYBRIDES **33**

INTRODUCTION **34**

I MODELISATION DES SYSTEMES MECATRONIQUES **35**

I.1 SYSML 35
I.2 MODELICA 36
I.3 SIMULINK/STATEFLOW 37
I.4 COMSOL MULTIPHYSICS 37
I.5 BOND-GRAPH 38

II MODELISATION DES SDH **41**

II.1 LES PRINCIPALES APPROCHES DE MODELISATION DES SDH 41
II.1.1 Abstraction en un modèle purement continu *41*
II.1.2 Abstraction en un modèle purement événementiel *41*
II.1.3 Modélisation mixte *42*
II.2 LES AUTOMATES HYBRIDES 43
II.2.1 Les automates finis déterministes *43*
II.2.2 Les automates hybrides *44*

III OUTIL PROPOSE POUR LA MODELISATION DES SYSTEMES MECATRONIQUES HYBRIDES **45**

III.1 BOND GRAPH HYBRIDE 46

CONCLUSION **47**

CHAPITRE 3 : DIAGNOSTIC DES SYSTEMES DYNAMIQUES **48**

INTRODUCTION **49**

I TERMES GENERAUX **50**

I.1 DEFINITIONS 50

II DIAGNOSTIC **51**

II.1 PROCEDURE DE DETECTION ET DE LOCALISATION DE DEFAUTS 51

II.1.1 Détection *52*

II.1.2 Isolation *52*

II.1.3 Identification *53*

III METHODES DE DIAGNOSTIC **53**

III.1 METHODES SANS MODELE 54

III.1.1 Redondance matérielle : *55*

III.1.2 Seuillage : *55*

III.1.3 Traitement statistique : *56*

III.1.4 Analyse fréquentielle (Filtrage) : *57*

III.1.5 Capteurs spécifiques (Capteurs-Détecteurs) : *57*

III.1.6 Réseaux de neurones artificiels : *58*

III.1.7 Systèmes d'inférence flous : *59*

III.1.8 Les systèmes experts (le raisonnement à partir des cas) : *59*

III.1.9 Reconnaissance de formes : *60*

III.2 METHODES AVEC MODELE 61

III.2.1 Estimation paramétrique : *61*

III.2.2 Estimation d'état : *63*

CONCLUSION **67**

CHAPITRE 4 : DIAGNOSTIC DES SYSTEMES MECATRONIQUES HYBRIDES **68**

INTRODUCTION **69**

I DETECTION ET LOCALISATION DES DEFAUTS PAR OBSERVATEURS **70**

I.1 CONCEPT DE DETECTION ET DE LOCALISATION 70

I.1.1 Identification du mode *70*

I.1.2 Détection et isolation des défauts *72*

II INTEGRATION DE L'AUTOMATE HYBRIDE ET FIABILISATION DE DETECTION DE MODES **73**

II.1 INTRODUCTION 73

II.2 DEVELOPPEMENT DE LA METHODE 74

II.3 EXEMPLE D'APPLICATION 77

II.3.1 Description du système *77*

II.3.2 Modélisation du système *78*

II.3.3 Conception d'observateur *80*

II.3.4 Résultats des simulations *81*

II.4 CONCLUSION 85

III OPTIMISATION DE NOMBRES D'OBSERVATEURS ET MODELISATION PAR BOND GRAPH **85**

III.1 INTRODUCTION 85

III.2 DEVELOPPEMENT DE LA METHODE 85

III.2.1 Diagnostic des erreurs du modèle *85*

III.2.2 Identification de défauts *87*

III.2.3 Identification des modes ... 87
III.3 EXEMPLE D'APPLICATION ... 89
III.3.1 Description du système ... 89
III.3.2 Modélisation du système ... 90
III.3.3 Conception d'observateur ... 93
III.3.4 Résultats des simulations ... 96
III.4 CONCLUSION ... 101
IV INTEGRATION DES SEUILS DYNAMIQUES POUR UN DIAGNOSTIC PLUS FIABLE ... 101
IV.1 INTRODUCTION ... 101
IV.2 DEVELOPPEMENT DE LA METHODE ... 102
IV.2.1 Détection des défauts ... 102
IV.2.2 Identification des modes ... 103
IV.3 EXEMPLE D'APPLICATION ... 104
IV.3.1 Description du système ... 104
IV.3.2 Modélisation du système ... 105
IV.3.3 Conception d'observateur ... 108
IV.3.4 Résultats des simulations ... 110
IV.4 CONCLUSION ... 113
CONCLUSION ... 114
CHAPITRE 5 : DETECTION DES DEGRADATIONS CAPTEURS ... 115
INTRODUCTION ... 116
I ANTICIPATION DES DEFAUTS ET IDENTIFICATION DES DEGRADATIONS ... 117
I.1 DEVELOPPEMENT DE LA METHODE ... 117
I.1.1 Identification de mode ... 117
I.1.2 Carte de contrôle ... 117
I.1.3 Méthode de détection de la dégradation ... 119
I.2 EXEMPLE D'APPLICATION ... 120
I.2.1 Description du système ... 120
I.2.2 Modélisation du système ... 121
I.2.3 Résultats des simulations ... 122
CONCLUSION ... 126
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES ... 127
BIBLIOGRAPHIE ... 128

Liste des figures

FIGURE 1: MULTIDISCIPLINARITE DE LA MECATRONIQUE 19
FIGURE 2: OMNIPRESENCE DE LA MECATRONIQUE DANS PLUSIEURS DOMAINES 20
FIGURE 3: EVOLUTION D'UNE VARIABLE CONTINUE 21
FIGURE 4: EVOLUTION D'UNE VARIABLE DISCRETE 22
FIGURE 5: ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DYNAMIQUE HYBRIDE 23
FIGURE 6: EVOLUTION DE LA PARTIE CONTINUE ET DISCRETE DU SYSTEME 24
FIGURE 7: EVOLUTION DE LA POSITION DE LA BALLE EN REBONDISSEMENT 25
FIGURE 8: CIRCUIT ELECTRIQUE HYBRIDE 25
FIGURE 9: EVOLUTION DE LA TENSION V_L 26
FIGURE 10: SYSTEME HYDRAULIQUE 27
FIGURE 11: VANNE PNEUMATIQUE 27
FIGURE 12: ARCHITECTURE GENERIQUE D'UN SYSTEME DE PRODUCTION 29
FIGURE 13: CYCLE DE VIE D'UN AXE DE RECHERCHE 29
FIGURE 14: TENDANCE DE NOMBRE D'ARTICLES TRAITANT LES SYSTEMES MECATRONIQUE ET LES SDH 30
FIGURE 15: TENDANCE DE NOMBRE D'ARTICLES TRAITANT LES SYSTEMES MECATRONIQUES HYBRIDES 31
FIGURE 16: DIAGRAMMES SYSML 36
FIGURE 17: LIAISON ENTRE MATLAB, SIMULINK ET STATEFLOW 37
FIGURE 18: ECHANGE DE PUISSANCE ENTRE DEUX ELEMENTS 39
FIGURE 19: EXEMPLE D'UNE MODELISATION D'UN SYSTEME PAR BOND-GRAPH 41
FIGURE 20: MODELE D'UN AUTOMATE FINI 43
FIGURE 21: MODELE D'UN AUTOMATE HYBRIDE SIMPLE 45
FIGURE 22: BOND GRAPH HYBRIDE 46
FIGURE 23 : QUADRIPTYQUE : FAUTE/DEFAUT/DEFAILLANCE/PANNE 50
FIGURE 24: FONCTIONS DE LA FDI 51
FIGURE 25: METHODES DE DIAGNOSTIC DES SYSTEMES DYNAMIQUES 54
FIGURE 26: PROCEDURE DE DETECTION DE DEFAUT PAR ESTIMATION PARAMETRIQUE 63
FIGURE 27: BLOC D'OBSERVATEURS POUR LA DETECTION DES MODES 71
FIGURE 28: BLOC D'OBSERVATEURS POUR LA DETECTION DE DEFAUTS 73
FIGURE 29: LA PLAGE INCONNUE 74
FIGURE 30: ANALYSE DE CAS 75
FIGURE 31: INTEGRATION DES CONTRAINTES DE TEMPS 75
FIGURE 32: IMPACT DU DEFAUT SUR LE TEMPS DE MODE 76
FIGURE 33: SYSTEME HYDRAULIQUE A TROIS RESERVOIRS 78
FIGURE 34: AUTOMATE HYBRIDE REPRESENTATIF DU SYSTEME 79
FIGURE 35: ETATS DISCRETS ET CONTINUS DU SYSTEME 81
FIGURE 36: EVOLUTION DES SIGNATURES (S1, S2, S3) 82
FIGURE 37: EVOLUTION DES SIGNATURES (S21, S22, S23) 82
FIGURE 38: EVOLUTION DES SIGNATURES (S1, S2, S3) 83
FIGURE 39: EVOLUTION DES RESIDUS (S31, S32, S33) 83
FIGURE 40: EVOLUTION DES SIGNATURES (S1, S2, S3) 84
FIGURE 41: EVOLUTION DES SIGNATURES (S11, S12, S13) 84
FIGURE 42: TRAIT DE CAUSALITE D'UN ELEMENT 86
FIGURE 43: EXEMPLE D'UN SYSTEME MECATRONIQUE 89
FIGURE 44: AUTOMATE HYBRIDE DU SYSTEME 90
FIGURE 45: MODELE BG DU SECOND MODE 90
FIGURE 46: MODELE BG DU PREMIER MODE 90
FIGURE 47: CAS DE L'ELEMENT C 94
FIGURE 48: CAS DE L'ELEMENT I 94
FIGURE 49: MODELE BG DU SECOND MODE ET SON OBSERVATEUR 95
FIGURE 50: MODELE BG DU PREMIER MODE ET SON OBSERVATEUR 96
FIGURE 51: EVOLUTION DISCRETE-CONTINUE DU SYSTEME 98

FIGURE 52: ZOOM SUR LE NIVEAU L DU RESERVOIR 98
FIGURE 53: EVOLUTION DES RESIDUS 99
FIGURE 54: SIGNATURES DES CAPTEURS 100
FIGURE 55: SIGNATURES DES MODES 100
FIGURE 56: MODES REELS VS MODES ESTIMES 101
FIGURE 57: SYSTEME HYDRAULIQUE A DEUX RESERVOIRS 104
FIGURE 58: AUTOMATE HYBRIDE DU SYSTEME 105
FIGURE 59: MODELE BG DU SYSTEME EN MODE 2 106
FIGURE 60: MODELE BG DU SYSTEME EN MODE 1 106
FIGURE 61: BOND GRAPH DU DEUXIEME MODE ET SON OBSERVATEUR 109
FIGURE 62: BOND GRAPH DU PREMIER MODE ET SON OBSERVATEUR 110
FIGURE 63: EVOLUTION HYBRIDE DES PARAMETRES 110
FIGURE 64: EVOLUTION DES RESIDUS DU SYSTEME SANS DEFAUT 111
FIGURE 65: SIGNATURES DES CAPTEURS 112
FIGURE 66: SIGNATURES DES MODES 112
FIGURE 67: MODES REELS VS MODES ESTIMES 112
FIGURE 68: CARTE X-BARRE 118
FIGURE 69: SYSTEME A DEUX RESERVOIRS 120
FIGURE 70: BG ET OBSERVATEUR ASSOCIE DU MODE 1 121
FIGURE 71: BG ET OBSERVATEUR ASSOCIE DU MODE 2 122
FIGURE 72: EVOLUTION DE LA DYNAMIQUE HYBRIDE DU SYSTEME 122
FIGURE 73: SIGNAL DE DEGRADATION INTEGRE 123
FIGURE 74: EVOLUTION DE S1 ET S2 123
FIGURE 75: MODES REELS VS ESTIMES 124
FIGURE 76: CARTE X-BARRE DE S2 124
FIGURE 77: CARTE X-BARRE DE S1 124

Liste des tableaux

TABLEAU 1: ANALOGIE ENTRE LES DIFFERENTS DOMAINES 39
TABLEAU 2: ELEMENTS DU BOND GRAPH 40
TABLEAU 3: CRITICITE PAR TYPE D'ANOMALIE 50
TABLEAU 4: TABLEAU THEORIQUE DES SIGNATURES DE MODE 72
TABLEAU 5: TABLEAU THEORIQUE DES SIGNATURES DE DEFAUT 73
TABLEAU 6: CONTRAINTES CAUSALES DES ELEMENTS BOND GRAPHS 86
TABLEAU 7: TABLEAU THEORIQUE DES SIGNATURES 87
TABLEAU 8: VALEURS NUMERIQUES DES PARAMETRES 96
TABLEAU 9: SEUILS DE DETECTION 99
TABLEAU 10: VALEURS NUMERIQUES DES PARAMETRES 104
TABLEAU 11: REGLES DE DETECTION DES DERIVES 119

Liste des abréviations

AE : Equations algébriques

AEF : Automate à états finis

AFNOR : Association française de normalisation

BG : Bond Graph

DAE : Equations algèbro-différentielles

LCL : Limite inférieure de contrôle

NF : Norme française

PI : Proportionnel, intégral

RNA : Réseaux de neurones artificiels

RRA : Relation de redondance analytique

SDH : Systéme dynamique hybride

SED : Système à événements discrets

SysML : Langage de modélisation des systèmes

UCL : Limite supérieure de contrôle

UML : Langage de modélisation unifié

VDI : Association des ingénieurs allemands

Introduction générale

L'être humain est en quête constante d'évolution, de défi et d'innovation. Cette aspiration le pousse à rechercher en permanence la meilleure productivité et le meilleur confort en développant des processus toujours plus sophistiqués. Plus la technologie avance plus les systèmes deviennent complexes. Les systèmes d'aujourd'hui sont de véritables écosystèmes qui combinent différents domaines de compétences, tels que la mécanique, l'électronique, et l'hydraulique, et qui traitent des dynamiques très variées, qu'elles soient continues, discrètes ou hybrides. Une complexité qui stimule la créativité des chercheurs pour réussir à concevoir et à optimiser ces systèmes.

Historiquement, les chercheurs ont beaucoup travaillé sur chaque partie séparément afin de mieux comprendre les spécificités de chaque domaine et de chaque type de dynamique. Pour chaque classe, il existe une panoplie de méthodes et d'outils. Cependant, la tendance actuelle exige l'étude et le traitement de tous ces aspects à la fois, sous le nom des systèmes mécatroniques hybrides. Le challenge est de standardiser le traitement et garantir le bon fonctionnement en adoptant des nouvelles approches holistiques prenant compte de la diversité des domaines et de la variété des dynamiques.

En effet, les systèmes mécatroniques hybrides sont souvent utilisés dans des environnements critiques, tels que l'aérospatiale, la défense, l'automobile, la production d'énergie et la robotique industrielle. Par conséquent, la capacité de diagnostiquer rapidement et précisément les défauts est d'une importance primordiale. Pour garantir le bon fonctionnement et la sécurité de ces systèmes, il 'est nécessaire de travailler sur des techniques de diagnostic avancées basées sur des méthodes de détection en temps réel, des algorithmes de traitement de signal et des systèmes de surveillance de santé. En combinant ces techniques avec une approche holistique de conception et de contrôle des systèmes mécatroniques hybrides, nous pouvons garantir une fiabilité maximale et une durée de vie prolongée de ces systèmes. Dans ce sens, notre travail s'inscrit pour proposer une nouvelle méthode de diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides.

Ce rapport de thèse vise à présenter notre travail de recherche intitulé "Développement d'une méthode de diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides". Pour ce faire, nous avons opté pour cinq chapitres.

Le premier chapitre rapproche le lecteur des systèmes mécatroniques hybrides en détaillant en premier lieu les systèmes mécatronique et en définissant en deuxième lieu les systèmes dynamiques hybrides. Une analyse de la tendance de recherche scientifique est également présentée afin de montrer l'intérêt des auteurs aux différents types de système au fil des années et de converger vers les systèmes mécatroniques hybrides comme systèmes à étudier.

Le deuxième chapitre met le focus sur les types de modélisation existant, en présentant les méthodes de modélisations des systèmes mécatroniques ainsi que des systèmes dynamiques hybrides, et il penche vers le Bond Graph hybride comme solution de modélisation des systèmes mécatroniques hybrides.

Le troisième chapitre explore en détail les différentes méthodes de diagnostic utilisées pour résoudre les problèmes des systèmes dynamiques. Elle présente les termes généraux du diagnostic, elle détaille les définitions clés nécessaires à la compréhension du sujet, et elle examine les différentes étapes de la procédure de détection et de localisation de défauts.

Ce chapitre présente en premier lieu les différentes méthodes sans modèle, telles que la redondance matérielle, le seuillage, la reconnaissance de formes et les systèmes experts, et elle montre comment ces méthodes sont utilisées pour résoudre les problèmes de systèmes dynamiques en prenant en compte les avantages et les inconvénients de chaque approche.

Ensuite, les méthodes de diagnostic avec modèle, telles que l'estimation paramétrique, l'estimation d'état et les observateurs, sont étudiées afin de montrer comment elles peuvent être utilisées pour améliorer la précision du diagnostic.

Le quatrième et le cinquième chapitres présentent le cœur de notre travail. Le quatrième chapitre expose notre démarche de détection et de localisation des défauts en utilisant les observateurs comme outils de diagnostic, les Bond Graphs comme outils de modélisation et les seuils dynamiques comme levier d'amélioration de la fiabilité de diagnostic. Cette méthode permet d'identifier les modes, de détecter et d'isoler les défauts, offrant ainsi une solution fiable pour le diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides.

Le cinquième chapitre se concentre sur la détection des dégradations des capteurs, la méthode proposée dans ce chapitre intègre une approche innovante qui intègre les cartes de contrôles dans le processus d'anticipation des défauts et d'identification de dégradations des capteurs. Des exemples d'application sont présentés pour renforcer la compréhension de la méthode proposée.

En utilisant l'approche proposée dans cette thèse, nous pouvons garantir la fiabilité et la qualité de fonctionnement des systèmes complexes, améliorant ainsi la sécurité et la satisfaction des utilisateurs.

Chapitre 1 : Présentation des Systèmes mécatroniques hybrides

Introduction

Les systèmes mécatroniques hybrides sont devenus un élément essentiel de notre vie quotidienne, présents dans une variété de domaines allant des petits équipements utilisés à la maison aux grandes architectures complexes utilisées dans l'industrie.

Cependant, peu de gens connaissent l'historique de ces systèmes, leur caractéristique et leur spécificité. Ce sont des questions clés auxquelles le premier chapitre de cette thèse répondra.

Ce chapitre commencera par une introduction aux systèmes mécatroniques, en détaillant leur définition, leur structure et leur fonctionnement. Il explorera ensuite les systèmes dynamiques hybrides, en fournissant une définition complète de ce que sont ces systèmes et comment ils fonctionnent.

Une analyse de la tendance de la recherche scientifique sera également présentée, montrant comment l'intérêt pour les différents types de systèmes a évolué au fil des ans et comment cela a conduit à une convergence vers les systèmes mécatroniques hybrides comme objet d'étude.

En somme, ce chapitre donnera au lecteur une introduction complète aux systèmes mécatroniques hybrides, en explorant leur fonctionnement et leur histoire.

Un système mécatronique hybride, et comme son nom l'indique, est un système mécatronique avec un comportement hybride combinant les aspects de la dynamique continue et de la dynamique discrète. Ce sont les systèmes les plus présents dans l'industrie grâce à leur exhaustivité qui s'étale sur plusieurs disciplines et qui touche plusieurs dynamiques.

Pour une compréhension plus claire, nous développons dans la première partie de ce chapitre les systèmes mécatroniques et dans la deuxième partie nous donnons plus de détails sur les systèmes dynamiques hybrides.

I Les systèmes mécatroniques

Avant les années cinquante, le mot « mécatronique » n'existait pas. Les systèmes complexes étaient considérés comme un ensemble de sous-systèmes électromécaniques [1]. En 1950, le développement de l'électronique de commande et de puissance a pris plus de hauteur, et par conséquent la genèse des semi-conducteurs. Puis en 1960, l'utilisation des calculateurs a ouvert des nouvelles pistes d'amélioration de la commande et de la conception des systèmes. Le point fort de cette technologie réside dans le fait qu'elle est programmable, performante et plus flexible. A la fin des années soixante, la science s'est orientée vers l'intégration du contrôle de la commande dans les sous-systèmes électromécaniques. C'est ce qui a donné la naissance de la mécatronique.

Le terme mécatronique a été inventé pour la première fois par l'ingénieur Japonais TETSURO MORI [2] en 1969. Il a été enregistré par son entreprise YASKAWA Electric Corporation, spécialisée dans la fabrication des composants et des systèmes d'automatisation, comme marque internationale en 1971. Le mot a pris plus d'ampleur et il est devenu d'usage général dans l'industrie. Ce qui a poussé la société d'abandonner tous les droits qu'elle détenait en 1982 et de permettre que le mot soit largement utilisé comme jargon technique [3].

Le guide VDI 2206 [4] donne plus de détails concernant l'historique du terme et son évolution au fil de l'eau en expliquant les différentes phases ; de l'intégration de composants électroniques vers l'association de disciplines pour aboutir au sens actuel combinant les démarches d'ingénierie avec la description technique et fonctionnelle du produit.

I.1 Définitions liées à la mécatronique

Parmi les nombreuses définitions de la mécatronique trouvées dans la littérature, on peut citer :

- « Le mot, mécatronique, se compose de 'méca' de mécanisme et 'tronique' de l'électronique. En d'autres termes, les technologies et les produits développés incorporeront de plus en plus l'électronique aux mécanismes, étroitement et organiquement, de manière à rendre impossible de dire où commence l'une et où se termine l'autre » définition donnée par l'entreprise YASKAWA [2]

- « L'intégration synergique de l'ingénierie mécanique, avec l'électronique et le contrôle informatique intelligent pour la conception et la fabrication des produits et des processus

industriels » [5].

- « L'intégration synergique des systèmes physiques, des actionneurs, des capteurs, de contrôle, d'électronique, et des ordinateurs à travers un processus de conception permettant une prise de décision complexe » [6].

- « Technique industrielle consistant à utiliser simultanément et en symbiose, la mécanique, l'électronique, l'automatisme et l'informatique pour la conception et la fabrication de nouveaux produits ». Définition du petit Larousse qui est introduite dans son édition 2005.

- « La mécatronique est la combinaison synergique de l'ingénierie mécanique de précision, de la commande électronique et du système informatique dans la conception des produits et des processus de fabrication ». Définition proposée par le Comité Consultatif de Recherche Industrielle et de Développement de la Communauté Européenne.

- « La mécatronique est une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité ». Première définition publiée par la norme française NF E01-010 [7] en novembre 2008.

D'une façon générale, les définitions liées au terme mécatronique mettent en évidence les aspects suivants :

- La multidisciplinarité : la mécatronique est la "science" de la mutualisation, elle combine entre plusieurs domaines ; en occurrence : la mécanique, l'électronique, l'hydraulique, l'informatique, l'hydraulique, etc. (Figure 1).

- La simultanéité : la mécatronique utilise simultanément et en temps réel les différentes techniques de la mécanique, de l'automatique, de l'électronique et de l'informatique afin de concevoir un produit performant répondant aux exigences client.

- La fiabilité, la miniaturisation et la performance : le regroupement d'un ensemble de concepts issus de plusieurs disciplines garantit l'évolution vers des systèmes autonomes, fiables et plus performants.

Selon la norme NF E01-010 mécatronique, l'intégration mécatronique se manifeste dans deux dimensions essentielles, l'une physique et l'autre fonctionnelle :

- Intégration physique : pénétration des composants électroniques et mécaniques.

- Intégration fonctionnelle : configuration des fonctions de communication assurant la liaison entre les composants multidisciplinaires, traitement de l'information et des signaux, et rétroaction aux fonctions de base mécaniques.

Selon le niveau d'intégration [1], une distinction entre les produits mécatroniques qui sont caractérisés par une intégration élevée et les composants mécatroniques qui ont une intégration faible ou moyenne peut être faite :

- Composant mécatronique : est un produit mécatronique avec un niveau partiel d'intégration mécatronique. Il permet de combiner la mécanique avec l'électronique et assurer un traitement de l'information.

- Produit mécatronique : est un produit intelligent ayant la capacité de réagir avec son milieu environnant, de traiter, et de percevoir l'information en toute autonomie. Il est caractérisé par un niveau complet d'intégration mécatronique. En fonction des domaines d'activité, le mot « produit mécatronique » recouvre les notions d'ingénierie de système, équipement de production, sous-ensemble autonome, etc.

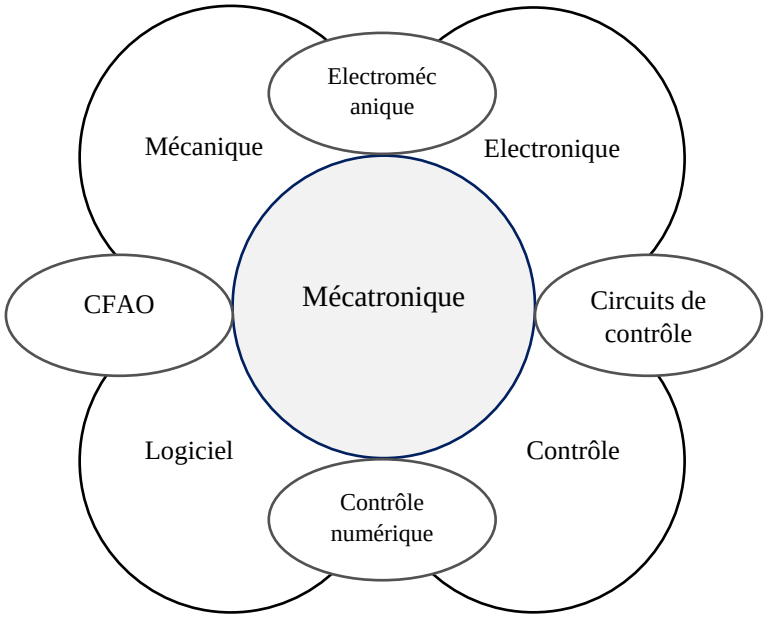


Figure 1: Multidisciplinarité de la mécatronique

Afin de faciliter l'appellation, le terme « système mécatronique » sera utilisé d'une manière générale, dans ce qui suit, il désignera en même temps les composants ainsi que les produits mécatroniques.

I.2 Différentes applications de la mécatronique

La mécatronique est de plus en plus présente, elle a envahi notre vie quotidienne et elle a pris la tête du peloton dans le secteur industriel. De nombreuses applications des systèmes mécatroniques sont développées. La Figure 2 présente quelques exemples d'applications des systèmes mécatroniques dans les différents domaines, tels que la fabrication, le transport, la recherche spatiale, etc.

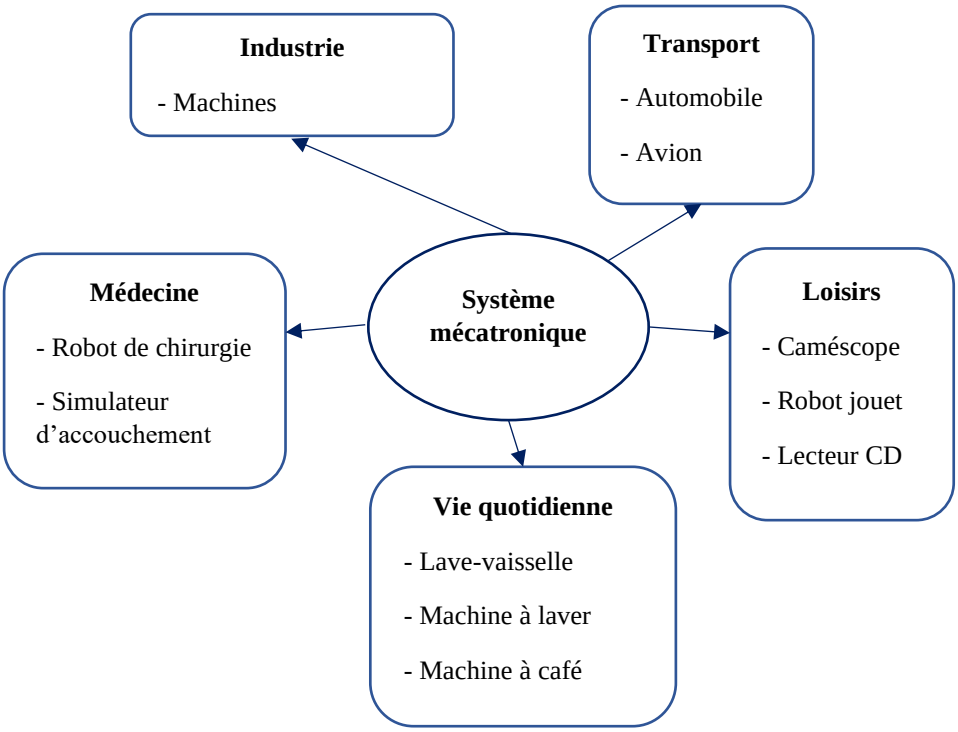


Figure 2: Omniprésence de la mécatronique dans plusieurs domaines

II Les systèmes dynamiques hybrides (SDH)

II.1 Systèmes continus

Les systèmes continus sont des systèmes à état continu définis par des variables continues (figure 3). Les variables continues sont des grandeurs physiques qui peuvent prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle donné. Les systèmes continus sont souvent utilisés pour décrire des phénomènes physiques, comme la mécanique des fluides, la thermodynamique et l'électromagnétisme [8], [9].

Il existe deux types de systèmes continus : les systèmes linéaires et les systèmes non linéaires. Les systèmes linéaires sont ceux pour lesquels les relations entre les variables sont linéaires, c'est-à-dire qu'ils peuvent être décrits par des équations différentielles linéaires. Les systèmes non linéaires, quant à eux, sont décrits par des équations différentielles non linéaires.

Pour étudier les systèmes continus, il est souvent nécessaire de résoudre des équations différentielles. Il existe plusieurs méthodes pour résoudre ces équations, notamment la méthode de la variation des constantes, la méthode de la séparation des variables et la méthode de Laplace [10].

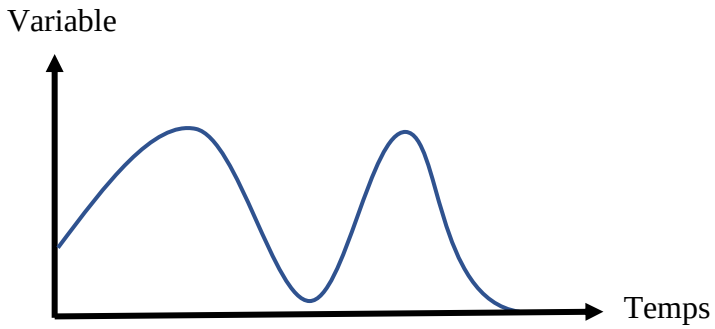


Figure 3: Evolution d'une variable continue

Formellement, un système continu est un 5-tuplet [11] :

SC= (T, X, X_0, U, Φ)

- $T \in \mathbb{R}$ est l'intervalle du temps
- $X \subseteq \mathbb{R}^n$ est l'espace d'état continu
- $X_0 \subseteq X$ est l'espace d'état initial du système continu
- $U \subseteq \mathbb{R}^r$ est le vecteur de commande
- Φ est le vecteur champ déduit par l'équation différentielle de la forme ci-dessous :

$$\dot{x}(t) = f\big(x(t), u(t)\big); x(t_0) = x_0 \qquad (1)$$

F : X → $\mathbb{R}^n$ vecteur de champ continu

II.2 Systèmes à événements discrets

Les systèmes à événements discrets sont des systèmes caractérisés par des variables discrètes (figure 4). Les variables discrètes prennent un nombre fini de valeurs, contrairement aux variables continues qui prennent un nombre infini de valeurs dans un intervalle de temps [12]. Les systèmes à événements discrets sont souvent utilisés pour décrire des systèmes qui changent de façon soudaine et imprévisible, comme les systèmes de contrôle de processus, les systèmes de communication, les systèmes informatiques et les systèmes de commande [13].

Les systèmes à événements discrets peuvent être décrits par plusieurs outils de modélisation, à savoir les modèles de Petri, les automates finis, les graphes de flux de données etc. Ces modèles permettent de décrire la structure et le comportement des systèmes en utilisant des symboles discrets [14].

La théorie des systèmes à événements discrets est largement utilisée dans les domaines de la commande et de la régulation, de la communication et de l'informatique. Elle permet de concevoir des systèmes de contrôle robustes et efficaces pour des systèmes à événements imprévisibles. Les algorithmes de commande basés sur les systèmes à événements discrets sont souvent utilisés pour les systèmes industriels, les systèmes de transport, les systèmes de communication et les systèmes informatiques. Les systèmes à événements discrets sont également utilisés pour la modélisation de systèmes réactifs, tels que les systèmes embarqués,

les systèmes temps réel, les systèmes de contrôle de processus, les systèmes de communication et les systèmes de contrôle de trafic aérien.

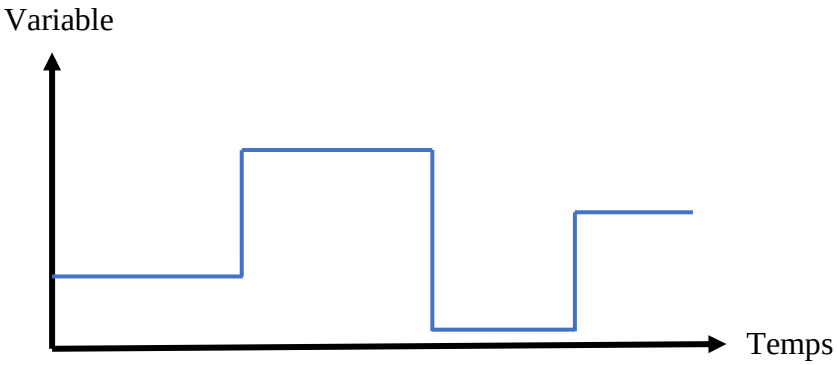


Figure 4: Evolution d'une variable discrète

Formellement, un système à événements discrets est un 5-tuplet [11] :

SED= (T, Q, Q_0, U, Φ)

- $T \in \mathbb{R}$ est l'intervalle du temps
- Q est l'ensemble des états finis ou infinis
- $Q_0 \subseteq Q$ est l'ensemble des états initiaux
- U est l'ensemble fini des entrées (alphabets)
- Φ : Q x Q est la fonction de transition entre les états, elle détermine le comportement du système

II.3 Systèmes dynamiques hybrides

Les systèmes dynamiques hybrides sont des systèmes pour lesquels les dynamiques discrètes et continues interagissent [15]–[17] .Un SDH est composé d'un système dynamique continu, d'un système à événements discrets (SED) et d'une interface qui gère les interactions entre ces deux types d'évolutions (continue et discrète).

L'interface traduit l'interaction entre la partie continue et la partie discrète du SDH.L'état discret *q* détermine la dynamique continue spécifique de la partie continue du SDH [Antsaklis et al, 97] (voir figure 5).

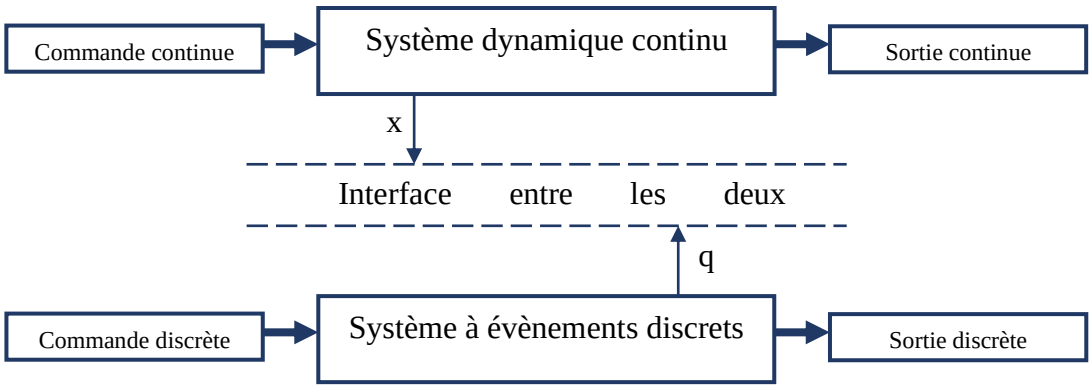


Figure 5: Architecture d'un système dynamique hybride

Formellement, un système dynamique hybride (SDH) est composé d'un 5-tuple [11]:

SDH= (T, (x, q),(x_0, q_0), $U_c \cup U_d$, Φ)

- $T \in \mathbb{R}$ est l'intervalle de temps
- (x, q) ⊆ X × Q représente l'état complet du système hybride
- (x_0, q_0) est l'ensemble des états initiaux
- $U_c \cup U_d$ représente l'ensemble des commandes continues et discrètes
- $\Phi : X \times Q \rightarrow \mathbb{R}^n$ définit un sous-ensemble des trajectoires pour chaque état discret

II.4 Les différentes classes des SDH

Les SDH ont été étudiés intensivement au cours de ces dernières années. De nombreuses classes de SDH ont été étudiées par les chercheurs. Nous citons dans cette section les classes de SDH les plus connues ; pour plus de détails le lecteur pourra se référer aux thèses [18], [19].

II.4.1 Systèmes continus commandés par un système à événements discrets (systèmes à commutations)

Les systèmes continus commandés par un système à événements discrets, également appelés systèmes à commutations, sont caractérisés par des variables continues qui peuvent prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle donné, mais qui sont également commandés par un système à événements discrets qui peut changer leur comportement de manière soudaine et imprévisible [20]–[22]. Ces événements de commutation peuvent être causés par des contrôleurs, des capteurs ou des limites physiques. Comme exemple de ce type de système, nous pouvons citer le système de thermostat utilisé pour maintenir la température dans une pièce.

Exemple : Thermostat [18]

On considère un thermostat utilisé pour maintenir la température dans une pièce [9], il est composé d'un élément chauffant et d'un capteur de température. Les seuils, inférieur et supérieur, du thermostat sont fixés à des valeurs βmin et βmax tels que βmin < βmax. Le comportement hybride du système est imposé par la commande discrète qui est liée à l'évolution continue de la température.

Le système de chauffage fonctionne lorsque la température ambiante est inférieure à βmin, et il s'arrête lorsque la température dépasse βmax. Les deux états discrets du système sont "Marche" et "Arrêt". D'autre part, la température de la pièce est une variable continue, qui suit un modèle décrit par l'équation (2) :

$$\dot{\beta}(t) = \begin{cases} -k\big(a - \beta(t)\big), \text{chauffage en marche} \\ -k\beta(t), \text{chauffage en arrêt} \end{cases} \quad (2)$$

Où $a \in \mathbb{R}$ est une constante réelle positive qui dépend de la puissance du système de chauffage, et k est une constante déterminée par la pièce.

L'évolution de la température est définie par une équation d'état qui dépend de l'état discret du système de chauffage. La figure 6 présente l'évolution continue de β et l'évolution discrète de l'état du système de chauffage.

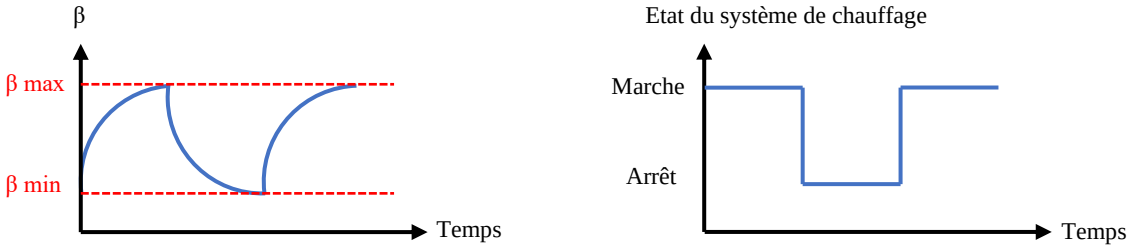


Figure 6: Evolution de la partie continue et discrète du système

II.4.2 Systèmes continus qui comportent des discontinuités

Les systèmes continus qui comportent des discontinuités sont caractérisés par des variables continues qui peuvent prendre n'importe quelle valeur dans un intervalle donné, mais qui présentent également des sauts ou des discontinuités dans leur comportement. Ces discontinuités peuvent être causées par des événements imprévus ou des limites physiques. Les discontinuités se produisent lorsque l'état passe soudainement de la valeur courante à une autre valeur. Cette classe de systèmes est illustrée à travers l'exemple d'une balle rebondissante ou la collision entre deux corps.

Exemple : Balle en rebondissement [19]

Dans cet exemple, nous considérons une balle en chute libre qui rebondit de façon élastique sur le sol (voir figure 7). Initialement, la position de la balle est $(0, y_0)$, et sa vitesse instantanée v(t) est constituée de deux composantes, v_y et v_x. Lorsque la balle atteint le sol, la composante de vitesse v_y subit une inversion de signe instantanée au moment ti, passant de $v_y(t_i)$ à $-v_y(t_i)$. La balle suit ensuite une nouvelle trajectoire avec une vitesse v(t) ($t \geq t_i$) composée de $-v_y$ et v_x. Le changement de signe de la composante de vitesse v_y induit des évolutions différentes pour la balle, et chaque état de la vitesse caractérise une dynamique des variables x et y. Pour étudier de tels phénomènes, il est possible soit de considérer des équations d'état non linéaires discontinues (et non dérivables), soit de considérer une succession d'équations d'état continues.

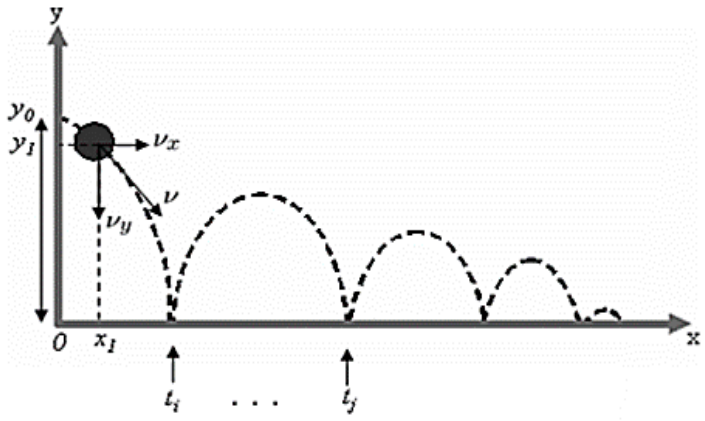


Figure 7: Evolution de la position de la balle en rebondissement

II.4.3 Systèmes comportant des éléments discrets et continus

Certains systèmes sont constitués d'éléments continus et d'éléments discrets. A titre d'exemple, on peut citer les circuits électroniques qui contiennent des éléments à caractéristiques continues (résistance, condensateur, self,...etc) et des éléments à caractéristiques discrètes (interrupteur, diode, transistor, thyristor,...etc).

Exemple : Circuit électrique [23]

Le système illustré par la figure 8 est composé d'une source de tension d'une diode D, d'une résistance R_1, d'un interrupteur Sw, et d'une self L.

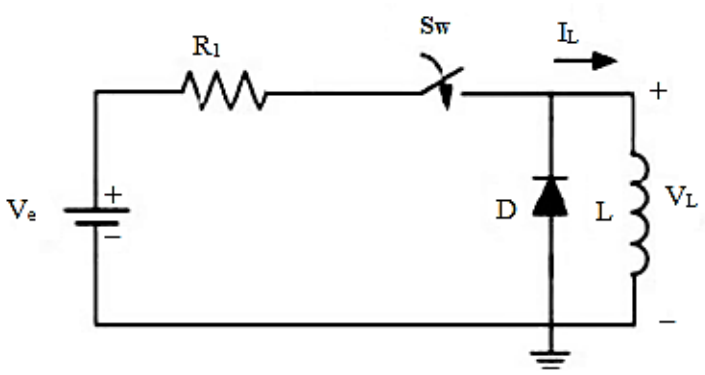


Figure 8: Circuit électrique hybride

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant I_L traverse la self, générant un flux magnétique $Ø_0$. Cependant, lorsque l'interrupteur est ouvert, le flux se décharge rapidement, créant une discontinuité de flux qui passe de $Ø_0$ à 0. Ce changement brusque de flux entraîne l'apparition d'une force électromotrice (f.e.m) selon la loi $f.e.m = \frac{dØ}{dt}$, et donc un courant induit I_i. La différence de potentiel V_L (qui est la f.e.m) aux bornes de la self est importante, car le rapport $\frac{dØ}{dt}$ est important.

Durant cette phase, la diode est passante, car la tension V_L générée aux bornes de la self est supérieur à la tension seuil Vs de la diode. Toutefois, lorsque la tension V_L aux bornes de l'inductance devient inférieur à Vs, la diode devient bloquée. Ces différents modes d'exploitation du circuit sont représentés par la figure 9.

L'évolution du système met en évidence une dynamique continue entrecoupée par des commutations dues à l'état discret de l'interrupteur qui peut être « Fermé » ou « Ouvert » , et de la diode, qui peut être « Passant » ou « Bloqué ». Le changement d'état discret de l'interrupteur crée une discontinuité de flux dans l'inductance qui passe instantanément de Ø à 0.

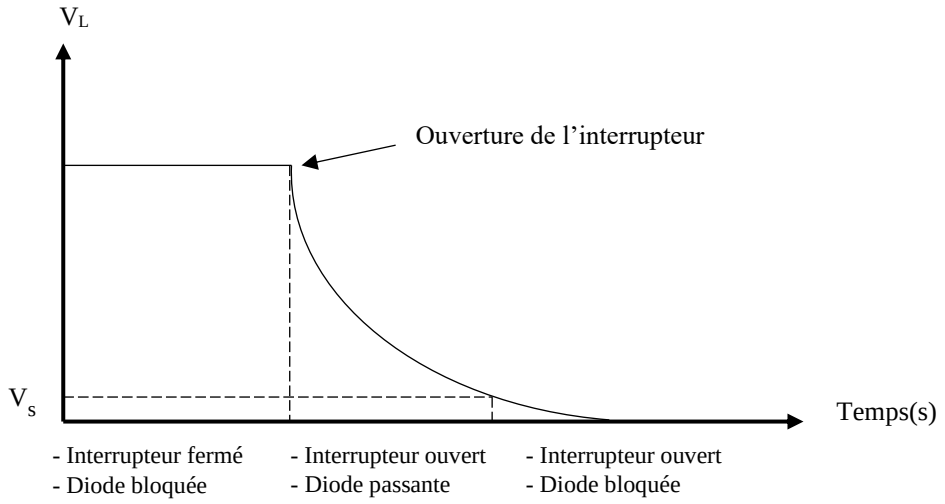


Figure 9: Evolution de la tension V_L

II.4.4 Systèmes continus pour lesquels des dynamiques discrètes sont introduites par abstraction

Les systèmes continus pour lesquels des dynamiques discrètes sont introduites par abstraction sont des systèmes où la discrétisation est utilisée pour introduire des dynamiques discrètes dans un système continu, tout en conservant les propriétés essentielles du système continu. Cette approche permet de rendre les systèmes continus plus simples à comprendre et à contrôler en utilisant des techniques d'échantillonnage pour discrétiser les variables continues dans le temps, ou en utilisant des techniques de discrétisation pour approximer les équations différentielles continues par des équations algébriques discrètes. Nous trouvons également d'autres méthodes qui introduisent la dynamique discrète en isolant les dynamiques rapides qui peuvent avoir lieu au moment de changement de modèle ; les dynamiques continues très rapides et complexes peuvent être remplacées par des dynamiques discrètes.

Exemple : Système hydraulique [19]

On considère l'exemple de la figue 10, le système est constitué de :

- Un régulateur PI assurant un niveau de liquide constant dans le réservoir
- Une pompe P
- Un réservoir de section S muni d'une conduite C
- Une vanne pneumatique V (figure 11) commandée en tout-ou-rien permettant un prélèvement du liquide pour utilisation

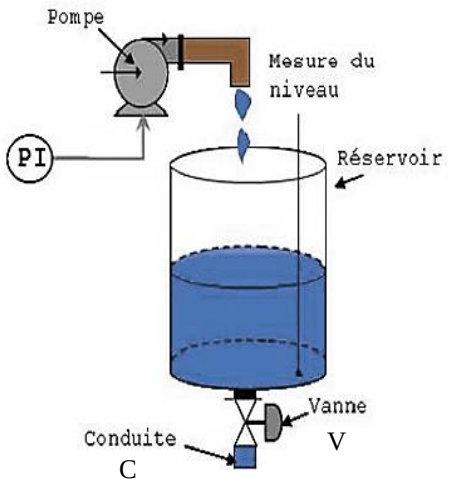


Figure 10: Système hydraulique

Le niveau du liquide h(t) est une variable continue. Sa valeur dépend des débits entrants (sortie de la pompe) et sortants (évacuation par la vanne V). Ces deux débits ont également des évolutions continues : le débit d'entrée est adapté par le régulateur PI et la valeur du débit de sortie dépend de l'ouverture de la vanne pneumatique. L'ouverture de la vanne, qui est en réalité une fonction continue dans le temps, est déterminée par la fonction $Ø_e(x)$, où x est la position de la tige.

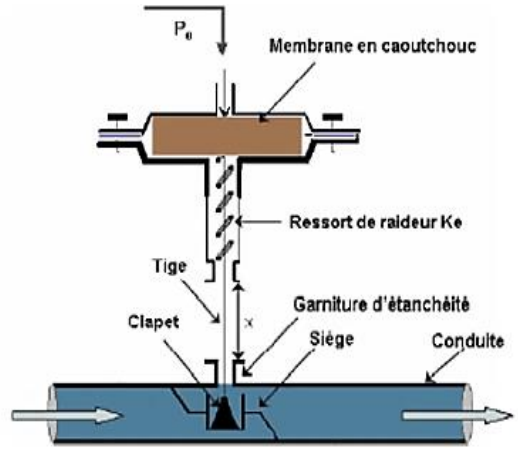


Figure 11: Vanne pneumatique

Lorsqu'une commande d'ouverture de la vanne est émise, la fonction continue $Ø_e$, qui dépend de la position de la tige x, évolue très rapidement, de sorte que la dynamique associée peut être négligée. Dans ce cas, il est possible de considérer un état discret associé à la vanne, qui prend deux valeurs ou modalités : x=0% (vanne fermée) et x=100% (vanne ouverte). Cette approximation permet de caractériser le comportement de la vanne par rapport au système

global de manière simplifiée. L'introduction de cet état discret permet de mettre en évidence les deux modes de fonctionnement du système et facilite la modélisation complète du système.

II.4.5 Systèmes discrets pour lesquels des dynamiques continues sont introduites par abstraction

Les systèmes discrets pour lesquels des dynamiques continues sont introduites par abstraction sont des systèmes pour lesquels on utilise une approche d'abstraction pour introduire des dynamiques continues dans un système discret. Cette approche permet de rendre les systèmes discrets plus simples à comprendre et à contrôler en utilisant des techniques d'approximation pour introduire des variables continues dans un système discret. Ils sont généralement des systèmes dans lesquels les états discrets évoluent plus vite que la dynamique globale. Ces systèmes sont souvent utilisés pour la modélisation de systèmes réactifs, tels que les systèmes embarqués, les systèmes temps réel, les systèmes de contrôle de processus, les systèmes de communication et les systèmes de contrôle de trafic aérien.

Nous trouvons souvent ce type de systèmes dans les industries de processus, qui traitent les matières premières avant qu'elles soient utilisées par les industries manufacturières. Dans ces industries, la production peut être continue ou divisée en étapes successives, appelées procédés de traitement par lots. Ces procédés sont fréquents dans des domaines, comme l'industrie chimique, pharmaceutique et agroalimentaire. Ils comprennent des séquences de transfert et de conditionnement qui utilisent des systèmes à événements discrets, ainsi que des opérations continues pendant une certaine période, comme l'évaporation, la cristallisation et le mélange.

L'exemple ci-dessous présente un système discret pour lequel des dynamiques continues sont introduites par abstraction :

Exemple : Système de production [19]

Le système illustré par la figure 12 est composé d'un ensemble de stocks (S_1, S_2, S_2'…) et d'un groupe de machines (M_1, M_2, M_3….). Chaque groupe est composé d'un nombre de machines identiques. Les stocks (S_1, S_2, S_2'…) sont utilisés pour emmagasiner les pièces (matière première ou pièces encours de traitement) jusqu'au moment où une machine en aval est disponible pour commencer un nouveau traitement. Ce système de production peut être vu comme étant un système hybride ayant une évolution continue, représentant les flux de pièces dans le système, et une évolution discrète liée à l'état des ressources. Le niveau des pièces dans les stocks peut être modélisé par une équation différentielle linéaire sous la forme d'équation d'état ci-dessous :

$$\dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t) \qquad (3)$$

Où x= [x_1 ;… ; x_i ;….; x_n], représente le niveau des pièces dans les stocks (La composante x_i représente le niveau de pièces dans le stock S_i) et u représente le débit des pièces en entrée.

L'évolution discrète du système de production est décrite par l'occurrence des événements associés à l'intervention de l'opérateur pour démarrer ou arrêter le flux d'entrée et aux états de

ressources. L'occurrence de l'un de ces événements entraine le changement de l'état discret : démarrage de flux d'entrée, arrêt de flux d'entrée, marche ou arrêt de la machine1, etc.

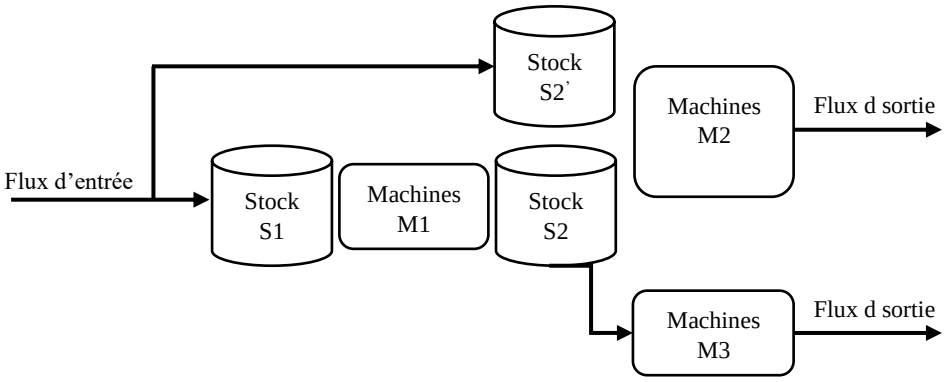


Figure 12: Architecture générique d'un système de production

III Analyse de la tendance de la recherche scientifique des systèmes

III.1 Cycle de vie d'un axe de recherche

Chaque axe de recherche passe par trois phases essentielles. La première phase, où le besoin est identifié, les nouvelles idées sont abondantes, et l'avancement est croissant ; la deuxième, qui est caractérisée par la stabilité de nombre d'articles et la limitation des perspectives ; et la troisième, qui présente la diminution de nombre d'articles et la saturation en termes de pistes d'amélioration [24].

Selon la pente de la courbe de tendance, un axe de recherche peut avoir trois cas de figure :

- Courbe croissante : axe de recherche actif
- Courbe constante : axe de recherche presque saturé
- Courbe décroissante : axe de recherche saturé

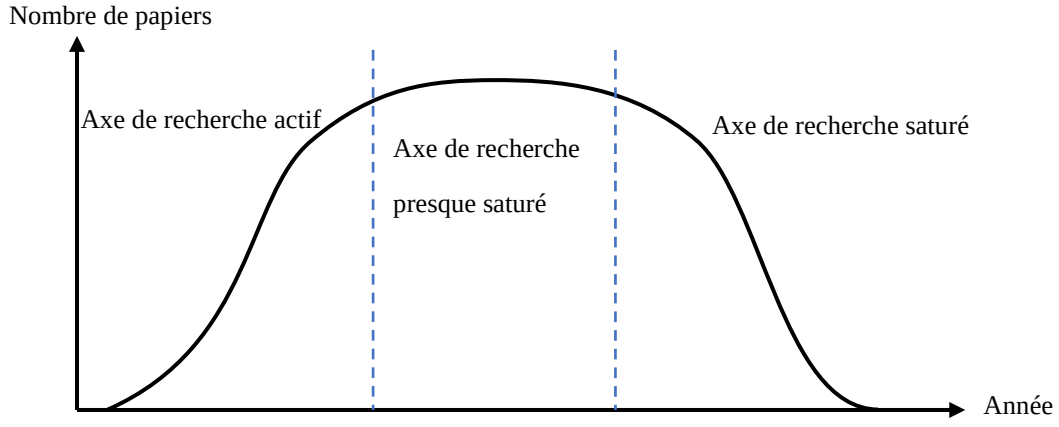


Figure 13: Cycle de vie d'un axe de recherche

III.2 Analyse de la tendance des systèmes mécatroniques hybrides

La théorie des systèmes dynamiques hybrides est omniprésente dans plusieurs domaines. Par conséquent, les systèmes hybrides représentent un axe de recherche en pleine expansion faisant l'objet de beaucoup de travaux scientifiques et reçoit beaucoup d'attention sur les dernières décennies.

La mécatronique par son principe de multidisciplinarité a pris de l'ampleur sur tous les niveaux et aujourd'hui, elle représente un axe de recherche prometteur qui fait couler beaucoup d'encre.

Afin de prouver ces constats, nous optons pour une analyse de la base de données Scopus en traçant le nombre d'articles reçu par année en relation avec les deux types de systèmes. Une information que nous allons exploiter pour savoir la tendance de la recherche scientifique.

La figure 14 montre une tendance croissante du nombre d'articles traitant les deux types de systèmes. Ce qui prouve l'intérêt croissant à ces systèmes ; les deux types de systèmes intéressent les chercheurs parce qu'ils touchent une grande partie des systèmes fortement demandés dans l'industrie et dans la vie quotidienne.

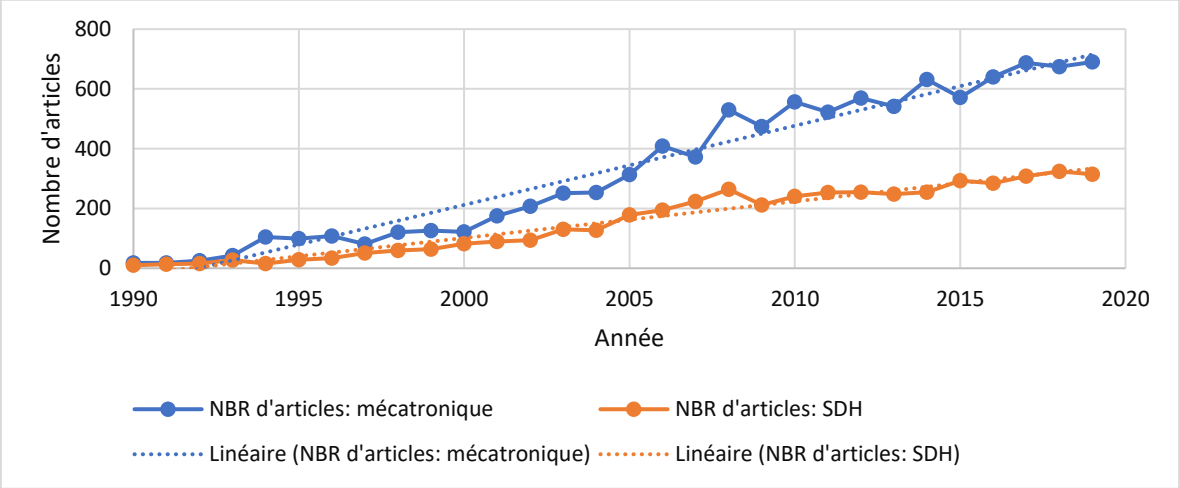


Figure 14: Tendance de nombre d'articles traitant les systèmes mécatronique et les SDH

Une comparaison entre les deux pentes des deux courbes montre une vitesse d'orientation vers les systèmes mécatroniques plus importante que celle des systèmes dynamiques hybrides. En revanche, la question qui s'oppose, avons-nous assez de RETEX par rapport au traitement des deux systèmes à la fois ? nous parlons des systèmes mécatroniques hybrides.

La figure 15 présente le nombre d'articles combinant les systèmes dynamiques hybrides avec les systèmes mécatroniques.

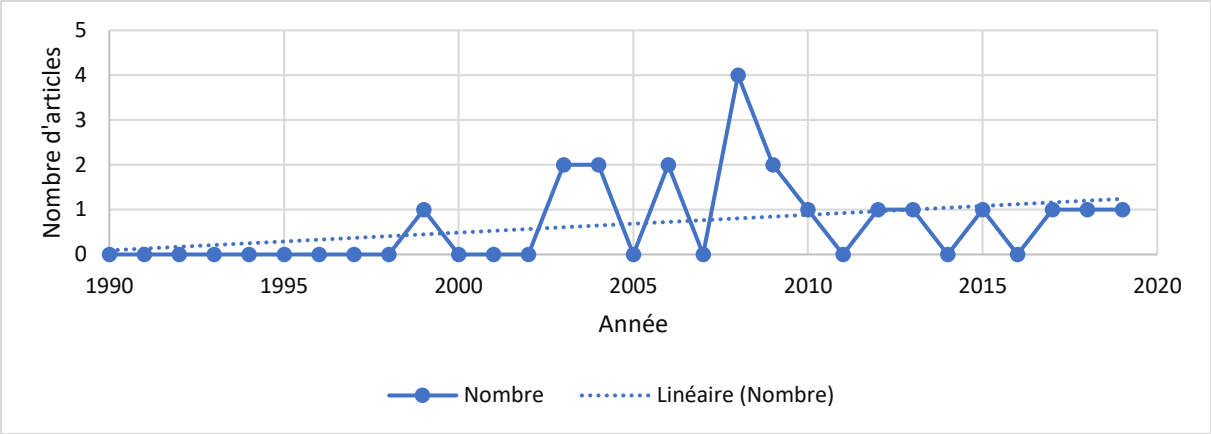


Figure 15: Tendance de nombre d'articles traitant les systèmes mécatroniques hybrides

Le nombre de ces articles est très faible vu la difficulté de traitement de l'aspect hybride des dynamiques tout en prenant en compte l'aspect multidisciplinaire des domaines.

Nous avons choisi le traitement de ce type de systèmes pour encourager les chercheurs à s'orienter vers des systèmes plus transverses fortement demandés, et d'ouvrir des perspectives vers un diagnostic plus fiable et applicable dans plusieurs secteurs.

Conclusion

Nous avons consacré le premier chapitre pour présenter les systèmes mécatroniques hybrides qui constituent une combinaison entre les systèmes mécatroniques et les systèmes dynamiques hybrides. Une présentation de la mécatronique a été faite pour montrer l'importance et l'omniprésence de cette discipline dans les différents domaines, et une description des systèmes dynamiques hybrides a été également exposée pour montrer la complétude de ces systèmes combinant les théories de la dynamique continue et les théories de la dynamique discrète.

A la fin du chapitre, une analyse de la tendance de recherche a montré la rareté des articles traitant ce type de systèmes à cause de la difficulté d'étude de l'aspect hybrides des dynamiques et de l'aspect multidisciplinaire en même temps. Un résultat qui nous a motivé à prendre le défi et continuer dans l'analyse de ces systèmes en proposant un autre chapitre qui porte sur la modélisation des systèmes mécatroniques hybrides.

Chapitre 2 : Modélisation des Systèmes mécatroniques hybrides

Introduction

La modélisation consiste à représenter mathématiquement les relations entre les entrées et les sorties d'un système donné. Elle permet de capturer les interactions temporelles, les comportements évolutifs et les contraintes qui régissent le fonctionnement du système. Grâce à la modélisation, nous pouvons simuler et prédire le comportement du système dans différentes conditions et analyser ses performances.

la modélisation est d'une importance capitale dans l'étude des systèmes mécatroniques hybrides. Elle permet de comprendre leur comportement présent et futur, de simuler leurs performances, de prévoir leurs problèmes potentiels et de détecter leurs défauts.

Ce chapitre examinera les types de modélisation existants et présentera les outils les plus couramment utilisés pour la modélisation des systèmes mécatroniques ainsi que pour les systèmes dynamiques hybrides.

Ce chapitre, explorera également le Bond Graph hybride comme solution proposée pour la modélisation des systèmes mécatroniques hybrides, et discutera en détail des avantages de cette méthode et de la raison pour laquelle elle est proposée.

I Modélisation des systèmes mécatroniques

La modélisation d'un système mécatronique est un processus complexe qui implique l'utilisation de plusieurs langages et outils de modélisation. Parmi les langages et les outils les plus employés, on trouve :

I.1 SysML

SysML (Systems Modeling Language) est un langage de modélisation des systèmes mécatroniques [25], [26]. Il permet de représenter graphiquement les différents éléments d'un système mécatronique et leurs relations, ainsi que les spécifications et les exigences du système. SysML est basé sur UML (Unified Modeling Language) et est conçu pour être utilisé dans les domaines de l'ingénierie des systèmes, de l'aérospatiale, de l'automobile, de la défense, de l'énergie et de l'informatique.

SysML offre une grande flexibilité pour la modélisation des systèmes mécatroniques, car il permet de représenter différents types de systèmes, comme les systèmes de contrôle, les systèmes embarqués, les systèmes de communication et les systèmes de soutien à la décision. Il fournit également des outils pour la vérification et la validation des modèles, ainsi que pour la génération de code à partir des modèles.

Comme montré dans la figure 16, le SysML comprend plusieurs types de diagrammes, chacun ayant une fonction spécifique. Les diagrammes de blocs permettent de représenter les différents éléments d'un système et leurs relations, tandis que les diagrammes de séquences permettent de représenter les interactions entre les éléments d'un système. Les diagrammes de cas d'utilisation permettent de représenter les exigences fonctionnelles d'un système, tandis que les diagrammes de répartition permettent de représenter la répartition des éléments d'un système sur les différents nœuds d'un réseau.

En utilisant SysML, les ingénieurs peuvent facilement communiquer les spécifications et les exigences des systèmes mécatroniques aux différents acteurs du projet, tels que les fournisseurs, les clients et les autres équipes de développement. Il permet également de faciliter la collaboration entre les différents domaines d'expertise, comme l'électronique, la mécanique et l'informatique, qui sont tous impliqués dans la conception des systèmes mécatroniques.

SysML a également des limitations à savoir :

- Limitations de performance : Les modèles SysML peuvent devenir très volumineux pour la modélisation des systèmes complexes, ce qui peut entraîner des problèmes de performance lors de la génération de code ou de la simulation.

- Limitations de compatibilité : SysML est basé sur UML, mais il y a des différences entre les deux langages, ce qui peut poser des problèmes de compatibilité avec certains outils de modélisation UML.

- SysML ne prend pas en compte les aspects de cybersécurité, ce qui peut être problématique pour les systèmes connectés ou embarqués.

- SysML étant un outil de modélisation généraliste, il peut manquer de certains outils spécifiques pour les domaines d'application spécifiques. Nous citons l'exemple de l'incapacité des SysML à raffiner les structures 1D avec les modèles géométrique 3D.

Malgré les limitations de ce langage, il peut être combiné avec des outils de modélisation et simulation [27], tels que Bond-Graph, Modelica et Simulink pour étendre ses fonctionnalités. Des chercheurs ont proposé de développer un profil ModelicaML pour l'intégrer avec SysML afin de pouvoir simuler les modèles créés dans SysML avec le langage de modélisation et de simulation Modelica.

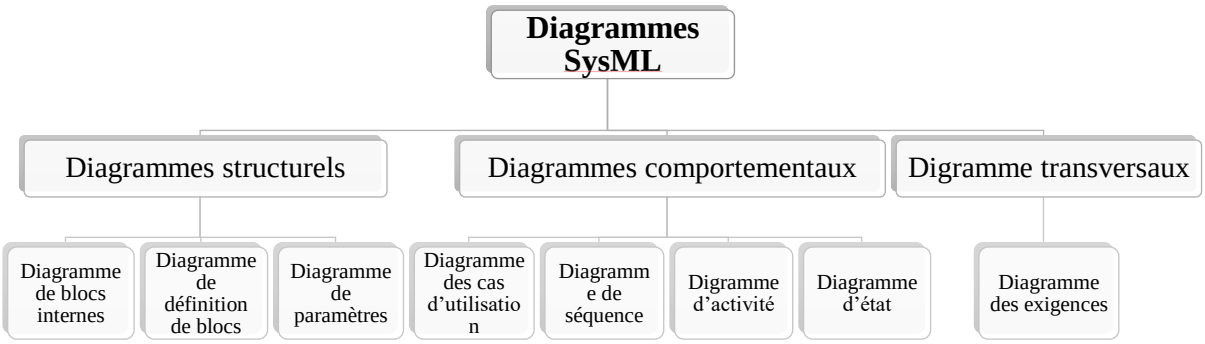


Figure 16: Diagrammes SysML

I.2 Modelica

Modelica est un langage de modélisation des systèmes mécatroniques qui permet de représenter graphiquement les différents éléments d'un système mécatronique et leurs relations, ainsi que les lois physiques qui régissent leur comportement [28], [29]. Il est conçu pour être utilisé dans les domaines de l'ingénierie des systèmes, de l'énergie, de l'automobile, de l'aérospatiale et de la défense.

Modelica est basé sur un formalisme orienté objet, qui permet de représenter les différents éléments d'un système mécatronique sous forme d'objets et de relations entre ces objets. Il offre une grande flexibilité pour la modélisation des systèmes mécatroniques, car il permet de représenter différents types de systèmes, comme les systèmes électriques, les systèmes thermiques, les systèmes mécaniques et les systèmes de contrôle. Il fournit également des outils pour la vérification et la validation des modèles, ainsi que pour la génération de code à partir des modèles.

Modelica comprend un grand nombre de bibliothèques de modèles prédéfinis qui peuvent être utilisées pour représenter les différents éléments d'un système mécatronique, comme les moteurs, les réseaux de transmission, les actionneurs et les capteurs. Ces bibliothèques incluent aussi des modèles pour les lois physiques qui régissent le comportement des différents éléments d'un système mécatronique, tels que les lois de Newton, les lois de Kirchhoff et les équations de Maxwell.

I.3 Simulink/Stateflow

Matlab est une plate-forme de calcul à syntaxe simplifié développé par la société MathWorks [30]. Ses fonctions spécialisées l'aident également à être un langage de programmation par excellence adapté pour l'analyse des problèmes scientifiques. Matlab est constitué de plusieurs rubriques dont Simulink fait partie. Simulink et parmi les rubriques les plus utilisées dans la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques.

Simulink par sa plateforme graphique et ses bibliothèques riches en blocs multidisciplinaires le rendent un outil puissant de modélisation et de simulation des systèmes [31], [32]. Simulink offre une simulation des problèmes physiques représentés par des : équations algébriques (AE), équations différentielles ordinaires (ODE) et équations algèbro-différentielles (DAE).

MathWorks offre plusieurs autres produits complémentaires afin de s'adapter aux différents besoins exprimés par les scientifiques. L'un des produits proposés par cette société nous trouvons l'outil Stateflow.

Stateflow est un module qui permet de développer les machines d'état et les organigrammes. Une machine d'état représente un nombre fini d'états, tout simplement elle modélise le fonctionnement d'un système à évènement discret. En utilisant les objets de sa bibliothèque, à savoir les jonctions, les transitions, les événements … Stateflow assure une modélisation complète des états et des règles qui régissent les transitions de modes.

Comme montré dans la figure 17, l'intégration de Stateflow dans Simulink et par la suite dans Matlab assure une liaison entre les blocs Simulink, les fonctions Matlab et les machines d'états. Ce qui permet de simuler non seulement les systèmes à évènement discret mais également les systèmes mécatroniques hybrides.

La modélisation des systèmes mécatroniques hybrides est réalisée par une combinaison des blocs Simulink et des machines d'état de Stateflow, qui fonctionnent ensemble afin d'assurer une modélisation exhaustive et une simulation en temps réel.

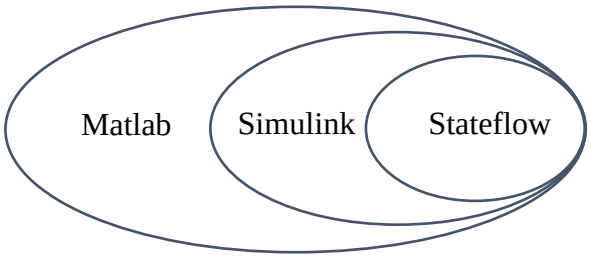


Figure 17: Liaison entre Matlab, Simulink et Stateflow

I.4 Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics est un outil de simulation scientifique et technique qui permet de modéliser et de résoudre des problèmes multiphysiques [33]. Il est utilisé pour la conception, l'optimisation et la validation de produits et de procédés dans divers domaines, tels que les sciences de la vie, l'énergie, l'électronique, la mécanique, la chimie et les sciences de la terre.

COMSOL Multiphysics intègre un environnement de modélisation graphique facile à utiliser avec un moteur de calcul performant pour résoudre des équations mathématiques complexes [34]. Il prend en charge plusieurs méthodes de résolution, y compris les éléments finis, les volumes finis, les méthodes de type boundary element et les méthodes de type domain.

COMSOL Multiphysics est également équipé d'une bibliothèque de modèles prédéfinis qui couvre une large gamme de phénomènes physiques et de domaines d'application, permettant aux utilisateurs de démarrer rapidement leur simulation sans avoir besoin de développer leur propre modèle à partir de zéro.

Il est également possible de créer des applications personnalisées en utilisant la plate-forme de développement intégrée de COMSOL Multiphysics, qui permet aux utilisateurs de créer des interfaces utilisateur personnalisées pour leurs modèles, de les intégrer à d'autres systèmes ou de les déployer en ligne.

COMSOL Multiphysics est un outil puissant qui permet de simuler de nombreux phénomènes physiques, mais il peut être coûteux, complexe et nécessiter un temps de calcul important. Il peut également y avoir des limites dans les modèles disponibles et dans la prise en charge de certaines situations. Il est important de considérer ces limitations lors de la planification et de l'utilisation de COMSOL Multiphysics pour des simulations spécifiques.

I.5 Bond-Graph

Au 19ème siècle, Lord Kelvin et James Clerk Maxwell ont constaté que plusieurs phénomènes physiques sont représentés par des formes d'équations similaires, en trouvant des analogies entre le flux de chaleur et l'effort électrique et entre les lignes de force et les lignes de courant fluides [35].

Dans les années 1940-1950, H.M. Paynter a travaillé sur des projets d'ingénierie interdisciplinaires, notamment sur des centrales hydroélectriques, des ordinateurs analogiques/numériques, des dynamiques non linéaires et des commandes [16]. Cette expérience lui a permis de constater que des formes similaires d'équations sont générées par des différents systèmes dynamiques dans une grande variété de domaines : hydraulique, électrique, pneumatique, mécanique, etc. et que ces systèmes physiques ont en commun les lois de conservation de la masse et de l'énergie ; par conséquent le professeur H.M Paytner a annoncé l'idée révolutionnaire d'un langage unifié de modélisation des systèmes physiques, le Bond Graph.

L'outil Bond Graph est une représentation graphique d'un système physique. Il prend en compte le modèle mathématique et la structure du système [36]. Il permet de générer non seulement un modèle comportemental mais aussi un modèle mathématique représenté par une fonction de transfert ou un espace d'état. En outre, les Bond Graphs utilisent l'analyse structurelle et causale, qui sont les socles de conception et de surveillance des systèmes, comme la contrôlabilité, l'observabilité, le placement des capteurs et la détection et l'isolation des défauts [37], [38] . Toutes ces caractéristiques font du Bond Graph le meilleur outil pour la modélisation et l'analyse avancées.

Le Bond Graph est basé sur deux principes socles : le transfert de puissance et l'analogie entre les différentes variables des différents domaines.

Transfert de puissance

La figure 18 représente l'échange de puissance entre deux éléments dans un Bond Graph. La demi-flèche nommée « lien » ou « bond » porte deux variables « effort » et « flux » qui relie les deux éléments.

Le produit de ces deux éléments représente la puissance instantanée transportée par le bond selon l'équation (4).

$$P = e \times f \tag{4}$$

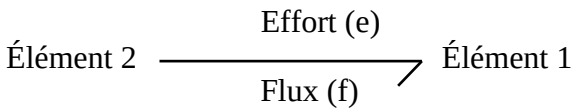


Figure 18: Echange de puissance entre deux éléments

Analogie entre les domaines

Le flux et l'effort sont proposés afin de standardiser et unifier le langage de modélisation de plusieurs phénomènes physiques dans des différents domaines [39]. Le tableau 4 représente l'équivalent de l'effort et le flux dans plusieurs domaines

Tableau 1: Analogie entre les différents domaines

Domaine physique	**Effort**	**Flux**
Electrique	Tension : V	Courant : A
Mécanique	Force : N	Vitesse : m/s
Rotation	Couple : N.m	Vitesse de rotation : rad/s
Hydraulique	Pression : Pa	Débit volumique : m^3/s
Thermique	Température : k	Flux d'entropie : J/(k.s)
Chimique	Potentiel chimique : J/mol	Flux molaire : mol/s
Cinétique chimique	Affinité chimique : J/mol	Vitesse de réaction : mol/s

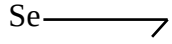
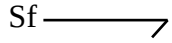
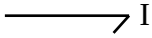
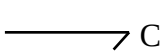
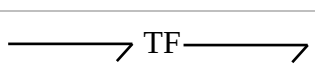
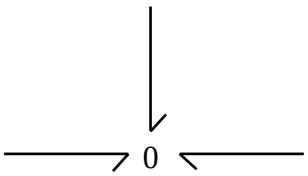
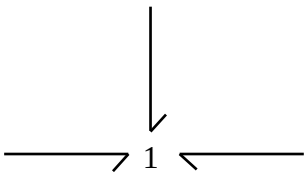
Afin de représenter tous les types d'échange, le Bond Graph utilise un ensemble composé de trois sous-groupes constituant un total de neuf éléments différents :

- Trois éléments passifs : résistance R, inertie I, et capacité C.

- Deux éléments actifs : source de flux Sf et source d'effort Se.
- Quatre éléments de jonction : jonction zéro 0, jonction un 1, transformateur TF et gyrateur GY.

En plus de ces trois sous-groupes, deux détecteurs peuvent être rajoutés : le détecteur d'effort De et le détecteur de débit Df.

Tableau 2: Eléments du Bond Graph

Nom	Représentation	Relation
Source d'effort		
Source de flux		
Inertie		$e = I\frac{df}{dt}$
Capacité		$f = C\frac{de}{dt}$
Résistance		$e = Rf$
Gyrateur		$\begin{cases} e_1 = rf_2 \\ e_2 = rf_1 \end{cases}$
Transformateur		$\begin{cases} e_1 = me_2 \\ f_2 = mf_1 \end{cases}$
Jonction 0		$e_1 = e_2 = \cdots = e_n$ $\sum_{i=1}^{i=n} f_i = 0$
Jonction 1		$f_1 = f_2 = \cdots = f_n$ $\sum_{i=1}^{i=n} e_i = 0$

Pour construire un modèle BG d'un système mécatronique, il est recommandé de décomposer le système multi-physique en plusieurs parties du domaine énergétique (électrique, mécanique, hydraulique, pneumatique, thermique, etc.) et de créer des liens entre les différents blocs à l'aide de liaisons, qui représentent la puissance échangée. Ensuite, pour chaque partie, un modèle BG doit être conçu en utilisant des procédures spécifiques dédiées à chaque domaine.

La figure 19 présente un exemple simple de modélisation d'un système « masse ressort » par Bond Graph.

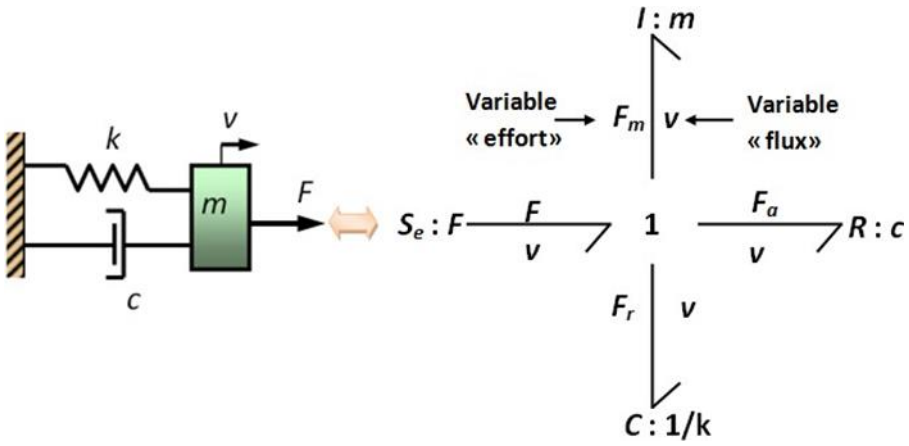


Figure 19: Exemple d'une modélisation d'un système par Bond-graph

II Modélisation des SDH

II.1 Les principales approches de modélisation des SDH

Un même système peut être modélisé de nombreuses façons différentes. Le modèle choisi dépend des objectifs visés (observation, commande, diagnostic, etc…) [40]–[43].

De manière générale, les approches de modélisation de système hybrides peuvent être classées en trois catégories principales :

II.1.1 Abstraction en un modèle purement continu

Ce sont des modèles représentés sous forme d'équations différentielles non linéaires intégrant des variables binaires, correspondant aux modes de fonctionnement mis en évidence. Ces modèles sont complexes à manipuler. Ils sont utilisés essentiellement pour l'étude de la stabilité.

II.1.2 Abstraction en un modèle purement événementiel

Ces modèles sont de type automates à états finis ou réseaux de Petri [44]. La dynamique continue est remplacée par une dynamique discrète. A titre d'exemple, les travaux de Puri [45] présentent une méthode permettant d'obtenir un modèle événementiel en découpant l'espace d'état continu en plusieurs régions, qui sont ensuite associées à un état discret. Cette méthode de modélisation est confrontée au compromis entre la précision et le nombre d'états discrets qui devient rapidement élevé.

II.1.3 Modélisation mixte

L'approche de modélisation dite mixte consiste à intégrer les aspects continus et discrets au sein d'un même formalisme de modélisation. Cette démarche d'intégration permet d'obtenir de nouveaux formalismes hybrides à partir de formalismes de modélisation discrets ou continus. Les modèles développés sont classés en deux catégories :

La première catégorie de modèles est obtenue à partir de formalismes de modélisation discrets. Les réseaux de Petri hybrides, les automates hybrides (extension des automates temporisés) ou les statecharts hybrides en sont des exemples [44].

La deuxième catégorie de modèles est obtenue à partir des modèles continus. Le principe est d'introduire des variables booléennes (ou entières) dans l'équation d'état continue et de considérer des inégalités définissant des contraintes entre les variables continues et discrètes. Ceci a donné naissance à des nouveaux formalismes de modélisation des systèmes hybrides. Les modèles MLD en sont des exemples [46].

Dans la suite, nous utilisons l'automate hybride comme outil de modélisation des SDH grâce à ses différents avantages cités ci-dessous :

Précision : Les automates hybrides permettent de modéliser des systèmes dynamiques hybrides avec une grande précision, en prenant en compte les comportements discrets et continus du système.

Flexibilité : Les automates hybrides peuvent être utilisés pour modéliser une grande variété de systèmes dynamiques hybrides, tels que les systèmes de contrôle de processus, les robots, les systèmes de transport, les systèmes énergétiques et les systèmes biologiques.

Vérification de sécurité : Les automates hybrides peuvent être utilisés pour vérifier la sécurité et la fiabilité des systèmes dynamiques hybrides en simulant leur comportement dans des situations différentes. Cette vérification peut aider à détecter des erreurs ou des comportements dangereux dans le système.

Simulation : Les automates hybrides peuvent être utilisés pour simuler le comportement d'un système dynamique hybride, ce qui permet de prédire le comportement futur du système dans des situations différentes.

Compréhension du système : La modélisation d'un système dynamique hybride avec un automate hybride peut aider à comprendre le comportement complexe du système, en identifiant les interactions entre les comportements discrets et continus.

La partie suivante donne plus de détails sur les automates hybrides.

II.2 Les automates hybrides

II.2.1 Les automates finis déterministes

Les automates sont des outils de représentation de systèmes. Ils permettent de modéliser le comportement d'un grand nombre de systèmes. D'une manière globale, un automate est un ensemble d'états du système, reliés entre eux par des transitions qui sont marquées par des symboles [47].

Un automate à états finis (AEF) est un quintuple A = (Q, Q_0, δ, $\sum$, QF) tel que :

- Q représente l'ensemble fini d'états
- Q_0 est l'ensemble des états initiaux
- δ : Q × E → Q définit l'ensemble de règles de transition
- $\sum$ est un ensemble fini d'étiquettes ou alphabet (noms d'action ou d'événements)
- QF est un sous-ensemble de Q appelé l'ensemble des états finaux.

Exemple : moteur électrique

La figure 20 présente les différents états d'un moteur électrique : M (marche), A (arrêt), et D (Défaut) ; par conséquent, l'ensemble Q peut être défini comme suit Q= {M, A, D}. L'occurrence de l'un des quatre évènements ci-dessous assure la transition d'un été à un autre :

(a) : début du travail

(b) : fin du travail

(c) : panne de la machine

(d) : réparation de la machine

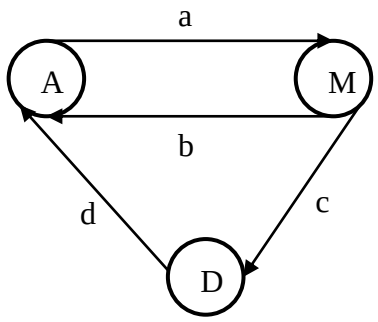


Figure 20: Modèle d'un automate fini

Q = {M, A, D}

$\sum$= {a, b, c, d}

δ (A, a)=M ; δ (M, b)=A

δ (M, c)=D ; δ (D, d)=A ; q0=A

F= {M}

II.2.2 Les automates hybrides

Les automates hybrides ont été introduits pour la première fois par Alur [48], comme une extension des automates à état finis. Il s'agissait de nouveaux automates intégrant deux types de composants :

- Un composant discret, modélisé par un automate à états finis

- Un composant continu dans le temps, naturellement modélisé par un système d'équations différentielles

A chaque sommet q d'un automate hybride, on associe pour chaque variable continue de la forme $f(\dot{x}(t), x(t)) = 0$, une fonction d'évolution f_q, encore dite activité, et un prédicat sur la valeur des variables appelée invariant du sommet.

Tant que les valeurs des horloges vérifient l'invariant associé, le système peut séjourner dans un sommet. À chaque passage d'un sommet à un autre, on associe une condition de franchissement, appelée garde, et une affectation. La transition ne peut être franchie que si sa garde est vérifiée par les valeurs des variables. Les gardes modélisent les contraintes imposées au comportement du système, et l'affectation associée à une transition désigne les variables qui effectuent un saut suite au franchissement de la transition.

Soit l'automate illustré dans la figure 21 modélisant un système dynamique hybride. Dans ce modèle :

- La dynamique continue est représentée par des équations différentielles associées aux sommets du graphe

- La dynamique discrète est modélisée par les arcs étiquetés des graphes

Les sommets « Arrêt » et « Marche » représentent les états discrets du système dans lesquels la dynamique continue évolue. x représente une horloge, alors que y correspond à une variable plus complexe.

Les prédicats $x \in [2, 4]$ et $x \in [5, 10]$ sur les arcs présentent les gardes qui définissent les conditions pour l'occurrence des événements « Allumer » et « Eteindre ».

Les prédicats $x \leq 4$ et $x \leq 10$ étiquetés dans les sommets constituent les invariants de l'automate, c'est à dire, des conditions imposées aux variables continues du système pour rester dans un état discret (dans notre cas, les états « Arrêt » ou « Marche »).

La dynamique du système hybride démarre par l'état initial symbolisé par l'arc d'entrée au sommet d'origine « Arrêt » avec L'étiquette x = [5, 10] ,y =0.

L'évolution des variables x et y dans les sommets « Arrêt » et « Marche », se fait respectivement conformément aux équations différentielles [$\dot{x} = 1 \; et \; \dot{y} = -4y$] et [$\dot{x} = 1 \; et \; \dot{y} = 3y + 2$].

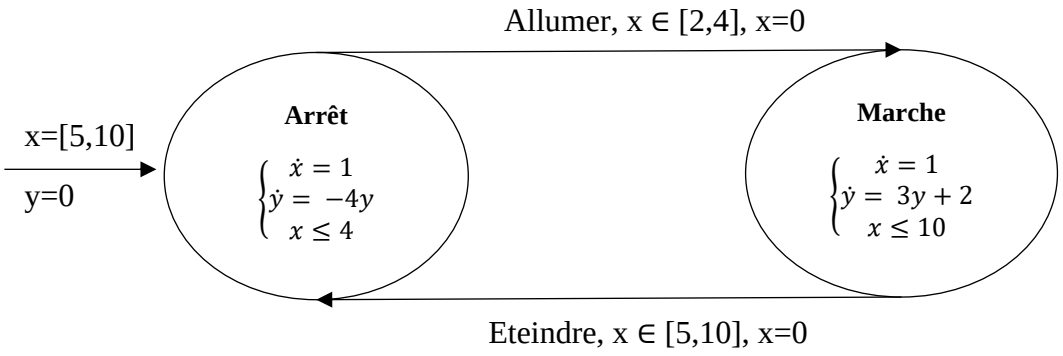


Figure 21: Modèle d'un automate hybride simple

Formellement, un automate hybride est défini par A= (Q, ∑, X, Inv, dyn, T, σ, g, A) tel que :

- Q représente l'ensemble fini de sommets
- ∑ est un ensemble fini de labels de synchronisation
- $X \subseteq \mathbb{R}^n$est un ensemble fini de variables
- Inv est la fonction qui associe à chaque sommet q ∈ Q un prédicat sur les variables
- dyn: Q × X → ℚ: décrit l'évolution des variables dans les sommets
- T est un ensemble fini de transitions
- σ ∈ ∑ est le label de synchronisation associé à la transition e= (q, q')
- g est une fonction qui associe à chaque transition e= (q, q') un prédicat Ce
- A est une fonction qui associe à chaque transition e= (q, q') une affectation. Les initialisations spécifiées par A correspondent à des fonctions calculant la nouvelle valeur de l'état à partir de sa valeur avant le franchissement, une affectation est de la forme x :=A(x)

III Outil proposé pour la modélisation des systèmes mécatroniques hybrides

Dans les parties I et II, nous avons présenté les méthodes de modélisation des SDH et des systèmes mécatroniques séparément, le but de cette partie est de proposer la méthode de modélisation adaptée aux systèmes mécatroniques hybrides et de l'adopter par la suite.

Historiquement, plusieurs recherchent se sont orientées vers les outils de modélisation des systèmes dynamiques hybrides afin de modéliser les systèmes mécatroniques hybrides. Néanmoins, ces modélisations étaient limitées vu la difficulté de modélisation de plusieurs disciplines en même temps par le même outil.

Dans cette thèse, nous convergeons vers les automates hybrides comme outil de modélisation pour les SDH grâce à leur simplicité et leur flexibilité de se coupler avec d'autres outils de modélisation, et vers le Bond Graph comme outil de modélisation des systèmes mécatroniques grâce à leur multidisciplinarité et à leur langage unifié facilitant son utilisation.

La modélisation des systèmes mécatroniques hybrides exige l'accouplement des deux outils choisis afin de garantir une modélisation de l'aspect multidisciplinaire et de l'aspect hybride

des dynamiques en même temps, on désigne le Bond Graph hybride.

III.1 Bond Graph hybride

Le Bond Graph est généralement utilisé dans le domaine de la dynamique continue. Afin de l'adapter pour la prise en compte de l'aspect discret, l'automate hybride a été utilisée.

Le couplage proposé entre le Bond Graph et l'automate hybride consiste à modéliser l'évolution continue du système par un Bond Graph et l'évolution discrète par un automate hybride [49] . Chaque évolution continue représente un mode et la transition d'un mode à un autre est définie par une condition logique C comme le montre la figure 22 ci-dessous :

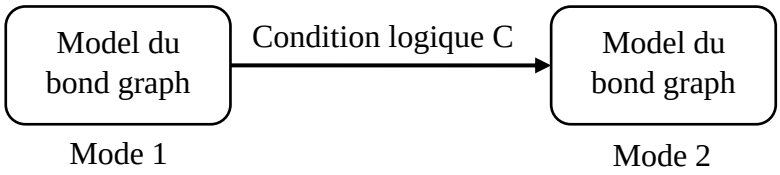


Figure 22: Bond Graph hybride

La modélisation des systèmes mécatroniques hybrides avec les Bond Graphs hybrides présente plusieurs avantages :

- Capacité à représenter des systèmes mécatroniques complexes : Les Bond Graphs hybrides permettent de représenter les interactions entre les différents composants d'un système mécatronique, y compris les éléments mécaniques, électriques et électroniques, de manière concise et intuitive.
- Modélisation de systèmes temps-réel : Les Bond Graphs hybrides permettent de modéliser les systèmes en temps réel, en prenant en compte les transitions entre les états continus et discrets.
- Étude de la stabilité et de la performance : Les Bond Graphs hybrides permettent d'étudier les propriétés de stabilité et de performance des systèmes, en utilisant des techniques de contrôle et d'optimisation.
- Facilité de simulation : La modélisation par Bond Graph hybride permet de simuler facilement le comportement des systèmes mécatroniques, en utilisant des outils de simulation tels que Simulink ou Bond Graph Toolbox.
- Facilité de compréhension : La représentation graphique des systèmes mécatroniques permet une compréhension intuitive de leur fonctionnement, et facilite la communication entre les différents membres d'une équipe de projet.

Conclusion

Le deuxième chapitre a montré la richesse de méthodes de modélisation des systèmes mécatroniques ainsi que les différentes approches de modélisation des systèmes dynamiques hybrides, et il a penché vers le Bond Graph hybride comme outil de modélisation à adopter grâce à son langage unifié et sa capacité de simuler les deux types de dynamiques, continu et discret.

En utilisant le Bond Graph hybride, il devient possible d'appréhender les deux types de dynamiques de manière simultanée, ce qui facilite grandement la modélisation et la simulation des systèmes complexes. Ce choix s'appuie sur la flexibilité et la puissance de cette approche, qui permet d'obtenir des résultats fiables et cohérents dans l'étude des systèmes mécatroniques hybrides.

Après avoir défini l’importance des systèmes mécatroniques hybrides et penché vers l’outil de modélisation idoine, la question qui s’opposera, quelle est la démarche de diagnostic à suivre ?

Chapitre 3 : Diagnostic des systèmes dynamiques

Introduction

Le diagnostic des systèmes dynamiques joue un rôle crucial dans le fonctionnement efficace des systèmes complexes présents dans notre vie quotidienne. La capacité de détecter, localiser et identifier les défauts dans un système est essentielle parce qu'elle permet de prendre des mesures correctives avant d'avoir des dommages ou des dysfonctionnements.

Nous réserverons ce chapitre pour discuter du diagnostic des systèmes dynamiques, et nous commencerons par une introduction des termes généraux du diagnostic, en incluant les définitions clés nécessaires à la compréhension du sujet. Ensuite, nous examinerons les différentes étapes de la procédure de détection et de localisation de défauts.

Nous passerons également en revue les différentes méthodes de diagnostic disponibles pour les systèmes dynamiques. En premier lieu, nous présenterons les différentes méthodes sans modèle, comme la redondance matérielle, le seuillage, la reconnaissance de formes et les systèmes experts. Ensuite, nous examinerons les méthodes de diagnostic avec modèle, telles que l'estimation paramétrique, l'estimation d'état et les observateurs. Après l'évaluation des avantages et des inconvénients de chaque méthode, nous choisirons d'utiliser l'observateur comme outil de diagnostic pour notre application. En effet, l'observateur présentera plusieurs avantages, tels que sa facilité de mise en place et sa capacité à fournir des estimations précises de l'état du système.

En somme, ce chapitre vise à donner une vue d'ensemble complète des différentes méthodes de diagnostic utilisées dans le domaine des systèmes dynamiques. En comprenant ces différentes méthodes, nous serons mieux armés pour faire face aux défis de la maintenance et du fonctionnement des systèmes complexes actuels.

I Termes généraux

Avant de passer aux différentes méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques, il est nécessaire de rappeler le jargon et définir les concepts utilisés dans ce domaine. Nous nous sommes basés sur plusieurs travaux, à savoir [14], [24], [50]–[54], dans la littérature afin de construire une synthèse exhaustive qui touche les points clés et les approches les plus courantes. Cela permettra aux lecteurs de comprendre facilement les concepts importants dans la suite de ce chapitre et de mieux appréhender les différentes méthodes de diagnostic présentées.

I.1 Définitions

Faute : C'est un événement qui peut être lié à des facteurs internes ou externes du système en perturbant son fonctionnement.

Défaut : il est défini comme l'écart entre le comportement normal d'un système et sa réponse réelle. Au début, il' est larvé et il se manifeste par la suite pour causer une défaillance. D'où l'intérêt du diagnostic.

Défaillance : une défaillance est une anomalie permanente provoquant l'interruption de la capacité d'un système à accomplir la fonction ou les fonctions souhaitées définies par les spécifications fonctionnelles. La défaillance est la conséquence d'un défaut, dont la cause est une faute.

Panne : Une panne présente l'état d'un système incapable d'assurer une fonction requise suite à une défaillance qui peut provoquer son arrêt complet.

La liaison entre la faute, le défaut, la défaillance et la panne peut être illustrée par la figure 23.



Figure 23 : Quadriptyque : Faute/défaut/défaillance/panne

Tableau 3: Criticité par type d'anomalie

Anomalie	Ecart par rapport au comportement normal	Aptitude à accomplir la fonction requise
Faute	Faible	Complète
Défaut	Moyen	Complète
Défaillance	Elevé	Partielle
Panne	Elevé	Nulle

Dégradation : La dégradation est un état d'altération ou de détérioration d'un système. La dégradation peut être due à des facteurs internes ou externes, tels que l'usure, la corrosion, la pollution, le changement climatique, les incendies, les accidents, les mauvaises pratiques, etc. Les conséquences de la dégradation peuvent varier de faibles à graves, elles peuvent entraîner

des pertes de valeur, des risques pour la sécurité, des perturbations dans le fonctionnement des systèmes, et des coûts pour la restauration, la réparation ou la remise en état.

II Diagnostic

Selon l'AFNOR, le diagnostic est l'identification des causes probables d'une défaillance ou d'un défaut par un raisonnement logique basé sur un ensemble d'informations issues de contrôles, d'essais ou d'inspection.

Le but de la fonction de diagnostic est de déterminer la cause, et localiser l'organe ou l'élément responsable sur la dégradation du système.

Le diagnostic vise à comprendre le fonctionnement d'un système en examinant ses caractéristiques extérieures. Pour ce faire, il utilise des connaissances préexistantes sur les modes de fonctionnement du système et des observations en temps réel de son état actuel. Sa méthode consiste à comparer les données collectées du système réel avec ce qu'on sait de son fonctionnement défaillant ou normal. En cas de comportement anormal, le diagnostic peut identifier la cause de la défaillance. Le but du diagnostic est donc de trouver un lien de causalité entre les symptômes, la défaillance et son origine.

Autrement dit, le diagnostic consiste à identifier les parties défaillantes d'un système et à trouver les causes du problème en créant un lien de causalité entre les symptômes et les éléments impactés. Une fois la défaillance identifiée, il faut prendre une décision pour ramener le système à un état normal. Ces actions peuvent inclure des arrêts d'urgence, des réparations ou des actions préventives. Si l'on souhaite éviter une perte de production, la décision peut être de reconfigurer le processus.

La fonction de diagnostic est généralement liée à la procédure de détection et d'isolation des défauts connue sous le nom de la FDI (Fault Detection and Isolation)

II.1 Procédure de détection et de localisation de défauts

La FDI est une couche essentielle pour assurer le suivi et le bon fonctionnement d'un système (figure 24), son premier objectif est la détection des défauts en lançant les alarmes et en informant les opérateurs de supervision au bon moment [42], [55], [56]. Après avoir détecté le défaut, le deuxième objectif de la surveillance sera le diagnostic de défaut en localisant les éléments impactés et en identifiant les causes premières.

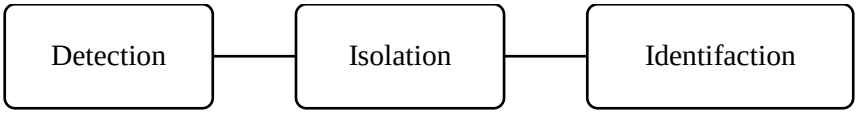


Figure 24: Fonctions de la FDI

II.1.1 Détection

La détection permet de savoir si un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement ou dans un mode normal en se basant sur la connaissance de ses caractéristiques. La détection cherche à identifier l'apparition et le moment où une erreur se produit. Généralement, Il existe deux types d'anomalies : celles qui résultent d'un comportement anormal du système par rapport à ses caractéristiques intrinsèques, et celles qui résultent d'un comportement anormal par rapport à la loi de commande appliquée.

La fonction de détection est responsable sur la décision de l'existence d'un défaut en comparant la signature courante (mesure actuelle) avec la signature de référence associée aux différents modes de fonctionnement déjà identifiés. Nous trouvons également d'autres démarches de détection qui utilisent des dates limites d'apparition des signaux, des suiveurs d'états, des systèmes experts, des capteurs spécialisés ou des techniques d'analyse de fréquence.

La comparaison de l'état actuel avec l'état du modèle produit un écart, appelé résidu. Si le résidu est nul, le système est sain, sinon il existe un défaut.

Dans l'application pratique, les modèles que nous utilisons sont basés sur des hypothèses simplificatrices et ne sont donc pas parfaits. Les résidus, qui reflètent l'écart entre le modèle nominal et le système réel, ne sont plus égaux à zéro. Nous devons alors les comparer avec des seuils fixes ou dynamiques pour décider si la valeur non nulle du résidu doit déclencher une alarme ou non.

La qualité de la détection dépend de la procédure de décision choisie, mais également de la qualité des résidus utilisés. Pour réduire le taux de fausses alarmes et de non-détection des défauts, il est nécessaire d'optimiser la sensibilité des résidus, c'est-à-dire de les rendre les plus sensibles possible aux défaillances et les moins sensibles possible aux perturbations ou aux erreurs de modélisation.

II.1.2 Isolation

L'isolation, nous la trouvons également sous le nom de localisation, elle consiste à localiser le défaut en précisant son endroit et en définissant sa nature.

A la différence de la détection, l'isolation est responsable sur la détermination de l'origine du défaut. Pour ce faire, elle utilise un ensemble de résidus pointant sur les éléments les plus critiques d'un système, et chaque résidu doit être conçu de telle manière qu'il soit sensible à un type de défaut. La construction des résidus est une étape primordiale pour assurer une isolation complète et fiable. Dans la littérature, nous trouvons généralement deux grandes catégories [57]:

- La construction de résidus structurés
- La construction de résidus directionnels

II.1.3 Identification

L'identification, rentre plus dans le type et la nature de défauts. Son objectif est de déterminer les caractéristiques de chaque défaut. Afin de mieux caractériser les défauts, des modèles de comportements sont utilisés. Ces modèles prennent en compte la structure de la dynamique des défaillances et présentent un niveau élevé de connaissance sur les défauts. L'obtention d'une estimation de défaillance reflète une image beaucoup plus précise de l'état du système.

III Méthodes de diagnostic

La littérature présente une panoplie de méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques. Ces méthodes sont généralement classées selon le niveau de connaissance disponible sur le système et selon le type de modèle possible. Les méthodes de diagnostic peuvent alors être classifiées selon deux grandes catégories(figure 25): méthodes de diagnostic à base de modèle et méthodes de diagnostic sans modèle [23].

Les méthodes basées sur un modèle, également appelées méthodes internes, sont utilisées lorsque la fonctionnalité du système étudié est bien connue, tandis que les méthodes sans modèle sont utilisées lorsqu'il n'y a pas suffisamment d'informations sur le système étudié.

Dans cette partie, une présentation des méthodes de diagnostic les plus connues a été faite, le but n'est pas de présenter toutes les méthodes mais de mettre en relief la richesse des choix qui s'exposent aux concepteurs de systèmes de diagnostic. Les travaux [14] [24] [23] [25] [15] contiennent plus de détails sur ces méthodes.

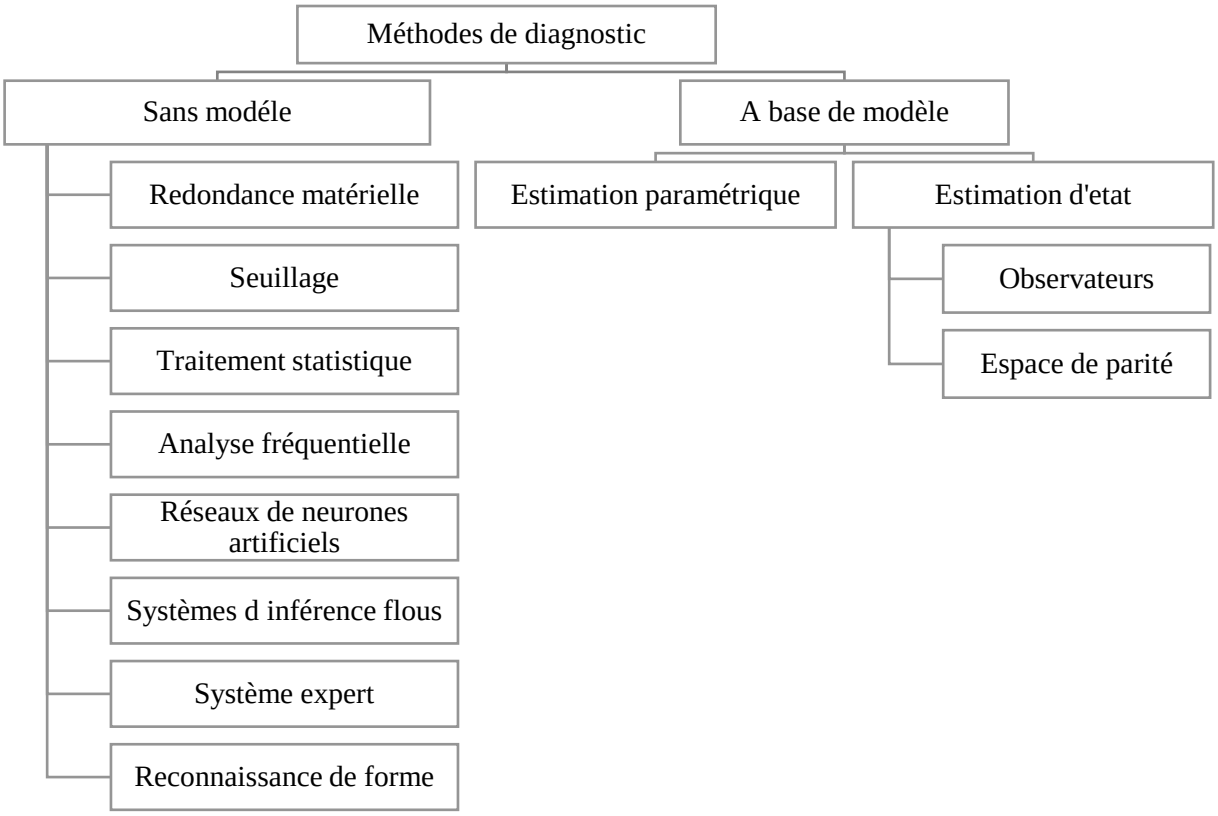


Figure 25: Méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques

III.1 Méthodes sans modèle

Le but de diagnostic sans modèle est de détecter et de diagnostiquer les défaillances qui peuvent survenir dans les systèmes sans avoir recours à un modèle préalablement défini du système.

Pour effectuer un diagnostic sans modèle, on utilise généralement des algorithmes de traitement de signal et d'information qui permettent de traiter les données en temps réel et de détecter les anomalies ou les défaillances. Ces algorithmes peuvent être basés sur des méthodes statistiques, des techniques de filtrage ou encore des approches basées sur l'apprentissage automatique.

Le diagnostic sans modèle est particulièrement utile dans les situations où il est difficile de modéliser le système de manière précise, par exemple lorsque le système est très complexe ou lorsqu'il est soumis à des conditions variables. Il est également utile lorsque le système évolue rapidement et que la modélisation devient rapidement obsolète.

En pratique, le diagnostic sans modèle peut être utilisé dans de nombreux domaines, tels que la maintenance prédictive, la surveillance de processus industriels, la surveillance de systèmes de transport, etc. Il permet de détecter rapidement les défaillances et de prendre les mesures nécessaires pour les corriger, ce qui contribue à améliorer la fiabilité et la sécurité des systèmes dynamiques.

III.1.1 Redondance matérielle :

La redondance matérielle est une méthode utilisée pour améliorer la fiabilité et la sûreté des systèmes dynamiques en utilisant des éléments en excès. Cela permet de réduire les risques d'interruption de service ou de défaillance du système en augmentant le nombre d'éléments qui peuvent prendre le relais en cas de panne ou de défaut.

Cette méthode est particulièrement utilisée dans les systèmes critiques, tels que les systèmes de transport, les systèmes de production d'énergie, les systèmes de communication, les systèmes de contrôle des processus industriels, etc.

Il existe plusieurs types de redondance matérielle, notamment la redondance parallèle, la redondance en série et la redondance en parallèle série. La redondance parallèle implique l'utilisation de plusieurs éléments identiques pour effectuer la même tâche, de sorte qu'un élément de remplacement peut prendre la relève en cas de défaillance. La redondance en série implique l'utilisation d'éléments différents pour effectuer la même tâche, de sorte qu'un élément de remplacement peut prendre la relève en cas de défaillance. La redondance en parallèle série combine les deux types de redondance en utilisant des éléments en parallèle et en série pour effectuer la même tâche.

Il est important de noter que la redondance matérielle ne garantit pas la fiabilité absolue d'un système, elle réduit seulement le risque de défaillance. Par conséquent, il est nécessaire de combiner la redondance matérielle avec d'autres méthodes de sûreté de fonctionnement, comme la surveillance des performances, la maintenance préventive, la formation du personnel, la gestion des risques, etc.

Enfin, la méthode de redondance matérielle est souvent utilisée en combinaison avec la redondance logicielle, qui repose sur des algorithmes pour identifier les erreurs et récupérer les données en cas de défaillance. Ainsi, la combinaison de la redondance matérielle et de la redondance logicielle permet d'obtenir des systèmes plus fiables et plus sûrs, qui répondent aux exigences en matière de disponibilité, de sécurité et de performance.

III.1.2 Seuillage :

La méthode de seuillage est une technique couramment utilisée dans le diagnostic des systèmes dynamiques pour détecter les défaillances potentielles. Elle consiste à définir une valeur seuil à partir de laquelle on déclenche une alarme [58]. Si la valeur du résidu, qui reflète l'écart entre le modèle nominal du système et son comportement réel, dépasse le seuil, cela peut indiquer une défaillance et on déclenche une alarme. Sinon, si la valeur du résidu reste en dessous du seuil, on considère que le système est fonctionnel et on ne déclenche pas d'alarme.

La définition du seuil peut être effectuée de manière subjective, en fonction de l'expertise et de l'expérience de l'opérateur, ou basée sur des critères préétablis, comme l'analyse statistique de données historiques. Dans ce dernier cas, le seuil est choisi de manière à minimiser le taux de fausse alarme tout en maintenant un niveau de détection acceptable.

Il est important de noter que la méthode de seuillage présente des limitations. En particulier, elle peut entraîner un taux élevé de fausse alarme dans les systèmes complexes, où les variations du résidu peuvent être causées par des facteurs autres que les défaillances, comme les perturbations ou les erreurs de modélisation. De plus, la définition du seuil doit être réajustée périodiquement pour tenir compte de l'évolution du système et de son environnement.

Pour pallier ces limitations, il est souvent recommandé de combiner la méthode de seuillage avec d'autres méthodes de détection de défaillances, comme l'analyse des tendances ou l'analyse de la variance. Cela permet d'améliorer la qualité de la détection et de réduire le taux de fausse alarme. En outre, il est important de disposer de données de qualité et de modèles de simulation précis afin de maximiser la sensibilité de la méthode de seuillage aux défaillances et de minimiser sa sensibilité aux perturbations et aux erreurs de modélisation.

III.1.3 Traitement statistique :

La méthode de traitement statistique consiste à analyser les données collectées sur le système afin de détecter des anomalies qui pourraient indiquer une défaillance [59] .

Plusieurs approches statistiques peuvent être utilisées dans le diagnostic des systèmes dynamiques, telles que l'analyse de la variance, l'analyse des tendances ou la régression. L'analyse de la variance consiste à mesurer la dispersion des valeurs observées autour de la moyenne. Elle peut être utilisée pour détecter des changements significatifs dans la variance des données, qui pourraient indiquer une défaillance. L'analyse des tendances consiste à observer l'évolution des données au fil du temps pour détecter des tendances anormales, comme une augmentation ou une diminution soudaine de la valeur d'un paramètre. La régression consiste à établir une relation entre plusieurs variables et à utiliser cette relation pour prédire les valeurs des variables à l'avenir. Elle peut être utilisée pour détecter des déviations anormales entre les valeurs observées et les valeurs prédites.

La méthode de traitement statistique présente plusieurs avantages par rapport à la méthode de seuillage. En particulier, elle permet de détecter des anomalies qui pourraient être masquées par le bruit de fond dans les données et de prendre en compte les variations naturelles du système. De plus, elle offre une plus grande flexibilité pour détecter des défaillances de différents types et de différentes intensités.

Cependant, la méthode de traitement statistique présente également des limitations. En particulier, elle nécessite des données de qualité et une bonne modélisation du système pour être efficace. De plus, elle peut être complexe à mettre en œuvre et nécessite une expertise statistique pour interpréter correctement les résultats. Pour pallier ces limitations, il est souvent recommandé de combiner la méthode de traitement statistique avec d'autres méthodes de détection de défaillances, comme la méthode de seuillage ou l'analyse des corrélations. Cela permet d'améliorer la qualité de la détection et de réduire le taux de fausse alarme.

III.1.4 Analyse fréquentielle (Filtrage) :

L'analyse fréquentielle par filtrage étudie la répartition des fréquences des vibrations du système à l'aide de filtres passe-bas et passe-haut afin de mettre en évidence des anomalies qui pourraient indiquer une défaillance [60].

Le principe de l'analyse fréquentielle par filtrage est d'appliquer des filtres passe-bas et passe-haut aux données de vibrations collectées sur le système. Les filtres passe-bas laissent passer les fréquences basses et bloquent les fréquences hautes, tandis que les filtres passe-haut laissent passer les fréquences hautes et bloquent les fréquences basses. En comparant les données filtrées à des références préétablies, on peut détecter des anomalies qui pourraient indiquer une défaillance telles que des fréquences anormalement élevées ou faibles.

L'analyse fréquentielle par filtrage présente plusieurs avantages par rapport à d'autres techniques de diagnostic. En particulier, elle permet de mettre en évidence des anomalies qui pourraient être masquées par le bruit de fond dans les données et de sélectionner les fréquences qui sont les plus pertinentes pour le diagnostic. De plus, elle offre une bonne résolution temporelle et permet de localiser les défaillances du système.

Cependant, l'analyse fréquentielle par filtrage présente également des limitations. En particulier, elle nécessite des données de qualité et une bonne modélisation du système pour être efficace. De plus, elle peut être complexe à mettre en œuvre et nécessite une expertise en traitement du signal pour interpréter correctement les résultats. Pour pallier ces limitations, il est souvent recommandé de combiner l'analyse fréquentielle par filtrage avec d'autres techniques de diagnostic, comme l'analyse de la variance ou l'analyse des corrélations. Cela permet d'améliorer la qualité de la détection et de réduire le taux de fausse alarme.

III.1.5 Capteurs spécifiques (Capteurs-Détecteurs) :

Les capteurs spécifiques, également appelés capteurs détecteurs, sont des instruments de mesure utilisés dans le diagnostic des systèmes dynamiques pour détecter et mesurer une grandeur physique spécifique [61], telle que la température, la pression, l'humidité, etc.

Il existe de nombreux types de capteurs spécifiques, chacun conçu pour mesurer une grandeur physique différente. Par exemple, un thermocouple est un capteur de température utilisé pour mesurer la température dans les fours industriels et les chaudières, tandis qu'un manomètre est un capteur de pression utilisé pour mesurer la pression dans les systèmes de pression.

La méthode de fonctionnement des capteurs spécifiques dépend de la grandeur physique qu'ils sont censés mesurer. En général, ils fonctionnent en convertissant la grandeur physique en un signal électrique, qui peut être ensuite analysé et interprété.

Par exemple, dans le cas d'un thermocouple, une différence de température entre deux fils métalliques de différents types crée une tension électrique qui peut être mesurée et utilisée pour déterminer la température.

Les capteurs spécifiques sont largement utilisés dans de nombreuses industries, notamment l'automobile, l'aérospatiale, l'énergie, la santé et l'environnement. Ils sont également couramment utilisés dans les systèmes de contrôle et de régulation, tels que les thermostats de chauffage et de climatisation.

Il est important de noter que les capteurs spécifiques ont des limites de précision et de sensibilité, et il est donc important de vérifier régulièrement leur étalonnage pour s'assurer de leur fiabilité. De plus, certains capteurs peuvent être affectés par des interférences électromagnétiques ou des conditions environnementales extrêmes, ce qui peut affecter leur précision.

En conclusion, les capteurs spécifiques sont des outils essentiels pour la mesure et le diagnostic des systèmes dynamiques. Ils sont largement utilisés dans de nombreuses industries et applications, mais il est important de les entretenir et de les vérifier régulièrement pour s'assurer de leur fiabilité.

III.1.6 Réseaux de neurones artificiels :

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont des modèles informatiques inspirés du fonctionnement du cerveau humain. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, y compris le diagnostic des systèmes dynamiques [62], [63].

La méthode de RNA pour le diagnostic des systèmes dynamiques consiste à entraîner un RNA avec des données de fonctionnement normal et anormal du système, puis à utiliser le RNA entraîné pour détecter des anomalies dans le fonctionnement du système en temps réel.

Pour entraîner le RNA, on utilise un jeu de données étiquetées contenant des exemples de fonctionnement normal et anormal du système. On utilise ces exemples pour ajuster les poids et les biais du RNA, de sorte qu'il soit capable de distinguer le fonctionnement normal du fonctionnement anormal.

Une fois entraîné, le RNA peut être utilisé pour analyser de nouvelles données de fonctionnement du système et détecter des anomalies. Cela se fait en envoyant les données dans le RNA et en observant la sortie du RNA. Si la sortie du RNA correspond à ce qu'on attend pour du fonctionnement normal, alors le système est considéré comme fonctionnant normalement. Si la sortie du RNA ne correspond pas à ce qu'on attend pour du fonctionnement normal, alors le système est considéré comme présentant une anomalie.

Il y a plusieurs types de RNA qui peuvent être utilisés pour le diagnostic des systèmes dynamiques, notamment les RNA à propagation avant et les RNA à rétropropagation. Les RNA à propagation avant consistent en un réseau de neurones qui sont entraînés en utilisant un processus itératif appelé propagation avant, dans lequel les données d'entrée sont envoyées dans le réseau, traitées par chaque neurone du réseau et finalement produisent une sortie. Les RNA à rétropropagation, également appelés RNA à erreur back propagation, utilisent un processus itératif appelé rétropropagation de l'erreur pour ajuster les poids du réseau de neurones.

En utilisant des RNA pour le diagnostic des systèmes dynamiques, il est possible de détecter des anomalies de manière plus précise et plus rapide que par des méthodes de diagnostic traditionnelles. Cependant, il est important de disposer d'un jeu de données suffisamment important et bien étiqueté pour entraîner le RNA de manière efficace, et il peut être difficile de déterminer la meilleure architecture de RNA à utiliser pour un système donné.

III.1.7 Systèmes d'inférence flous :

Les systèmes d'inférence flous sont des outils logiciels qui permettent de modéliser et de résoudre des problèmes où l'incertitude et l'imprécision sont présentes [64], [65]. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications, y compris le diagnostic des systèmes dynamiques.

La méthode d'inférence floue pour le diagnostic des systèmes dynamiques permet de définir un modèle de fonctionnement normal et anormal du système en utilisant des variables floues et des règles floues. Les variables floues sont des variables qui peuvent prendre des valeurs comprises entre 0 et 1, et qui représentent des concepts tels que "élevé" ou "faible". Les règles floues sont des propositions qui utilisent des variables floues et qui peuvent être utilisées pour déduire des conclusions floues.

Pour utiliser un système d'inférence flou pour le diagnostic des systèmes dynamiques, on commence par définir des variables floues qui représentent les différents états du système et des règles floues qui décrivent le fonctionnement normal et anormal du système. On peut alors utiliser le système d'inférence flou pour analyser de nouvelles données de fonctionnement du système et déterminer si le système est en état normal ou anormal.

Pour cela, on utilise le système d'inférence flou pour évaluer les variables floues en fonction des données d'entrée. Les règles floues sont alors appliquées pour déduire une conclusion floue sur l'état du système. La conclusion floue peut être convertie en une valeur numérique en utilisant une fonction de pertinence, qui permet de déterminer le degré de confiance de la conclusion.

Les systèmes d'inférence flous peuvent être utilisés pour le diagnostic des systèmes dynamiques car ils permettent de modéliser l'imprécision et l'incertitude qui peuvent être présentes dans les données de fonctionnement du système. Cependant, ils nécessitent une modélisation précise du fonctionnement normal et anormal du système, ce qui peut être difficile à réaliser dans certains cas. De plus, ils peuvent être sensibles aux erreurs de modélisation et peuvent nécessiter un grand nombre de règles floues pour modéliser de manière précise le fonctionnement du système.

III.1.8 Les systèmes experts (le raisonnement à partir des cas) :

La méthode des systèmes experts est une approche de résolution de problèmes qui utilise la connaissance et l'expérience des experts dans un domaine donné pour résoudre des problèmes complexes [66], [67] . Elle est souvent utilisée dans le diagnostic des systèmes dynamiques, qui peuvent être des systèmes physiques tels que des machines ou des systèmes de logiciels.

La méthode des systèmes experts repose sur l'utilisation de bases de connaissances, qui sont des ensembles de règles et de données qui représentent les connaissances et l'expérience

d’experts dans un domaine donné. Ces bases de connaissances sont utilisées par un système expert pour effectuer des inférences et prendre des décisions en utilisant des techniques de raisonnement à partir de cas.

Le raisonnement à partir de cas implique l’utilisation d’exemples précédemment résolus pour résoudre des problèmes similaires. Le système expert compare les caractéristiques du problème en cours à celles des problèmes résolus précédemment, et utilise ces similitudes pour trouver une solution au problème en cours.

La méthode des systèmes experts est particulièrement utile dans les domaines où il y a une grande quantité de connaissances à traiter, ou lorsque les problèmes sont complexes et nécessitent l’expertise de plusieurs personnes. Elle peut également être utilisée pour automatiser des processus de prise de décision qui nécessitent une expertise humaine, ce qui peut être bénéfique dans les situations où les délais sont courts ou lorsque l’accès à des experts humains est limité.

Cependant, la méthode des systèmes experts présente également certaines limites. Elle nécessite une grande quantité de connaissances préalables pour être mise en place, et peut être coûteuse à mettre en place et à maintenir. De plus, elle peut être moins flexible que le raisonnement humain, car elle est limitée aux connaissances et aux expériences incluses dans sa base de connaissances.

III.1.9 Reconnaissance de formes :

La reconnaissance de formes est un domaine de l’intelligence artificielle qui s’intéresse à la manière de faire en sorte que les ordinateurs soient capables de reconnaître des formes et des structures dans des données brutes [51], [64], [65]. Cette technique est particulièrement utile dans le diagnostic des systèmes dynamiques, car elle permet de détecter des anomalies dans le comportement d’un système et de les corriger avant qu’elles ne causent des problèmes plus graves.

Il existe plusieurs approches différentes pour la reconnaissance de formes, mais l’une des plus couramment utilisées est l’apprentissage automatique. Cette méthode repose sur l’utilisation d’algorithmes de machine learning pour analyser des données et apprendre à reconnaître des patterns ou des modèles dans ces données.

Pour utiliser l’apprentissage automatique pour la reconnaissance de formes dans le diagnostic des systèmes dynamiques, il faut d’abord collecter des données sur le système en question. Ces données peuvent être obtenues de différentes manières, par exemple en utilisant des capteurs pour mesurer les différentes variables du système ou en analysant les données enregistrées par le système lui-même.

Une fois suffisamment de données ont été collectées, elles sont utilisées pour entraîner un modèle de reconnaissance de formes. Ce modèle est constitué d’un algorithme de machine learning qui va analyser les données et apprendre à reconnaître les différentes formes et structures présentes dans les données.

Une fois le modèle entraîné, il peut être utilisé pour détecter des anomalies dans le comportement du système en analysant de nouvelles données collectées sur le système. Si le modèle détecte une anomalie, il peut alors être utilisé pour générer une alerte ou déclencher une action corrective pour corriger le problème avant qu'il ne cause des dommages ou des perturbations dans le système.

III.2 Méthodes avec modèle

Le diagnostic à base de modèle repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système à diagnostiquer pour simuler son comportement et comparer les résultats de la simulation à des mesures réelles prises sur le système. Si les résultats de la simulation sont significativement différents des mesures réelles, cela peut indiquer la présence d'une anomalie dans le système qui nécessite une intervention corrective.

Pour utiliser le diagnostic à base de modèle dans la détection des défauts, il faut tout d'abord construire un modèle mathématique du système à diagnostiquer. Ce modèle peut être basé sur des données physiques ou sur des équations de dynamique de systèmes. Une fois que le modèle est construit, il peut être utilisé pour simuler le comportement du système en réponse à différentes conditions d'entrée.

Pour valider le modèle, il est important de comparer les résultats de la simulation à des mesures réelles prises sur le système. Si les résultats de la simulation sont suffisamment proches des mesures réelles, cela signifie que le modèle est assez précis pour être utilisé dans le diagnostic du système.

Une fois que le modèle est validé, il peut être utilisé pour détecter les anomalies dans le comportement du système en comparant les résultats de la simulation à des mesures réelles prises sur le système. Si les résultats de la simulation sont significativement différents des mesures réelles, cela peut indiquer la présence d'une anomalie dans le système qui nécessite une intervention corrective.

Le diagnostic avec modèle est particulièrement utile pour la prédiction des erreurs car il permet de détecter les anomalies dans le fonctionnement d'un système de manière proactive, avant qu'elles ne causent des problèmes plus graves. Cette technique est également utile pour optimiser le fonctionnement d'un système en modifiant le modèle pour prendre en compte les effets de différentes variables sur le comportement du système.

Parmi les méthodes les plus connues dans le diagnostic à base de modèle, nous trouvons l'estimation paramétrique et l'estimation d'état.

III.2.1 Estimation paramétrique :

L'estimation paramétrique est basée sur la détermination des paramètres d'un modèle mathématique à partir de données observées. Elle consiste à étudier et à comprendre le comportement d'un système à partir de ses caractéristiques et de ses performances [59], [68].

Il existe de nombreuses méthodes d'estimation paramétrique, qui peuvent être classées selon différents critères. Selon la nature des données observées, on peut distinguer entre l'estimation paramétrique à partir de données a priori et l'estimation paramétrique à partir de données a posteriori. Dans le premier cas, les données sont disponibles avant la détermination des paramètres, alors que dans le second cas, les données sont collectées après la détermination des paramètres. Selon le nombre de paramètres à estimer, on peut également distinguer entre l'estimation paramétrique à un paramètre et l'estimation paramétrique à plusieurs paramètres.

Pour effectuer l'estimation paramétrique dans le cadre du diagnostic des systèmes dynamiques, il est d'abord nécessaire de définir un modèle mathématique du système. Ce modèle doit être suffisamment simple pour pouvoir être manipulé et analysé, mais suffisamment précis pour refléter de manière fidèle le comportement du système. Une fois le modèle défini, il est possible de déterminer les paramètres qui permettent de le mettre en forme.

Il existe plusieurs méthodes pour estimer les paramètres d'un modèle. La méthode la plus simple consiste à utiliser des techniques d'optimisation pour minimiser la différence entre les données observées et les prédictions du modèle. Cette approche est appelée "moindres carrés". Elle permet de trouver les valeurs des paramètres qui minimisent l'erreur quadratique moyenne entre les données observées et les prédictions du modèle.

Il existe également d'autres méthodes plus sophistiquées, comme la méthode de maximum de vraisemblance, qui permet de trouver les valeurs des paramètres qui maximisent la probabilité de générer les données observées à partir du modèle. Cette méthode est particulièrement utile lorsque les données sont bruyantes ou lorsqu'il y a peu de données disponibles.

Après la modélisation et l'estimation des paramètres du systèmes en utilisant les entrées/sorties, le processus de diagnostic utilise ces données pour les comparer avec les paramètres physiques et prendre la décision sur l'existence de défauts (figure 26).

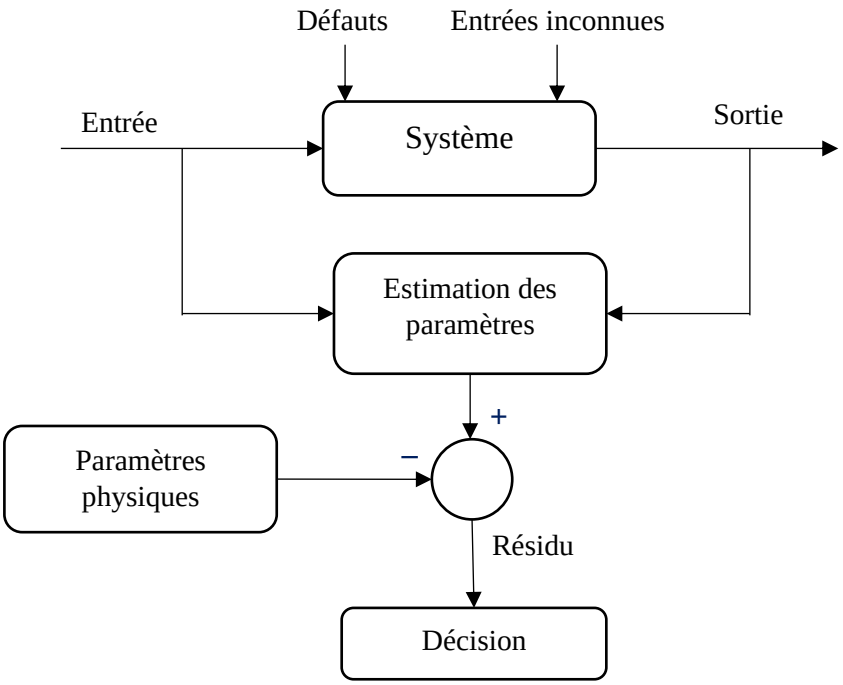


Figure 26: Procédure de détection de défaut par estimation paramétrique

La deuxième catégorie de méthodes basées sur les modèles comprend celles qui utilisent l'estimation de l'état. Cela inclut l'observateur et l'espace de parité.

III.2.2 Estimation d'état :

L'estimation d'état consiste à utiliser des informations issues de modèles pour créer des grandeurs de même nature que celles issues des capteurs. L'avantage est qu'il est alors possible de remplacer un capteur physique par un capteur informationnel (résidu).

Nous présentons par la suite l'espace de parité et l'observateur qui sont les méthodes les plus utilisées dans ce sens.

III.2.2.1 Espace de parité (approche par Relation de Redondance Analytique RRA) :

L'Espace de parité est une méthode utilisée pour diagnostiquer les systèmes dynamiques. Elle s'appuie sur la Relation de Redondance Analytique (RRA) pour établir des relations de similitude entre différents éléments du système [42], [69], [70].

La RRA est une relation binaire qui indique si deux éléments du système sont similaires ou non. Cette relation peut être représentée sous forme de matrice, où chaque élément du système est représenté par une ligne et une colonne, et où la valeur de chaque cellule indique si les éléments correspondants sont similaires ou non.

Pour utiliser l'espace de parité, il faut d'abord définir les éléments du système à étudier et établir les relations de similitude entre eux en utilisant la RRA. Ensuite, on peut utiliser ces relations pour établir des groupes d'éléments similaires, appelés clusters, qui permettent de mieux comprendre le fonctionnement du système.

Une fois ces clusters établis, on peut utiliser différentes techniques de visualisation pour mieux comprendre comment les éléments du système sont liés entre eux et comment ils influencent le fonctionnement du système dans son ensemble.

L'Espace de parité est particulièrement utile pour diagnostiquer les systèmes complexes, qui peuvent être difficiles à comprendre de manière intuitive. Elle permet de mettre en évidence des relations qui pourraient être difficiles à repérer autrement, ce qui peut être très utile pour établir des diagnostics précis et proposer des solutions efficaces pour résoudre les problèmes rencontrés.

III.2.2.2 Observateurs :

L'estimation d'état par observateur est une technique utilisée pour déterminer l'état actuel d'un système dynamique à partir de mesures observées. Elle repose sur l'utilisation d'un modèle mathématique du système, appelé observateur, qui est conçu pour évaluer en continu l'état du système à partir des mesures observées [71]–[74].

Pour mettre en œuvre cette technique, il faut d'abord définir un modèle mathématique du système à étudier, qui décrit les équations de mouvement du système et les relations entre ses différents éléments. Ensuite, on peut définir un observateur en utilisant ce modèle mathématique et en prenant en compte les mesures observées.

L'observateur est conçu de manière à suivre l'état du système en temps réel et à estimer l'état actuel du système à partir des mesures observées. Pour ce faire, il utilise une boucle de commande qui compare les mesures observées avec les valeurs prévues basées sur le modèle mathématique du système, et corrige les estimations de l'état en fonction des écarts observés.

L'estimation d'état par observateur est particulièrement utile dans les systèmes complexes, où il peut être difficile de déterminer l'état actuel du système. Elle peut également être utilisée dans les systèmes où les données de mesure sont incomplètes ou imprécises, car elle permet de combiner différentes sources de données pour obtenir une estimation plus précise de l'état du système.

Nous optons pour la méthode des observateurs grâce à sa flexibilité et sa capacité d'adaptation. La conception et le choix d'observateur se fait selon le type de système, ce qui rend cette démarche avantageuse par rapport aux autres.

En outre, Les observateurs estiment l'état du système et permettent au diagnostiqueur de fonctionner avec le minimum d'information. C'est une caractéristique qui confère aux observateurs un point fort et qui les rend très demandés dans le diagnostic des systèmes complexes.

L'observateur joue le rôle d'un capteur fictif permettant de minimiser les coûts et gagner en espace.

Différents types d'observateurs d'état sont disponibles pour répondre à des besoins spécifiques, tels que la précision de l'estimation, la robustesse aux perturbations, ou encore la complexité de l'algorithme.

Parmi les différents types d'observateurs, l'observateur de Luenberger est une option populaire. Il utilise une approche géométrique pour estimer l'état du système à partir des données de mesure. L'observateur de Luenberger présente plusieurs avantages, tels que sa simplicité d'implémentation, sa stabilité et sa robustesse aux perturbations. De plus, il est facilement adaptable à différents types de systèmes dynamiques.

Dans cette thèse, nous utilisons l'observateur de Lunberger, cependant d'autres observateurs peuvent être également utilisés, le choix d'un observateur dépend des exigences spécifiques de chaque système, ainsi que des compromis à faire entre la précision d'estimation, la complexité de l'algorithme et la robustesse aux perturbations.

III.2.2.2.1 Observateur de Luenberger :

L'observateur de Luenberger a été développé par David G. Luenberger dans les années 1960. Il constitue une contribution importante à la théorie de la commande des systèmes, car il permet d'estimer l'état d'un système à partir de mesures de sortie et d'entrée, ce qui est souvent plus facile à obtenir que les mesures d'état directes [75]–[77].

L'observateur de Luenberger est représenté par le modèle mathématique ci-dessous :

$$O:\begin{cases}\check{\dot{x}}(t) = A.\check{x}(t) + B.u(t) + K\big(y(t) - \check{y}(t)\big) \\ \check{y}(t) = C.\check{x}(t) + D.u(t) \\ \check{x}(0) = \check{x}_0\end{cases} \quad (5)$$

A est la matrice d'état du système, B est la matrice de commande, C est la matrice d'observation et D est la matrice d'action directe.

K est le gain de l'observateur O, et le système est observable.

Le système est observable si et seulement si la paire [A,C] est observable, c'est-à-dire pour $A \in \mathbb{R}^{n*n}$:

$$rang\begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1}\end{bmatrix} = n \quad (6)$$

La technique de placement de pôles est souvent utilisée pour concevoir l'observateur de Luenberger. Le placement de pôles consiste à placer les pôles de l'observateur de telle sorte qu'ils aient une dynamique plus rapide que celle des pôles du système d'origine. Cela permet de garantir que l'observateur est suffisamment rapide pour suivre les variations rapides de l'état du système, et ainsi fournir des estimations précises de l'état actuel du système. Le placement de pôles est également utilisé pour optimiser les performances de l'observateur en termes de temps de convergence et d'erreur d'estimation.

Le choix des pôles d'un observateur est important car il détermine les caractéristiques de l'observateur, comme sa rapidité et sa stabilité. Voici quelques considérations importantes lors du choix des pôles d'un observateur :

Rapidité de l'observateur : Les pôles de l'observateur doivent être choisis de manière à garantir une réponse rapide de l'observateur pour suivre les variations de l'état réel du système. Cela signifie que les pôles doivent être placés dans la partie gauche du plan complexe, c'est-à-dire avec une partie réelle négative. Cependant, il est important de trouver un équilibre entre la rapidité de l'observateur et sa stabilité.

Stabilité de l'observateur : Les pôles de l'observateur ne doivent pas être trop proches de l'axe imaginaire pour éviter les oscillations indésirables de l'observateur. Si les pôles sont trop proches de l'axe imaginaire, l'observateur peut osciller et conduire à une instabilité du système.

En général, les pôles doivent être placés de manière à assurer la stabilité du système et à répondre aux spécifications de conception, tout en évitant les oscillations indésirables.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné différentes méthodes de diagnostic des systèmes dynamiques, y compris les méthodes sans modèle, telles que la redondance matérielle, le seuillage, le traitement statistique, l'analyse fréquentielle, les réseaux de neurones artificiels, les systèmes d'inférence flous, les systèmes experts et la reconnaissance de formes. Nous avons également examiné les méthodes de diagnostic basées sur des modèles, telles que l'estimation paramétrique, l'estimation d'état et les méthodes basées sur des observateurs et sur l'espace de parité.

Après avoir examiné les différentes méthodes, nous pouvons conclure que la méthode d'observateurs est un choix judicieux pour le diagnostic des systèmes dynamiques. En effet, cette méthode permet de déterminer les états internes du système à partir de mesures externes, ce qui la rend capable de détecter et d'isoler les défauts en jouant le rôle d'un capteur fictif.

En outre, la méthode d'observateurs est également flexible et peut être adaptée à des situations différentes en fonction des besoins spécifiques du système. Elle peut également être combinée avec d'autres méthodes pour améliorer la performance globale du système de diagnostic.

Dans le chapitre suivant, nous allons exposer notre méthode proposée pour le diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides et notre choix de la méthode d'observateurs pour résoudre ce problème complexe.

Chapitre 4 : Diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides

Introduction

Le diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides est un enjeu crucial pour garantir la fiabilité et la qualité des systèmes complexes intégrant des technologies mécaniques, électroniques et informatiques.

Pour garantir la sécurité et la satisfaction des utilisateurs, il est important de développer une méthode de diagnostic efficace, rapide et fiable. Dans ce sens, le quatrième chapitre de ce travail s'inscrit pour présenter notre nouvelle méthode de diagnostic.

Ce chapitre détaillera la détection et la localisation de défauts en utilisant les observateurs comme outils de diagnostic, les Bond Graphs comme outils de modélisation et les seuils dynamiques comme levier d'amélioration de la fiabilité de diagnostic. Cette méthode permettra d'identifier les modes, de détecter et d'isoler les défauts, offrant ainsi une solution fiable pour le diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides.

En utilisant notre approche, nous pouvons garantir la fiabilité et la qualité de fonctionnement de ces systèmes complexes, améliorant ainsi la sécurité et la satisfaction des utilisateurs.

I Détection et localisation des défauts par observateurs

I.1 Concept de détection et de localisation

Considérons un système dynamique non linéaire qui possède m sorties et qui fonctionne selon n modes. La représentation de l'espace d'état ci-dessous décrit le comportement dynamique linéaire d'un mode i ∈[1,n].

$$S_i: \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i.x(t) + B_i.u(t) + E_{ix}.d(t) \\ y(t) = C_i.x(t) + D_i.u(t) + E_{iy}.d(t) \end{cases} \quad (7)$$

L'approche présentée dans cette thèse traite que les défauts capteurs, par conséquent $E_{ix} = 0$ et le système peut être décrit par l'équation (8).

$$S_i: \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i.x(t) + B_i.u(t) \\ y(t) = C_i.x(t) + D_i.u(t) + E_i.d(t) \end{cases} \quad (8)$$

Où $x(t) \in \mathbb{R}^k$ est le vecteur d'état, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur de sortie, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ est le vecteur d'entrée et $d(t) \in \mathbb{R}^k$ représente le vecteur des défauts.

$A_i \in \mathbb{R}^{k*k}$ est la matrice d'état du système, $B_i \in \mathbb{R}^{k*p}$ est la matrice de commande, $C_i \in \mathbb{R}^{m*k}$ est la matrice d'observation et $D_i \in \mathbb{R}^{m*p}$ est la matrice d'action directe.

$E_i \in \mathbb{R}^{m*k}$ est la matrice de distribution des défauts agissant sur l'équation de mesure (capteurs de défauts) dans le mode i.

La méthode basée sur les observateurs se compose de deux parties : un premier bloc d'observateur qui identifie l'emplacement actuel du système en cherchant le mode actif et un autre bloc d'observateur qui suit l'état du système en cherchant les défauts capteurs [78].

I.1.1 Identification du mode

Nous associons à chaque mode un observateur.

Le type le plus simple d'observateurs que nous pouvons utiliser pour appliquer notre méthode est celui de Luenberger [75], représenté par le modèle mathématique ci-dessous :

$$O_i: \begin{cases} \check{\dot{x}}(t) = A_i.\check{x}(t) + B_i.u(t) + K_i\big(y(t) - \check{y}(t)\big) \\ \check{y}(t) = C_i.\check{x}(t) + D_i.u(t) \\ \check{x}(0) = \check{x}_0 \end{cases} \quad (9)$$

$K_i \in \mathbb{R}^{k*k}$ est le gain de l'observateur O_i, et la paire $[A_i, C_i]$ est observable.

L'erreur d'estimation $e_i(t)$ entre l'état du système x (t) et l'état reconstruit $\check{x}(t)$ en utilisant l'observateur i est donné par l'équation (10).

$$e_i(t) = x(t) - \check{x}(t) \quad (10)$$

Le résidu $r_i(t)$ est l'erreur d'estimation entre la sortie obtenue y(t) et la sortie reconstruite $\check{y}(t)$ par l'observateur i. Le résidu converge vers zéro uniquement lorsque le système évolue dans le mode i ; sinon, elle s'écarte significativement de zéro.

$$r_i(t) = y(t) - \check{y}(t) \tag{11}$$

$$\begin{cases} \dot{e}_i(t) = (A_i - K_i C_i).e_i(t) - K_i E_i d(t) \\ \quad r_i(t) = C_i.e_i(t) + E_i.d(t) \end{cases} \tag{12}$$

Chaque observateur reçoit toutes les entrées sorties du système, les sorties reconstruites par chaque observateur $\check{y}$ (t) sont comparées, à chaque instant, aux sorties mesurées pour générer des vecteurs résiduels ri.

Le résidu ri sera ensuite évalué pour générer les signatures des modes comme montré dans la figure 27.

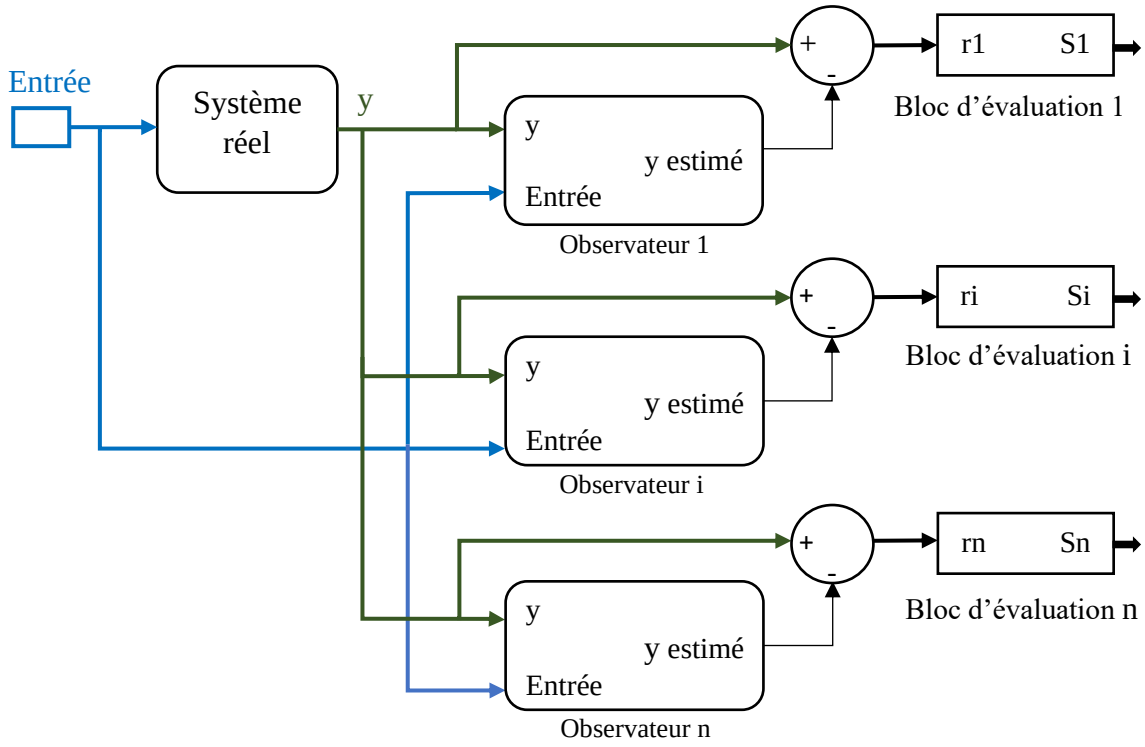


Figure 27: Bloc d'observateurs pour la détection des modes

L'évaluation des résidus consiste à comparer chaque élément calculé à un seuil Mi qui est défini en fonction des erreurs de modélisation, des perturbations et de bruit ; nous utilisons alors la logique de décision suivante :

Si |ri(t)|> Mi alors Si =0

Sinon Si=1

L'identification du mode courant consiste à faire la correspondance entre le vecteur signature obtenu (S1,Si,Sn) et la signature figurant dans le tableau théorique des signatures présenté ci-dessous :

Tableau 4: Tableau théorique des signatures de mode

Signature	**Mode 1**	**Mode i**	**Mode n**	**Mode inconnu**
S1	1	0	0	0
Si	0	1	0	0
Sn	0	0	1	0

I.1.2 Détection et isolation des défauts

Si le mode est identifié à l'aide du premier module, nous utilisons M observateurs correspondant au mode identifié i (figure 28) tels que chacun de ces observateurs est sensible à une seule sortie.

Chaque mode i est décrit par l'équation (13).

$$S_{ij}:\begin{cases}\dot{x}(t) = A_i.x(t) + B_i.u(t)\\ y_j(t) = C_{ij}.x(t) + D_{ij}.u(t) + E_{ij}.d(t)\end{cases} \quad (13)$$

La structure de l'observateur est donnée par l'équation (14).

$$O_{ij}:\begin{cases}\check{\dot{x}}(t) = A_i.\check{x}(t) + B_i.u(t) + L_{ij}\big(y(t) - \check{y}(t)\big)\\ \check{y}_j(t) = C_{ij}.\check{x}(t) + D_{ij}.u(t)\\ \check{x}(0) = \check{x}_0\end{cases} \quad (14)$$

$L_{i\,j} \in \mathbb{R}^{\mathrm{m}}$ est le gain de l'observateur O_{ij}, et la paire $[A_i, C_{ij}]$ est observable.

$e_{ij}(t)$ est la jème composante du vecteur d'erreur d'estimation $e_i(t)$ à l'instant t.

$$e_{ij}(t) = x(t) - \check{x}(t) \quad (15)$$

$r_{ij}(t)$ est la jème composante du vecteur résiduel $r_i(t)$ à l'instant t.

$$r_{ij}(t) = y(t) - \check{y}(t) \quad (16)$$

$$\begin{cases}\dot{e}_{ij}(t) = (A_i - L_{ij}C_{ij}).e_{ij}(t) - L_{ij}E_{ij}d(t)\\ \dot{r}_{ij}(t) = C_{ij}.e_i(t) + E_{ij}.d(t)\end{cases} \quad (17)$$

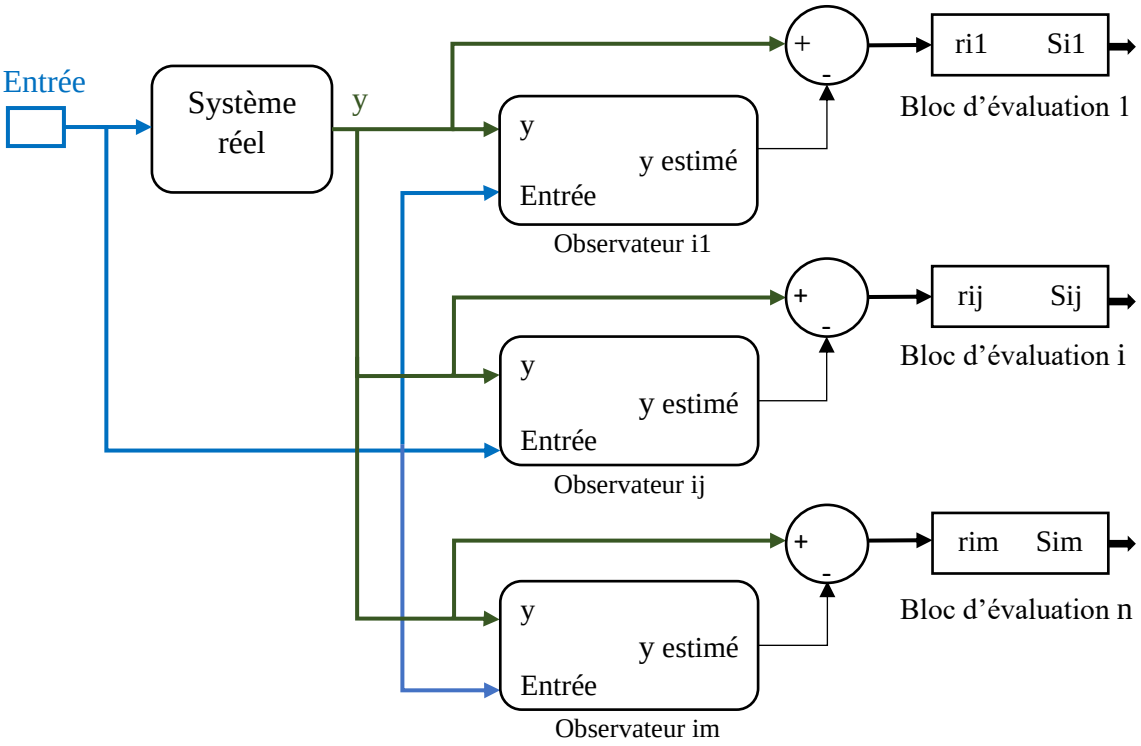


Figure 28: Bloc d'observateurs pour la détection de défauts

Le résidu rij sera ensuite évalué pour générer les signatures des capteurs, appelées également signatures de défaut. L'évaluation du résidu consiste à comparer chaque élément calculé à un seuil Mij.

Si |rij(t)|> Mij alors Si =1 ; ce qui signifie que la sortie j est défectueuse.

Sinon Sij=0

L'identification de la sortie défectueuse fait la correspondance entre le vecteur signature obtenu (Si1,Sij,SiM) et la signature présentée dans le tableau théorique des signatures ci-dessous :

Tableau 5: tableau théorique des signatures de défaut

Signature	**C1**	**Cj**	**CM**
Si1	1	0	0
Sij	0	1	0
SiM	0	0	1

II Intégration de l'automate hybride et fiabilisation de détection de modes

II.1 Introduction

La méthode présentée dans la partie I permet de détecter et localiser les défauts dans un système dynamique hybride en utilisant deux blocs d'observateurs. Bien que cette approche soit intéressante, elle n'est toujours pas capable de détecter instantanément le changement de l'état

continu ; par conséquent et en cas de défaut, le système ne peut pas identifier correctement le mode défectueux. Dans cette partie, une nouvelle version est proposée pour améliorer cette approche et atteindre de bons résultats de diagnostic.

Les systèmes dynamiques hybrides sautent d'un mode à un autre et à chaque transition, les observateurs mettent un temps τ pour converger vers l'estimation d'état souhaité. Comme montré dans la figure 29, lors de la transition du mode 1 vers le mode 2 les deux signatures des deux modes sont égales à zéro et la méthode est incapable de détecter le mode courant. Pour régler ce problème et rendre l'approche des observateurs plus robuste, nous avons intégré une nouvelle procédure basée sur le temps.

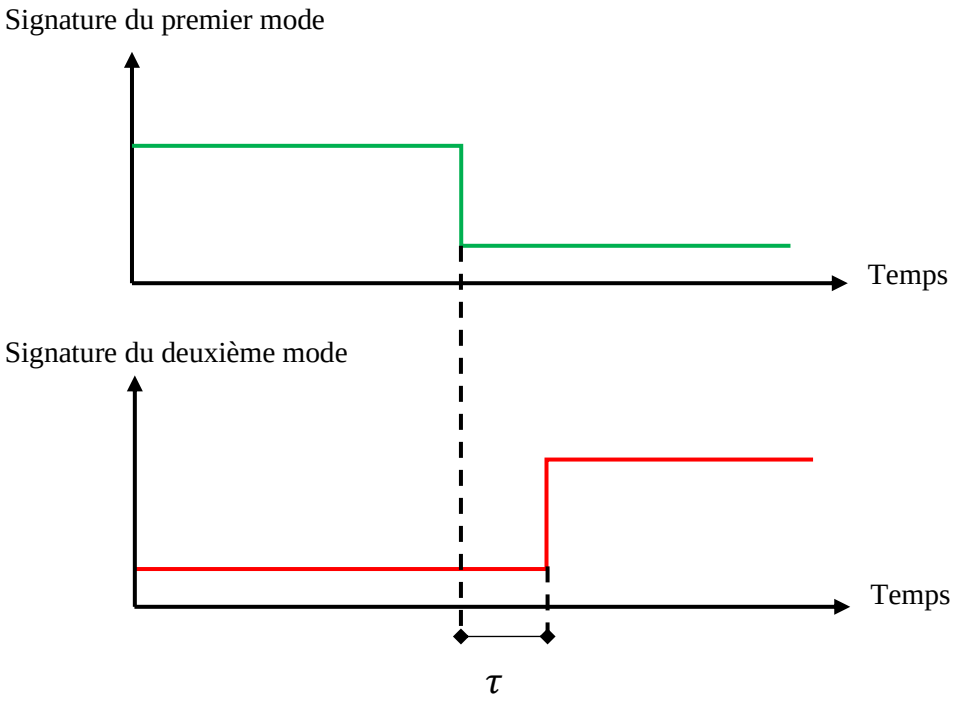


Figure 29: La plage inconnue

II.2 Développement de la méthode

Nous commençons par l'étude des différents cas possibles en utilisant la première méthode comme montré dans la figure 30, et nous proposons des solutions pour chaque situation.

Les modes détectés précédemment et postérieurement sont respectivement le mode avant et après la plage τ.

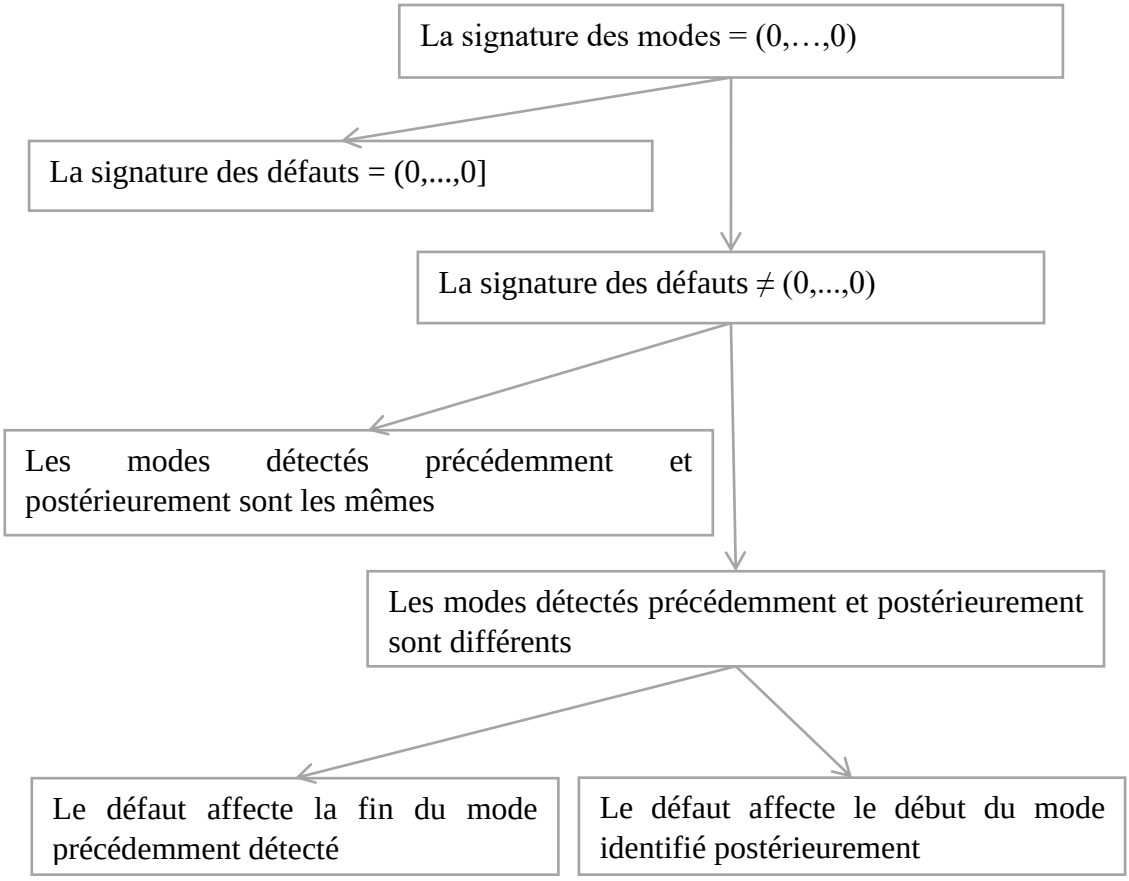


Figure 30: Analyse de cas

Les systèmes dynamiques hybrides sont largement appliqués dans le domaine industriel et ils fonctionnent périodiquement de manière cyclique. Nous nous concentrons sur cette caractéristique pour construire notre concept de détection et d'isolation.

Tout d'abord, nous calculons le temps de sécurité de chaque mode, nous modélisons le système par des automates hybrides, puis nous ajoutons les contraintes de temps [T1, Ti,Tn] comme le montre la figure 31 .

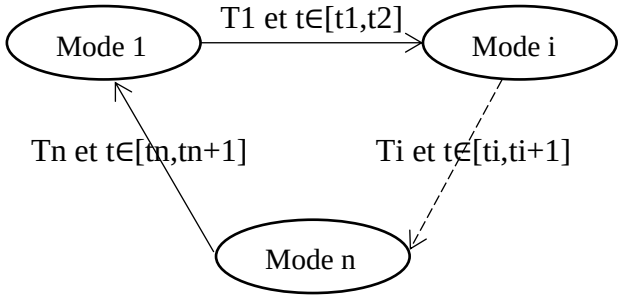


Figure 31: Intégration des contraintes de temps

Nous étudions le cas où le vecteur signature de mode = [0,...,0].

Si le vecteur signature de défaut = [0,...,0] le système est sain.

Sinon, le système est défectueux et nous pouvons avoir deux cas :

-les modes détectés précédemment et postérieurement sont les mêmes ; dans ce cas le mode défectueux est le même que celui détecté avant et après le défaut.

-les modes détectés précédemment et postérieurement sont différents, ce qui conduit à deux cas :

Le défaut affecte la fin du mode précédemment détecté

Si le défaut affecte la fin d'un mode, il influence automatiquement son temps normal ; nous donnons un exemple pour l'expliquer.

Prenons l'exemple d'un système dynamique hybride qui évolue dans le premier mode selon la fonction Sortie(t) = t et qui saute vers un autre mode lorsque la sortie y = 3. En se basant sur cette hypothèse et comme montré dans la figure 32, le temps normal du premier mode est de 3 secondes.

Nous ajoutons un défaut constant tel que d=1 à l'intervalle t= [2.5 s,3 s] et nous constatons par conséquent que la courbe atteint la valeur 3 à t =2.5 s, ce qui impacte et change la durée du premier mode en 2.5 s uniquement.

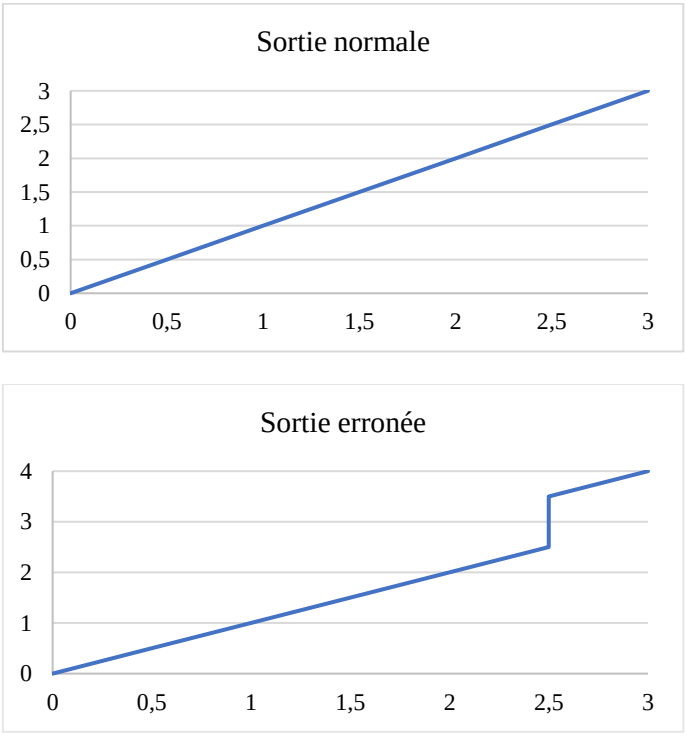


Figure 32: Impact du défaut sur le temps de mode

Les contraintes de temps arrêteront la propagation du défaut pour ne pas affecter les autres modes, et le mode défectueux sera le mode où le système s'est arrêté.

Le défaut affecte le début d'un mode

Grâce aux contraintes de temps, le système ne peut pas passer à un autre mode, sauf si les conditions normales sont bien satisfaites. Le but c'est de stopper l'hémorragie et ne pas

perturber tout le fonctionnement du système. Par conséquent, le système suivra une évolution normale et le mode défectueux sera le dernier mode détecté avant l'apparition du défaut.

Dans les deux cas, si nous avons un défaut dans la plage inconnue, le mode défectueux est le premier mode détecté après l'apparition du défaut.

Grâce à cette approche, nous pouvons détecter et localiser tous les types de défauts capteurs à tout moment. Nous allons appliquer cette méthode à un exemple académique pour tester l'efficacité et la robustesse de notre approche.

II.3 Exemple d'application

II.3.1 Description du système

Nous considérons, comme exemple, un système hydraulique à trois réservoirs représenté dans la Figure 33.

L'eau arrive à un premier réservoir T1 de section S1= 2 m^2 avec un débit volumique q1= 0.2 $m^3.s^{-1}$ et une hauteur $l1$. À la sortie de ce réservoir, une vanne V1 de résistance hydraulique R1 =20 N.s. m^{-5} laisse passer le fluide vers un second réservoir T2, de section S2= 1.5 m^2 et de hauteur l2. A la sortie de ce réservoir, une vanne V2 de résistance hydraulique R2=20 N.s. m^{-5} laisse passer le fluide dans un troisième réservoir T3, de section S3= 1 m^2et de hauteur l3. Ainsi, le débit de sortie de ce réservoir est autorisé par une vanne V3 de résistance hydraulique R3=20 N.s. m^{-5}.

Les niveaux d'eau $l1, l2\ et\ l3$ sont mesurés respectivement par les capteurs L1, L2 et L3.

Afin de faciliter l'étude, les deux vannes V1 et V2 sont laissées ouvertes et seule la vanne V3 est actionnée.

On peut avoir trois états de la vanne V3 :

Fermée : mode 1

Demi-ouverte : mode 2

Ouverte : mode 3

L'objectif est de maintenir le niveau de liquide dans les deux réservoirs T1 et T3 à un niveau bien défini. L'équation (18) définit les seuils à ne pas dépasser.

$$\begin{cases} l3 \leq 1 \\ l1 \geq 0.9 \end{cases} \tag{18}$$

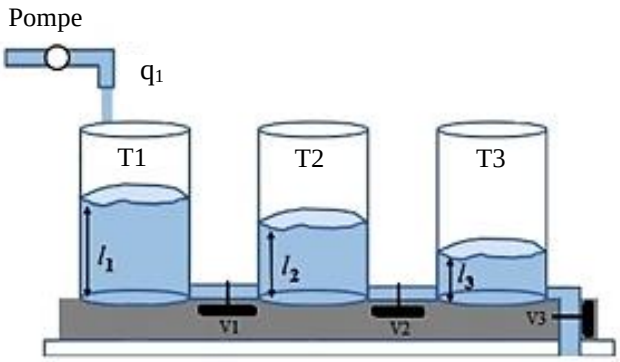


Figure 33: Système hydraulique à trois réservoirs

II.3.2 Modélisation du système

II.3.2.1 Equation d'état

Le débit volumétrique Q est le volume de fluide qui passe par unité de temps. Il est défini par :

$$Q = \frac{dV}{dt} \tag{19}$$

La variation de volume dV d'un réservoir est égale à la différence des débits d'entrée et de sortie comme indiqué ci-dessous :

$$Q = \sum input\ flow - \sum output\ flow \tag{20}$$

Comme montré ci-dessous, le volume de fluide à l'intérieur d'un réservoir est la surface du réservoir multipliée par le niveau du liquide :

$$V = S * Level \tag{21}$$

L'équation d'état du système à trois réservoirs est alors obtenue :

$$\begin{cases} \dfrac{dl1}{dt} = \dfrac{q1}{s1} + \dfrac{g}{R1 * S1}(l2 - l1) \\ \dfrac{dl2}{dt} = \dfrac{g}{R1 * S2}(l1 - l2) + \dfrac{g}{R2\ * S2}(l3 - l2) \\ \dfrac{dl3}{dt} = \dfrac{g}{R2 * S3}(l2 - l3) - \dfrac{g}{R3 * S3} l3 \end{cases} \tag{22}$$

Nous pouvons représenter notre système sous l'équation d'état ci-dessous :

$$\begin{cases} \dot{X} = A.X + B.u \\ Y = C.X \end{cases} \tag{23}$$

La matrice d'état du système est :

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{g}{R1*S1} & \frac{g}{R1*S1} & 0 \\ \frac{g}{R1*S2} & -\frac{g}{R1*S2} - \frac{g}{R2*S2} & \frac{g}{R2*S2} \\ 0 & \frac{g}{R2*S3} & -\frac{g}{R2*S3} - \frac{g}{R3*S3} \end{pmatrix} \quad (24)$$

La matrice de commande est :

$$B = \begin{pmatrix} \frac{q1}{S1} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (25)$$

La matrice d'observation est :

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

II.3.2.2 Présentation du système par automates hybrides

Un modèle dynamique représenté par des automates hybrides contient tous les états normaux du système, ce qui nous permet de suivre son évolution temporelle. Ainsi, grâce à l'intégration du temps dans les transitions, nous sommes capables de localiser un défaut en quantifiant le temps passé dans le mode. Tous les temps concernant la détection et la localisation des défauts ont été trouvés mathématiquement ou à partir de simulations.

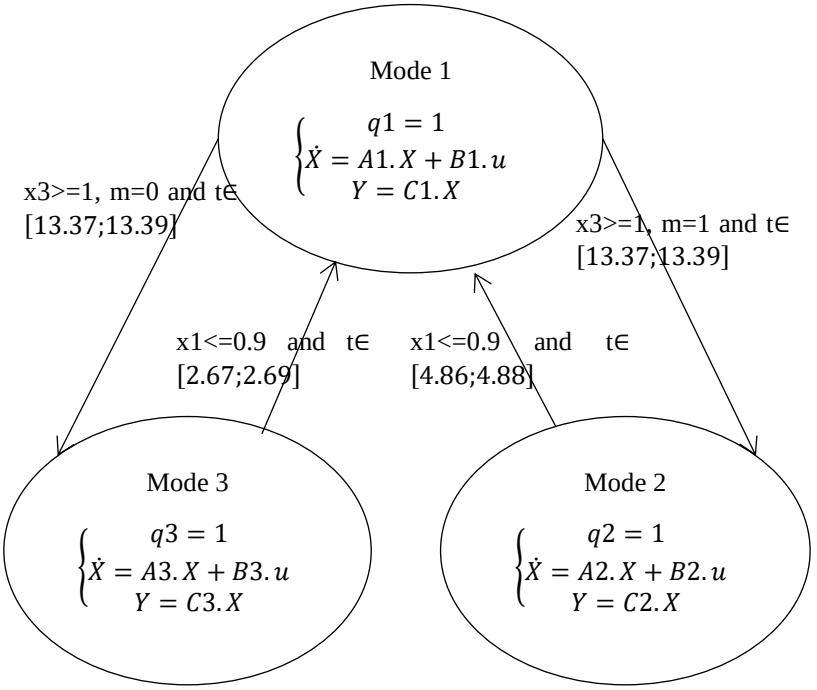


Figure 34: Automate hybride représentatif du système

La figure 34 montre le modèle de notre système représenté par un automate hybride. Pour passer d'un mode à un autre, le système doit satisfaire les conditions sur l'état continu ainsi que les

conditions externes représentées par la variable m, qui donne à l'utilisateur la possibilité de choisir le mode successeur.

II.3.3 Conception d'observateur

Nous rappelons le modèle mathématique de l'observateur de Luenberguer presenté par l'équation (27) :

$$O_{ij}:\begin{cases}\check{\dot{x}}(t) = A_i.\check{x}(t) + B_i.u(t) + L_{ij}\big(y(t) - \check{y}(t)\big)\\ \check{y}_j(t) = C_{ij}.\check{x}(t) + D_{ij}.u(t)\\ \check{x}(0) = \check{x}_0\end{cases} \quad (27)$$

Le premier bloc d'observateurs est constitué de trois observateurs : O_i, $i \in \{1, 2,3\}$. Chaque observateur est sensible à un mode.

Le deuxième bloc est constitué de neuf observateurs : O_{ij}, $i \in \{1, 2,3\}$, $j \in \{1, 2, 3\}$. Chaque observateur est sensible à une sortie.

L'utilisation de la technique de placement de pôles permet de déterminer les gains des observateurs. Pour ce faire, il est nécessaire d'estimer les pôles de l'observateur en se basant sur les critères de rapidité et de stabilité présentés dans la partie III.2.4 et également faire des tests réels sur le système afin de converger vers les pôles optimaux.

Les tests ont été fait dans Matlab et les pôles choisis sont représentés ci-dessous :

$$\begin{gathered}\mathrm{P_1} = \mathrm{P_2} = \mathrm{P_3} = \begin{pmatrix}-25 + \mathrm{i}\\ -25 - \mathrm{i}\\ -25\end{pmatrix}\\ \mathrm{P_{11}} = \mathrm{P_{12}} = \mathrm{P_{13}} = \mathrm{P_{21}} = \mathrm{P_{22}} = \mathrm{P_{23}} = \begin{pmatrix}-50 + \mathrm{i}\\ -50 - \mathrm{i}\\ -50\end{pmatrix}\end{gathered} \quad (28)$$

Le gain des observateurs de mode et des observateurs de sortie sont donnés par l'équation (29) et (30) :

$$\begin{gathered}\mathrm{K_1} = 10^4\begin{pmatrix}24.8 & -24.8 & 0\\ 25.3 & 24.4 & 0.32\\ 0 & 0.5 & 25\end{pmatrix};\ \mathrm{K_2} = \begin{pmatrix}24.5 & -24.8 & 0\\ 25.3 & 24.4 & 0.3\\ 0 & 0.5 & 5\end{pmatrix}\\ \mathrm{K_3} = \begin{pmatrix}24.5 & -24.5 & 0\\ 25.6 & 23.7 & 0.6\\ 0 & 1 & -15\end{pmatrix}\end{gathered} \quad (29)$$

$$L_{11} = 10^4 \begin{pmatrix} 0.01 \\ 4.1 \\ 319.3 \end{pmatrix}; L_{12} = 10^4 \begin{pmatrix} 322.4 \\ 0.01 \\ -319.3 \end{pmatrix}; L_{13} = 10^2 \begin{pmatrix} 161.21 \\ 2.06 \\ 0.01 \end{pmatrix}$$
$$L_{21} = 10^4 \begin{pmatrix} 0.01 \\ 3 \\ 132.8 \end{pmatrix}; L_{22} = 10^2 \begin{pmatrix} 391.6 \\ 1.3 \\ -161.3 \end{pmatrix}; L_{23} = 10^4 \begin{pmatrix} 161.2 \\ 2 \\ 0.01 \end{pmatrix} \quad (30)$$
$$L_{31} = 10^2 \begin{pmatrix} 1.1 \\ 113.8 \\ 847.7 \end{pmatrix}; L_{32} = 10^2 \begin{pmatrix} 96.9 \\ 1.1 \\ -10.3 \end{pmatrix}; L_{33} = 10^3 \begin{pmatrix} 399.2 \\ 10.15 \\ 0.11 \end{pmatrix}$$

II.3.4 Résultats des simulations

La simulation du comportement dynamique a été réalisée par le logiciel Matlab. L'évolution normale des états discret et continu est présentée dans la figure 35. Le passage d'un mode à un autre se produit lorsque les conditions sont réalisées. Le temps de simulation est fixé à 35 s pour montrer tous les modes du système.

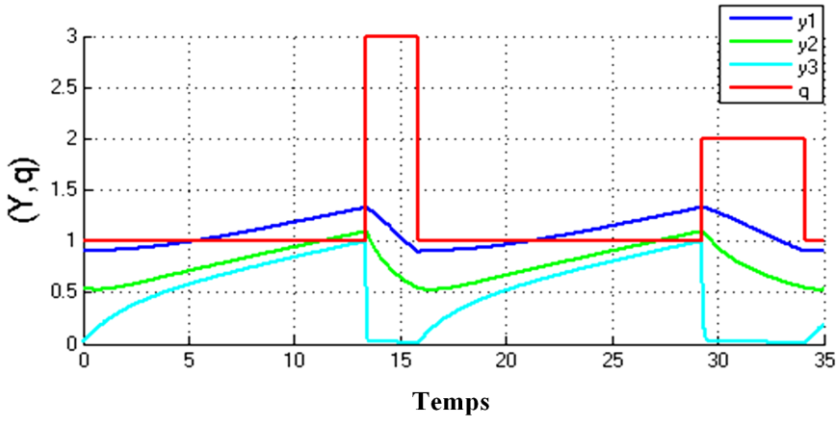


Figure 35: Etats discrets et continus du système

Afin de tester l'efficacité de l'approche de diagnostic proposée, nous allons injecter différents défauts capteurs à différents moments, et nous présenterons les réponses du système.

Premier cas

Nous injectons un défaut dans le capteur L1 à l'instant t = 30 s. Notre objectif est de détecter le mode actif et localiser la sortie défectueuse.

La figure 36 montre la réponse des observateurs de localisation représentés par les signatures (S1, S2, S3) et leur sensibilité pour détecter les différents modes du système.

On remarque qu'à l'instant t=30 s, nos observateurs détectent un mode inconnu (la signature des modes (S1, S2, S3) = (0, 0, 0)) et reviennent au deuxième mode.

Les modes détectés précédemment et postérieurement entourant la plage inconnue sont les mêmes ; par conséquent, le mode inconnu est le mode 2.

L'autre bloc d'observateurs de défauts est utilisé pour localiser le capteur défectueux dans le deuxième mode.

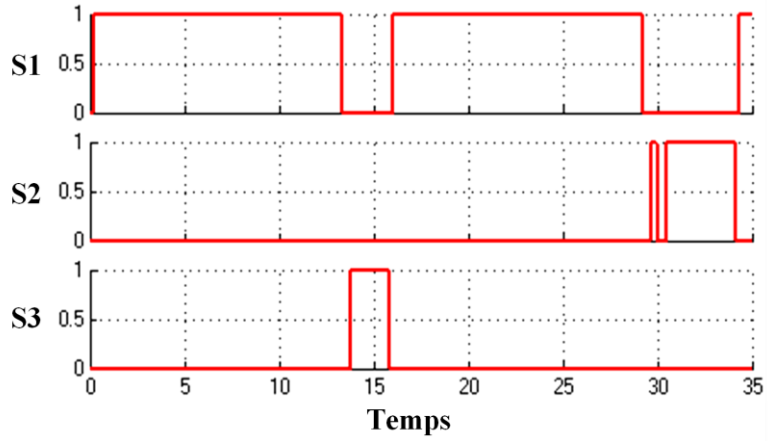


Figure 36: Evolution des signatures (S1, S2, S3)

La figure 37 présente la réponse des signatures (S21, S22, S23). A l'instant t=30 s, la signature S21 passe de 0 à 1, ce qui signifie l'existence d'un défaut au niveau de la sortie y1 qui correspond au capteur L1.

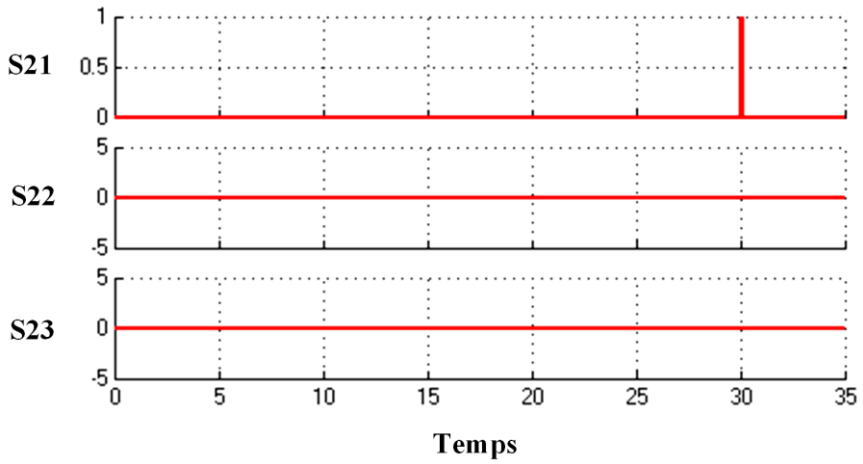


Figure 37: Evolution des signatures (S21, S22, S23)

Deuxième cas

Dans ce cas, nous injectons un défaut aux extrémités d'un mode, ce qui génère un impact direct sur sa durée normale. Comme solution, les contraintes de temps de l'automate vont stopper la propagation du défaut afin de ne pas perturber les autres modes, et aider à détecter le mode défectueux.

Nous injectons un défaut dans le capteur L1 à l'instant t = 15.5 s. La figure 38 montre la réponse des signatures (S1, S2, S3) et leur sensibilité pour détecter les différents modes du système.

A l'instant t=15.5 s, nos observateurs détectent un mode inconnu et notre système reste dans le même mode, qui est le troisième mode.

Les modes détectés antérieurement et postérieurement entourant la plage inconnue sont les mêmes ; par conséquent, le mode inconnu est le troisième mode.

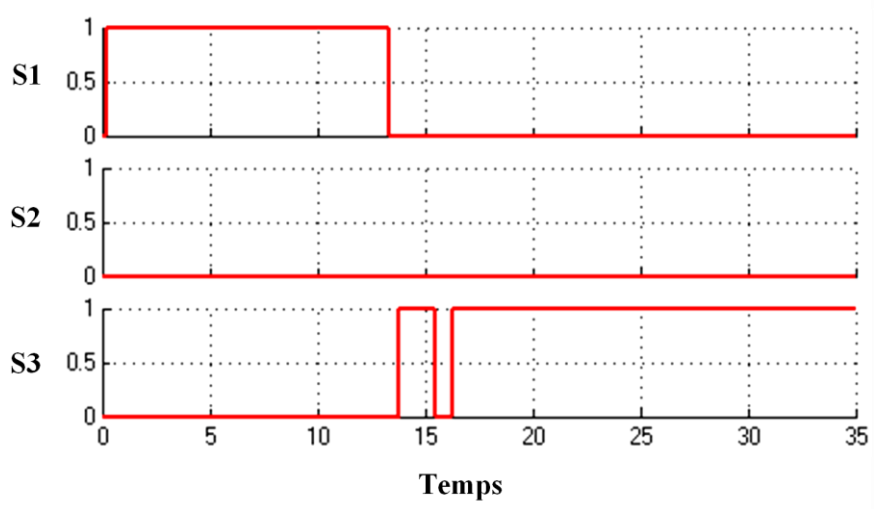


Figure 38: Evolution des signatures (S1, S2, S3)

L'autre bloc d'observateurs donne plus d'informations pour déterminer exactement la sortie affectée par le défaut. La figure 39 montre la réponse des signatures (S31, S32, S33), nous pouvons noter que nous avons un défaut dans la première sortie.

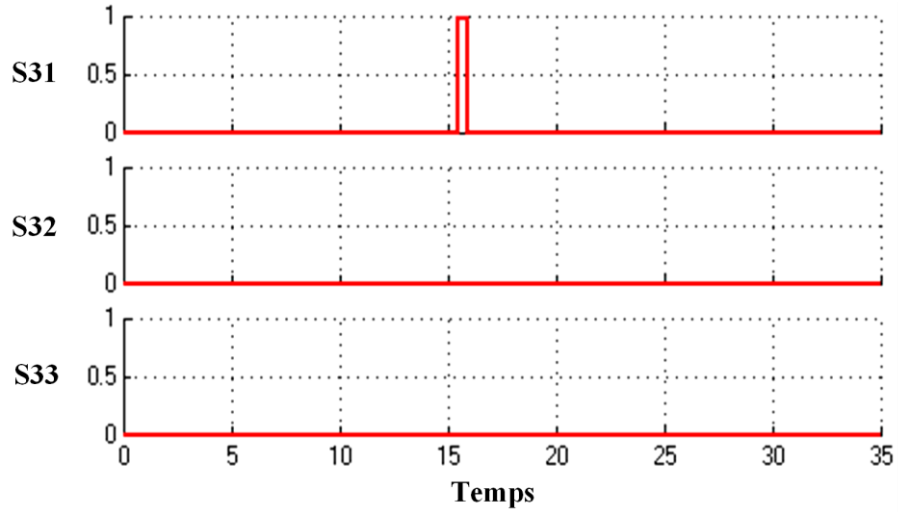


Figure 39: Evolution des résidus (S31, S32, S33)

Troisième cas

Il y a toujours un délai pour détecter un mode en utilisant seulement des observateurs, notre système est incapable de détecter le mode actif instantanément. Par conséquent, nous ne pouvons pas définir le mode défectueux.

Pour montrer l'efficacité de notre approche, nous injectons un défaut au début d'un mode, lorsque nos observateurs ne peuvent pas détecter le mode actif.

Dans la plage de temps τ et à t=15.8 s, nous insérons un défaut. Par conséquent, l'ensemble des observateurs de modes ne peuvent pas détecter le mode actif dans cette plage de temps, comme montré dans la figure 40. En parallèle, nous lançons l'autre bloc d'observateurs pour savoir s'il y a un défaut dans cette plage ou non.

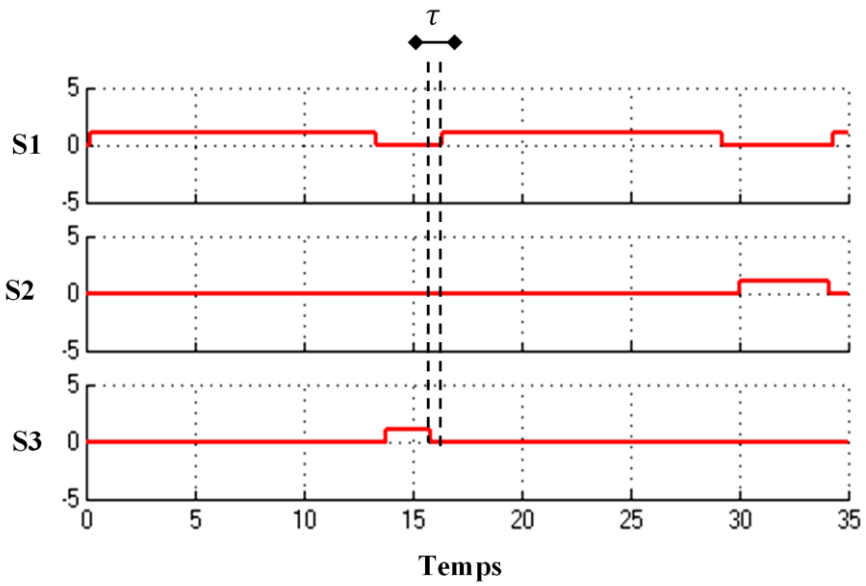


Figure 40: Evolution des signatures (S1, S2, S3)

Avec le bloc d'observateurs de défauts, nous pouvons détecter la sortie défectueuse. La figure 41 montre la réponse des signatures (S11, S12, S13). Nous remarquons un défaut au niveau de la première sortie, et le mode détecté après ce défaut est le mode 1 ; par conséquent, nous déduisons que nous avons un défaut dans le mode 1 ; précisément, dans la première sortie à t=15.8 s.

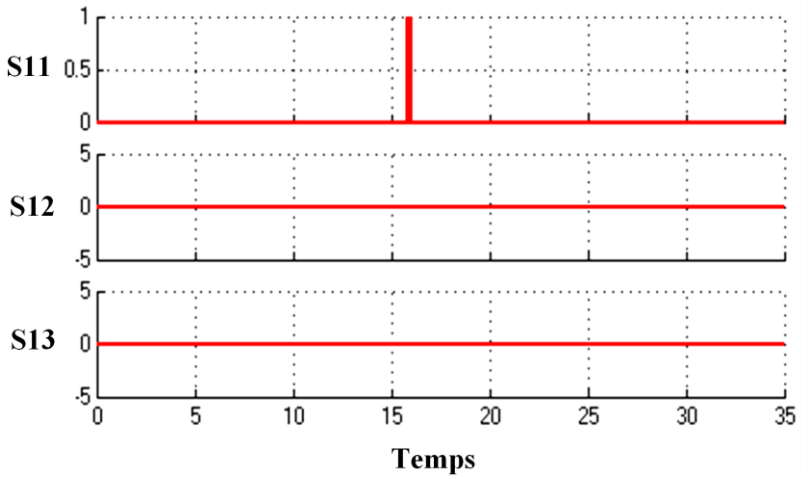


Figure 41: Evolution des signatures (S11, S12, S13)

II.4 Conclusion

Dans cette partie, nous nous sommes concentrés sur le diagnostic des systèmes dynamiques hybrides en utilisant des observateurs et des automates hybrides. En premier lieu, nous avons généré des résidus d'observateurs. Ces résidus doivent être nuls dans le comportement normal du système et sensibles à tout défaut. Ensuite, nous avons analysé ces résidus en utilisant des contraintes de temps pour renforcer la précision de détection et d'isolation de défauts.

À travers ces étapes, notre méthode a permis de résoudre le problème de la plage inconnue, et elle a pu assurer un diagnostic faible et continue dans le temps. En outre, cette méthode peut être appliquée facilement sur de nombreux systèmes dynamiques hybrides.

III Optimisation de nombres d'observateurs et modélisation par Bond Graph

III.1 Introduction

Les chercheurs ont toujours divisé l'observateur hybride en deux blocs : un observateur qui identifie le mode actif et un autre qui détecte les défauts. L'application de la même logique à un système comportant un grand nombre de paramètres provenant de différents domaines énergétiques augmente le nombre de calculs et conduit à l'explosion combinatoire.

L'intérêt novateur de cette partie est l'optimisation du nombre d'observateurs en utilisant un seul bloc pour détecter le mode actif et, en même temps, localiser les défauts. Comme deuxième objectif, ce chapitre propose le Bond Graph comme outil de modélisation des systèmes mécatroniques hybrides et également comme outil de diagnostic des erreurs de modélisation rajoutant une couche de plus pour une fiabilité meilleure.

III.2 Développement de la méthode

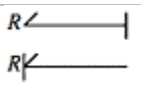
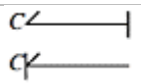
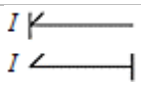
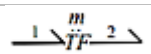
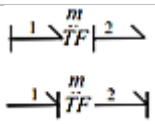
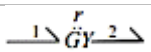
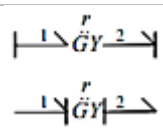
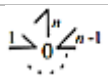
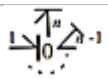
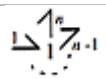
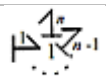
III.2.1 Diagnostic des erreurs du modèle

Un modèle contenant des erreurs conduit directement à un mauvais diagnostic. Grâce à la notion de causalité, le Bond Graph détecte les erreurs de modélisation préliminaires et fournit une première couche de diagnostic.

Dans les Bond Graphs, les entrées et les sorties sont organisées par la causalité de l'effort et la causalité de flux. Le processus d'attribution de causalité catégorise les efforts et les flux en ensembles d'entrées et de sorties. Il établit les relations de cause à effet entre les facteurs de puissance et permet de détecter les incohérences de modélisation [79], [80].

Le tableau 6 ci-dessous énumère les contraintes causales fondamentales des Bond Graphs [81].

Tableau 6: Contraintes causales des éléments Bond Graphs

Elément	Flux de puissance	Causalité
Source d'effort		
Source de flux		
Resistance		
Capacité		
Inertie		
Transformateur		
Gyrateur		
Jonction 0		
Jonction 1		

La colonne « Causalité » du tableau 6 présente les cas de causalité possible de chaque élément. Le trait de causalité spécifie la direction de l'effort, et le flux est toujours dans la direction opposée, comme montré dans la figure 42 ci-dessous :

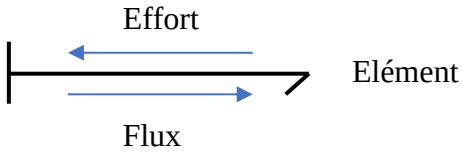


Figure 42: Trait de causalité d'un élément

III.2.2 Identification de défauts

Comme montré dans la partie I.1.1, l'évaluation des résidus compare chaque élément calculé à un seuil T_{ij}, qui est défini en fonction des erreurs de modélisation, des perturbations et des mesures de bruit.

L'évaluation est faite selon les étapes suivantes :

Si $|r_{ij}(t)|>T_{ij}$

S_{ij}=1, ce qui signifie que la sortie j est impactée

Sinon S_{ij}=0

L'identification de la sortie défectueuse consiste à faire la correspondance entre le vecteur signature obtenu (Si1,Sij,Sim) et la signature présentée dans le tableau 7 ci-dessous [9] :

Tableau 7: Tableau théorique des signatures

Signature	C_1	C_j	C_m
Si1	1	0	0
Sij	0	1	0
Sim	0	0	1

III.2.3 Identification des modes

Pour une sortie y_j, le plus petit résidu $r_{ij}(t)$correspond au mode actif i.

Afin de générer le mode de chaque sortie, le résidu $r_{ij}(t)$ sera alors évalué en utilisant l'algorithme ci-dessous :

for *j*=1:m

Min = $r_{1j}(t)$;

Sj = 1;

for *i* = 2:n

If $r_{ij}(t)$ < Min

Min = $r_{ij}(t)$;

Sj = *i*;

end

end

end

S=(Sj) ∈ $\mathbb{R}^m$

S'il n y'a pas de défaut alors $S(t)=a.U$

où a est le mode actif et U est le vecteur unitaire $U = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ . \\ . \\ 1 \end{pmatrix}$

Sinon, le $S_d(t)$ de la sortie défectueuse sera différent des autres $S_j(t)$

Le mode actif est le mode de la plupart des sorties.

Nous supposons que nous ne pouvons pas avoir plus de la moitié du nombre de capteurs qui renvoient des erreurs en même temps.

V= zeros(1,m);

for j=1:m

r=0;

for i=1:m

if $S_i == S_j$

$r=r+1$;

end

end

$V_j=r$;

End

V_j est le nombre de répétitions de S_j. La Valeur la plus élevée (V_c) de V_j correspond au mode actif.

c=1;

Max=V_1;

for k=1:m

if V_k> Max

Max=V_k;

$c=k$;

end

end

Sc est le mode avec le plus grand nombre de répétitions de Sj.

Afin de rendre le diagnostic plus fiable, nous ajoutons une autre contrainte sur V_c, qui est le plus grand nombre de répétitions de S_j. Si V_c>m/2, alors le mode actif est S_c. Sinon, le mode actif est un mode défaillant.

III.3 Exemple d'application

III.3.1 Description du système

Le système mécatronique hybride choisi pour l'application de la méthode de diagnostic est présenté dans la figure 43 [21].

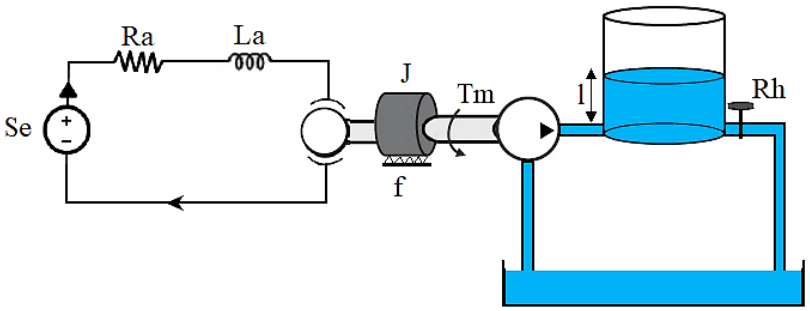


Figure 43: Exemple d'un système mécatronique

Le système est composé d'une source de tension qui alimente un moteur à courant continu fournissant un mouvement de rotation, et d'une pompe transformant ce dernier mouvement en une puissance hydraulique capable de conduire l'eau vers le réservoir.

Le but principal de ce système est de maintenir le niveau de liquide dans le réservoir à un niveau bien défini : $0.8 \leq l \leq 1.5$.

Pour contrôler le niveau d'eau dans le réservoir, on agit sur les états de la vanne qui peut avoir deux positions :

Fermée : mode 1

Ouverte : mode 2

La figure 44 montre les états normaux du système représentés par un automate hybride. Pour passer d'un mode à un autre, le système doit satisfaire les conditions sur l'état continu.

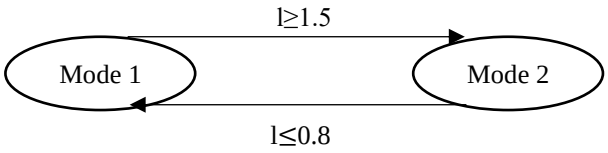


Figure 44: Automate hybride du système

III.3.2 Modélisation du système

Afin de simplifier l'étude et de se concentrer sur la méthode de diagnostic, le modèle BG du système est construit en tenant compte des hypothèses suivantes :

- La source de tension est constante
- La partie électrique du moteur est composée d'une résistance Ra et d'une inductance La. Sa partie mécanique est représentée par une inertie J et un frottement mécanique f.
- Le débit de la pompe f est proportionnel à la vitesse de rotation du moteur ω tel que $f=Cy \bullet \omega$

Le modèle BG en causalité intégrale du système mécatronique est donné dans les figures 45 et 46.

Pour chaque mode, nous concevons un modèle Bond Graph :

Mode 2 :

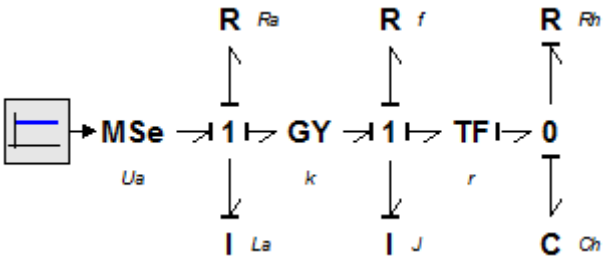


Figure 45: Modèle BG du second mode

Mode 1 :

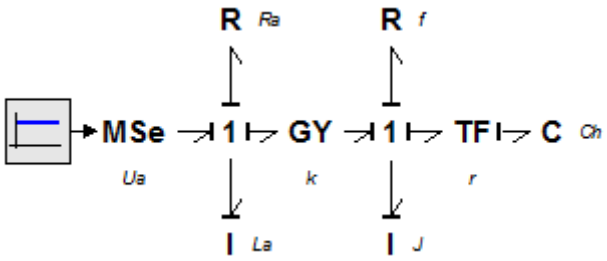


Figure 46: Modèle BG du premier mode

Le Bond Graph en causalité intégrale est utilisé pour générer le modèle dynamique du système en suivant les étapes ci-dessous :

- Définir les variables d'entrée et de sortie

- Ecrire les équations des jonctions

- Ecrire les équations des éléments actifs et passifs

- Combiner les équations générées pour obtenir les équations de l'espace d'état

Les équations dérivées des jonctions "0" et "1", du transformateur "TF" et du gyrateur "GY" sont données pour les deux modes dans les équations (31) et (38) ci-dessous :

Mode 2 :

$$\begin{cases} f1 = f2 = f3 = f4 = \{i\} \\ e1 = e2 + e3 + e4 \end{cases}; \begin{cases} f5 = f7 = f8 = f6 = \{\omega\} \\ e5 = e6 + e7 + e8 \end{cases}; \begin{cases} f9 = f10 + f11 \\ e9 = e10 = e11 = \{l\} \end{cases}$$
$$\begin{cases} e5 = kf4 \\ e4 = kf5 \end{cases}; \begin{cases} f9 = r.f8 \\ e8 = r.e9 \end{cases} \quad (31)$$

Module du transformateur $r = Cy.\rho.g$

Les équations constitutives des éléments du Bond Graph sont données dans l'équation (32) :

$$e3 = Ra.f3;\ e2 = La.\frac{df2}{dt};\ e7 = f.f7;\ e6 = J.\frac{df6}{dt};$$
$$e11 = Rh.f11;\ f10 = Ch.\frac{de10}{dt};\ Rh = \frac{R}{\rho.g};\ Ch = S \quad (32)$$

Le modèle dynamique du système mécatronique peut être obtenu sous la forme représentée par l'équation (33) :

$$\begin{cases} \dfrac{di}{dt} = \dfrac{U}{La} - \dfrac{Ra}{La}i - \dfrac{k}{La}\omega \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{k}{J}i - \dfrac{f}{J}\omega - \dfrac{Cy.\rho.g}{J}l \\ \dfrac{dl}{dt} = \dfrac{Cy.\rho.g}{S}\omega - \dfrac{1}{Rh.S}l \end{cases} \quad (33)$$

Nous pouvons représenter notre système sous l'espace d'état ci-dessous :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_2.X + B_2.u \\ Y = C_2.X \end{cases} \quad (34)$$

où $X = \begin{pmatrix} f1 \\ f8 \\ e10 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i \\ \omega \\ l \end{pmatrix}$

La matrice d'état du système est représentée par l'équation (35) :

$$A_2 = \begin{pmatrix} -\frac{Ra}{La} & -\frac{k}{La} & 0 \\ \frac{k}{J} & -\frac{f}{J} & -\frac{Cy.\rho.g}{J} \\ 0 & \frac{Cy.\rho.g}{S} & -\frac{1}{Rh.S} \end{pmatrix} \quad (35)$$

La matrice de commande est représentée par l'équation (36) :

$$B_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{La} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (36)$$

La matrice d'observation est représentée par l'équation (37) :

$$C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (37)$$

Mode 1 :

$$\begin{cases} f1 = f2 = f3 = f4 = \{i\} \\ e1 = e2 + e3 + e4 \end{cases}; \begin{cases} f5 = f7 = f8 = f6 = \{\omega\} \\ e5 = e6 + e7 + e8 \end{cases}; \begin{cases} f9 = r.f8 \\ e8 = r.e9 \end{cases} \quad (38)$$
$$\begin{cases} e5 = kf4 \\ e4 = kf5 \end{cases}$$

Module du transformateur $r = Cy.\rho.g$

Les équations constitutives des éléments du Bond Graph sont données dans l'équation (39) ci-dessous :

$$e3 = Ra.f3; e2 = La.\frac{df2}{dt}; e7 = f.f7; e6 = J.\frac{df6}{dt}; f9 = Ch.\frac{de9}{dt}; Ch = S \quad (39)$$

Le modèle dynamique du système mécatronique peut être obtenu sous la forme d'un espace d'état représenté par l'équation (40) ci-dessous :

$$\begin{cases} \frac{di}{dt} = \frac{U}{La} - \frac{Ra}{La} i - \frac{k}{La} \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{k}{J} i - \frac{f}{J} \omega - \frac{Cy.\rho.g}{J} l \\ \frac{dl}{dt} = \frac{Cy.\rho.g}{S} \omega \end{cases} \quad (40)$$

Nous pouvons représenter notre système sous l'espace d'état dans l'équation (41) ci-dessous :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_1.X + B_1.u \\ Y = C_1.X \end{cases} \quad (41)$$

Où $X = \begin{pmatrix} f1 \\ f8 \\ e10 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i \\ \omega \\ l \end{pmatrix}$

La matrice d'état du système est représentée par l'équation (42) :

$$A_1 = \begin{pmatrix} -\frac{Ra}{La} & -\frac{k}{La} & 0 \\ \frac{k}{J} & -\frac{f}{J} & -\frac{Cy.\rho.g}{J} \\ 0 & \frac{Cy.\rho.g}{S} & 0 \end{pmatrix} \quad (42)$$

La matrice de commande est représentée par l'équation (43) :

$$B_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{La} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (43)$$

La matrice d'observation est représentée par l'équation (44) :

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (44)$$

III.3.3 Conception d'observateur

Nous rappelons le modèle mathématique de l'observateur de Luenberger ci-dessous :

$$O_{ij}: \begin{cases} \check{\dot{x}}(t) = A_i.\check{x}(t) + B_i.u(t) + L_{ij}\big(y(t) - \check{y}(t)\big) \\ \check{y}_j(t) = C_{ij}.\check{x}(t) + D_{ij}.u(t) \\ \check{x}(0) = \check{x}_0 \end{cases} \quad (45)$$

Dans cet exemple, le bloc d'observateurs utilisé est constitué de six observateurs : O_{ij} tel que $i \in \{1, 2\}$ et $j \in \{1, 2, 3\}$. Chaque observateur est sensible à une sortie.

Nous utilisons la technique de placement de pôles, et nous nous basons sur les critères de rapidité et de stabilité présentées dans la partie III.2.4.1 pour déterminer les gains des observateurs.

Les pôles choisis sont donnés ci-dessous :

$$\mathrm{P_{11}} = \mathrm{P_{12}} = \mathrm{P_{13}} = \mathrm{P_{21}} = \mathrm{P_{22}} = \mathrm{P_{23}} = \begin{pmatrix} -70 + \mathrm{i} \\ -70 - \mathrm{i} \\ -70 \end{pmatrix} \quad (46)$$

Le gain de chaque observateur est défini dans l'équation (47) :

$$\begin{matrix} \mathrm{L}_{11} = 10^2 \begin{pmatrix} 1.3 \\ -3701 \\ 259.3 \end{pmatrix}; \mathrm{L}_{12} = \begin{pmatrix} -0.03 \\ 131.2 \\ -12.9 \end{pmatrix}; \mathrm{L}_{13} = 10^2 \begin{pmatrix} -1.6 \\ 2512.3 \\ 1.31 \end{pmatrix} \\ \mathrm{L}_{21} = 10^2 \begin{pmatrix} 1.3 \\ -3645.2 \\ 248.3 \end{pmatrix}; \mathrm{L}_{22} = \begin{pmatrix} -0.03 \\ 130.2 \\ -12.6 \end{pmatrix}; \mathrm{L}_{23} = 10^2 \begin{pmatrix} -1.6 \\ 2512.3 \\ 1.3 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (47)$$

L'étape suivante est la construction d'un modèle BG équivalent aux équations de l'observateur.

Ce modèle, noté OBG, est composé du terme $L(Y - \check{Y})$ ajouté au modèle IBG.

Les figures 47 et 48 représentent l'injection linéaire du terme $L(Y - \check{Y})$ dans les éléments dynamiques I et C, à l'aide de sources modulées : la source de débit modulé MSf pour un élément I et la source d'effort modulé MSe pour un élément C.

Le "E" utilisé ci-dessous est une représentation symbolique d'un élément auquel C ou I est attaché par une liaison.

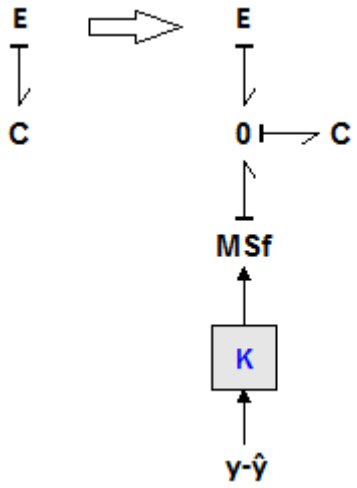


Figure 47: Cas de l'élément C

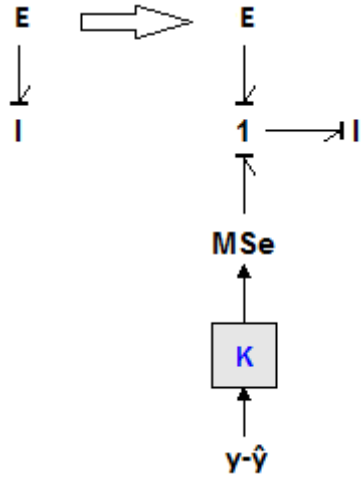


Figure 48: Cas de l'élément I

Le modèle de l'observateur BG de chaque mode est présenté dans les figures 49 et 50 ci-dessous :

K1, K2, K3 sont les composantes du vecteur L_{ij} tel que $i \in \{1, 2\}$ et $j \in \{1, 2, 3\}$.

Mode 2

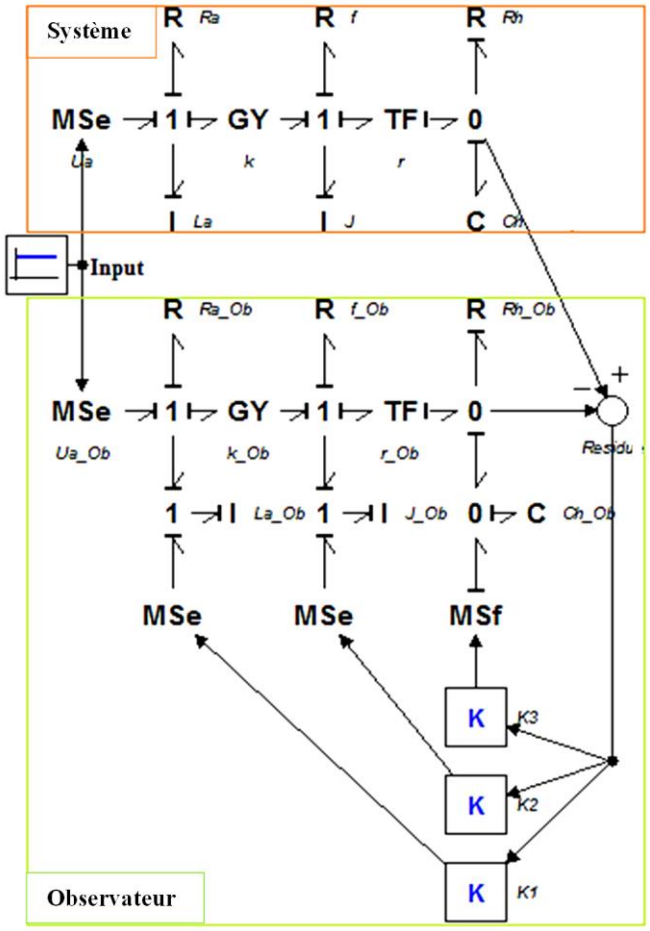


Figure 49: Modèle BG du second mode et son observateur

Mode 1

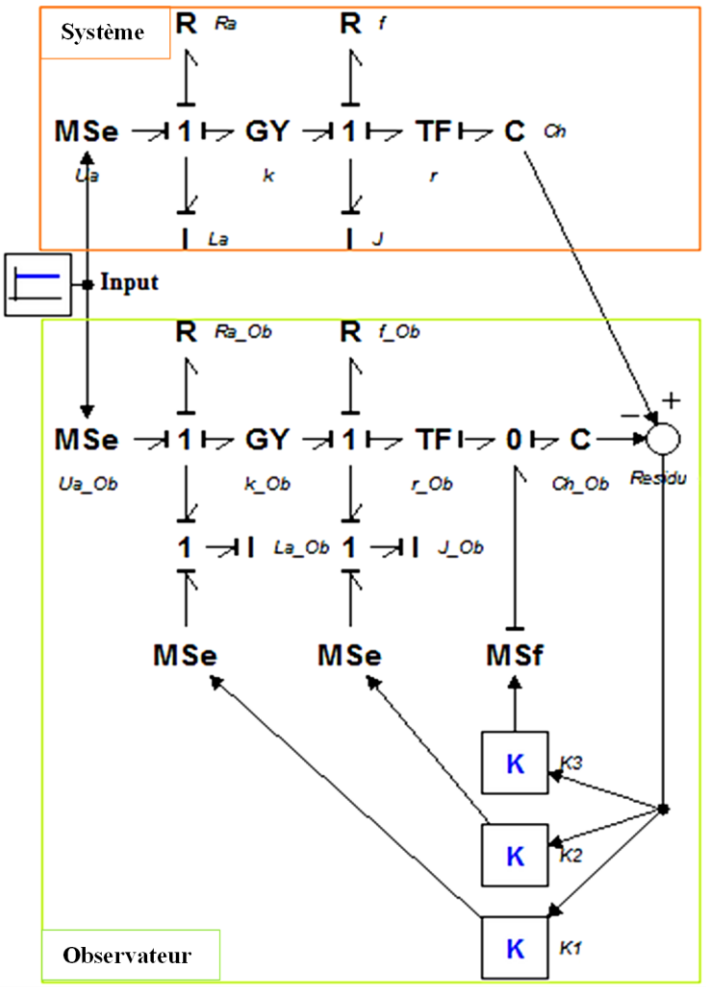


Figure 50: Modèle BG du premier mode et son observateur

III.3.4 Résultats des simulations

La simulation du système a été réalisée par le logiciel Matlab et 20-sim. Les valeurs numériques des paramètres sont indiquées dans le tableau 8.

Tableau 8: Valeurs numériques des paramètres

Symbole	Description	Valeur numérique
Ua	Source de tension	48 V
Ra	Résistance électrique du moteur à courant continu	4 Ω
La	Inductance du moteur à courant continu	55 mH
J	Inertie de la partie rotative	43.10^{-6} Kg. m^2

f	Coefficient de frottement de la partie mécanique du moteur à courant continu	26.10^{-5} N. m. s
k	Rapport de gyrateur	0.002 V.S/rad
g	Accélération gravitationnelle	9.8 m. s^{-2}
S	Surface de la base du réservoir	1 m^2
Cy	Cylindrée de la pompe hydraulique	$1.59.10^{-6}$ m^3/rad
R	Résistance hydraulique de la valve	$9.8.10^3$ N. s. m^{-5}
ρ	Densité de l'eau	10^3 Kg. m^{-3}

L'évolution normale des états discrets et continus est présentée dans la figure 51. La commutation entre les modes se produit lorsque les conditions sont réalisées. Le temps de simulation est fixé à 10 s pour montrer le comportement dynamique du système dans les deux modes.

Les figures 51 et 52 donnent un aperçu sur l'évolution des paramètres du système. Chaque mode se distingue de l'autre par une dynamique différente.

Le zoom sur le niveau l du réservoir dans la figure 52 montre un niveau d'eau variant entre 0,8 et 1,5, et respectant les conditions préliminaires.

Afin de tester l'efficacité de l'approche de diagnostic proposée, nous injectons un défaut capteur et nous présentons la réponse du système. Notre objectif est de détecter le mode actif et localiser la sortie défectueuse.

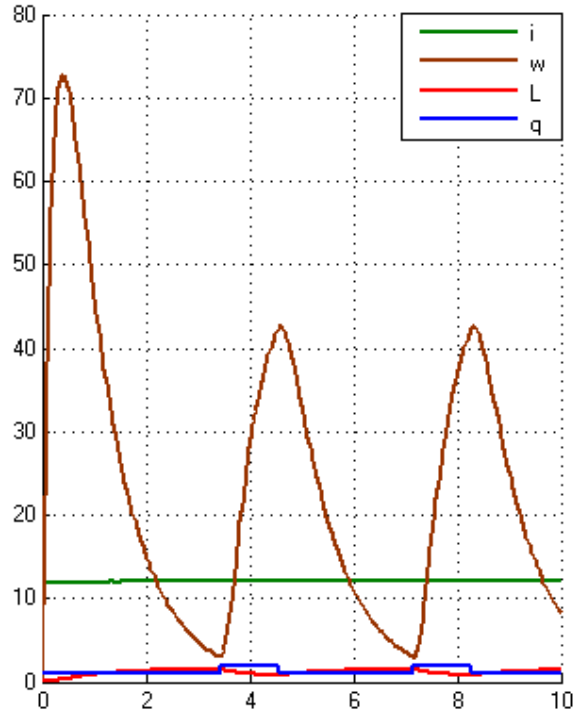


Figure 51: Evolution discrète-continue du système

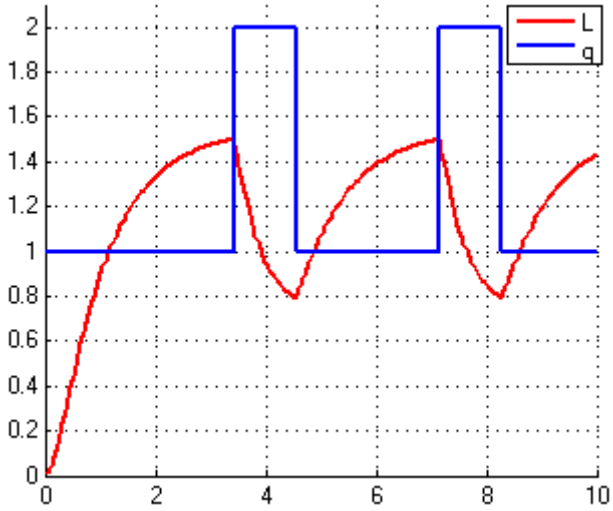


Figure 52: Zoom sur le niveau l du réservoir

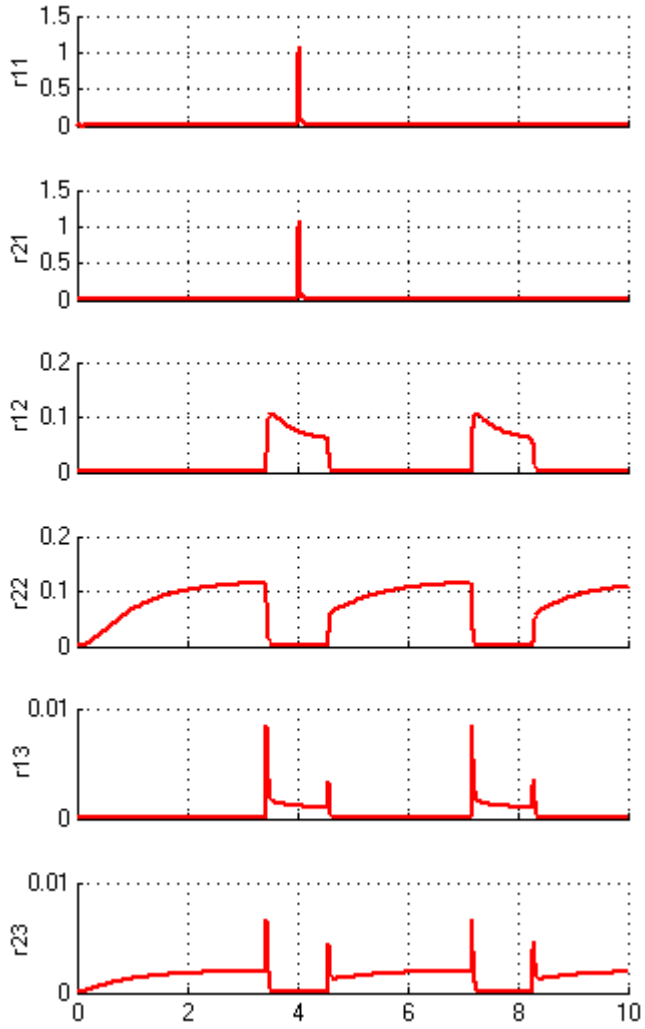


Figure 53: Evolution des résidus

La figure 53 montre les réponses des résidus. La décision de détection des défauts consiste à comparer les résidus à des seuils définis.

Les seuils de détection du système choisi sont donnés dans le tableau 9.

Tableau 9: Seuils de détection

Seuils	T_{11}	T_{21}	T_{12}	T_{22}	T_{13}	T_{23}
Valeur numérique	0.03	0.03	0.1	0.1	0.03	0.03

On remarque qu'à l'instant t=4 s, les deux résidus r11 et r21 s'écartent significativement de zéro et dépassent leurs seuils respectifs T11 et T21, ce qui signifie la détection d'un défaut dans la première sortie y1.

La figure 54 montre le résultat de l'évaluation des résidus générant les signatures des capteurs ci-dessous :

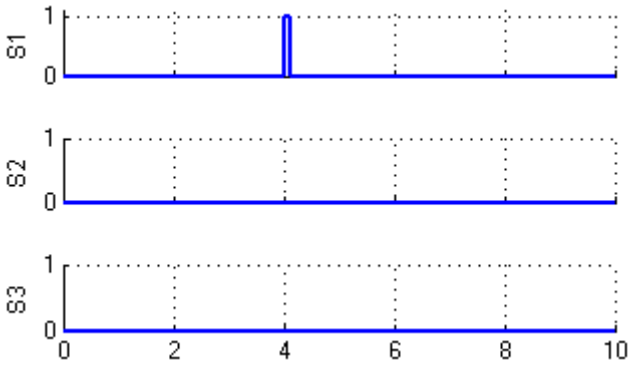


Figure 54: Signatures des capteurs

Grâce aux signatures des capteurs, le défaut est clairement détecté. L'étape suivante est l'identification du mode actif.

La figure 55 montre la signature des modes de chaque sortie.

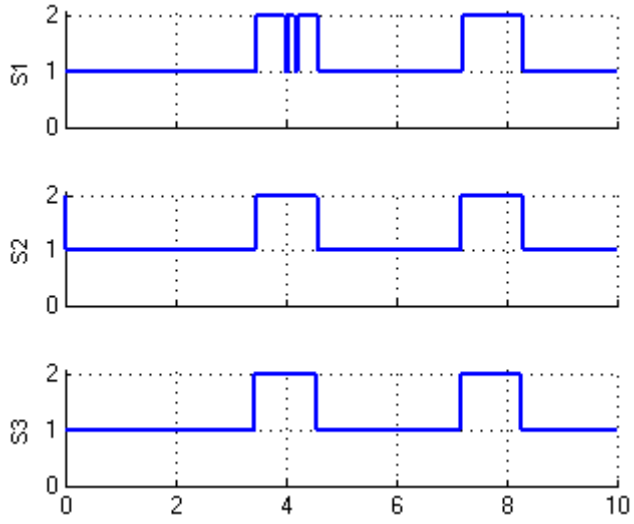


Figure 55: Signatures des modes

Notre algorithme détecte le mode actif en utilisant le feedback des signatures des modes. La figure 56 montre la comparaison entre les modes réels du système et les modes estimés par les observateurs.

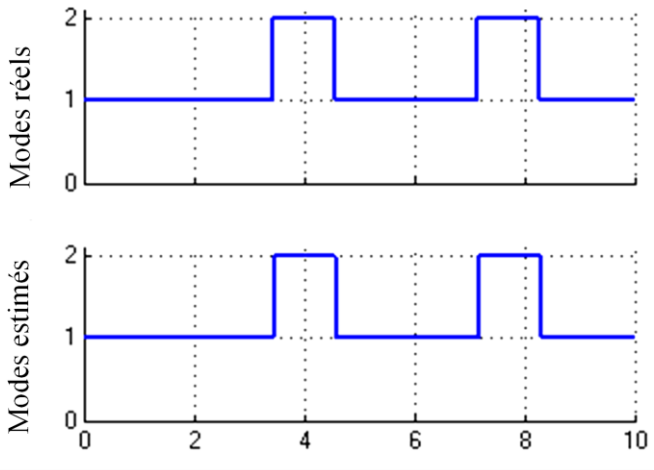


Figure 56: Modes réels VS modes estimés

Nous constatons que les modes réels et les modes estimés sont les mêmes.

L'application de la méthode proposée sur l'exemple choisi a donné de bons résultats. Elle a pu détecter et localiser le défaut de manière fiable et instantanée, et elle a prouvé qu'elle mérite d'être utilisée et déployée dans le secteur industriel.

III.4 Conclusion

La partie III a proposé une méthode innovante de diagnostic de défauts appliquée aux systèmes mécatroniques hybrides. Il s'agit d'une nouvelle approche basée sur le modèle permettant la détection et l'isolation des défauts pour plusieurs systèmes industriels, que ce soit pour les systèmes mécatroniques, les systèmes dynamiques hybrides ou les deux. L'approche proposée trouve une solution rapide et puissante en optimisant le nombre de calculs.

La première phase concerne la construction du modèle du système en utilisant le couplage Bond Graph-Automate hybride, où l'état continu est modélisé par un Bond Graph et l'état discret est décrit par un automate hybride.

Une première couche de diagnostic de modèle est employée pour détecter les erreurs de modélisation à l'aide de Bond Graph, et une deuxième couche de détection et d'isolation des défauts est élaborée pour détecter et localiser les défauts à l'aide d'observateurs hybrides.

IV Intégration des seuils dynamiques pour un diagnostic plus fiable

IV.1 Introduction

La plupart des études se sont concentrées sur les schémas de diagnostic, la modélisation du système et la génération de résidus. Cependant, elles ont négligé l'importance des seuils, qui jouent un rôle crucial dans la prise de décision sur l'existence des défauts. L'obtention d'un haut niveau de précision n'est possible qu'avec des seuils dynamiques.

Comme présenté avant, notre méthode de diagnostic des systèmes mécatronique hybrides est basé sur deux outils principaux ; le Bond Graph et l'observateur. Une couche de diagnostic détecte les erreurs de modèle en utilisant le Bond Graph, et un algorithme intelligent identifie et localise les défauts en utilisant l'observateur. Bien que les observateurs servent de détecteurs de défauts, ils ont aussi leurs propres erreurs causées par le retard de convergence des calculs ; même dans le cas où il n'y a pas de défaut capteur, le résidu ne converge pas vers zéro [22]. Dans cette partie, nous proposons une amélioration de la méthode pour résoudre ce problème en intégrant des seuils dynamiques dans la procédure de détection, ce qui permet d'éviter les fausses alarmes et d'assurer un diagnostic plus fiable.

IV.2 Développement de la méthode

IV.2.1 Détection des défauts

L'équation (48) donne la fonction dérivée de $r_{ij}(t)$ et $e_{ij}(t)$.

$$\begin{cases} \dot{e}_{ij}(t) = (A_i - L_{ij}C_{ij}).\, e_{ij}(t) - L_{ij}E_{ij}d(t) \\ \dot{r}_{ij}(t) = C_{ij}.\, e_i(t) + E_{ij}.\, d(t) \end{cases} \tag{48}$$

Les observateurs reçoivent toutes les sorties/entrées du système. Les sorties obtenues y(t) sont comparées instantanément aux sorties reconstruites $\check{y}$ (t) pour générer des vecteurs résiduels rij.

Chaque résidu $r_{ij}(t)$ calculé est comparé à un seuil dynamique m_{ij}(t), qui est défini par l'équation (49).

$$m_{ij}(t) = p_{ij}(t) + T_{ij}(t) \tag{49}$$

Tij est une constante calculée en considérant les bruits et les perturbations présentes dans le système.

pij(t) est l'erreur propre à l'observateur causée par le changement de mode et les délais de calcul. Elle est définie par l'équation (52) résultant de l'équation (50) et de l'équation (51).

$$S_{ij}: \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i.\, x(t) + B_i.\, u(t) \\ y_{ij}(t) = C_{ij}.\, x(t) + D_{ij}.\, u(t) \\ \mathrm{x}(0) = \mathrm{x}_0 \end{cases} \tag{50}$$

$$O_{ij}: \begin{cases} \dot{\check{x}}(t) = A_i.\, \check{x}(t) + B_i.\, u(t) + L_{ij}\big(y(t) - \check{y}(t)\big) \\ \widecheck{y_{ij}}(t) = C_{ij}.\, \check{x}(t) + D_{ij}.\, u(t) \\ \check{x}(0) = \check{x}_0 \end{cases} \tag{51}$$

$$p_{ij}(t) = y_{ij}(t) - \widecheck{y_{ij}}(t) \tag{52}$$

Par conséquent, $m_{ij}(t)$ est décrit par l'équation (53).

$$m_{ij}(t) = y_{ij}(t) - \widecheck{y_{ij}}(t) + T_{ij} \tag{53}$$

nous adoptons alors la logique de décision ci-dessous :

Si |rij(t)|> mij(t)

SCij =0, ce qui signifie que la sortie j est défectueuse.

Sinon Sij=1

Nous générons ensuite la signature des capteurs

SCj=$\prod_{i=1}^{n} SCij$

IV.2.2 Identification des modes

Pour une sortie y_j, la valeur minimale du résidu $r_{ij}(t)$ correspond au numéro du mode actif i.

En suivant l'algorithme ci-dessous, le résidu $r_{ij}(t)$ sera évalué pour identifier le mode correspondant à chaque sortie SMj:

for j=1:m

Min = $r_{1j}(t)$;

SMj = 1;

for i = 2:n

If $r_{ij}(t)$ < Min

Min = $r_{ij}(t)$;

SMj = i;

end

end

end

SM=(SMj) ∈ $\mathbb{R}^{m}$

Si le système fonctionne normalement, sans erreurs, alors SM(t)=C.U.

Où U est le vecteur unitaire, U^T= (1 1...1), et C est le mode actif.

Sinon, le $SM_{d}(t)$ de la sortie défectueuse n'est pas identique aux autres $SM_{j}(t)$.

Le mode actif S est le mode des sorties sans défaut.

Supposons que nous ne pouvons pas avoir tous les capteurs générant des erreurs en même temps.

Alors, $S = \frac{\sum_{j=1}^{m} SM_j * \mathrm{SCj}}{\sum_{j=1}^{m} \mathrm{SCj}}$

Sinon, le mode actif S est défaillant.

IV.3 Exemple d'application

IV.3.1 Description du système

La figure 57 présente le système à deux réservoirs choisi pour l'application de l'approche de détection et d'isolation de défauts.

Nous considérons un système hydraulique à deux réservoirs. Une pompe délivre de l'eau au débit q1 qui arrive dans un premier réservoir T1 de section S1. A la sortie de ce réservoir, une vanne V1 de résistance hydraulique Rh laisse passer le fluide vers un second réservoir T2, de section S2 ; et la sortie de ce réservoir est autorisée par une vanne V2 de résistance hydraulique Rh.

Afin de faciliter l'étude, la vanne V1 est laissée ouverte et seule la vanne V2 est actionnée.

On peut avoir deux états de la vanne V2 : fermée ou ouverte.

Dans le mode 1, V2 est fermée et q1 est maintenu.

Dans le mode 2, V2 est ouverte et q1 est arrêté.

Le but est de maintenir le niveau de liquide l1 et l2 dans les deux réservoirs T1 et T2 à un niveau bien défini : $\begin{cases} l1 \leq 0.6 \\ l2 \geq 0.2 \end{cases}$

Le tableau 1 présente les valeurs numériques des paramètres.

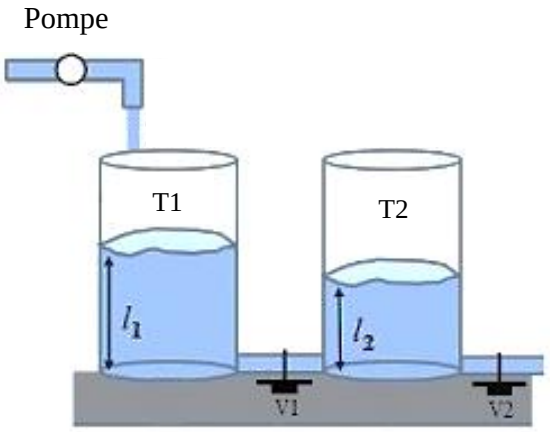


Figure 57: Système hydraulique à deux réservoirs

Tableau 10: Valeurs numériques des paramètres

Paramètre	Description	Valeur
q1	Débit volumétrique	0.2 m^3/s

Rh	Résistance hydraulique de la vanne	$10\ N.s.m^{-5}$
S1	Surface de base du réservoir 1	$2\ m^2$
S2	Surface de base du réservoir 2	$1.5\ m^2$
g	Accélération gravitationnelle	$9.8\ m.s^{-2}$

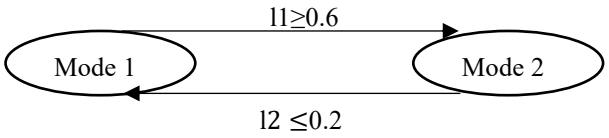


Figure 58: Automate hybride du système

L'automate hybride de la figure 58 présente les différents états standards du système décrits par le mode 1 et le mode 2. La satisfaction des conditions permet de passer d'un mode à un autre.

IV.3.2 Modélisation du système

Pour construire un modèle BG en causalité intégrale, les suppositions suivantes sont prises en compte :

- Le débit volumétrique q représente le volume de fluide, qui se déplace dans la canalisation d'un circuit durant un laps de temps déterminé ; il est défini par l'équation (54).

$$q = \frac{dV}{dt} \tag{54}$$

- Le débit volumétrique q1 de la pompe est constant.
- La résistance hydraulique Rh est la résistance résultant des vannes d'écoulement d'un liquide ou des changements de diamètre d'un tuyau ; elle est définie par l'équation (55).

$$R = \frac{Q}{\Delta P} \tag{55}$$

La figure 59 et la figure 60 présentent le modèle BG en causalité intégrale.

Un modèle Bond Graph est conçu pour chaque mode :

Deuxième mode :

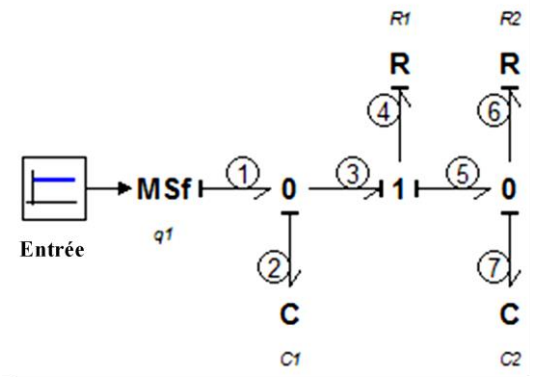


Figure 59: Modèle BG du système en mode 2

Premier mode :

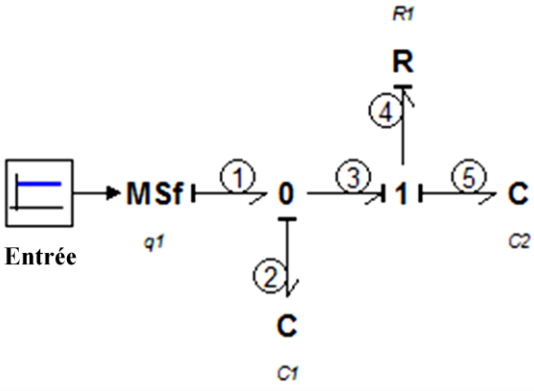


Figure 60: Modèle BG du système en mode 1

Pour générer le modèle dynamique du système, nous suivons les quatre étapes ci-dessous :

- Identifier les variables de sortie/entrée

- Extraire les équations des jonctions

- Extraire les équations des éléments passifs et actifs

- Combiner l'ensemble des équations pour générer l'espace d'état

Les équations (56) et (63) extraites des jonctions "0" et "1" du modèle BG sont présentées ci-dessous :

Deuxième mode :

$$\begin{cases} e1 = e2 = e3 = \{h1\} \\ f1 = f2 + f3 \end{cases}; \begin{cases} f3 = f4 = \mathrm{f5} \\ e3 = e4 + e5 \end{cases}; \begin{cases} e5 = e6 = e7 = \{h2\} \\ f5 = f6 + f7 \end{cases} \quad (56)$$

Les équations constitutives des éléments BG sont présentées ci-dessous :

$$e4 = R1.f4;\ e6 = R2.f6;\ f7 = C2.\frac{de7}{dt};$$
$$f2 = C1.\frac{de2}{dt};\ R1 = R2 = \frac{RH}{g};\ C1 = S1; C2 = S2 \tag{57}$$

Le modèle dynamique du système peut être décrit sous la forme ci-dessous :

$$\begin{cases} \dfrac{dl1}{dt} = \dfrac{q1}{s1} + \dfrac{g}{RH * S1}(l2 - l1) \\ \dfrac{dl2}{dt} = \dfrac{g}{RH * S2}(l1 - l2) - \dfrac{g}{RH * S2} l2 \end{cases} \tag{58}$$

Le système peut être représenté par l'équation d'état ci-dessous :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_2.X + B_2.u \\ Y = C_2.X \end{cases} \tag{59}$$

Où X=$\begin{pmatrix} e2 \\ e7 \end{pmatrix}$=$\begin{pmatrix} l1 \\ l2 \end{pmatrix}$

L'équation (60) représente la matrice d'état du système.

$$A_2 = \begin{pmatrix} -\dfrac{g}{RH * S1} & \dfrac{g}{RH * S1} \\ \dfrac{g}{RH * S2} & -\dfrac{2g}{RH * S2} \end{pmatrix} \tag{60}$$

L'équation (61) représente la matrice de commande.

$$B_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{61}$$

L'équation (62) représente la matrice d'observation.

$$C_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{62}$$

Premier mode :

$$\begin{cases} e1 = e2 = e3 = \{h1\} \\ f1 = f2 + f3 \end{cases}; \begin{cases} f3 = f4 = \mathrm{f5} \\ e3 = e4 + e5 \end{cases} \tag{63}$$

Les équations constitutives des éléments du BG sont présentés ci-dessous :

$$e4 = R1.f4;\ f2 = C1.\frac{de2}{dt};\ f5 = C2.\frac{de5}{dt};$$
$$R1 = R2 = \frac{RH}{g};\ C1 = S1;\ C2 = S2 \tag{64}$$

Le modèle dynamique du système peut être décrit sous la forme ci-dessous :

$$\begin{cases} \frac{dl1}{dt} = \frac{q1}{s1} + \frac{g}{RH * S1}(l2 - l1) \\ \frac{dl2}{dt} = \frac{g}{RH * S2} l1 - \frac{g}{RH * S2} l2 \end{cases} \quad (65)$$

Le système peut être représenté sous l'équation de l'espace d'état ci-dessous :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_1.X + B_1.u \\ Y = C_1.X \end{cases} \quad (66)$$

Où $X=\begin{pmatrix} e2 \\ e5 \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} l1 \\ l2 \end{pmatrix}$

L'équation (67) représente la matrice d'état du système.

$$A_1 = \begin{pmatrix} -\frac{g}{RH * S1} & \frac{g}{RH * S1} \\ \frac{g}{RH * S2} & -\frac{2g}{RH * S2} \end{pmatrix} \quad (67)$$

L'équation (68) représente la matrice de commande.

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (68)$$

L'équation (69) représente la matrice d'observation.

$$C_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (69)$$

IV.3.3 Conception d'observateur

L'équation (70) rappelle le modèle mathématique de l'observateur de Luenberger :

$$O_{ij}: \begin{cases} \check{\dot{x}}(t) = A_i.\check{x}(t) + B_i.u(t) + L_{ij}\big(y(t) - \check{y}(t)\big) \\ \check{y}_j(t) = C_{ij}.\check{x}(t) + D_{ij}.u(t) \\ \check{x}(0) = \check{x}_0 \end{cases} \quad (70)$$

Chaque sortie est liée à un observateur, et nous avons un ensemble de quatre observateurs O_{ij} tels que i ∈ {1, 2} et j ∈ {1, 2}.

Nous utilisons la technique de placement de pôles, et nous nous basons sur les critères de rapidité et de stabilité présenté dans la partie III.2.4.1 pour déterminer les gains des observateurs.

les pôles sont choisis comme suit dans l'équation (71).

$$P_{11} = P_{12} = P_{21} = P_{22} = \begin{pmatrix} -40 + i \\ -40 - i \end{pmatrix} \quad (71)$$

Les gains des observateurs sont ensuite calculés pour donner les valeurs mentionnées dans l'équation (72).

$$L_{11} = 10^2 \begin{pmatrix} 0.789 \\ 31.622 \end{pmatrix};\ L_{12} = 10^2 \begin{pmatrix} 23.914 \\ 0.789 \end{pmatrix};$$
$$L_{21} = 10^2 \begin{pmatrix} 0.782 \\ 30.582 \end{pmatrix};\ L_{22} = 10^2 \begin{pmatrix} 23.914 \\ 0.782 \end{pmatrix} \quad (72)$$

L'étape suivante sera, la conception d'un modèle BG correspondant aux équations de l'observateur, et l'OBG est construit en ajoutant le terme $L(Y - \check{Y})$ au modèle BG.

La figure 61 et la figure 62 représentent respectivement le modèle BG de l'observateur du mode 2 et du mode 1.

Les composantes du vecteur L_{ij}, tel que i ∈ {1, 2} et j ∈ {1, 2}, sont représentées par K1 et K2.

Deuxième mode :

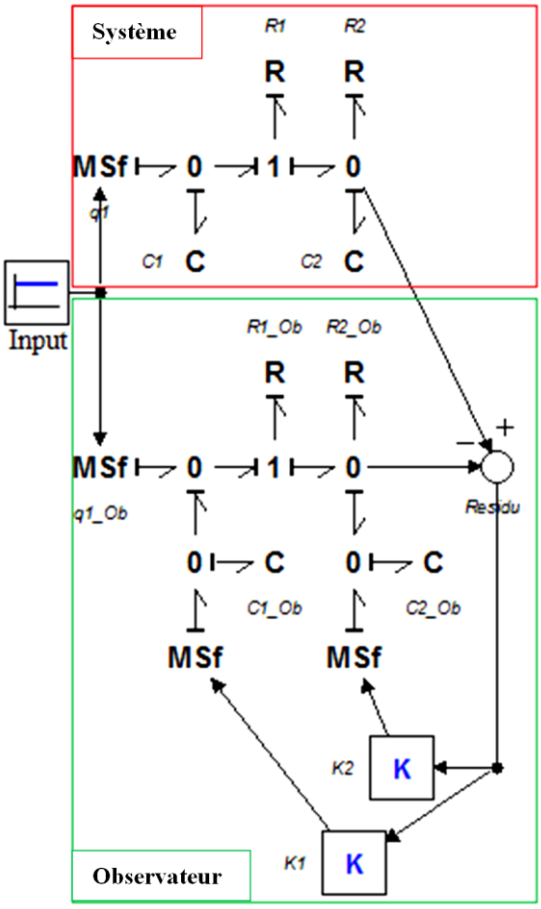


Figure 61: Bond Graph du deuxième mode et son observateur

Premier mode

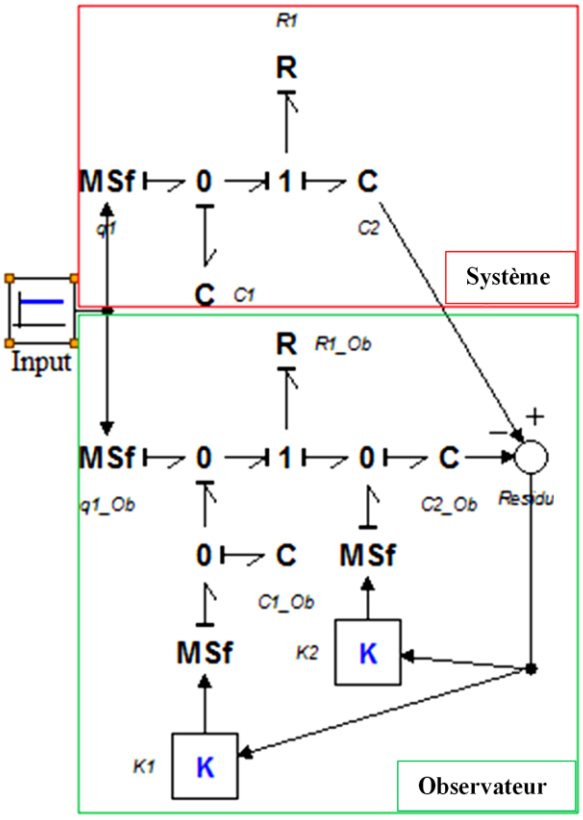


Figure 62: Bond Graph du premier mode et son observateur

IV.3.4 Résultats des simulations

Pour obtenir des résultats fiables, le système a été simulé à l'aide des deux logiciels ; 20-sim et Matlab.

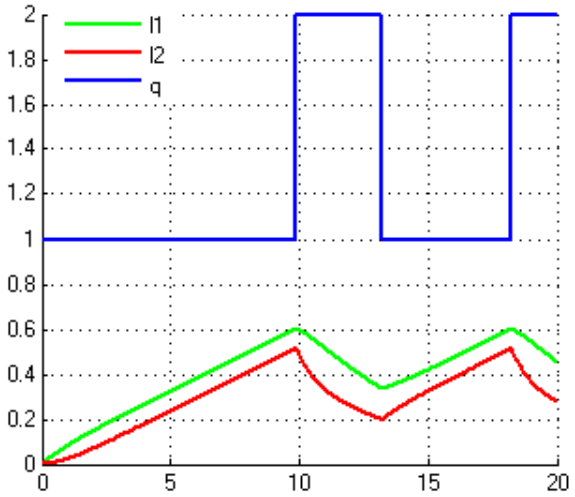


Figure 63: Evolution hybride des paramètres

La figure 63 représente l'évolution normale des états continus et discrets. Lorsque les conditions sont remplies, le système passe d'un mode à l'autre. Afin de simuler le système dans tous les modes, le temps de simulation est fixé à 20 s.

Nous pouvons voir que chaque mode se distingue par son évolution propre et que le niveau de variation de l'eau dans les deux réservoirs ne dépasse pas les seuils définis au préalable.

La méthode proposée dans cette partie doit être testée pour prouver son efficacité. Ainsi, nous allons ajouter un défaut capteur et montrer la réponse du système, qui devrait être capable de détecter le défaut et de localiser le mode actif.

L'approche de détection de défaut compare les résidus calculés à un seuil défini mij(t) qui est la somme de pij(t) et Tij.

La figure 64 montre l'évolution des résidus du système sans défaut. On peut voir clairement qu'ils ne sont pas égaux à zéro et que les observateurs ont leurs propres erreurs, qui seront éliminées par la suite par notre méthode.

La constante Tij choisie est donnée ci-dessous :

$$T_{11} = T_{12} = T_{21} = T_{22} = 5.10^{-4} \tag{73}$$

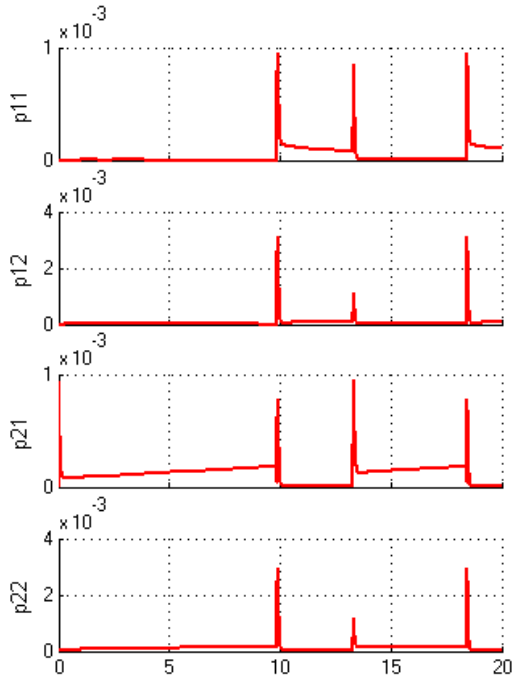


Figure 64: Evolution des résidus du système sans défaut

La figure 65 présente les signatures des capteurs basées sur le résultat de l'évaluation des résidus.

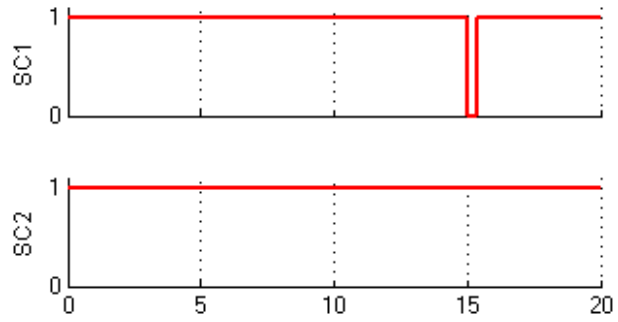


Figure 65: Signatures des capteurs

Les signatures des capteurs détectent un défaut à l'instant t=15 s, et la détection du mode actif sera l'étape suivante.

La signature des modes de chaque sortie est représentée dans la Figure 66.

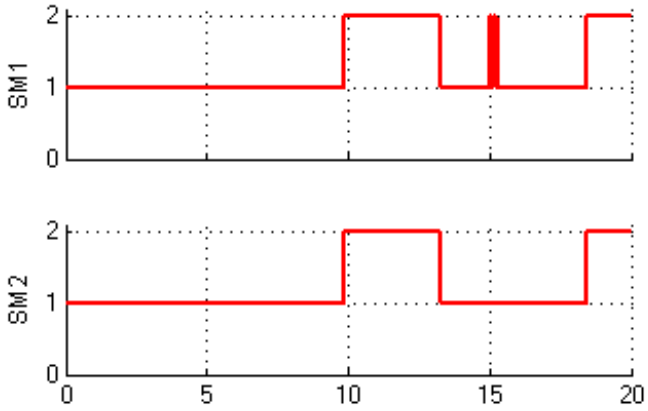


Figure 66: Signatures des modes

Sur la base des signatures des modes, l'algorithme proposé localise le mode actif, et une comparaison entre l'estimation et les modes réels est représentée dans la figure 67.

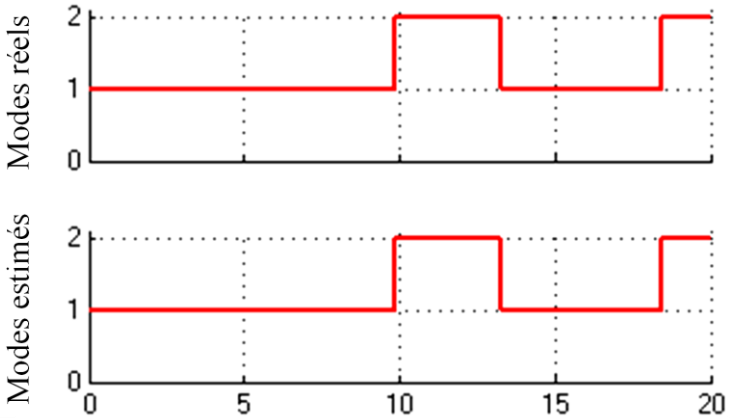


Figure 67: Modes réels VS modes estimés

Nous voyons clairement que les modes estimés et réels sont identiques.

L’application de l’approche proposée sur l’exemple choisi a montré son efficacité et sa fiabilité pour détecter et localiser les défauts.

Grâce à la facilité d’application de notre algorithme de diagnostic, il peut être déployé et mis en œuvre dans l’industrie.

IV.4 Conclusion

Dans cette partie, nous avons proposé une amélioration de notre méthode de détection et de localisation de défauts des systèmes mécatronique hybrides, la solution est composée de trois étapes.

Dans la première étape, le Bond Graph hybride est utilisé pour modéliser le système et assurer une première couche de diagnostic du modèle ; la deuxième étape permet la génération de résidus issus des observateurs ; et la dernière étape vise à annuler l’erreur de l’observateur en intégrant les seuils dynamiques.

La troisième étape rajoutée a amélioré la fiabilité de diagnostic et a évité les fausses alarmes.

Conclusion

Le quatrième chapitre propose une nouvelle approche efficace pour le diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides. L'avantage de cette méthode est sa capacité à détecter les défauts capteurs dans la plupart des systèmes industriels. Que ce soit pour les systèmes mécatroniques, les systèmes dynamiques hybrides ou les deux.

L'approche proposée trouve une solution rapide et puissante de diagnostic en commençant par la partie modélisation, où le Bond Graph est combiné avec un automate hybride pour donner une présentation exhaustive prenant en compte les deux dynamiques, continue et discrète, du système. L'utilisation des Bond Graphs n'est pas seulement limitée à la modélisation, elle est également utilisée pour le processus de détection des erreurs de modélisation.

Après la modélisation, les observateurs interviennent pour détecter le mode actif et générer les résidus qui seront analysés et comparés à des seuils dynamiques visant l'annulation des erreurs d'observateurs et évitant les mauvaises alarmes.

En somme, la méthode proposée est une solution complète pour le diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides, qui permet de garantir leur fiabilité et leur bon fonctionnement. Cette méthode peut être utilisée pour améliorer la qualité et la sécurité des systèmes industriels complexes, ce qui est essentiel pour maintenir une performance optimale.

Chapitre 5 : Détection des dégradations capteurs

Introduction

La détection des dégradations capteurs joue un rôle très important pour anticiper les défauts et garantir le bon fonctionnement des systèmes.

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle méthode d'anticipation des erreurs de capteur appliquée aux systèmes mécatroniques hybrides. Dès qu'une petite dégradation de performance est détectée, le capteur concerné est identifié avant l'apparition du défaut. Pour ce faire, le Bond Graph hybride est utilisé pour modéliser le système en prenant en compte ses parties continues et discrètes.

Une fois que le système est modélisé, les observateurs interviennent pour estimer les paramètres du système. Les sorties des observateurs servent d'entrées pour les cartes de contrôle, qui visent à détecter les fluctuations anormales et à avertir de la dégradation des capteurs.

L'approche proposée améliore la fiabilité du système et évite les erreurs qui peuvent causer des retards dans les systèmes de production industriels.

I Anticipation des défauts et identification des dégradations

I.1 Développement de la méthode

I.1.1 Identification de mode

L'équation (74) donne la fonction dérivée de $r_{ij}(t)$ et $e_{ij}(t)$.

$$\begin{cases} \dot{e}_{ij}(t) = (A_i - L_{ij}C_{ij}).e_{ij}(t) - L_{ij}E_{ij}d(t) \\ \dot{r}_{ij}(t) = C_{ij}.e_i(t) + E_{ij}.d(t) \end{cases} \quad (74)$$

Chaque observateur reçoit toutes les entrées et sorties du système. Pour générer les vecteurs résiduels rij, les sorties reconstruites $\check{y}$ sont instantanément comparées aux sorties mesurées.

Pour une sortie y_j, le mode actif i correspond au plus petit résidu $r_{ij}(t)$.

Le résidu $r_{ij}(t)$ sera ensuite analysé selon l'algorithme ci-dessous pour générer le mode de chaque sortie MOj :

for j=1:m

Min = $r_{1j}(t)$;

MOj = 1;

for i = 2:n

If $r_{ij}(t)$ < Min

Min = $r_{ij}(t)$;

SMj = i;

end

end

end

MO=(MOj) ∈ $\mathbb{R}^m$

Then MO(t)=C.U

Où C est le mode actif et U est le vecteur unitaire U^T=(1 1 ... 1).

I.1.2 Carte de contrôle

La carte de contrôle est l'une des premières cartes utilisées à des fins de surveillance des processus [82]. Il s'agit d'une représentation graphique de la caractéristique de qualité développée par Walter A. Shewhart en 1924 [83]. L'idée principale de Shewhart est d'analyser

la variabilité d'un processus de production afin de détecter les changements anormaux et de converger vers les causes racines.

Il existe plusieurs types de cartes de contrôle utilisées pour différents types de données [84]:

Les cartes de contrôle aux attributs comme la carte P, la carte U, la carte X et la carte C [85].

Les cartes de contrôle aux mesures comme la carte X barre, la carte R barre et la carte S barre [86] .

I.1.2.1 Carte X barre

Notre méthode proposée pour le diagnostic traite des données continues provenant de résidus. Par conséquent, nous proposons les cartes de contrôles aux mesures, et nous penchons vers l'utilisation de la carte X barre grâce à sa simplicité et sa mise en œuvre rapide.

La carte en X présente la valeur de la caractéristique de qualité en fonction du temps. Elle contient trois lignes ; une ligne centrale représentant la valeur moyenne pour le processus en cours de contrôle, une limite supérieure de contrôle (UCL) et une limite inférieure de contrôle (LCL) [87]. Les limites de contrôle sont sélectionnées de manière à ce que la plupart des points se trouvent à l'intérieur de ces limites lorsque le processus est sous contrôle.

Si les données du système dépassent les limites de contrôle, un défaut est déclaré. Dans le cas contraire, Le processus est censé fonctionner dans des conditions normales, et aucune intervention n'est nécessaire.

Les limites supérieures et inférieures de contrôle de détection des défauts peuvent être calculées comme suit :

$$\mathrm{UCL, LCL} = \mathrm{M} \pm 3\sigma \tag{75}$$

Où M est la moyenne et σ est l'écart-type. Dans une distribution normale, 99,7 % des observations se situent à l'intérieur de M ± 3σ.

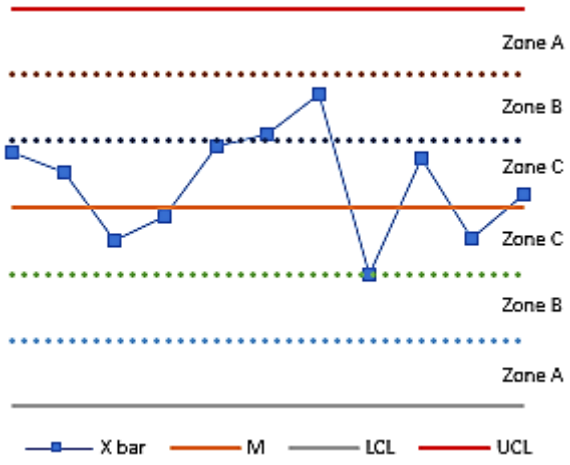


Figure 68: Carte X-barre

Comme le montre la figure 68, la zone située entre chaque limite de contrôle et la moyenne M est divisée en trois zones. La zone A est le tiers le plus proche de la ligne centrale M, la zone B est le tiers suivant et la zone C est le tiers le plus proche des limites de contrôle.

I.1.2.2 Règles d'interprétation

En scrutant l'affichage graphique, plusieurs règles d'interprétation sont utilisées pour détecter l'existence d'une variation due à des causes spéciales. Si un ou plusieurs critères particuliers sont observés, cela indique la présence d'une variation due à une cause spécifique [88]. Le tableau 11 présente les huit critères pour détecter les dérives de processus sous surveillance :

Tableau 11: Règles de détection des dérives

Régle	**Description**
1	Un ou plusieurs points au-dessus de UCL ou au-dessous de LCL
2	Parmi 3 points successifs, 2 se retrouvent dans la zone A ou au-delà
3	Parmi 5 points successifs, 4 se retrouvent dans la zone B ou au-delà
4	7 points successifs ou plus d'un côté de la moyenne (dans la zone C ou au-delà)
5	7 points successifs ayant une tendance à la hausse ou à la baisse
6	8 points successifs sans aucun point dans la zone C
7	15 points successifs dans la zone C
8	14 points successifs alternant hausse et baisse

I.1.3 Méthode de détection de la dégradation

Pour détecter la sortie impactée par la dégradation, nous suivons l'algorithme ci-dessous :

pour j=1:m

Sj= $\sum_{i=1}^{n} r_{ij}(t)$

Sur la base de l'algorithme d'identification des modes, nous extrayons la valeur de Sj à la fin de chaque mode, qui sera utilisée comme entrée pour la carte de contrôle.

Nous utilisons des mesures individuelles avec une taille d'échantillon égale à 1.

X est la cible ; c'est la moyenne de S_j pour un fonctionnement normal du système.

X= $\overline{S_J}$

UCL= X + 3σ

LCL= X - 3σ

For n=2 $A_4 = 2.66$

u est le numéro de lot et u ∈[1,t]

for u=1:t

$\mathrm{R}_j = \left| S_{j,u+1} - S_{j,u} \right|$

$\overline{\mathrm{R}_J} = \dfrac{\mathrm{R}_j}{t-1}$

$\mathrm{UCL}_j = \mathrm{X} + A_4 \times \bar{R}$

$\mathrm{LCL}_j = \mathrm{X} - A_4 \times \bar{R}$

Après avoir élaboré la carte de contrôle, nous passons à l'étape de l'interprétation. Nous utiliserons principalement la règle de tendance car nous nous intéressons uniquement à la dégradation du capteur.

Pour être plus précis dans la détection de la dégradation, nous utilisons la règle suivante : quatre points successifs de Sj ayant une tendance à la hausse indiquent une dégradation du capteur.

I.2 Exemple d'application

I.2.1 Description du système

Le système présenté dans la figure 69 est utilisé comme exemple pour l'application de la méthode de diagnostic. Ce système est le même que celui utilisé dans le chapitre IV.3.1. Cependant, dans ce chapitre, nous ne nous intéressons pas à la détection de défauts mais plutôt à l'identification de la dégradation des capteurs avant d'avoir des défauts.

Nous rappelons brièvement la description du système, et nous passerons par la suite à la méthode de détection des dégradations.

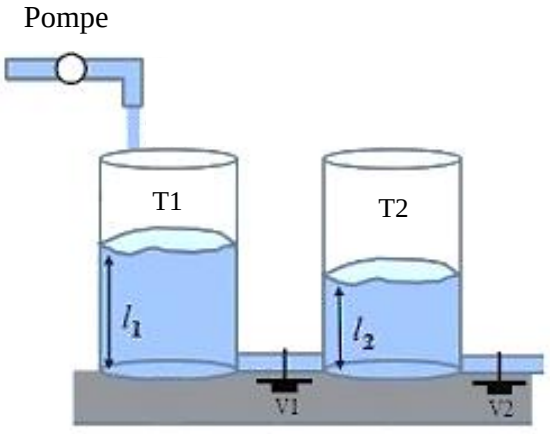


Figure 69: Système à deux réservoirs

Le débit d'eau q1 alimente un premier réservoir T1 de section S. L'eau passe par un tube contenant une vanne V1 de résistance hydraulique Rh vers un réservoir T2, de section S2. Le deuxième réservoir T2 est déchargé par la vanne V2 de résistance hydraulique Rh.

On considère que la vanne V1 est toujours ouverte et que la vanne V2 n'a que deux états : ouvert ou fermé.

Les modes sont définis selon les conditions suivantes :

Mode 1 : q1 activé et V2 fermé

Mode 2 : q1 désactivé et V2 ouvert

Le but est de contrôler le niveau d'eau dans les deux réservoirs selon les seuils ci-dessous :

$$\begin{cases} l1 \leq 0.6 \\ l2 \geq 0.2 \end{cases} \tag{76}$$

I.2.2 Modélisation du système

La figure 70 et la figure 71 montrent le résultat de la modélisation tirée du chapitre 3 de l'article [23]. Pour plus de détails, vous pouvez le consulter.

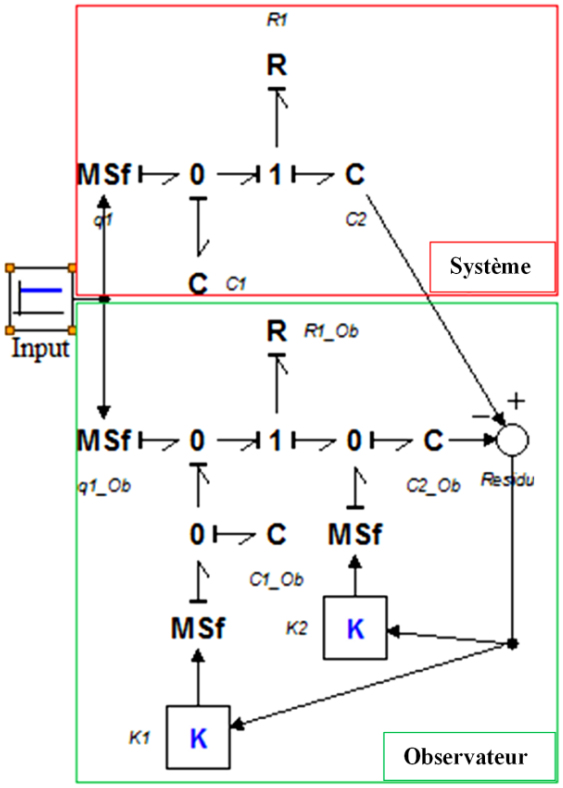


Figure 70: BG et observateur associé du mode 1

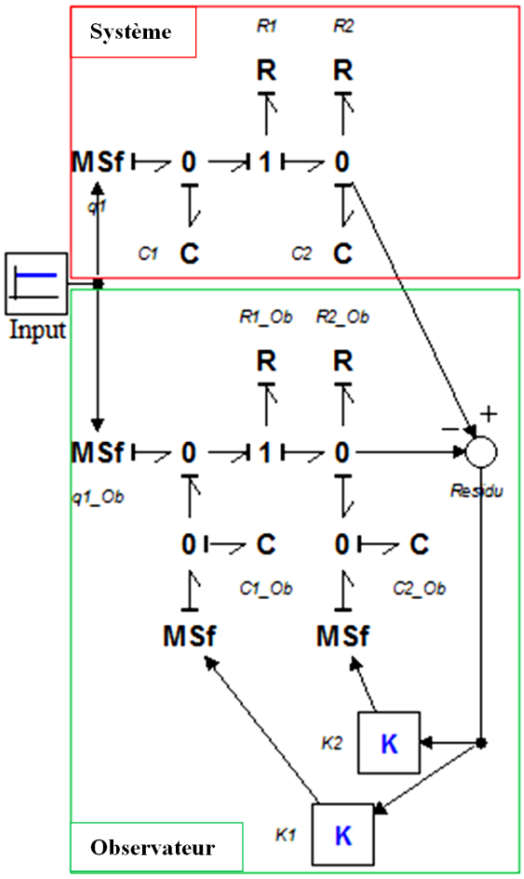


Figure 71: BG et observateur associé du mode 2

I.2.3 Résultats des simulations

Pour obtenir des résultats précis, le système a été simulé à l'aide des deux fameux programmes ; 20-sim et Matlab.

La figure 72 illustre l'évolution normale des états discrets et continus. Lorsque les critères de transition sont réalisés, la commutation entre les modes se produit.

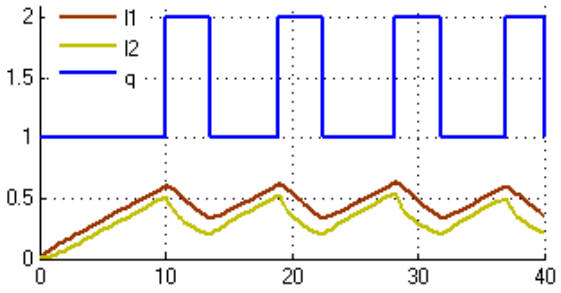


Figure 72: Evolution de la dynamique hybride du système

Le graphique ci-dessus donne une visibilité sur l'évolution des paramètres du système. Chaque mode se distingue des autres par une dynamique différente.

Les niveaux l1 et l2 des deux réservoirs présentés dans la figure 72 montrent une variation de niveau d'eau qui respecte les conditions préliminaires.

Pour tester l'efficacité de l'approche de diagnostic proposée, nous injectons un signal de dégradation du capteur et nous présentons la réponse du système. Nous cherchons à détecter le mode actif et à localiser la sortie impactée.

La figure 73 présente le signal de dégradation choisi, et la figure 74 donne l'évolution de S1 et S2 obtenue à partir des résidus de l'observateur.

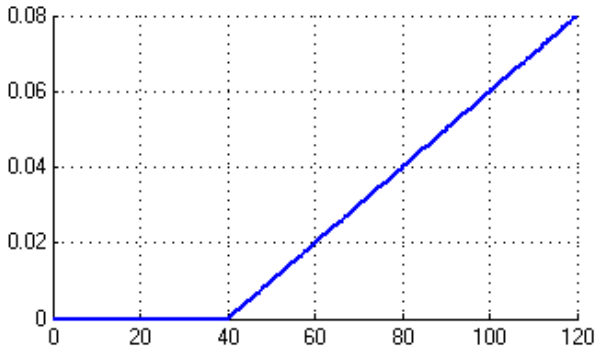


Figure 73: Signal de dégradation intégré

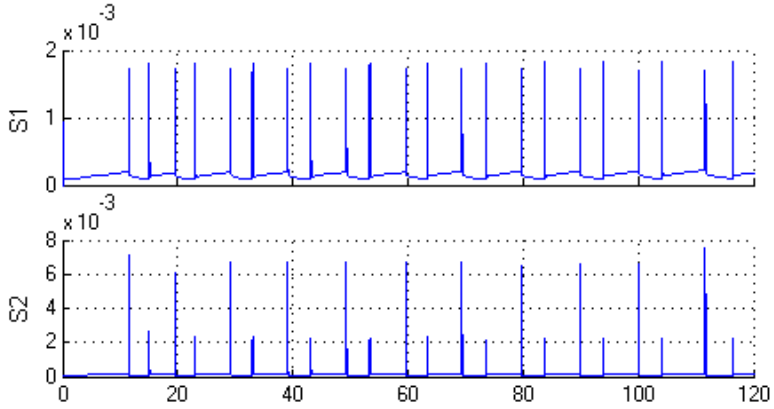


Figure 74: Evolution de S1 et S2

L'étape suivante est la détection du mode actif. Nous utilisons l'algorithme proposé dans la section III pour détecter le mode actif et nous extrayons la valeur de S1 et S2 à la fin de chaque mode.

La figure 75 montre une comparaison entre les modes estimés et les modes réels, et nous pouvons noter qu'ils sont exactement les mêmes, ce qui prouve la fiabilité de l'algorithme mis en œuvre.

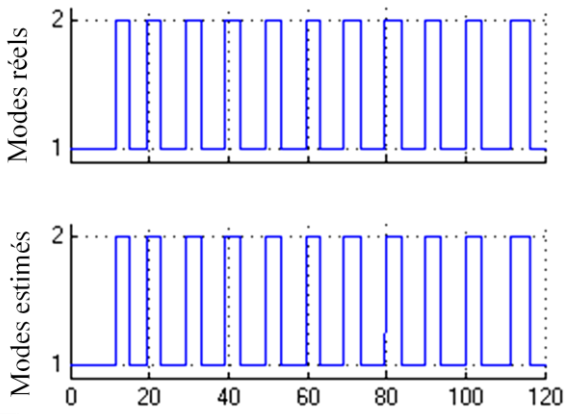


Figure 75: Modes réels VS estimés

La figure 76 et la figure 77 présentent les cartes de contrôle de S1 et S2.

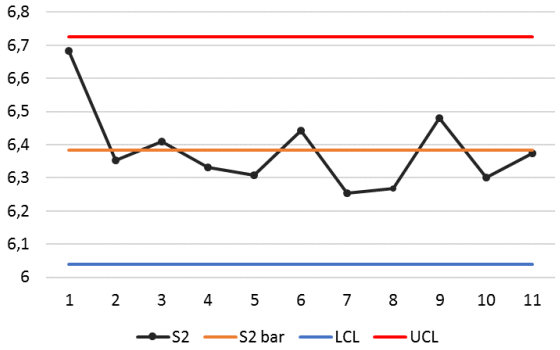


Figure 76: Carte X-barre de S2

Tous les points sont dans l'intervalle [LCL,UCL] et nous remarquons une fluctuation normale du signal S2 qui indique une performance normale du capteur.

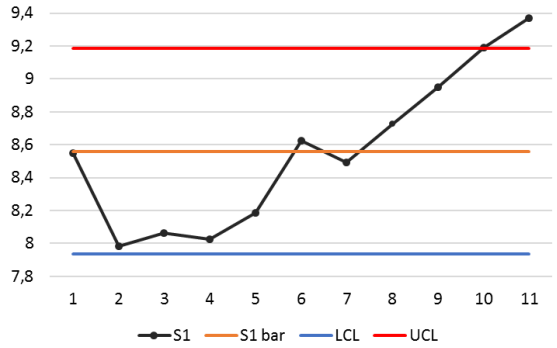


Figure 77: Carte X-barre de S1

Dans la figure 77, quatre points successifs ont une tendance à la hausse et un point dépasse la limite supérieure de contrôle, ce qui signale une dégradation du capteur.

L’approche proposée a montré son fort potentiel pour détecter les dégradations des capteurs. Elle prend en compte la spécificité des systèmes dynamiques hybrides pour donner une approche de diagnostic exhaustif, fiable et efficace.

Conclusion

Le dernier chapitre a abordé le problème de la dégradation des capteurs dans les systèmes mécatroniques hybrides, l'objectif était d'anticiper les erreurs avant d'obtenir des défauts réels. Afin d'atteindre les résultats souhaités, un processus en trois étapes a été proposé.

La partie modélisation commence par l'utilisation du Bond Graph qui est combiné avec un automate hybride. Cette approche permet de présenter de manière exhaustive les deux dynamiques, continue et discrète, du système. Les Bond Graphs sont utilisés non seulement pour la modélisation, mais également pour le processus de détection. Ils permettent d'assurer la détection des erreurs de modélisation.

Après la modélisation, les observateurs interviennent pour détecter le mode actif et génèrent des résidus qui sont exploités par les cartes de contrôle. Ces dernières tracent l'évolution des résidus et donnent une image sur la performance du système.

Cette méthode complète les approches de détection et d'isolation des défauts proposées pour les systèmes mécatroniques hybrides. Cette étape a permis de mutualiser les observateurs qui sont basés sur le modèle et les cartes de contrôles qui sont basées sur les données pour donner une méthode plus exhaustive et plus puissante.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail a été conçu pour améliorer les méthodes de diagnostic actuelles, et apporter une valeur ajoutée permettant d'assurer un diagnostic fiable pour un scope de système plus large. Cette thèse a ciblé le diagnostic des systèmes mécatronique hybrides vu leur exhaustivité et leur omniprésente dans l'industrie. Le Bond Graph était l'outil de modélisation choisi et l'observateur était l'outil de diagnostic adopté.

L'utilisation de Bond Graph a permis de rajouter une couche de diagnostic de plus en évitant les erreurs de modélisation. Un modèle contenant des erreurs conduit directement à un mauvais diagnostic et c'est pour cette raison que notre proposition était pertinente et elle a aidé à fiabiliser davantage le diagnostic.

L'observateur par son pouvoir d'estimation d'état a contribué également à minimiser le nombre d'information nécessaire au diagnostiqueur pour trouver le paramètre impacté. L'observateur a été présenté comme un capteur analytique permettant d'identifier le mode actif et localiser le défaut en temps réel. Comme tous les outils, chacun à ses propres limitations. Bien que les observateurs servent de détecteurs de défauts, ils ont aussi leurs propres erreurs causées par le retard de convergence des calculs. Notre proposition novatrice était d'intégrer les seuils dynamiques dans la procédure de détection, ce qui a permis de dépasser cette limitation, éviter les fausses alarmes et assurer un niveau de diagnostic plus poussé.

En outre, nous avons proposé une optimisation de nombre d'observateur en utilisant un seul bloc d'observateurs au lieu de deux blocs. Dans un système mécatronique hybride où le nombre de variables est très élevé, cette idée était une bonne piste pour gagner en efficience et en rapidité de détection des défauts.

Notre recherche ne s'est pas limitée qu'au diagnostic des défauts mais s'est étendue aussi à l'anticipation des erreurs de capteur. Nous avons fait appel aux cartes de contrôles qui ont exploité les résidus des observateurs, comme entrés d'analyse, pour alerter de la dégradation avant l'apparition de défaut.

Les résultats obtenus dans cette thèse peuvent être utilisés pour améliorer la conception et la maintenance des systèmes mécatroniques hybrides, et pour contribuer au développement de nouveaux systèmes plus performants et plus efficaces dans l'avenir.

Dans nos efforts pour améliorer constamment, nous avons engagé des travaux de recherche continus. Nous sommes déterminés à explorer de nouvelles avenues pour améliorer nos démarches. Dans nos prochains travaux de recherche, nous avons l'intention de prendre en compte un certain nombre de perspectives importantes, à savoir :

- L'orientation vers l'intelligence artificielle en visant le pronostic basé sur l'apprentissage
- La généralisation de la méthode en prenant en compte les défauts actionneurs
- L'intégration de la logique floue dans le processus de détection de défaut

Bibliographie

[1] M. M. Chaabane, « Geometrical and mechanical modeling for mechatronic systems », phdthesis, Ecole Centrale Paris ; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2014. Consulté le: 5 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-01087264

[2] N. Kyura et H. Oho, « Mechatronics-an industrial perspective », *IEEEASME Trans. Mechatron.*, vol. 1, nº 1, p. 10‑15, mars 1996, doi: 10.1109/3516.491405.

[3] N. Kyura, « The development of a controller for mechatronics equipment », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, nº 1, p. 30‑37, févr. 1996, doi: 10.1109/41.481405.

[4] J. Gausemeier et S. Moehringer, « New guideline Vdi 2206-a flexible procedure model for the design of mechatronic systems », in *DS 31: Proceedings of ICED 03, the 14th International Conference on Engineering Design, Stockholm*, 2003.

[5] M. Tomizuka, « Mechatronics: from the 20th to 21st century », *Control Eng. Pract.*, vol. 10, nº 8, p. 877‑886, août 2002, doi: 10.1016/S0967-0661(02)00016-3.

[6] K. Craig, « Mechatronic system design », in *Proceedings of the Motor, Drive & Automation Systems Conference*, 2009.

[7] « NF E01-010 (11/2008) », *Normadoc*. https://www.normadoc.com/french/nf-e01-010-11-2008.html (consulté le 5 février 2023).

[8] M. Vidyasagar, *Nonlinear Systems Analysis*. in Classics in Applied Mathematics. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002. doi: 10.1137/1.9780898719185.

[9] S. Wiggins, *Introduction to applied nonlinear dynamical systems and chaos*, vol. 2. Springer Science & Business Media, 2003.

[10] O. Bournez, « Complexite algorithmique des systemes dynamiques continus et hybrides », These de doctorat, Lyon, École normale supérieure (sciences), 1999. Consulté le: 5 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://www.theses.fr/1999ENSL0109

[11] Philips, P.P.H.H., van den Bosch, Paul P.P.J., et Mechanical Engineering, « Modelling, control and fault detection of discretely-observed systems », Technische Universiteit Eindhoven, 2001. doi: 10.6100/ir543245.

[12] C. G. Cassandras et S. Lafortune, *Introduction to discrete event systems*. Springer Science & Business Media, 2009.

[13] B. Caillaud, P. Darondeau, L. Lavagno, et X. Xie, *Synthesis and control of discrete event systems*. Springer Science & Business Media, 2013.

[14] A. Philippot, « Contribution au diagnostic décentralisé des systèmes à événements discrets: Application aux systèmes manufacturiers », PhD Thesis, Reims, 2006.

[15] A. S. Matveev et A. V. Savkin, *Qualitative theory of hybrid dynamical systems*. Springer Science & Business Media, 2012.

[16] A. J. Van Der Schaft et J. M. Schumacher, *An introduction to hybrid dynamical systems*, vol. 251. Springer London, 2000.

[17] R. Goebel, R. G. Sanfelice, et A. R. Teel, « Hybrid dynamical systems », *IEEE Control Syst. Mag.*, vol. 29, nº 2, p. 28‑93, 2009.

[18] T. E. Mezyani, « Méthodologie de surveillance des systèmes dynamiques hybrides », PhD Thesis, Lille 1, 2005.

[19] R. HAKIKI, « Etude et Analyse des Systèmes Dynamiques Hybrides: Approche par les Réseaux de Petri Hybrides et Automates Hybrides Linéaires », PhD Thesis, Université d'Oran1-Ahmed Ben Bella, 2010.

[20] M. S. Branicky, « Stability of switched and hybrid systems », in *Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control*, IEEE, 1994, p. 3498‑3503.

[21] A. Abboudi et F. Belmajdoub, « Hybrid Diagnosis Method Applied to Switched Mechatronic Systems », *J. Eur. Systèmes Autom.*, vol. 54, nº 5, p. 683‑691, oct. 2021, doi: 10.18280/jesa.540503.
[22] A. Abboudi et F. Belmajdoub, « Dynamic Thresholds for a Reliable Diagnosis of Switched Systems », *J. Eur. Systèmes Autom.*, vol. 54, nº 6, p. 827‑833, déc. 2021, doi: 10.18280/jesa.540604.
[23] P. J. Mosterman et G. Biswas, « A theory of discontinuities in physical system models », *J. Frankl. Inst.*, vol. 335, nº 3, p. 401‑439, 1998.
[24] B. Omaima, « Développement d'une méthode de diagnostic des systèmes industriels hybrides », 2020.
[25] M. Hammadi, « Contribution to the integration of multiphysics modelling and simulation for the design of mechatronic systems », phdthesis, Ecole Centrale Paris ; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2012. Consulté le: 9 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: https://theses.hal.science/tel-00711469
[26] S. Friedenthal, A. Moore, et R. Steiner, *A practical guide to SysML: the systems modeling language*. Morgan Kaufmann, 2014.
[27] E. Andrade, P. Maciel, B. Nogueira, C. Araújo, et G. Callou, « A cots-based approach for estimating performance and energy consumption of embedded real-time systems », *Inf. Process. Lett.*, vol. 110, nº 14‑15, p. 525‑534, 2010.
[28] M. Tiller, *Introduction to physical modeling with Modelica*, vol. 615. Springer Science & Business Media, 2012.
[29] S. E. Mattsson, H. Elmqvist, et M. Otter, « Physical system modeling with Modelica », *Control Eng. Pract.*, vol. 6, nº 4, p. 501‑510, 1998.
[30] H. Moore et S. Sanadhya, *MATLAB for Engineers*. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 2007.
[31] D. K. Chaturvedi, *Modeling and simulation of systems using MATLAB and Simulink*. CRC press, 2017.
[32] H. Klee et R. Allen, *Simulation of dynamic systems with MATLAB® and Simulink®*. Crc Press, 2018.
[33] C. Multiphysics, « Introduction to comsol multiphysics® », *COMSOL Multiphysics Burlingt. MA Accessed Feb*, vol. 9, nº 2018, p. 32, 1998.
[34] C. Multiphysics, « Comsol multiphysics », *Ref. Man. Version*, vol. 5, 2014.
[35] H. M. Paynter, « An epistemic prehistory of bond graphs », *Bond Graphs Eng.*, p. 3‑17, 1992.
[36] R. C. Rosenberg et D. C. Karnopp, « A Definition of the Bond Graph Language », *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 94, nº 3, p. 179‑182, sept. 1972, doi: 10.1115/1.3426586.
[37] A. K. Samantaray et B. O. Bouamama, *Model-based Process Supervision: A Bond Graph Approach*. in Advances in Industrial Control. London: Springer-Verlag, 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-159-6.
[38] M. Said, R. Fazai, K. Ben Abdellafou, et O. Taouali, « Decentralized fault detection and isolation using bond graph and PCA methods », *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 99, nº 1, p. 517‑529, oct. 2018, doi: 10.1007/s00170-018-2526-4.
[39] J. U. Thoma, *Introduction to bond graphs and their applications*. Elsevier, 2016.
[40] P. Antsaklis, X. Koutsoukos, et J. Zaytoon, « On hybrid control of complex systems: A survey », *J. Eur. Systèmes Autom.*, vol. 32, nº 9‑10, p. 1023‑1045, 1998.
[41] P. J. Antsaklis et X. D. Koutsoukos, « Hybrid systems: Review and recent progress », *Softw.-Enabled Control Inf. Technol. Dyn. Syst.*, p. 273‑298, 2003.

[42] V. Cocquempot, T. El Mezyani, et M. Staroswiecki, « Fault detection and isolation for hybrid systems using structured parity residuals », in *2004 5th Asian Control Conference (IEEE Cat. No. 04EX904)*, IEEE, 2004, p. 1204‑1212.
[43] J. A. Bergstra et C. A. Middelburg, « Continuity controlled hybrid automata », *J. Log. Algebr. Program.*, vol. 68, nº 1‑2, p. 5‑53, 2006.
[44] J. Zaytoon, « Systèmes dynamiques hybrides, Traité IC2 série systèmes automatisés », *Hermès*, 2002.
[45] A. Puri^1, V. Borkar, et P. Varaiya^1, « e-Approximation of differential inclusions », *Hybrid Syst. III Verification Control*, vol. 3, p. 362, 1996.
[46] A. Bemporad et M. Morari, « Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints », *Automatica*, vol. 35, nº 3, p. 407‑427, 1999.
[47] L. Ghomri, « Modelisation-structurelle-utilisant-les-automates-hybrides-les-reseaux-de-petri-hybrides-en-vue-de-la-synthese-de-controleur-des-systemes-dynamiques-hybrides », Thesis, 2014. Consulté le: 10 février 2023. [En ligne]. Disponible sur: http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/4845
[48] R. Alur *et al.*, « The algorithmic analysis of hybrid systems Theoretical computer science ». Elsevier, 1995.
[49] O. F. Ezzahra et N. Zanzouri, « Hybrid Dynamical System Monitoring based on Bond Graph », 2016.
[50] R. Zemouri, « Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques: Application à la e-maintenance », PhD Thesis, Université de Franche-Comté, 2003.
[51] H. Derbel, « Diagnostic à base de modèles des systèmes temporisés et d'une sous-classe de systèmes dynamiques hybrides », PhD Thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2009.
[52] A. Villemeur, « Sureté de fonctionnement des systèmes industriels: fiabilité-facteurs humains, informatisation », 1988.
[53] A. K. A. Toguyeni, « Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière », PhD Thesis, Lille 1, 1992.
[54] D. Lefebvre, « Contribution à la modélisation des systèmes dynamiques à événements discrets pour la commande et la surveillance », *Habilit. Dir. Rech. Univ.*, 2000.
[55] I. Samy et D.-W. Gu, « Fault Detection and Isolation (FDI) », in *Fault Detection and Flight Data Measurement: Demonstrated on Unmanned Air Vehicles Using Neural Networks*, I. Samy et D.-W. Gu, Éd., in Lecture Notes in Control and Information Sciences. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, p. 5‑17. doi: 10.1007/978-3-642-24052-2_2.
[56] J. Bokor et Z. Szabó, « Fault detection and isolation in nonlinear systems », *Annu. Rev. Control*, vol. 33, nº 2, p. 113‑123, 2009.
[57] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, et S. N. Kavuri, « A review of process fault detection and diagnosis: Part I: Quantitative model-based methods », *Comput. Chem. Eng.*, vol. 27, nº 3, p. 293‑311, 2003.
[58] J. Montmain, « Interprétation qualitative de simulations pour le diagnostic en ligne de procédés continus », PhD Thesis, Grenoble INPG, 1992.
[59] A. S. Willsky, « A survey of design methods for failure detection in dynamic systems », *Automatica*, vol. 12, nº 6, p. 601‑611, 1976.
[60] C. Combastel, S. Lesecq, S. Petropol, et S. Gentil, « Model-based and wavelet approaches to induction motor on-line fault detection », *Control Eng. Pract.*, vol. 10, nº 5, p. 493‑509, 2002.
[61] S. Touaf, « Diagnostic logique des systémes complexes et dynamiques dans un contexte multi-agent », PhD Thesis, Université Joseph-Fourier-Grenoble I, 2005.

[62] S. Khomfoi et L. M. Tolbert, « Fault diagnostic system for a multilevel inverter using a neural network », *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, nº 3, p. 1062‑1069, 2007.
[63] H. N. Koivo, « Artificial neural networks in fault diagnosis and control », *Control Eng. Pract.*, vol. 2, nº 1, p. 89‑101, 1994.
[64] O. Ondel, « Diagnostic par reconnaissance des formes: Application à un ensemble convertisseur-machine asynchrone », PhD Thesis, Ecole centrale de Lyon, 2006.
[65] B. Dubuisson, « Diagnostic et reconnaissance des formes, Traité des nouvelles Technonlogies, série Diagnostic et Maintenance », *Hermes*, 1990.
[66] G. Zwingelstein, *Diagnostic des défaillances: théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Hermès, 1995.
[67] M. Blanc, M. Freyssenet, et E. Charron, *Le développement des systèmes experts en entreprise*. GIP Mutations industrielles, 1989.
[68] R. Isermann, « Estimation of physical parameters for dynamic processes with application to an industrial robot », in *[1991 Proceedings] 6th Mediterranean Electrotechnical Conference*, mai 1991, p. 12‑17 vol.1. doi: 10.1109/MELCON.1991.161769.
[69] R. J. Patton et J. Chen, « A review of parity space approaches to fault diagnosis », *IFAC Proc. Vol.*, vol. 24, nº 6, p. 65‑81, 1991.
[70] J.-F. Magni et P. Mouyon, « On residual generation by observer and parity space approaches », *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 39, nº 2, p. 441‑447, févr. 1994, doi: 10.1109/9.272354.
[71] A. Balluchi, L. Benvenuti, M. D. Di Benedetto, et A. L. Sangiovanni-Vincentelli, « Design of Observers for Hybrid Systems », in *Hybrid Systems: Computation and Control*, C. J. Tomlin et M. R. Greenstreet, Éd., in Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002, p. 76‑89. doi: 10.1007/3-540-45873-5_9.
[72] P. M. Frank, « Advanced Fault Detection and Isolation Schemes Using Nonlinear and Robust Observers », *IFAC Proc. Vol.*, vol. 20, nº 5, Part 3, p. 63‑68, juill. 1987, doi: 10.1016/S1474-6670(17)55353-7.
[73] T. Zhan, S. Ma, X. Liu, et H. Chen, « Impulsive observer design for a class of switched nonlinear systems with unknown inputs », *J. Frankl. Inst.*, vol. 356, nº 12, p. 6757‑6777, août 2019, doi: 10.1016/j.jfranklin.2019.05.039.
[74] C. Edwards, S. K. Spurgeon, et R. J. Patton, « Sliding mode observers for fault detection and isolation », *Automatica*, vol. 36, nº 4, p. 541‑553, 2000.
[75] M. Zeitz, « The extended Luenberger observer for nonlinear systems », *Syst. Control Lett.*, vol. 9, nº 2, p. 149‑156, 1987.
[76] A. Alessandri et P. Coletta, « Design of Luenberger observers for a class of hybrid linear systems », in *Hybrid Systems: Computation and Control: 4th International Workshop, HSCC 2001 Rome, Italy, March 28–30, 2001 Proceedings 4*, Springer, 2001, p. 7‑18.
[77] J. Birk et M. Zeitz, « Extended Luenberger observer for non-linear multivariable systems », *Int. J. Control*, vol. 47, nº 6, p. 1823‑1836, 1988.
[78] A. Abboudi et F. Belmajdoub, « A new diagnosis approach of hybrid systems through Observers and hybrid automata », *Int. J. Autom. Smart Technol.*, vol. 10, nº 1, p. 135‑143, 2020.
[79] W. Borutzky, Éd., « Analysis of Causal Bond Graph Models », in *Bond Graph Methodology: Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models*, London: Springer, 2010, p. 223‑303. doi: 10.1007/978-1-84882-882-7_6.

[80] S. Behzadipour et A. Khajepour, « Causality in vector bond graphs and its application to modeling of multi-body dynamic systems », *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 14, nº 3, p. 279‑295, avr. 2006, doi: 10.1016/j.simpat.2005.06.001.

[81] T. Wong et G. Cormier, « Bond Graph Causality Assignment and Evolutionary Multi-Objective Optimization », in *Advances and Innovations in Systems, Computing Sciences and Software Engineering*, K. Elleithy, Éd., Dordrecht: Springer Netherlands, 2007, p. 433‑438. doi: 10.1007/978-1-4020-6264-3_75.

[82] S. W. Roberts, « A comparison of some control chart procedures », *Technometrics*, vol. 8, nº 3, p. 411‑430, 1966.

[83] L. S. Nelson, « The Shewhart control chart—tests for special causes », *J. Qual. Technol.*, vol. 16, nº 4, p. 237‑239, 1984.

[84] W. A. Jensen, L. A. Jones-Farmer, C. W. Champ, et W. H. Woodall, « Effects of parameter estimation on control chart properties: a literature review », *J. Qual. Technol.*, vol. 38, nº 4, p. 349‑364, 2006.

[85] T. Cembrzynski, « Les cartes de contrôle aux attributs utilisées dans l'industrie automobile sont-elles des outils performants pour la maîtrise statistique des processus? », *Rev. Stat. Appliquée*, vol. 40, nº 2, p. 55‑65, 1992.

[86] R. Palm, « Cartes de contrôle: les cartes de Shewhart. », *Notes Stat. Inform.*, nº 2, 1996.

[87] G. Chen et S. W. Cheng, « Max chart: combining X-bar chart and S chart », *Stat. Sin.*, p. 263‑271, 1998.

[88] A. E. Smith, « X-bar and R control chart interpretation using neural computing », *Int. J. Prod. Res.*, vol. 32, nº 2, p. 309‑320, 1994.

Résumé de la thèse

La technologie est en plein évolution et les systèmes qui lui sont associés sont de plus en plus sophistiqués. La plupart des systèmes actuels sont des systèmes dynamiques qui combinent des aspects continus et discrets, et qui réagissent dans des différentes disciplines, telles que la mécanique, l'électrique et l'hydraulique. Une complexité qui nécessite une couche de diagnostic puissante capable de détecter les erreurs dans tout type de dynamiques et dans tous les domaines.

L'objectif de ce travail est l'élaboration d'une nouvelle méthode de diagnostic des systèmes mécatroniques hybrides apte à détecter et isoler les défauts capteurs, et en même temps capable d'identifier et d'anticiper les dégradations du système avant qu'elles se manifestent en défauts.

Nous avons utilisé le Bond Graph hybride comme outil de modélisation grâce à son langage unifié et sa capacité à détecter les erreurs du modèle. Dans le cadre de notre approche de diagnostic, nous avons également utilisé les observateurs comme capteurs analytiques, leur but était d'estimer l'état du système et remplacer les capteurs physiques.

Par ailleurs, nous avons intégré les cartes de contrôles dans le processus d'anticipation des défauts. Dès qu'une petite dégradation de performance est détectée, le capteur concerné est identifié avant que l'erreur ne se présente réellement. Les cartes de contrôles utilisent les résidus issus des observateurs pour détecter les fluctuations anormales et avertir de la dégradation du capteur.

La méthode proposée se base sur un algorithme intelligent qui rassemble les données des différents outils, les analyse et les exploite pour prendre la bonne décision. Une décision qui aidera à son tour dans le développement de la fiabilité, la sécurité et la maintenabilité des systèmes.

Mots clés : Systèmes mécatroniques hybrides ; Diagnostic ; Bond Graph ; Observateurs ; Cartes de contrôle.

Abstract

The technology is in full evolution and the systems associated with it are more and more sophisticated. Most of today's systems are dynamic systems that combine continuous and discrete aspects, and react in different disciplines, such as mechanical, electrical, and hydraulic. A complexity that requires a robust diagnostic layer able to detect errors in any type of dynamic and any type of domain.

The aim of this work is the development of a new diagnosis method for hybrid mechatronic systems able to detect and isolate sensor faults and at the same time in a position to identify and anticipate system degradations before the occurrence of faults.

We have used hybrid Bond Graph as a modeling tool thanks to its unified language and its capability to detect model errors. Observers have also been used as analytical sensors; their purpose has been the estimation of the system state and the replacement of physical sensors.

Furthermore, we have integrated control charts into the fault anticipation process. Once a small performance degradation is detected, the affected sensor is identified before the occurrence of the fault. The control charts use the residuals from observers to detect abnormal fluctuations and warn of sensor degradation.

The proposed method is based on an intelligent algorithm that gathers the data from the different tools, analyzes it and uses it to make the right decision. A decision that will in turn help in the development of reliability, safety, and maintainability of systems.

Keywords: Hybrid mechatronic systems; Diagnosis; Bond Graph; Observers; Control charts.