

THÈSE de DOCTORAT de L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Spécialité :

MICROÉLECTRONIQUE ET MICROINFORMATIQUE

présentée

par **Dominique URBANI**

pour obtenir le titre de **DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PARIS 6**

Sujet de la thèse :

**Méthodes statistiques de sélection d'architectures neuronales :
application à la conception de modèles de processus dynamiques**

Soutenue le 16 Novembre 1995

devant le jury composé de :

Mme D. FOURNIER

Mlle S. MARCOS Rapporteur

Mme S. THIRIA Rapporteur

M. M. WEINFELD

M. L. PERSONNAZ

M. G. DREYFUS

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
Chapitre I	La modélisation de processus dynamiques.....	5
Chapitre II	Estimation des paramètres d'un modèle.....	15
Chapitre III	La sélection de modèles.....	25
Chapitre IV	Procédure de sélection de modèles NARX.....	43
Chapitre V	Application de la procédure de sélection.....	65
Conclusion	95
Références bibliographiques	97
Annexes	105

INTRODUCTION	1
Chapitre I	
LA MODÉLISATION DE PROCESSUS DYNAMIQUES	5
I.1. Processus et modèles	5
I.2. Modèle hypothèse et forme prédicteur	8
I.2.1. Modèle hypothèse	8
I.2.2. Forme prédicteur théorique et système d'apprentissage	10
I.2.3. Forme prédicteur associée à un modèle hypothèse	11
I.2.3.1. Le modèle hypothèse est déterministe	12
I.2.3.2. Le modèle hypothèse est NARMAX	12
I.2.3.3. Le modèle hypothèse est NBSX	13
I.3. Conception de modèles NARMAX	14
Chapitre II	
ESTIMATION DES PARAMÈTRES D'UN MODÈLE	15
II.1. Position du problème	15
II.1.1. L'estimateur des moindres-carrés ordinaires	16
II.1.2. Les méthodes fondées sur l'erreur de prédiction. (méthodes EP)	18
II.1.3. Les méthodes de corrélation	18
II.2. Estimation des paramètres d'un modèle	20
II.3. Algorithmes d'optimisation	21
II.3.1. Les méthodes linéaires de résolution	21
II.3.2. Modèles non linéaires : les méthodes de gradient	22
II.3.2.1. Principe	22
II.3.2.2. La méthode du gradient simple	23
II.3.2.3. La méthode de Newton	23
II.3.2.4. Les méthodes Quasi-Newtoniennes	24
II.3.2.5. Optimisation du pas	24
Chapitre III	
LA SÉLECTION DE MODÈLES	25
III.1. Introduction	25
III.2. L'estimateur du maximum de vraisemblance (EMV)	27
III.2.1. L'estimateur du maximum de vraisemblance	27
III.2.2. Propriétés de l'EMV dans le cas de processus linéaires	27
III.2.3. Formulation à l'aide de l'approche EP	28

III.3. Les tests d'hypothèses statistiques	32
III.3.1. Principe des tests d'hypothèses	32
III.3.2. Le test du rapport de vraisemblance (TRV)	33
III.3.3. Test du rapport de vraisemblance et estimateurs EP :	
le test LDRT	34
III.3.4. Le test de Fisher	34
III.3.5. Sélection d'un modèle dans un ensemble	35
III.4. Les méthodes de sélections multiples	36
III.4.1. Principe des méthodes d'Akaike	36
III.4.2. Le Critère d'Information d'Akaike (AIC)	37
III.4.2.1. Définition	37
III.4.2.2. Lien avec la sélection à l'aide de tests d'hypothèses ...	38
III.4.3. Critère Final d'Akaike fondée sur	
l'erreur de prédiction (FPE)	39
III.5. Les méthodes de sélections "partielles"	40
III.5.1. Les méthodes "destructives"	40
III.5.2. Les méthodes "constructives"	41
III.6. Extension des méthodes de sélection de modèles	42

Chapitre IV

PROCÉDURE DE SÉLECTION DE MODÈLES NARX	43
IV.1. Introduction	43
IV.2. Principe de la procédure de sélection de modèles NARX	43
IV.3. Première phase : sélection de modèles linéaires locaux	49
IV.3.1. Linéarisation d'un modèle NARX	49
IV.3.1.1. Linéarisation d'un modèle déterministe	49
IV.3.1.2. Linéarisation d'un modèle NARX	50
IV.3.2. Procédure de sélection des régresseurs d'un modèle	
linéaire par rapport à ses paramètres	51
IV.3.2.1. Principe de la procédure	51
IV.3.2.2. Classement des régresseurs à l'aide d'une méthode	
d'orthogonalisation	53
IV.3.2.3. Description de l'algorithme	55
IV.3.2.4. Calcul de l'erreur quadratique moyenne	57
IV.3.2.5. Sélection d'un modèle linéaire local	58
IV.3.3. Fin de la première phase : compilation des résultats	59
IV.4. Deuxième phase : sélection des régresseurs d'un modèle	
neuronal global du processus	60

IV.5. Troisième phase : sélection du nombre de neurones du modèle	61
IV.6. Limitations et extensions de la procédure	62
IV.6.1. Construction et caractérisation de comportements locaux du processus	62
IV.6.2. Sélection de modèles NARMAX	63
Chapitre V	
APPLICATION DE LA PROCÉDURE DE SÉLECTION	65
V.1. Processus de référence P_1	65
V.2. Première phase : sélection des entrées de modèles linéaires	67
V.2.1. Étude préliminaire : problème du surajustement	67
V.2.1.1. Premier exemple : processus ARX	68
V.2.1.2. Deuxième exemple : le processus NARX P_1	69
V.2.2. Choix de l'amplitude de la perturbation superposée à la commande	71
V.2.3. Résultats obtenus avec le processus NARX P_1	73
V.2.3.1. Comparaison des procédures MCU et MCM	73
V.2.3.2. Modification de la procédure de sélection	75
V.2.3.3. Résultats	75
V.2.4. Résultats obtenus avec d'autres processus	77
V.2.4.1. Présentation des processus	77
V.2.4.2. Résultats	78
V.3. Deuxième phase : sélection des entrées d'un modèle non linéaire global	80
V.3.1. Résultats obtenus avec le processus de référence P_1	80
V.3.1.1. Critère d'arrêt de l'apprentissage	81
V.3.1.2. Choix du modèle complet	82
V.3.1.3. Sélection des entrées du modèle	82
V.3.1.4. Modification de la procédure	84
V.3.2. Conclusion	86
V.4. Troisième phase : sélection du nombre de neurones du modèle	86
V.4.1. Résultats obtenus avec le processus de référence P_1	86
V.5. Conclusion	91
CONCLUSION	95

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 97

Annexe I “Adaptive Training of Feedback Neural Networks for
Non-Linear Adaptive Filtering” article

Annexe II “Training Recurrent Networks : Why and How?
An illustration in Process Modelling” article

Annexe III “The selection of Neural Models of Non-linear Dynamical
Systems by Statistical Tests” article