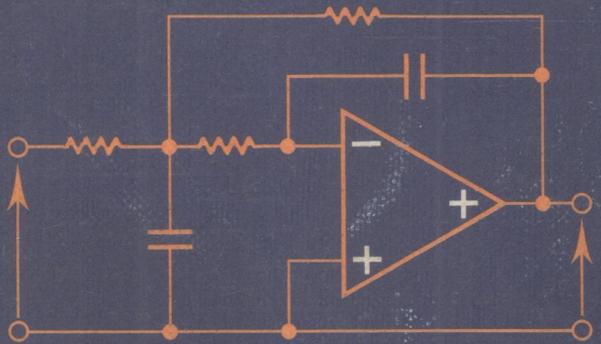


3063512

structures élémentaires des filtres actifs



J.-C. MARCHAIS

TN713
M2

8063512

STRUCTURES ÉLÉMENTAIRES DES FILTRES ACTIFS

par

J.-C. MARCHAIS

Ancien élève E.C.E.

Professeur à l'Ecole Spéciale de Mécanique et d'Electricité (Sudria)
Chef du groupe technique « Radars Aéroportés » à la division
d'Equipements Avioniques de la Thomson - C.S.F.



E8063512



MASSON

Paris New York Barcelone Milan

1979

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays.

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 reproductions 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 ayants cause, est illicite» (alinéa 1^{er} de l'article 40).

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

© *Masson, Paris, 1979*

ISBN : 2-225-62910-2

MASSON S.A.	120 Bd Saint-Germain, 75280 Paris Cedex 06
MASSON PUBLISHING U.S.A. Inc.	14 East 60 th Street, New York, N.Y. 10022
TORAY-MASSON S.A.	Balmes 151, Barcelona 8
MASSON ITALIA EDITORI S.p.A.	Via Giovanni Pascoli 55, 20133 Milano

STRUCTURES ÉLÉMENTAIRES
DES
FILTRES ACTIFS

CHEZ LE MÊME ÉDITEUR

Du même auteur :

L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL ET SES APPLICATIONS. 1978, 3^e édition révisée et complétée. 288 pages, 359 figures.

PRATIQUE DE L'ÉLECTRONIQUE, par M. AUMIAUX.

Tome 1. — L'amplification. 196 pages, 285 figures.

Tome 2. — Comparateurs, filtres actifs, techniques numériques. 1977, 208 pages, 278 figures.

ELECTRONIQUE NON LINÉAIRE. Cours et travaux dirigés, par Ch. MASSELOT et M. GIRARD.

Fascicule 1. — Amplification à transistors. Amplificateurs opérationnels. Oscillateurs sinusoïdaux. Stabilisations et régulateurs. 1975, 160 pages, 220 figures.

Fascicule 2. — Amplificateurs de puissance. Circuit à impulsions. Transmission d'une information. 1975, 160 pages, 164 figures.

TRANSISTORS MOS. Principes, différents types, caractéristiques, par R. LYON-CAEN. *Monographies d'électronique*, publiées sous la direction du Professeur P. Grivet. 1978, 96 pages, 40 figures.

CIRCUITS LOGIQUES MSI ET LSI, par R. LYON-CAEN. *Monographies d'électronique*, publiées sous la direction du Professeur P. Grivet. 1976, 2^e édition refondue de "Circuits logiques intégrés". 204 pages, 120 figures.

MICROPROCESSEURS ET MICROORDINATEURS, par R. LYON-CAEN et J.M. CROZET. *Monographies d'électronique*, publiées sous la direction du Professeur P. Grivet. 1977, 188 pages.

L'EMPLOI DES MICROPROCESSEURS, par M. AUMIAUX. 1979, 2^e édition révisée et augmentée. 180 pages, 111 figures.

ELECTRONIQUE LINÉAIRE, par J. FAGOT. *Monographies d'électronique*, sous les auspices du groupe Thomson. 1975, 300 pages, 242 figures.

INITIATION A LA FIABILITÉ EN ÉLECTRONIQUE, par T.I. BAJENESCO. 1977, 120 pages.

RADARS. Bases modernes, par M. H. CARPENTIER. 1977, 3^e édition révisée et complétée. 304 pages, 148 figures, tableaux, 3 dépliants hors texte.

Périodiques

L'ONDE ÉLECTRIQUE. 10 fascicules par an.

REVUE TECHNIQUE THOMSON-CSF. 4 fascicules par an.

TABLE DES MATIÈRES

	Pages
AVANT-PROPOS	1
CHAPITRE-PREMIER. — Rappels sur la théorie des filtres	3
Introduction	3
Catégories de filtres	4
Gabarit d'un filtre	5
Fonction de transfert	7
Filtre passe-bas prototype	8
Transformations de fréquence	10
Transformation passe-bas → passe-haut	10
Transformation passe-bas → passe-bande symétrique	12
Transformation passe-bas → coupe-bande symétrique	12
Transformation des éléments	13
Fonctions caractéristiques	14
CHAPITRE 2. — Éléments de synthèse des structures élémentaires	18
Éléments passifs	18
Éléments actifs	19
Amplificateur opérationnel de tension	20
Sources commandées ou sources contrôlées	23
Source contrôlée tension-tension	24
Source contrôlée tension-courant	25
Source contrôlée courant-tension	26
Source contrôlée courant-courant	27
Convertisseur d'impédances négatives	28
Convertisseurs d'impédances positives	31
Inverseur d'impédances positives (Gyrateur)	35
Convertisseur phase-amplitude	37
Multiplicateur	38
CHAPITRE 3. — Synthèse des structures élémentaires	40
Synthèse des structures de premier ordre	41
Synthèse des self inductances	43
Synthèse à gyrateur	43
Synthèse à circulateur	46
Selfs parallèles à intégrateurs	47
Synthèse à PIC	49
Synthèse des structures du second ordre	51
Synthèse avec des structures du premier ordre	51
Synthèse par transposition des cellules L-C passives	56
Synthèse à N.I.C.	56
Notes sur le double T ponté	59

Synthèse des structures d'ordre supérieur	60
Synthèse cascade : 1 ^{er} ordre, 2 ^e ordre	61
Structure à source contrôlée	61
Structure à contre-réaction	62
Synthèse par transposition des cellules L-C	63
Structure passe-partout	64
Structures multiples	66
Structure : passe-bas, passe-haut, passe-tout	66
Structure : passe-bas, passe-haut, passe-bande	67
Impédances variables	68
Transformations de structure	70
CHAPITRE 4. – Bibliothèque des structures élémentaires	73
Introduction	73
Bibliothèque	73
Remarques	74
Choix des structures	74
CHAPITRE 5. – Bruit des structures élémentaires	105
Généralités	105
Puissance transmise sur la charge	106
Gain en puissance	108
Puissance de bruit	108
Bande passante effective	108
Facteur de bruit	109
Facteur de bruit de quadripôles en cascade	109
Bruit des amplificateurs bouclés	111
Paramètres agissant sur le bruit des structures élémentaires	112
Amplificateurs utilisés	112
Gabarit d'atténuation	113
Valeurs des composants	118
Choix de la structure	121
Optimisation d'un filtre en bruit	121
Filtre passe-bande à bande large	121
Filtre passe-bande à bande étroite	122
BIBLIOGRAPHIE	123

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage, consacré aux structures élémentaires des filtres actifs, est un outil de travail qui je l'espère, rendra les plus grands services aux techniciens, élèves ingénieurs et ingénieurs.

Pour aborder avec efficacité la synthèse et la réalisation d'un filtre actif, le technicien doit connaître les principales structures élémentaires et leurs propriétés. A cette fin, ce livre constitué de cinq chapitres donne dans l'ordre : un rappel sur les filtres passifs, les éléments de synthèse, la synthèse et une importante bibliothèque concernant les structures élémentaires ; enfin, le bruit de ces structures.

Pour conclure, je souhaite aux lecteurs beaucoup de succès dans la réalisation des filtres actifs car celle-ci exige parfois beaucoup de courage et de ténacité.

J.C.M. Janvier 1979

1

RAPPELS SUR LA THÉORIE DES FILTRES

1.- INTRODUCTION

Dans le monde qui nous entoure, les filtres sont très répandus et ils se présentent sous des formes très variées, telles que :

- le système de suspension d'une automobile,
- la censure,
- les huiles solaires,
- le tamis, etc...

Tous ces filtres transmettent "l'information" en modifiant une ou plusieurs de ses caractéristiques.

Les filtres électriques ou électroniques qui nous intéressent ici se classent en un assez grand nombre de catégories définies soit par :

- la gamme des fréquences de travail,
- la technologie et les techniques employées,
- la loi d'affaiblissement en fonction de la fréquence,
- la méthode de synthèse, etc...

Nous nous sommes donc limités ici à l'étude des filtres actifs analogiques travaillant en basse fréquence ; pour fixer une limite toute relative, disons à des fréquences inférieures à 100 kHz.

Les filtres actifs sont dénommés ainsi, parce qu'ils sont réalisés à partir de sources ou d'amplificateurs (d'un type quelconque) associés à des composants passifs linéaires. Ces composants passifs sont de cinq types :

- la résistance (dipôle),
- la capacité (dipôle),

- la self-induction (dipôle),
- le transformateur d'impédance (multipôle),
- la ligne à retard (quadripôle).

A ces cinq types de composants, il convient d'ajouter le "gyrateur" qui est un quadripôle linéaire non réciproque. Cet élément, qui peut être passif, est examiné de manière détaillée au chapitre II.

En général, et en particulier aux basses fréquences, il est intéressant d'éliminer les transformateurs et les selfs, car ces éléments sont : volumineux, onéreux et leurs performances souvent médiocres (pertes, fuites, stabilité-thermique, etc...).

Certaines réalisations de filtres qui sortent du cadre de cet ouvrage, nécessitent des composants ou des systèmes non linéaires et même, à la limite, n'utilisent pas de composants passifs. Cependant, il convient de dire dès à présent que les filtres ainsi réalisés pourraient l'être également avec des composants passifs associés à des circuits actifs linéaires. En effet, les méthodes de synthèse restent les mêmes et, seules les techniques et technologies diffèrent.

2.- CATEGORIES DE FILTRES

Les filtres actifs comme les filtres passifs peuvent être classés en cinq grandes catégories :

- Passe-bas
- Passe-haut
- Passe-bande
- Coupe-bande ou réjecteur de bande
- Passe-tout ou réseaux déphaseurs

Bien entendu, certains filtres peuvent appartenir à plusieurs catégories à la fois.

La figure I.1 représente, pour les quatre premiers types de filtres, des lois d'affaiblissement dont les bandes de fréquence de transition sont nulles. Ces lois d'affaiblissement, souvent considérées à tort comme celles des filtres idéaux, doivent être associées à des lois de phase. Pour un filtre "Idéal" tel qu'il est défini plus haut, les déphasages devraient être nuls à toutes fréquences, et par voie de conséquence, le temps de transmission ou de propagation nul également.

Pour nous, nous préférons définir le filtre idéal comme celui dont les lois d'affaiblissement et de déphasage indépendantes entre elles

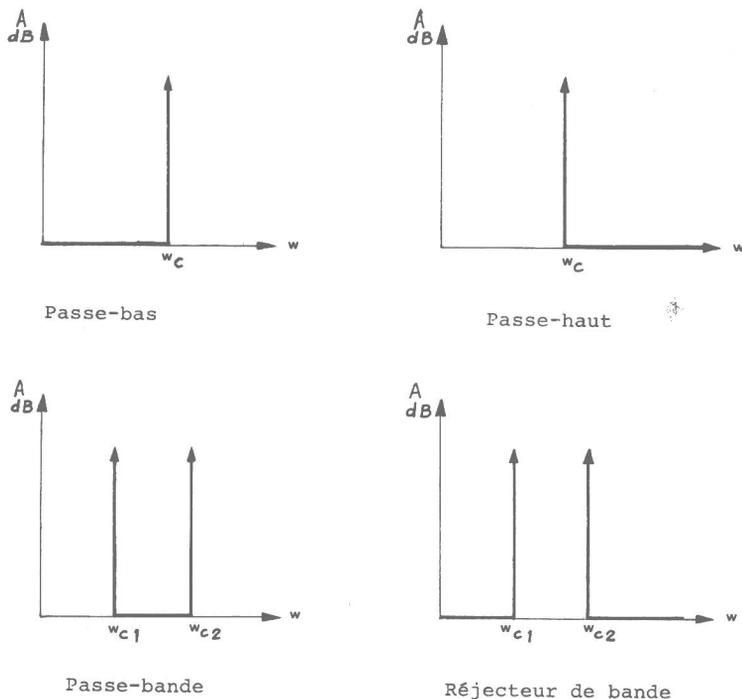


Fig. I.1

sont celles que l'on souhaite obtenir. Par suite, pour chaque application, il est possible de définir un filtre idéal. De toute façon, il est inutile de nous leurrer davantage, affaiblissements et phases sont liés par des lois, et il est impossible d'atténuer sans déphaser (relations de Bayard-Bode). Par contre, il est possible de déphaser (en retard) sans atténuer.

Nous n'avons pas l'intention de développer ici la théorie des filtres, en effet, il existe de très nombreux ouvrages et cours qui traitent abondamment de ce sujet, nous nous limiterons donc aux seuls rappels fondamentaux.

3.- GABARIT D'UN FILTRE

Le cahier des Charges d'un filtre est totalement défini lorsqu'il

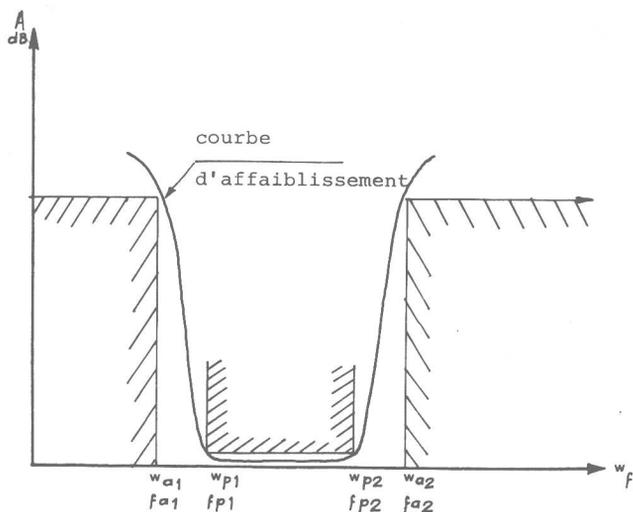
mentionne :

- le gabarit d'affaiblissement,
- le gabarit de phase ou du moins les contraintes sur la phase,
- l'impédance d'entrée,
- l'impédance de sortie,
- la nature des signaux à filtrer (niveau, spectre, etc...),
- le temps de propagation,
- le facteur de bruit du filtre,
- le coefficient de transfert dans la bande non atténuée,
- les réponses impulsionnelles ou indicielles,
- le volume,
- le prix,
- la gamme de température d'utilisation,
- les valeurs et qualités des sources d'alimentation, etc...

Il est bien évident que toutes ces données ne sont pas indépendantes les unes des autres, et il convient de s'assurer qu'elles sont compatibles entre elles, ce qui est loin d'être évident. Très souvent, en pratique, seul le gabarit d'affaiblissement est imposé et le "Concepteur" du filtre a une assez grande liberté d'action sur les autres paramètres. Malheureusement, il est quelquefois nécessaire de tenir compte de contraintes supplémentaires qui rendent alors l'étude du filtre plus complexe.

Examinons sur la figure I.2 le gabarit d'affaiblissement d'un filtre passe-bande quelconque. Si aucune autre donnée n'est imposée pour la réalisation du filtre, il est possible d'affirmer qu'un très grand nombre (et à la limite une infinité) de courbes d'affaiblissement peuvent respecter le gabarit ; par suite, de nombreuses réalisations sont possibles, du moins à priori. Il est également possible d'affirmer que seule une courbe peut être considérée comme optimale. Pour optimiser, il faut choisir des critères et selon les critères retenus, les courbes optimales seront différentes. Ces critères peuvent être :

- une loi d'affaiblissement caractéristique,
- la phase,
- le prix de revient (complexité du filtre),
- la sensibilité aux tolérances et à la stabilité des composants utilisés, etc...



f_a et ω_a : fréquences et pulsations de coupure des bandes atténuées

f_p et ω_p : fréquences et pulsations de coupure de la bande passante

Fig. I.2

4.- FONCTION DE TRANSFERT

D'une manière générale, la courbe d'affaiblissement d'un filtre représente le rapport : niveau de sortie sur niveau d'entrée en fonction de la fréquence ; ce rapport correspond à la définition de la fonction de transfert et il peut se mettre sous la forme :

$$H(p) = K \frac{N(p)}{D(p)}$$

avec : $H(p)$ fonction de transfert

$N(p)$ et $D(p)$ numérateur et dénominateur exprimés en fonction de la variable complexe p

Les valeurs de p qui annulent la fonction de transfert sont les zéros de la fonction (valeurs annulant le numérateur ou rendant le dénominateur infini) ; celles qui annulent le dénominateur sont les pôles.

$N(p)$ et $D(p)$ sont des polynômes en p qui peuvent se mettre sous la forme :

$$H(p) = \frac{A + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \dots}{a + bp + cp^2 + dp^3 + \dots}$$

La méthode des pôles et des zéros consiste à caractériser la fonction de transfert (ou transmittance) non pas par les coefficients A, B, C, D, a, b, c, d, etc... mais par les m racines du numérateur N(p) pour lesquelles celui-ci s'annule et par les n racines du dénominateur pour lesquelles celui-ci s'annule. La fonction de transfert prend alors la forme :

$$H(p) = \frac{KN}{KD} \cdot \frac{(p - z_1)(p - z_2) \dots (p - z_m)}{(p - p_1)(p - p_2) \dots (p - p_n)}$$

expression dans laquelle $z_1, z_2, \dots, z_m, p_1, p_2, \dots, p_n$ sont des constantes. Les constantes $z_i (z_1, z_2, \dots, z_m)$ s'appellent les zéros et les constantes $p_i (p_1, p_2, \dots, p_n)$ les pôles de la fonction de transfert. Ces pôles et ces zéros se représentent dans le plan complexe (ou plan de Laplace). La connaissance de l'implantation des pôles et des zéros permet de déduire la réponse impulsionnelle et la réponse indicielle du système. Nous n'insisterons pas davantage sur ce sujet, car il est abondamment traité dans de nombreux cours et ouvrages.

La fonction de transfert d'un filtre devant être stable, D(p) doit être un polynôme de Hurwitz, c'est-à-dire que toutes ses racines sont à partie réelle négative. De plus, le degré de N(p) ne peut être supérieur à celui de D(p).

L'ordre n d'un filtre correspond au nombre n de racines à partie réelle négative qui factorisent D(p). La recherche des racines d'une fonction quelconque est souvent une tâche difficile qui nécessite l'utilisation de tables ou mieux de l'ordinateur.

Comme nous l'avons vu au § 3, dans un gabarit donné, il est possible de faire "passer" un grand nombre de fonctions. Pour simplifier les calculs et la réalisation du filtre, le premier travail de l'Ingénieur consiste donc à rechercher une fonction caractéristique connue qui respecte le gabarit. Cette fonction d'approximation une fois déterminée, il convient lorsqu'elle est complexe de la décomposer en produits et sommes algébriques de fonctions relativement simplement synthétisables avec les structures élémentaires utilisées pour la réalisation des filtres actifs ; ce travail peut être fait à l'aide de l'ordinateur.

5.- FILTRE PASSE-BAS PROTOTYPE

Le gabarit d'un filtre quelconque est lié aux fréquences absolues, mais il peut par normalisation des unités de fréquence se ramener à un gabarit dans lequel seuls les rapports de fréquence interviennent. Si

l'on appelle f_u la fréquence unité de normalisation ou encore f la fréquence réduite, on a :

$$f = f_u = \frac{F}{F_0}$$

avec F fréquence absolue

F_0 fréquence caractéristique d'un réseau

Pour un filtre passe-bas ou un filtre passe-haut, la fréquence choisie est en principe la fréquence de coupure du filtre. Pour les filtres passe-bande et réjecteur de bande, F_0 est donnée par :

$$F_0 = \sqrt{f_{cb} \cdot f_{ch}}$$

avec f_{cb} la fréquence de coupure basse

f_{ch} la fréquence de coupure haute

$B = f_{ch} - f_{cb}$, la bande passante

et $\Delta = \frac{B}{F_0}$, la bande relative

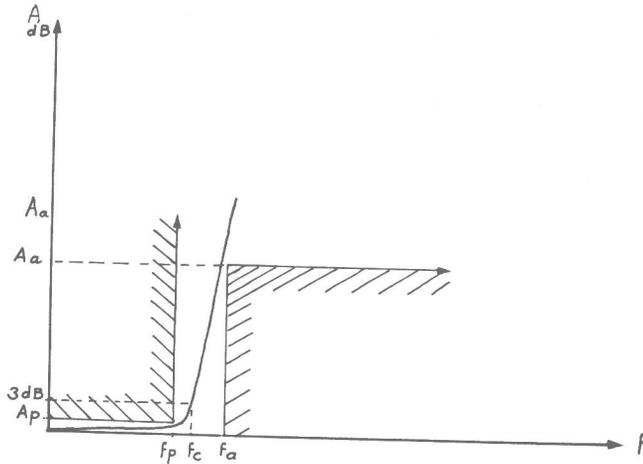
Les atténuations caractérisant les fréquences de coupure dépendent de la fonction caractéristique adoptée.

La normalisation de fréquence définit l'unité de constante de temps (RC ou L/R) car

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_0 C_0'}$$

par suite, le choix d'une unité d'impédance (1000 ohms par exemple) permet de normaliser l'ensemble des impédances du réseau étudié. Pour les filtres passifs, le choix de cette impédance est très important ; pour les filtres actifs, il l'est moins car toutes les cellules peuvent être à la limite, totalement indépendantes (principe de la totale désadaptation). Les normalisations étant effectuées, il est intéressant de ramener les gabarits des filtres passe-haut, passe-bande symétrique et coupe-bande symétrique à celui d'un filtre passe-bas appelé "prototype". De cette manière, les fonctions de transfert seront étudiées pour le passe-bas et par simple conversion de fréquence, il sera possible de déduire celles caractérisant les filtres passe-haut, passe-bande et coupe-bande symétriques.

Considérons le gabarit du filtre passe-bas prototype représenté sur la figure I.3. Ce gabarit d'affaiblissement est totalement défini lorsque : A_a , A_p , f_p et f_a sont fixées. Les fréquences f_a et f_p sont les fréquences de coupure du gabarit tandis que f_c est la fréquence de coupure de la fonction de transfert, cette fréquence de coupure correspond par exemple à l'atténuation de 3 dB. Le rapport f_p/f_a caractérise la bande de transition, ce rapport est équivalent à un facteur de sélectivité K toujours inférieur à 1.



f_a, f_p : fréquences de coupure du gabarit
 f_c : fréquence de coupure à 3 dB de la fonction de transfert

Fig. I.3

6.- TRANSFORMATIONS DE FREQUENCE

Pour passer du gabarit et de la fonction de transfert d'un filtre passe-bas à ceux des filtres passe-haut, passe-bande et coupe-bande symétriques, il suffit d'effectuer les transformations représentées sur la figure I.4.

Soit :

- f_a, f_p les fréquences réduites de coupure du gabarit passe-bas,
- K le facteur de sélectivité $K = f_p/f_a$,
- f_c la fréquence de coupure à 3 dB de la fonction de transfert,
- f_u la fréquence de normalisation est obtenue ici par le rapport F/f_c et par suite $f_p < 1$ et $f_a > 1$ ($f_u = 1$).

6.1. Transformation passe-bas → passe-haut. - Le passage du gabarit passe-bas au gabarit passe-haut s'effectue par les transformations simples suivantes :

$$f_u' = f_u = 1$$

$$f_p' = \frac{f_u}{f_p}$$

$$f_a' = \frac{f_u}{f_a}$$

transformations qui consistent à remplacer p par $\frac{1}{p}$.