

# **THESE**

présentée devant

**L'UNIVERSITE DE SAVOIE**

pour obtenir

**LE GRADE DE DOCTEUR**

Spécialité : Electronique, Electrotechnique et Automatique

par

**Lamir SAÏDI**

---

**COMMANDE A MODELE INTERNE : INVERSION  
ET EQUIVALENCE STRUCTURELLE**

---

Soutenue le 18 Septembre 1996 devant la Commission d'Examen

MM.      A. Oustaloup (Président)  
            L. Dugard (Rapporteur)  
            J.C. Trigeassou (Rapporteur)  
            J. Dufour  
            J. Lottin  
            Y. Touré

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Commande à Modèle Interne</b> .....	<b>5</b>
I.1. Structure de base .....	5
I.1.1. Stabilité .....	6
I.1.2. Erreur statique .....	6
I.2. Analogies.....	7
I.2.1. Analogie avec la boucle fermée classique .....	7
I.2.2. Prédicteur de Smith.....	8
I.3. Synthèse du correcteur .....	9
I.4. Filtre de robustesse .....	11
I.4.1. Propriétés .....	14
I.4.2. Performances nominales .....	15
I.4.3. Robustesse en stabilité .....	15
I.4.4. Performances robustes .....	16
I.5. CMI à paramètres variables .....	17
I.6. CMI dans le cas non linéaire .....	19
I.7. Exemple .....	22
I.8. Conclusion .....	28
<b>Chapitre II : Inversion de modèles</b> .....	<b>29</b>
II.1. Synthèse du correcteur de la CMI.....	29
II.1.1. Inversion de modèle en continu, Critère asymptotique .....	30
II.1.2. Inversion de modèle en discret, Prédicteur .....	33
II.1.2.1. Réalisabilité physique .....	34
II.1.2.2. Stabilité du correcteur .....	35
II.1.2.3. Modèle multivariable .....	36
II.2. Inversion de modèles en temps différé pour le suivi de trajectoires .....	38
II.2.1. Introduction.....	38
II.2.2. Cas monovisible.....	39
II.2.2.1. Transfert continu.....	39
II.2.2.2. Cas d'un transfert échantillonné.....	40
II.2.3. Exemples.....	43

II.2.3.1. Commande idéale en continu .....	43
II.2.3.2. Commande échantillonnée .....	45
II.2.3.3. Trajectoire continue non admissible.....	46
II.2.4. Cas multivariable .....	47
II.2.4.1. Transfert continu .....	47
II.2.4.2. Transfert échantillonné .....	48
II.2.5. Exemple .....	49
II.2.5.1. Commandes idéales continues .....	50
II.2.5.2. Commandes échantillonnées .....	51
II.3. Conclusion .....	53
<b>Chapitre III : Equivalence CMI et Retour d'Etat plus Observateur.....</b>	<b>55</b>
III.1. Introduction .....	55
III.2. Commande par retour d'état plus observateur .....	56
III.3. Passage d'une structure REO à une structure CMI .....	58
III.3.1. Correcteur de la CMI .....	60
III.3.2. Filtre de la CMI.....	61
III.3.3. Analyse de l'équivalence .....	62
III.4. Passage d'une structure CMI à une structure REO .....	63
III.4.1. Retour de Sortie plus Observateur réduit étendu (RSO) .....	66
III.4.2. Equivalence de la CMI et de la structure RSO .....	68
III.4.3. Analyse de l'équivalence .....	70
III.4.4. Exemple .....	72
III.5. Conclusion .....	73
<b>Chapitre IV : Rejet de perturbation .....</b>	<b>75</b>
IV.1. Introduction .....	75
IV.2. Perturbation stationnaire .....	76
IV.2.1. Détermination de l'observateur étendu .....	76
IV.2.2. Equivalence avec la CMI .....	78
IV.2.2.1. Etude du filtre de la CMI .....	80
IV.2.2.2. Exemple .....	83
IV.3. Perturbation variable .....	84
IV.3.1. Modèle de perturbation sinusoïdale .....	84
IV.3.2. Observateur étendu pour perturbation sinusoïdale .....	85
IV.3.3. Détermination de l'observateur étendu .....	86
IV.3.4. Equivalence avec la CMI .....	89
IV.3.4.1. Rejet de perturbation sinusoïdale dans une CMI .....	90

IV.3.4.2. Exemple .....	93
IV.3.5. Perturbation sinusoïdale amortie .....	94
IV.3.6. Construction de l'observateur étendu .....	94
IV.3.7. Equivalence avec la CMI .....	95
IV.4. Calibrage de la fonction de sensibilité .....	96
IV.4.1. Introduction .....	96
IV.4.2. Propriétés de la fonction de sensibilité .....	99
IV.4.3. Procédure de Calibrage de la fonction de sensibilité .....	99
IV.4.3.1. Exemple .....	100
IV.4.3.2. Observateurs en cascade .....	102
IV.4.3.3. Exemple .....	104
IV.4.4. Conclusion .....	106
<b>Conclusion .....</b>	<b>107</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>109</b>
<b>Annexes .....</b>	<b>115</b>
A1 : Identification de paramètres physiques dans les paliers magnétiques.....	115
A2 : Calcul de l'expression du filtre de la CMI à une pulsation donnée .....	125
A3 : Propriétés de la fonction de sensibilité.....	129

## Résumé :

Les travaux présentés dans cette thèse concernent l'analyse des propriétés d'une structure de commande particulière appelée Commande à Modèle Interne (CMI) et des transformations conduisant à d'autres schémas plus classiques (tels que le retour d'état par exemple) assurant une équivalence de comportement au sens transfert entre consigne et sortie ou perturbation et sortie. On s'attache à donner une interprétation aux différents blocs intervenant dans chaque schéma de commande.

Un premier chapitre rappelle le principe d'une telle structure CMI, décrit ses principales propriétés et présente quelques-uns de ses avantages permettant par exemple la prise en compte de certaines non-linéarités dures du procédé.

Le second chapitre est consacré au problème de l'inversion pour obtenir un transfert idéal entre consigne et sortie. Tout d'abord, le problème de synthèse d'un correcteur assurant l'annulation de l'erreur asymptotique pour des classes particulières de consigne (ou de perturbation) est traité en temps continu et en temps discret. Ensuite, cette inversion est abordée au sens de la génération de séquences de commande permettant d'obtenir des trajectoires de sorties prédéfinies, sous réserve que ces dernières soient admissibles. Une attention particulière est apportée aux systèmes à déphasage non minimal.

Le troisième chapitre concerne les transformations permettant le passage d'une structure CMI à une structure retour d'état plus observateur (REO), dans le cas des modèles linéaires. Dans le sens REO vers CMI, les conditions pour lesquelles la transformation est exploitable sont précisées et les complexités relatives des deux schémas de commande sont analysées. Dans le sens opposé, CMI vers REO, la transformation est plus délicate à établir puisqu'elle nécessite l'introduction d'un observateur particulier dont le rôle est difficilement interprétable à partir de la seule connaissance de la structure CMI.

Le quatrième chapitre a pour objet le rejet de perturbations. En utilisant les transformations établies dans le chapitre précédent, il est possible d'interpréter les augmentations de dimensions des correcteurs mis en place pour assurer un rejet total ou partiel de perturbations particulières (constantes ou sinusoïdales par exemple). Les liens avec le calibrage des fonctions de sensibilité introduites récemment dans les structures de commande robustes sont examinés.

**Mots-Clé :** Commande à Modèle Interne, Equivalence, Fonction de Sensibilité, Inversion