

DIXIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 20 au 24 MAI 1985

BANQUE DE LOGICIEL TRAITEMENT DU SIGNAL APPLIQUE AU FILTRAGE NUMERIQUE

DARMOUNI C. et LOFFLER E.

THOMSON INFORMATIQUE SERVICES 104 rue Castagnary 75015 PARIS

RESUME

Cette communication décrit un ensemble de logiciels complémentaires d'aide à la réalisation de filtres numériques.

ANAZ : permet d'analyser et de simuler toute machine numérique comportant uniquement des additionneurs, des retards et des multiplicateurs.

CASCADE-TREILLIS : il permet d'obtenir la fonction de transfert d'un filtre numérique respectant un gabarit général en amplitude et/ou en temps de propagation de groupe. Il est particulièrement puissant car il combine, de façon interactive dans un même logiciel les techniques de modification manuelle et de comparaison de plusieurs fonctions de transfert. La synthèse se fait sous forme cascade, directe et numérique treillis pour des structures de type GRAY-MARKEL et MITRA.

ECHELLE : le logiciel permet de générer des filtres en échelle analogique de type Butterworth-Chebyshev, Papoulis Cauer et généraux. A partir de ces filtres analogiques, le logiciel génère les filtres numériques en échelle correspondant à l'aide des algorithmes de L.T. BRUTON.

SIIR : le logiciel effectue la synthèse optimisée d'un filtre numérique récursif sous forme cascade à l'aide de fonctions modèles analogiques puis une optimisation de la taille des registres contenant les coefficients et une minimisation du bruit de calcul total.

SFIR : le logiciel permet d'obtenir des filtres numériques non récursifs à phase linéaire. Le programme utilise l'algorithme d'échange de Remez dont la solution tend vers les réponses en fréquence idéale désirée selon l'approximation de Chebyshev.

OPTZ : c'est un logiciel de minimisation des effets de quantification des coefficients d'un filtre numérique récursif.

Les programmes forment un ensemble d'outils intégrés dans une structure commune destinée à faciliter la conception de filtres numériques.

SUMMARY

This communication describes some complementary algorithms for computer aided design of digital filters.

ANAZ : simulates any digital machine solely made up of adders, multipliers and delays.

CASCADE-TREILLIS : Synthesis of a cascade or lattice digital filter.

ECHELLE : Synthesis of low sensitivity digital ladder filters.

SIIR : program for the design of recursive digital filters. It minimizes the coefficient wordlength and minimizes the noise performance by scaling and pairing and ordering the poles and zeros for a number of different structures.

SFIR : The program gives the coefficients of a maximally flat pass and stop band symmetric FIR low pass digital filter.

OPTZ : Effects discrete optimization of the coefficients of digital filters implemented as direct, parallel or cascade structures.

These programs form the basis for an entire system for computer aided design of digital filters.

INTRODUCTION :

La THOMSON a mis au point, depuis plusieurs années un certain nombre de logiciels de traitement du signal orientés en analyse et synthèse de filtres numériques. Un certain nombre de ces logiciels ont été regroupés de façon à créer une structure de banque de logiciel de traitement du signal. Cette banque, de structure modulaire pourra ainsi évoluer en fonction des besoins des différents utilisateurs.

ORGANISATION DE LA BANQUE :

La banque comporte deux groupes de logiciels :

- des logiciels de synthèse et analyse de filtres analogiques
- des logiciels de synthèse et analyse de filtres numériques

Seule la partie numérique sera traitée dans cet article.

Chaque module comporte un certain nombre de commandes :

- des commandes de service :
 - . création d'un fichier de données, utilisation en mode console, aide à l'utilisation des logiciels
- des commandes d'analyse, de synthèse et d'implémentation de filtres.

LOGICIELS DE LA BANQUE NUMERIQUE :

Ils sont au nombre de 6 :

ANAZ : analyse et simulation de filtres numériques

CASCADE-TREILLIS : synthèse de filtres en cascade et en treillis

ECHELLE : synthèse de filtres en échelle

SIIR : synthèse optimisée d'un filtre récursif sous forme cascade

SFIR : synthèse de filtres numériques non récursifs

OPTZ : minimisation des effets de quantification des coefficients d'un filtre numérique récursif

LOGICIEL "ANA-Z"Présentation : (1)

Il s'agit de pouvoir analyser et simuler un circuit décrit élément par élément (additionneurs, multiplieurs, retards) en tenant compte des contraintes de la machine numérique qui effectuera l'opération de filtrage, à savoir nombre de digits pris en compte pour le calcul des opérations intermédiaires, type d'arithmétique utilisé, caractéristiques d'overflow.

Algorithmique :Partie simulation :

A chaque numéro de noeud rencontré dans la description du filtre, on associe un registre binaire (défini par LSB et MSB). Puis la simulation est effectuée, séquentiellement (élément par élément) dans un ordre fixé par l'utilisateur, comme dans le cas d'une machine numérique ne comportant qu'une unité arithmétique, avec la précision spécifiée en chacun des registres.

Analyse en fréquence :

Une analyse en fréquence est effectuée suivant la méthode décrite en (2) qui permet d'obtenir l'analyse fréquentielle entre deux noeuds quelconques du circuit sans effectuer plusieurs résolutions.

Analyse temporelle :

Elle peut être faite avec, pour signal d'entrée, la somme composite d'un maximum de dix signaux élémentaires : échelon, sinusoïde, bruit blanc et bruit gaussien.

Analyse du bruit dû à la quantification des registres de calcul. 2 types de critères sont utilisés : des critères statistiques (moyenne, écart-type, moyenne quadratique) et un critère fréquentiel de densité spectrale de puissance.

Partie interface :

Ce logiciel s'intègre dans la banque LTS et possède une compatibilité avec tous les autres logiciels de synthèse de la banque.

LOGICIEL CASCADE :Présentation :

La plupart des filtres que l'on réalise pourraient être de degré moindre si les gabarits réels spécifiés pouvaient être pris en compte dans le logiciel de calcul des coefficients. Les logiciels CASCADE et TREILLIS permettent d'obtenir la fonction de transfert d'un filtre numérique respectant un gabarit général en amplitude et/ou en temps de propagation de groupe.

Algorithmique :

Le point de départ de la synthèse générale se fait généralement de deux façons :

- par le calcul d'une approximation initiale du gabarit désiré à l'aide des fonctions classiques (Butterworth, Bessel, Papoulis, Chebychev, Chebychev inversé, Cauer) et de la transformation bilinéaire ou de la transformation adaptée.
- par la description par l'utilisateur d'une fonction de transfert en z.

Le gabarit réel en amplitude et/ou en phase et ensuite décrit soit par segments droits, soit par segments obliques.

Un logiciel d'optimisation utilisant les algorithmes du MIN MAX (3) permet de trouver rapidement une solution convergente (dans l'hypothèse où la solution existe).

Ainsi, pour un gabarit quelconque donné, on peut rapidement arriver à une série de solutions satisfaisantes. Le programme laisse l'utilisateur libre de choisir sa solution en fonction du meilleurs compromis de réalisation.

Une analyse, tenant compte de la quantification des coefficients est aisément réalisable avec le logiciel d'analyse et simulation ANAZ.

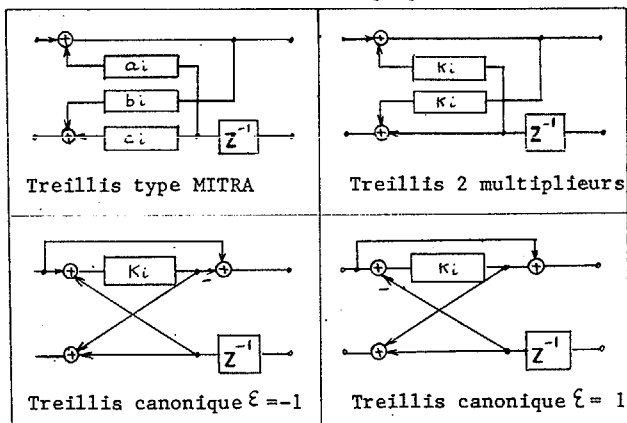
LOGICIEL "TREILLIS" :

Présentation :

La recherche de nouvelles structures plus "performantes" pour la réalisation de filtres numériques a fait l'objet de nombreuses études au cours de ces dernières années. De nombreux auteurs proposent des structures du type "Cascade" dont la cellule de base offre des caractéristiques plus intéressantes que la classique structure directe, coûteuse en nombre de bits. La cellule "Treillis" connue en analogique, intéresse une grande part de constructeurs en raison de sa faible sensibilité. C'est ce type de cellules qui fait l'objet de ce logiciel. Il offre aux concepteurs de filtres numériques un programme conversationnel, d'accès très simple, prenant en charge aussi bien la partie synthèse du filtre que sa réalisation sous forme d'une cascade de cellules "treillis".

Algorithmique (4)

Trois cellules treillis sont proposées :



Partie synthèse

Le programme calcule la fonction de transfert du filtre dans le plan p à partir des spécifications d'un gabarit quelconque, puis applique une des transformations proposées.

Partie réalisation sous forme "Treillis"

Les algorithmes de calculs proviennent des études de S.K. MITRA et de A.H. GRAY et J.D. MARKEL. Une étude en sensibilité des structures obtenues peut être effectuée de manière à déterminer le nombre minimal de bits nécessaires à la réalisation du filtre.

Partie interface

Ce logiciel s'insère dans la banque LTS et possède donc une compatibilité avec en particulier le logiciel de simulation numérique ANA-Z.

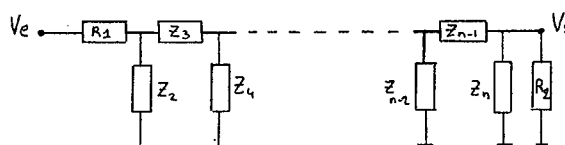
LOGICIEL ECHELLE

Présentation :

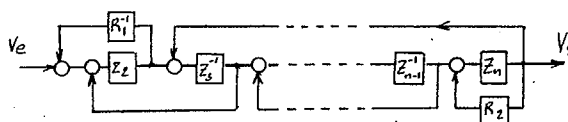
Dans le domaine analogique, la structure de filtres en échelle est bien connue pour la faible dérive de ces caractéristiques en fonction des fluctuations de la valeur des composants. L'idée a donc été d'obtenir, en numérique, des structures équivalentes, de manière à aboutir à un comportement similaire, par transposition. (5,6)

Algorithmique

A partir d'un filtre analogique en échelle

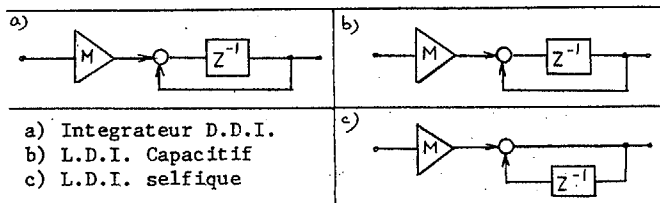


on détermine le graphe fonctionnel



où les Z_i sont les impédances d'éléments passifs simples (selfs, capa). Dans ce cas on peut garder la structure du filtre analogique en remplaçant ces impédances par des intégrateurs ou différentiateurs numériques. Dans ce logiciel, deux transformations sont proposées :

- la transformation D.D.I. (Direct Discrete Integrator)
 $p \rightarrow (Z - 1)/T$
- la transformation L.D.I. (Lowless Discrete Integrator)
 $1/p \rightarrow T.Z^{1/2}/(Z - 1)$



Ces transformations nécessitent toutefois un rapport fréquence d'échantillonnage à fréquence de coupure très élevée pour être acceptable. Cette condition satisfaite, la tenue du filtre est remarquable.

De même que pour les filtres en treillis, ce logiciel possède une interface, le rendant compatible avec le logiciel de simulation numérique ANA-Z.

LOGICIEL SIIR :Présentation :

C'est un logiciel de synthèse optimisé de filtres numériques récurrents. Contrairement aux autres logiciels présentés dans ce papier la partie algorithmique est de provenance de la bande IEEE (logiciel DOREDI) et a été industrialisée.

Algorithmique (7)

Ce logiciel effectue tout d'abord la synthèse d'un filtre numérique récurrent à l'aide des fonctions modèles analogiques (Chebychev, Cauer, Butterworth) et de la transformation bilinéaire. La structure de filtre obtenue est une structure cascade réalisée par une suite de cellules du premier et second ordres. Le programme effectue ensuite deux types d'optimisations :

1. Une optimisation de la taille des registres contenant les coefficients. On peut ainsi tenir compte du fait que dans une machine quelconque de traitement du signal, les coefficients du filtre sont codés avec un nombre de bits fini.
2. Une minimisation du bruit de calcul total en jouant sur trois paramètres :
 - . l'appariement des pôles et des zéros pour constituer une cellule
 - . l'ordre dans lequel sont rangées les cellules
 - . le facteur d'échelle affecté à chaque cellule.

Ce logiciel est complémentaire du logiciel CASCADE présenté. Il ne traite pas les gabarits quelconques mais a l'avantage d'une optimisation de la taille des registres et de la minimisation du bruit de calcul.

De même que tous les logiciels de synthèse, il possède une interface avec le logiciel de simulation ANA-Z.

LOGICIEL SFIRPrésentation :

C'est un logiciel de synthèse des coefficients d'un filtre à réponse impulsionnelle finie. Il est dérivé des algorithmes de PARKS, MAC CLELLAN et RABINER (8). Le programme utilise l'algorithme de REMEZ dont la solution tend vers la réponse en fréquence idéale désirée selon l'approximation de Chebychev. De même que le logiciel SIIR, il a été industrialisé à l'intérieur de la banque LTS.

LOGICIEL OPTZ :Présentation : (1)

Soit, par exemple, un filtre réalisé sous forme cascade ayant pour fonction de transfert

$$H(z) = A \prod_{i=1}^K \left(\frac{1 + a_i z^{-1} + b_i z^{-2}}{1 + c_i z^{-1} + d_i z^{-2}} \right)$$

Il s'agit donc de déterminer les coefficients a_i , b_i , c_i et d_i de chaque cellule élémentaire soumis aux contraintes suivantes

$$- a_i, c_i \in \mathbb{Z}^{Q-Q_M}, \quad b_i, d_i \in \mathbb{Z}^{Q-Q_M}$$

sont des nombres entiers dans lesquels 2^{Q_M} est la puissance de 2 immédiatement supérieure à la valeur théorique des coefficients et Q le nombre de bits du registre correspondant.

$$- G_m(F_j) \leq |H(\frac{z}{z^*})| \leq G_M(F_j) \quad j = 1 \dots N$$

dans laquelle G_m et G_M représentent les valeurs minimale et maximale d'amplitude à respecter

- le filtre obtenu doit être stable.

Algorithme :

L'idée de base a été d'utiliser une méthode d'optimisation à pas d'exploration fixe ou multiple d'un pas donné (correspondant ici à la variation du digit de poids le plus faible sur chacun des coefficients).

Cela permet d'utiliser dans le programme soit une méthode de pas à pas, soit la méthode de Hookes-Jeeves

Ces deux méthodes d'optimisation ont été adaptées au problème et modifiées selon les points suivants :

- exploration simultanée sur deux composantes
- exploration aléatoire
- réponse fréquentielle et gain en continu
- nouvelles valeurs initiales

EXEMPLE D'UTILISATION DE LA BANQUE DE LOGICIELS LTS

Il fut réalisé pour les Télécommunications, un filtre numérique dont les caractéristiques fréquentielles étaient les suivantes :

- Filtre passe-bande symétrique
- Bande passante : 7550-8050 Hz
- Réjection de 25 dB à 8250 Hz
- Ondulation dans la bande : 0,5 dB
- Fréquence d'échantillonnage : 20000

Une première commande nous a permis de calculer la fonction de transfert tout d'abord dans le plan 'p', puis de se transposer en numérique grâce à une des transformations proposées (ici la transformation bilinéaire). Le résultat, ayant pris une fonction d'approximation du type CAUER, est un filtre d'ordre 8 ; et une deuxième commande nous a permis de réaliser ce filtre sous une forme treillis à un multiplieur (cf. programme TREILLIS). La courbe théorique et une cellule Treillis sont présentées figure 1.

BANQUE DE LOGICIEL TRAITEMENT DU SIGNAL APPLIQUE AU FILTRAGE NUMERIQUE

De manière à vérifier le comportement du filtre après troncature des coefficients, une simulation du filtre fut faite immédiatement après la synthèse et sans aucune description de la cellule grâce aux programmes d'interface des logiciels.

Cette simulation nous a permis non seulement d'obtenir le comportement réel du filtre, codé sur 16 bits, dans le domaine fréquentiel, mais également de prévoir les éventuels problèmes de dépassement de capacité ou de cycles limites. L'analyse en gain en fréquence après arrondi des coefficients est donnée en figure 2 ainsi que le fichier de données ayant permis son obtention.

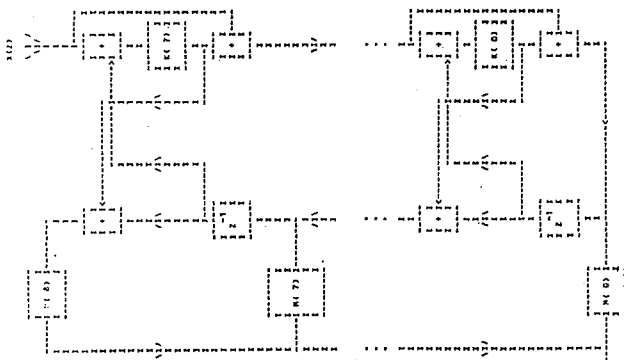
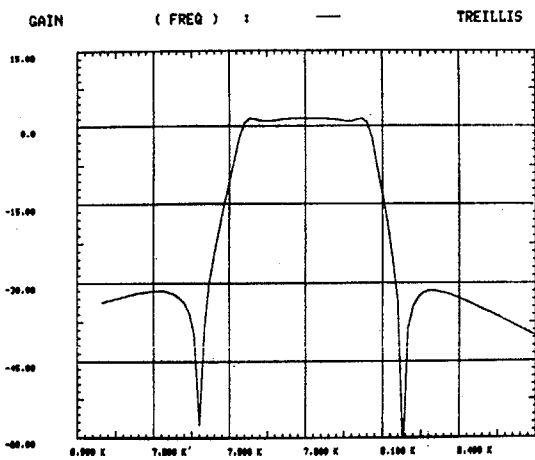


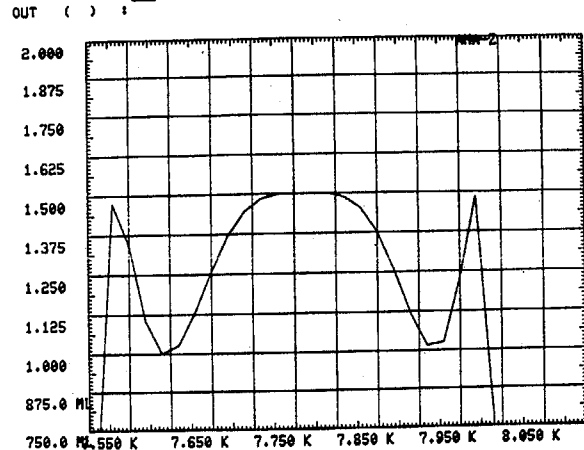
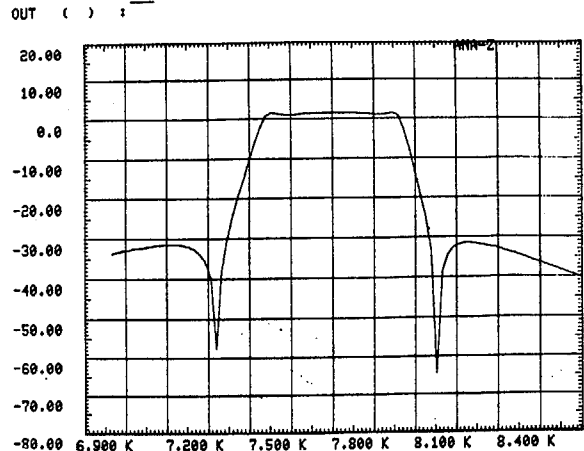
Figure 1 : Filtre treillis 1 multiplicateur

- a) courbe théorique
- b) schéma du filtre

Ci-contre

Figure 2 : Filtre Simulation sur ANA-Z

- a) analyse en fréquence coefficients quantifiés sur 16 bits
 - a.1 Gain en fréquence
 - a.2 Bande passante
- b) fichier de données généré par treillis



```

TITRE : TREILLIS UN MULTIPLICATEUR
DESCRIPTION
TOPU
TETE1(E1,E2-S1,S2)
R1=RETA(E2-H4)
M1=MULI(N4-H5)
A3=ADDI(E1,H5-M1)
N2=MULI(N1-N2)
A1=ADDI(H4,H2-N6)
M4=MULI(N6-S2)
M5=MULI(N2-N3)
A2=ADDI(E1,H3-S1)
FIN

TOPJ
TROJ1(E1,E2,E3-S1,S2,S3)
R1=RETA(E3-H4)
M1=MULI(N4-H5)
A1=ADDI(E1,H5-M1)
M2=MULI(H1-H2)
A2=ADDI(N4,H2-S1)
M4=MULI(S1-H6)
M3=MULI(H2-H3)
A5=ADDI(N3,E1-S2)
A4=ADDI(E2,H6-S3)
FIN

TOPQ
QUEJ1(E1,E2-S1,S2)
R1=RETA(Q5-Q1)
M1=MULI(Q1-Q2)
A2=ADDI(E1,Q2-Q3)
M2=MULI(Q5-Q4)
M3=MULI(Q4-Q8)
A5=ADDI(E1,Q8-Q5)
M5=MULI(Q5-Q7)
A1=ADDI(Q1,Q4-S1)
M6=MULI(S1-Q6)
A4=ADDI(E2,Q6-Q9)
A5=ADDI(Q9,Q7-S2)
FIN

TOPR
TREI1(IN,OUT)
A0=TETE1(IN,Y1-X1,Z1)
A1=TRON1(X1,Z1,Y2-Y1,X2,Z2)
A2=TRON1(X2,Z2,Y3-Y2,X3,Z3)
A3=TRON1(X3,Z3,Y4-Y3,X4,Z4)
A4=TRON1(X4,Z4,Y5-Y4,X5,Z5)
A5=TRON1(X5,Z5,Y6-Y5,X6,Z6)
A6=TRON1(X6,Z6,Y7-Y6,X7,Z7)
A7=QUEJ1(X7,Z7,Y7,OUT)
FIN

DYNA
TREI1
CONSTANTES
A0,M1= 1,16
A0,M2= 0,794718152E+00,16
A0,M3= 1,16
A0,M4= 0,128936678E-02,16
    
```

```

A1,M1= 1,16
A1,M2= 0,763793828E+00,16
A1,M3= 1,16
A1,M4= 0,185253534E-01,16
A2,M1= 1,16
A2,M2= 0,988471749E+00,16
A2,M3= 1,16
A2,M4= 0,249061349E-01,16
A3,M1= 1,16
A3,M2= 0,775009174E+00,16
A3,M3= 1,16
A3,M4= 0,325340485E-01,16
A4,M1= 1,16
A4,M2= 0,995444396E+00,16
A4,M3= 1,16
A4,M4= 0,307373490E-01,16
A5,M1= 1,16
A5,M2= 0,765294727E+00,16
A5,M3= 1,16
A5,M4= 0,253216439E-02,16
A6,M1= 1,16
A6,M2= 0,994337519E+00,16
A6,M3= 1,16
A6,M4= 0,176304561E-01,16
A7,M1= 1,16
A7,M2= 0,786824847E+00,16
A7,M3= 1,16
A7,M4= 0,442240474E+00,16
A7,M5= 0,327368438E+00,16
REGISTRE
TREI1=-14, 1
FIN

S
FREQ
ECHA= 20000,00
FMIN= 7000,00
FMAX= 9000,00
FPAS= 20,00
GRAPHE
OUT
GAIN
DB
EXEC
FIN

S
STOP
    
```


EVOLUTION DE LA BANQUE :

Plusieurs évolutions sont souhaitables à cette banque :

- la création en parallèle et selon la même structure d'un enseignement assisté par ordinateur sur le traitement du signal appliqué au filtrage numérique (9)
- un calcul approfondi de sensibilité des filtres numériques.
En effet, un problème auquel ont affaire les concepteurs de filtres numériques est celui du choix de la structure la plus appropriée aux contraintes qui leur sont demandées.
La plus appropriée signifiant celle, qui, tout en respectant le cahier des charges nécessitera un nombre de bits de codage des coefficients et un nombre d'opérateurs arithmétiques minimal.
L'étude d'un logiciel capable de prendre en charge cette partie décision de la chaîne de réalisation évitera autant de simulations qu'il y a de structures à comparer.
Pour ce faire, une étude de critères relatifs à la sensibilité de chaque structure doit permettre d'arriver aux résultats escomptés.
- la création d'un logiciel de synthèse de filtres à capacités commutées désensibilisés.
Les filtres numériques en échelle ont une topologie beaucoup moins sensible aux bruits d'arrondi que les structures classiques. On obtient des structures générales de filtres numériques conduisant à des coefficients représentables par un faible nombre de bits. A partir d'un logiciel complet de synthèse passive à savoir :
 - . synthèse passive de filtres polynômiaux
 - . synthèse passive de filtres de Caueur
 - . synthèse passive générale en échelle
 On peut en déduire des algorithmes exacts de filtres à capacités commutées désensibilisés.

CONCLUSION :

Grâce à cet ensemble de logiciels en traitement numérique, il est possible d'effectuer une approche comparative des diverses structures proposées. Ceci afin de répondre à la question du choix d'une structure appropriée au problème posé en fonction de critères tels que :

- nombre de bits minimum
- contrôle de stabilité
- processeur utilisé

BIBLIOGRAPHIE :

- (1) P. DUHAMEL et P. LESCOAN
Deux programmes d'aide à la conception des filtres numériques OPTZ et ANA-Z GRETSI 1977 p. 96
- (2) S.S. LAWSON et A.G. CONSTANTINIDES
On the efficient analysis of digital filter structures in the frequency domain.
Proceeding of the Florence Conference on digital signal processing, September 11-13 1975
- (3) K. MADSEN, HCHJAER -JACOBSEN, O. NIELSEN et THRANE.
Efficient Minimax Design of Networks without Using Derivatives (IEEE Microwave Theory and Techn., vol. MTT 23, n° 10, octobre 1975, p. 803-809).
- (4) A.H. GRAY, JR, Member, IEEE and JOHN D. MARKEL, Member, IEEE
Digital Lattice and ladder filter Synthesis
IEEE Transactions on audio and Electro-acoustics, vol. AU 21, n° 6, décembre 1973
- (5) L. T. BRUTON
"Low sensitivity digital ladder filters
IEEE Transactions on circuits and systems, vol. CAS. 22, p. 168-176, mars 1975
- (6) E.S. LIU, L. E. TURNER and L. T. BRUTON
Exact synthesis of LDI andLDD ladder filters
IEEE Transactions on circuits and systems, vol. CAS 31, n° 4, avril 1984, p. 369-381
- (7) Programs for Digital Signal Processing
Digital Signal Processing Committee IEEE ASSPS.
Chapitre 6.1 Program for the Design of Recursive Digital filters.
- (8) J.H. MAC CLELLAN, J.W. PARKS and L.R. RABINER,
"A Computer Program for Designing Optimum FIR Linear Phase Digital Filters"
IEEE Trans., on Audio and Electro-acoustics, vol. AU 21, n° 6, p. 506-526, décembre 1973
- (9) M. BELLANGER
Traitement numérique du signal
Théorie et pratique
MASSON