

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



D.E.R de Génie Electrique et Informatique  
Département d'Electronique

# THESE DE MAGISTER

*en*  
Electronique Appliquée  
*Option*  
Acquisition et traitement de l'information

*présentée par*

BENSAID Houcine  
Ingénieur d'Etat en Electronique

*Thème*

***Synthèse des Filtres Numériques  
R.I.I. par la Méthode des  
Moindres Carrés Vrais (MCV).***

*Soutenue publiquement le : 22 juin 1999*

*Devant le jury composé de :*

M. D. BERKANI  
M. A. BELOUHRANI  
M. M. TADJINE  
Mme. L. HAMAMI  
M. R. ZAKNOUNE

Professeur (ENP)  
Docteur d'état (ENP)  
Docteur d'état (ENP)  
Chargé de Cours (ENP)  
Docteur d'état (EMP)

*Président*  
*Rapporteur*  
*Examineur*  
*Examineur*  
*Examineur*

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو تركيب مرشحات عددية ذات الإستجابة الدفعية الامتناهية باستعمال طريقة المربعات الصغرى الحقيقية. في هذا الإطار، قمنا بتحليل هذه الطريقة مرتكزين على الفكرة الأولية التي إقترحها "ستايغلتز" و "ماك برايد" لتشخيص الأنظمة الآلية. لقد قمنا أيضا بتطبيق هذه الطريقة لتركيب المرشحات العددية و تقليص رتبة النماذج. تظهر لنا فعالية هذه الطريقة من خلال النتائج المحصل عليها وكذلك مقارنتها بتلك التي تعطىها طريقة "بادي" و طريقة المربعات الصغرى المعدلة.

الكلمات المفتاحية : المرشحات العددية ذات الإستجابة الدفعية الامتناهية، تركيب المرشحات، طريقة المربعات الصغرى المعدلة، طريقة المربعات الصغرى الحقيقية.

## Résumé

L'objectif du présent travail est la synthèse de filtres numériques récurrents (filtres RII) par la méthode des moindres carrés vrais (MCV).

Dans ce cadre, nous avons développé la méthode (MCV), en nous basant sur une idée de Steiglitz et McBride proposée initialement pour l'identification des systèmes en automatique. Nous avons appliqué la méthode MCV pour la synthèse de filtres numériques RII et aussi pour la réduction de modèles.

L'efficacité de la méthode est observée à travers de nombreuses simulations et aussi par comparaison avec les méthodes de Padé et des moindres carrés modifiés (MCM).

Mots clés : Filtres numériques récurrents (filtres RII), Synthèse des filtres, Méthode des Moindres Carrés Modifiés (MCM), Méthode des Moindres Carrés Vrais (MCV).

## Abstract

The aim of this work is the study of the True Least Squares method (TLS) and its application to the synthesis of recursive digital filters (IIR).

In this context, we have developed the TLS method, based on an original idea proposed by Steiglitz et McBride for system identification in control.

We have applied the TLS method to the synthesis of recursive digital filters and model reduction.

The efficiency of the TLS method is clearly shown by the simulation results on several examples and comparisons with Padé and modified least squares (MLS) methods.

Key words : Recursive digital filters (IIR filters), Filter synthesis, Modified Least Squares (MLS) Method, True Least Squares (TLS) Method.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Introduction</i> . . . . .	1
1.2	<i>Introduction au filtrage numérique</i> . . . . .	2
1.3	<i>But et présentation du travail</i> . . . . .	2
1.4	<i>Organisation de la thèse</i> . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Le Filtrage Numérique</b>	<b>5</b>
2.1	<i>Introduction</i> . . . . .	5
2.2	<i>Représentation des filtres numériques</i> . . . . .	6
2.3	<i>Analyse des filtres numériques</i> . . . . .	6
2.3.1	<i>Analyse temporelle</i> . . . . .	7
2.3.2	<i>Analyse fréquentielle</i> . . . . .	8
2.4	<i>Stabilité des filtres numériques</i> . . . . .	11
2.5	<i>Classification des filtres numériques</i> . . . . .	12
2.5.1	<i>Les filtres RIF</i> . . . . .	13
2.5.2	<i>Les filtres R.I.I.</i> . . . . .	13
2.5.3	<i>Comparaison entre filtres RIF et RII</i> . . . . .	14
2.6	<i>Synthèse des filtres numériques</i> . . . . .	14
2.7	<i>Synthèse des filtres non-récurrents (R.I.F)</i> . . . . .	15

2.7.1	Méthode d'échantillonnage fréquentiel . . . . .	15
2.7.2	Méthode de fenêtrage . . . . .	15
2.8	Synthèse des filtres récurrents (R.I.I) . . . . .	17
2.8.1	Méthode d'invariance de la réponse impulsionnelle . . . . .	17
2.8.2	Méthode de la transformation bilinéaire . . . . .	17
2.8.3	Méthode d'optimisation . . . . .	18
<b>3</b>	<b>Synthèse par les Méthodes de Padé et MCM</b>	<b>19</b>
3.1	Introduction . . . . .	19
3.2	La méthode de Padé . . . . .	21
3.2.1	Principe . . . . .	21
3.2.2	Procédure de synthèse . . . . .	23
3.3	Méthode des Moindres Carrés Modifiés . . . . .	24
3.3.1	Principe . . . . .	24
3.3.2	Procédure de synthèse . . . . .	24
<b>4</b>	<b>La Méthode des Moindres Carrés Vrais (MCV)</b>	<b>31</b>
4.1	Introduction . . . . .	31
4.2	Développement théorique du cas général MCP . . . . .	31
4.2.1	Etude et résolution du problème . . . . .	31
4.2.2	Calcul des matrices $R_k$ . . . . .	39
4.3	Etude de la méthode des moindres carrés vrais (MCV) . . . . .	45
4.4	Synthèse des filtres numériques RII par la méthode des moindres carrés vrais (MCV) . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Exemples de Synthèse</b>	<b>51</b>
5.1	Introduction . . . . .	51

---

5.2	<i>Application à la synthèse des filtres</i> . . . . .	52
5.2.1	<i>Synthèse de filtres passe-bas</i> . . . . .	52
5.2.2	<i>Synthèse de filtres passe-haut</i> . . . . .	53
5.2.3	<i>Synthèse de filtres passe-bande</i> . . . . .	53
5.3	<i>Application à la réduction de modèles</i> . . . . .	54
5.4	<i>Commentaires</i> . . . . .	54
	<b>Conclusion Générale</b>	<b>77</b>
<b>A</b>	<b>Algorithme de Horner</b>	<b>83</b>
<b>B</b>	<b>Algorithme de Levinson-Durbin</b>	<b>84</b>
<b>C</b>	<b>Algorithme de Mullis-Roberts</b>	<b>85</b>
<b>D</b>	<b>Algorithme de Levinson à deux canaux (bicanal)</b>	<b>86</b>
<b>E</b>	<b>Algorithme de Sylvester</b>	<b>87</b>
<b>F</b>	<b>Algorithme de Jury</b>	<b>89</b>