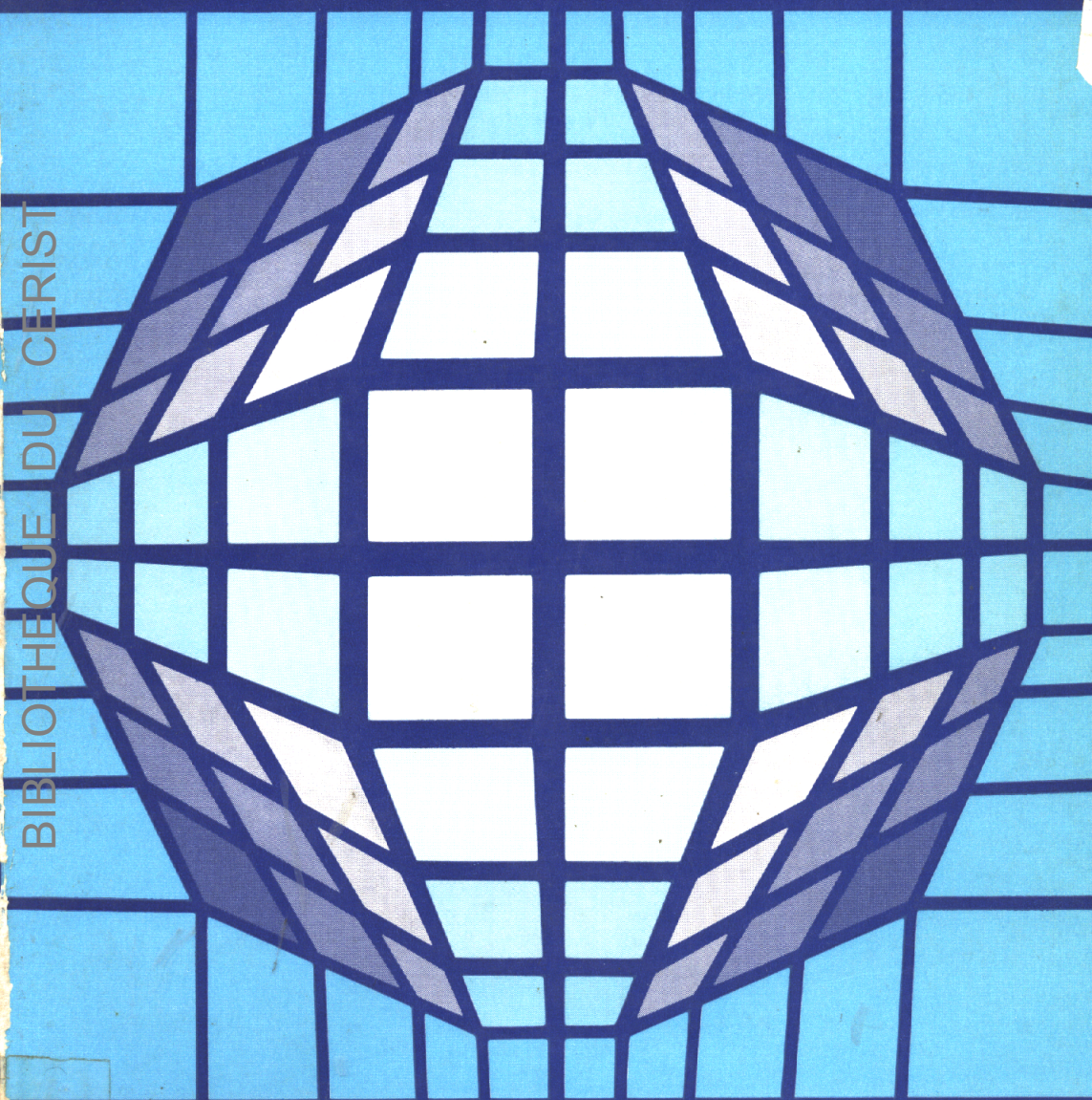


# LE FILTRAGE NUMERIQUE

BIBLIOTHEQUE DU CERIST



EYROLLES

Walid P. SALMAN  
Marc S. SOLOTAREFF

# **LE FILTRAGE NUMÉRIQUE**

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproduction strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). »

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. »

C  
1701

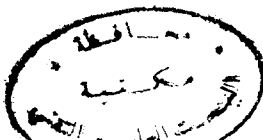
# LE FILTRAGE NUMÉRIQUE

par

Walid P. SALMAN et Marc S. SOLOTAREFF

  
EYROLLES

61, Boulevard Saint-Germain — 75005 Paris  
1982



BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Si vous désirez être tenu au courant de nos publications, il vous suffit d'adresser votre carte de visite au :

Service « Presse », Éditions EYROLLES  
61, Boulevard Saint-Germain,  
75240 PARIS CEDEX 05,

en précisant les domaines qui vous intéressent.  
Vous recevrez régulièrement un avis de parution des nouveautés en vente chez votre libraire habituel.



0318

# AVERTISSEMENT

*La science est un tout formé d'une théorie abstraite et d'expériences. Il est impossible de décrire un tout cohérent dans un exposé, ou même plusieurs exposés. Mais partant de n'importe quel point on doit pouvoir développer tout ou partie de la science.*

*Ce n'est qu'après plusieurs démarches linéaires et logiques que l'on saisit vraiment ce qu'est la science ; l'analogie qui nous a permis de l'établir.*

*L'automatique nous en donne un exemple : on peut, à partir d'un exposé sur les filtres, développer les concepts de la commande optimale ou de l'identification. L'étude des systèmes échantillonnés nous conduit aux mêmes conclusions et débouche sur l'étude des filtres.*

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

# INTRODUCTION

Le but de cet ouvrage est d'introduire le filtrage numérique tant au point de vue de sa conception que de son utilisation.

Dans le domaine scientifique, les techniques numériques prennent de plus en plus d'importance et supplantent les procédés analogiques ; Quelles en sont les raisons ?

*Les non-linéarités* : Étant donné qu'aucun système physique ne reste stable dans le temps on est amené à faire des modifications des organes de commande et la modification de coefficients est plus aisée et moins coûteuse que la modification des valeurs de composants analogiques (capacités, résistances, selfs...).

*La précision* : La précision toujours plus grande demandée aux systèmes nécessite l'introduction d'opérateurs non-linéaires qui sont très difficilement réalisables à l'aide de composants analogiques et surtout pour lesquels une précision de plus du millième est coûteuse et présente des problèmes technologiques de réalisation. (La multiplication par exemple).

Il s'agit donc à l'heure actuelle de faciliter la mise en œuvre d'outils numériques. Ces outils allant des microprocesseurs aux ordinateurs.

Dans le premier chapitre il a été nécessaire de préciser certains concepts relatifs aux techniques numériques (transformée de Fourier discrète, transformée en Z). Néanmoins nous ne développerons pas pour autant la théorie mathématique sous-jacente. La notion de fonction de transfert est présentée succinctement en raison de son utilisation fréquente.

Le deuxième chapitre précise les définitions relatives au filtrage continu et échantillonné et présente, en dégagant certaines idées fondamentales, le filtrage analogique dans le but de faciliter la liaison entre ces deux domaines.

Au chapitre trois nous abordons les deux étapes qui constituent la conception d'un filtre numérique. La première, qui est la plus importante, est le choix de la structure du filtre (agencement des opérations arithmétiques). Celle-ci relève de l'algorithmique. Ne traitant que des filtres invariants dans le temps, c'est-à-dire à coefficients constants, les techniques itératives et récursives seront développées pour la synthèse des filtres numériques.

La deuxième étape est le calcul des coefficients du filtre. Ce type de problème se résout en général par des méthodes d'optimisation. Une méthode est présentée par type de structure. Il est important de noter que ces méthodes sont indépendantes de la structure du filtre.

Afin de permettre au lecteur d'appliquer les techniques développées, quelques applications pratiques sont détaillées au chapitre quatre.

# TABLE DES MATIÈRES

Avertissement .....	V
Introduction .....	VII
1. - Notions de base .....	3
1.1. - <i>Signaux et systèmes discrets</i> .....	3
1.1.1. - Définition et représentation des signaux et systèmes discrets .....	4
1.1.2. - Propriétés .....	9
1.2. - <i>Transformée de Fourier pour l'étude des filtres</i> .....	10
1.2.1. - Généralités - Définitions .....	11
1.2.2. - Séries de Fourier .....	17
1.2.3. - Transformation de Fourier .....	20
1.2.4. - Transformée de Fourier discrète .....	21
1.2.5. - Propriétés .....	22
1.2.6. - Mise en œuvre d'une F.F.T. ....	24
1.2.7. - Discrétisation de signaux analogiques .....	28
1.3. - <i>Transformée en Z</i> .....	37
1.3.1. - Définition .....	37
1.3.2. - Fonction de transfert .....	40
2. - Généralités sur le filtrage .....	43
2.1. - <i>Définitions</i> .....	43
2.1.1. - Filtrage .....	43
2.1.2. - Lissage .....	44
2.1.3. - Prédiction .....	46
2.1.4. - Identification .....	47
2.1.5. - Optimisation .....	47
2.1.6. - Itératif .....	47
2.1.7. - Récursif .....	48
2.2. - <i>Les filtres classiques (Analogiques. Numériques)</i> .....	48
2.2.1. - 1° et 2° ordre .....	48
2.2.2. - Filtres polynomiaux .....	53
2.2.3. - Filtres elliptiques : Cauer .....	58
2.3. - <i>Différents classement des filtres</i> .....	58
2.3.1. - Tableau .....	59
2.3.2. - Les différents filtres analogiques .....	60
2.3.3. - Les différents types de transformation Analogique - Numérique .....	65

<b>3. - Synthèse des filtres numériques</b>	69
<b>3.1. - Structures itératives</b>	69
3.1.1. - Introduction	69
3.1.2. - Filtres analogiques et numériques	70
3.1.3. - Réponse fréquentielle	74
3.1.4. - Zéros & stabilité	79
3.1.5. - Approche par le gabarit fréquentiel	83
3.1.6. - Méthode optimale de Rémes	93
3.1.7. - Récapitulatif	99
<b>3.2. - Les filtres récursifs</b>	101
3.2.1. - Généralités	101
3.2.2. - Filtre à phase linéaire passe-bas	102
3.2.3. - Construction	104
3.2.4. - Méthode optimale de Fletcher - Powell [14]	110
<b>4. - Application et mise en œuvre</b>	115
<b>4.1. - Différents types d'erreur</b>	115
4.1.1. - Généralités	115
4.1.2. - Filtres itératifs	116
4.1.3. - Filtres récursifs	118
<b>4.2. - Programmation</b>	122
4.2.1. - A titre d'exemple sur calculatrice de poche	122
4.2.2. - Sur microprocesseur	129
4.2.3. - Sur ordinateur	132
Enveloppe fréquentielle	133
F.F.T.	135
Simulation de filtre récursif	137
Calcul de filtre itératif	146
<b>4.3. - Structures</b>	151
4.3.1. - Généralités	151
4.3.2. - Filtre récursif	151
4.3.3. - Filtre itératif	154
<b>Annexes</b>	157
<b>Annexe 1 - Rappels mathématiques</b>	157
<b>Annexe 2 - Approximation d'une fonction par un polynôme</b>	159
<b>Annexe 3 - Approximation d'une fonction au sens de Tchebychev</b>	163
<b>Table de transformée en Z [12] (James A. Cadzow, <i>Discrete-time systems : An Introduction with Interdisciplinary Applications</i>, © 1973, pp. 413-414, 415, 418, 419. Reprinted by permission of Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N.J.)</b>	165
<b>Séries</b>	168
<b>Bibliographie</b>	171
<b>Index alphabétique</b>	173