



Analyse et synthèse des filtres actifs analogiques

Gérard Mangiante

Editions
TEC
& **DOC**

Lavoisier

Table des matières

| | |
|---------------------------------------|-----|
| Préface | III |
| Principales notations utilisées | XIX |
| Avant-propos | XXI |

Chapitre 1

| | |
|---|----------|
| Rappels historiques | 1 |
| Introduction | 1 |
| 1. Les précurseurs | 2 |
| 2. Les outils mathématiques | 4 |
| 3. Les filtres passifs | 5 |
| 3.1. Les débuts | 5 |
| 3.2. Les travaux de Cauer | 7 |
| 3.3. La méthode d'insertion | 7 |
| 3.4. L'ère des filtres passifs | 8 |
| 4. Les filtres actifs | 8 |
| 4.1. Les filtres actifs à éléments discrets | 8 |
| 4.2. Les filtres actifs intégrés | 9 |
| 4.3. Les filtres actifs numériques | 10 |
| Références bibliographiques | 11 |
| I. Historique du filtrage | 11 |
| II. Les précurseurs | 11 |
| III. Les débuts du filtrage : brevets | 12 |
| IV. Les débuts du filtrage : articles | 13 |
| V. Les filtres actifs | 14 |
| VI. Les filtres numériques | 15 |

Chapitre 2

| | |
|--|-----------|
| Approche théorique du filtrage | 17 |
| Introduction | 17 |
| 1. Rappels sur le signal | 17 |
| 1.1. Représentation temporelle d'un signal | 18 |

| | |
|--|----|
| 1.2. Transformation de Fourier | 19 |
| 1.2.1. Principales propriétés | 20 |
| 1.2.2. Exemples de transformées de Fourier | 20 |
| 1.3. Les signaux causaux | 21 |
| 1.4. Transformation en z | 22 |
| 1.4.1. Rappels sur l'échantillonnage | 22 |
| 1.4.2. Transformation en z | 24 |
| 1.4.3. Correspondance entre les plans complexes P et Z | 24 |
| 2. Systèmes linéaires et filtres | 25 |
| 2.1. Généralités | 25 |
| 2.2. Grandeurs caractéristiques d'un filtre | 26 |
| 2.3. Filtres causaux | 26 |
| 2.4. Filtres à temps discret | 27 |
| 2.5. Réponses d'un filtre dans le domaine fréquentiel | 28 |
| 2.5.1. Réponse en amplitude | 28 |
| 2.5.2. Réponse en atténuation | 28 |
| 2.5.3. Réponse en phase | 28 |
| 2.5.4. Temps de retard | 29 |
| 2.6. Réponses d'un filtre dans le domaine temporel | 29 |
| 2.6.1. Notion de régime transitoire | 29 |
| 2.6.2. Réponses temporelles | 30 |
| 3. Filtres physiquement réalisables | 31 |
| 3.1. Les filtres idéaux | 31 |
| 3.2. Les filtres réels | 32 |
| 3.3. Fonction de transfert d'un filtre réel | 33 |
| 3.4. Notion de stabilité | 34 |
| 3.5. Distorsions linéaires | 34 |
| 3.6. Filtres à minimum de phase | 35 |
| 4. Utilisation de Matlab | 36 |
| 4.1. Fonctions de transfert | 36 |
| 4.2. Réponse fréquentielle | 37 |
| 4.3. Réponse impulsionnelle | 37 |
| 4.4. Réponse indicielle | 38 |
| Références bibliographiques | 38 |

Chapitre 3

| | |
|---|-----------|
| Les filtres du premier et du second ordre | 39 |
| Introduction | 39 |
| 1. Filtres du premier ordre | 39 |
| 1.1. Filtre passe-bas du premier ordre | 39 |
| 1.1.1. Réponse fréquentielle | 40 |
| 1.1.2. Réponses temporelles | 41 |
| 1.1.3. Mise en cascade de filtres passe-bas du premier ordre | 42 |
| 1.2. Filtre passe-haut du premier ordre | 43 |
| 2. Rappels sur le circuit RLC | 46 |
| 3. Filtres passe-bas du second ordre | 48 |
| 3.1. Filtre passe-bas du second ordre sans zéro de transmission | 48 |
| 3.1.1. Pôles | 48 |

| | | |
|--------|---|----|
| 3.1.2. | Réponse fréquentielle | 49 |
| 3.1.3. | Retard de groupe | 50 |
| 3.1.4. | Réponse impulsionnelle | 51 |
| 3.1.5. | Réponse indicielle | 51 |
| 3.1.6. | Étude d'un exemple | 52 |
| 3.2. | Filtre passe-bas du second ordre avec zéro de transmission | 54 |
| 4. | Filtres passe-haut du second ordre | 55 |
| 4.1. | Filtre passe-haut du second ordre sans zéro de transmission | 55 |
| 4.2. | Filtre passe-haut du second ordre avec zéro de transmission | 56 |
| 5. | Filtre passe-bande du second ordre | 57 |
| 6. | Filtre réjecteur de bande du second ordre | 58 |
| 7. | Filtres passe-tout | 59 |
| 7.1. | Filtre passe-tout du premier ordre | 60 |
| 7.2. | Filtre passe-tout du second ordre | 60 |

Chapitre 4

| | |
|---|-----------|
| Approximations analytiques des filtres passe-bas | 63 |
| Introduction | 63 |
| 1. Approximation analytique d'un filtre passe-bas | 65 |
| 1.1. Normalisation de la fréquence | 65 |
| 1.2. Fonction d'approximation | 66 |
| 1.2.1. Approximations polynomiales | 66 |
| 1.2.2. Approximations non polynomiales | 66 |
| 1.3. Détermination de l'ordre du filtre | 67 |
| 1.4. Détermination de la fonction de transfert | 68 |
| 1.4.1. Cas d'une approximation polynomiale | 68 |
| 1.4.2. Cas d'une approximation non polynomiale | 69 |
| 2. Approximations polynomiales | 69 |
| 2.1. Approximation de Butterworth | 69 |
| 2.1.1. Fonction d'approximation | 69 |
| 2.1.2. Détermination de l'ordre du filtre | 70 |
| 2.1.3. Détermination de la fonction de transfert | 70 |
| 2.1.4. Fonction de transmission | 72 |
| 2.1.5. Réponse fréquentielle | 72 |
| 2.1.6. Réponses temporelles | 73 |
| 2.2. Approximation de Tchebychev de type I | 74 |
| 2.2.1. Fonction d'approximation | 74 |
| 2.2.2. Détermination de l'ordre du filtre | 76 |
| 2.2.3. Détermination de la fonction de transfert | 77 |
| 2.2.4. Fonction de transmission | 79 |
| 2.2.5. Réponse fréquentielle | 80 |
| 2.2.6. Réponses temporelles | 82 |
| 2.3. Approximation de Legendre | 83 |
| 2.3.1. Fonction d'approximation | 83 |
| 2.3.2. Détermination de l'ordre du filtre | 85 |
| 2.3.3. Détermination de la fonction de transfert | 85 |
| 2.3.4. Fonction de transmission | 85 |
| 2.3.5. Réponse fréquentielle | 86 |

| | |
|---|-----|
| 3. Approximations non polynomiales | 88 |
| 3.1. Approximation de Cauer | 88 |
| 3.1.1. Rappels sur les fonctions elliptiques | 88 |
| 3.1.2. Fonction d'approximation | 89 |
| 3.1.3. Détermination de l'ordre du filtre | 90 |
| 3.1.4. Pôles et zéros | 90 |
| 3.1.5. Réponse fréquentielle | 91 |
| 3.1.6. Réponses temporelles | 92 |
| 3.2. Approximation de Tchebychev de type II | 92 |
| 3.2.1. Fonction d'approximation | 93 |
| 3.2.2. Détermination de l'ordre du filtre | 93 |
| 3.2.3. Pôles et zéros | 94 |
| 3.2.4. Réponse fréquentielle | 94 |
| 3.2.5. Réponses temporelles | 95 |
| 4. Approximation des filtres à phase linéaire | 96 |
| 4.1. Approximation de Bessel | 97 |
| 4.1.1. Principe de l'approximation | 97 |
| 4.1.2. Réponse fréquentielle | 99 |
| 4.1.3. Réponses temporelles | 101 |
| 4.1.4. Retard de groupe | 102 |
| 4.2. Filtres gaussiens | 102 |
| 4.2.1. Principe du filtre gaussien | 102 |
| 4.2.2. Réponse fréquentielle | 103 |
| 4.2.3. Réponses temporelles | 104 |
| 4.2.4. Retard de groupe | 105 |
| 5. Utilisation de Matlab | 105 |
| 5.1. Approximation de Butterworth | 105 |
| 5.2. Approximations de Tchebychev de type I et de Tchebychev de type II | 106 |
| 5.3. Approximation de Cauer | 106 |
| Références bibliographiques | 107 |

Chapitre 5

| | |
|--|------------|
| La transposition de fréquence | 109 |
| Introduction | 109 |
| 1. Approximation | 109 |
| 1.1. Gabarit | 109 |
| 1.2. Normalisation des variables | 111 |
| 1.2.1. Normalisation des fréquences | 111 |
| 1.2.2. Normalisation des impédances | 113 |
| 2. Transposition de fréquence | 114 |
| 2.1. Transposition prototype \leftrightarrow passe-bas | 114 |
| 2.2. Transposition prototype \leftrightarrow passe-haut | 115 |
| 2.2.1. Principe | 115 |
| 2.2.2. Transposition des fonctions de transfert élémentaires | 116 |
| 2.2.3. Transposition des éléments passifs | 117 |
| 2.3. Transposition prototype \leftrightarrow passe-bande | 117 |
| 2.3.1. Principe | 117 |
| 2.3.2. Transposition des fonctions de transfert élémentaires | 118 |
| 2.3.3. Transposition des éléments passifs | 119 |

| | |
|--|-----|
| 2.4. Transposition prototype \leftrightarrow coupe-bande | 120 |
| 2.4.1. Principe | 120 |
| 2.4.2. Transposition des fonctions de transfert élémentaires | 121 |
| 2.4.3. Transposition des éléments passifs | 122 |
| 3. Utilisation de Matlab | 123 |
| 3.1. Calcul d'un filtre passe-haut | 123 |
| 3.2. Calcul d'un filtre passe-bande | 124 |
| Références bibliographiques | 125 |

Chapitre 6

| | |
|--|------------|
| Les composants des filtres actifs | 127 |
| Introduction | 127 |
| 1. Résistances | 127 |
| 1.1. Technologies | 128 |
| 1.1.1. Résistances à couche de carbone | 128 |
| 1.1.2. Résistances à couches métalliques | 128 |
| 1.1.3. Résistances bobinées | 128 |
| 1.2. Séries de valeurs normalisées | 128 |
| 1.3. Codage des informations | 130 |
| 1.3.1. Codage par couleurs | 130 |
| 1.3.2. Codage alphanumérique | 131 |
| 2. Capacités | 131 |
| 2.1. Technologies | 131 |
| 2.1.1. Condensateurs à film plastique | 131 |
| 2.1.2. Condensateurs céramique | 132 |
| 2.1.3. Condensateurs au mica | 132 |
| 2.1.4. Condensateur électrolytiques | 132 |
| 2.2. Séries de valeurs normalisées | 132 |
| 2.3. Codage des informations | 133 |
| 3. Bruit dans les composants passifs | 133 |
| 4. Choix des composants passifs pour la réalisation des filtres | 134 |
| 4.1. Résistances | 134 |
| 4.2. Capacités | 135 |
| 5. Amplificateurs opérationnels | 135 |
| 5.1. Technologies | 136 |
| 5.1.1. Amplificateurs opérationnels à contre-réaction de tension | 136 |
| 5.1.2. Amplificateurs opérationnels à contre-réaction de courant | 139 |
| 5.1.3. Amplificateurs opérationnels à sortie différentielle | 140 |
| 5.1.4. Amplificateurs opérationnels de transconductance | 140 |
| 5.2. Amplificateurs opérationnels bouclés | 141 |
| 5.2.1. Amplificateur opérationnel à contre-réaction de tension | 142 |
| 5.2.2. Amplificateur opérationnel à contre-réaction de courant | 142 |
| 5.2.3. Amplificateur opérationnel à sortie différentielle | 143 |
| 5.3. Bruit dans les amplificateurs opérationnels | 144 |
| 5.3.1. Sources de bruit | 144 |
| 5.3.2. Facteur de bruit | 144 |
| 5.3.3. Dynamique d'un filtre actif | 145 |
| 5.4. Choix des amplificateurs opérationnels | 145 |
| 5.4.1. Bande passante | 145 |

| | |
|--|-----|
| 5.4.2. Produit gain-bande passante | 145 |
| 5.4.3. Gain en boucle ouverte | 146 |
| 5.4.4. Slew-rate | 146 |
| 5.4.5. Bruit | 147 |
| 5.4.6. Autres critères de choix | 147 |
| Références bibliographiques | 147 |

Chapitre 7

| | |
|--|------------|
| Synthèse des filtres actifs | 149 |
| Introduction | 149 |
| 1. Notion de sensibilité | 149 |
| 1.1. Principe | 150 |
| 1.2. Sensibilité d'une cellule du second ordre | 151 |
| 1.2.1. Sensibilité de $ H $ aux variations de Q | 151 |
| 1.2.2. Sensibilité aux variations de ω_0 | 152 |
| 1.3. Application à l'amplificateur opérationnel | 153 |
| 1.3.1. Sensibilité du montage non-inverseur | 153 |
| 1.3.2. Sensibilité du montage inverseur | 153 |
| 1.4. Mesure de la sensibilité | 153 |
| 2. Synthèse en cascade | 154 |
| 2.1. Organisation de la mise en cascade | 155 |
| 2.1.1. Regroupement des pôles et des zéros | 155 |
| 2.1.2. Ordre de mise en cascade des cellules | 156 |
| 2.1.3. Répartition des gains | 157 |
| 2.2. Réalisation des cellules élémentaires | 157 |
| 2.2.1. Cellules du premier ordre | 157 |
| 2.2.2. Cellules du second ordre utilisant un seul amplificateur opérationnel | 158 |
| 2.2.2.1. Biquad à rétroaction positive | 158 |
| 2.2.2.2. Biquad à rétroaction négative | 160 |
| 2.2.2.3. Biquad à double rétroaction | 162 |
| 2.2.3. Cellules du second ordre utilisant deux amplificateurs opérationnels | 163 |
| 2.2.4. Cellules du second ordre utilisant trois amplificateurs opérationnels | 164 |
| 3. Synthèse par simulation des composants | 166 |
| 3.1. Rappels sur les filtres LC en échelle | 166 |
| 3.1.1. Structures | 166 |
| 3.1.2. Sensibilité | 168 |
| 3.2. Les circuits actifs permettant la simulation des composants | 169 |
| 3.2.1. Gyrateur | 169 |
| 3.2.2. Circuits convertisseurs d'impédances | 170 |
| 3.3. Exemple de simulation d'un filtre LC | 173 |
| 3.4. Transformation de Bruton | 174 |
| 3.4.1. Les FDNR | 174 |
| 3.4.2. Transformation de Bruton | 175 |
| 3.4.3. Synthèse d'un filtre passe-bas | 175 |
| 4. Synthèse par simulation opérationnelle | 177 |
| 4.1. Simulation opérationnelle du filtre | 177 |
| 4.2. Simulation opérationnelle de l'entrée du filtre | 178 |
| 4.3. Simulation opérationnelle de la sortie du filtre | 179 |
| 4.4. Exemple | 181 |

| | |
|-----------------------------|-----|
| Références bibliographiques | 183 |
| I. Ouvrages | 183 |
| II. Articles | 184 |

Chapitre 8

| | |
|--|------------|
| Structures utilisant un seul amplificateur opérationnel | 187 |
| Introduction | 187 |
| 1. Cellules du premier ordre | 187 |
| 1.1. Filtres passe-bas | 187 |
| 1.1.1. Cellules passives | 187 |
| 1.1.2. Cellules actives | 188 |
| 1.1.2.1. Cellules utilisant un amplificateur opérationnel à alimentation double | 188 |
| 1.1.2.2. Montage inverseur | 188 |
| 1.1.2.3. Montage non-inverseur | 189 |
| 1.1.2.4. Cellules utilisant un amplificateur opérationnel à alimentation unique | 189 |
| 1.1.2.5. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à contre-réaction de courant | 190 |
| 1.2. Filtres passe-haut | 190 |
| 1.2.1. Cellules passives | 190 |
| 1.2.2. Cellules actives | 190 |
| 1.2.2.1. Cellules utilisant un amplificateur opérationnel à alimentation double | 190 |
| 1.2.2.2. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à alimentation unique | 191 |
| 1.2.2.3. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à contre-réaction de courant | 192 |
| 1.3. Filtres passe-tout | 192 |
| 2. Structure de Sallen et Key | 192 |
| 2.1. Filtres passe-bas | 193 |
| 2.1.1. Structure de base | 193 |
| 2.1.2. Sensibilité de la structure | 194 |
| 2.1.2.1. Sensibilité de K | 194 |
| 2.1.2.2. Sensibilité de Q | 194 |
| 2.1.2.3. Sensibilité de ω_0 | 195 |
| 2.1.2.4. Minimisation de la sensibilité de Q | 195 |
| 2.1.3. Calcul des éléments du filtre | 195 |
| 2.1.3.1. Gain unité | 196 |
| 2.1.3.2. Gain réglable | 198 |
| 2.1.4. Influence de l'amplificateur opérationnel | 200 |
| 2.1.5. Autres structures | 201 |
| 2.1.5.1. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à alimentation unique | 201 |
| 2.1.5.2. Cellule utilisant un opérationnel à contre-réaction de courant | 202 |
| 2.1.5.3. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à sortie différentielle | 202 |
| 2.2. Filtres passe-haut | 202 |
| 2.2.1. Structure de base | 202 |

| | |
|--|-----|
| 2.2.2. Autres structures | 203 |
| 2.2.2.1. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à alimentation unique | 203 |
| 2.2.2.2. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à contre-réaction de courant | 204 |
| 2.3. Filtres passe-bande | 204 |
| 2.4. Filtres coupe-bande | 205 |
| 3. Structure de Rauch | 207 |
| 3.1. Filtres passe-bas | 207 |
| 3.1.1. Structure de base | 207 |
| 3.1.2. Sensibilité de la structure | 209 |
| 3.1.2.1. Sensibilité de K | 209 |
| 3.1.2.2. Sensibilité de Q | 209 |
| 3.1.2.3. Sensibilité de ω_0 | 209 |
| 3.1.3. Calcul des éléments du filtre | 210 |
| 3.1.4. Influence de l'amplificateur opérationnel | 210 |
| 3.1.5. Autres structures | 212 |
| 3.1.5.1. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à alimentation unique | 212 |
| 3.1.5.2. Cellule utilisant un amplificateur opérationnel à sortie différentielle | 212 |
| 3.2. Filtres passe-haut | 213 |
| 3.3. Filtres passe-bande | 215 |
| 4. Structure de Deliyannis et Friend | 216 |
| 5. Utilisation de logiciels | 217 |
| Références bibliographiques | 218 |

Chapitre 9

| | |
|---|------------|
| Structures du second ordre de type MAB | 219 |
| Introduction | 219 |
| 1. Structure de Fliege | 219 |
| 1.1. Filtres passe-bas | 220 |
| 1.2. Filtres passe-haut | 222 |
| 1.3. Filtres passe-bande | 223 |
| 2. Structure à double T | 224 |
| 2.1. Filtres passe-bas | 224 |
| 2.2. Filtres passe-haut | 226 |
| 2.3. Filtres coupe-bande | 227 |
| 3. Cellules à variables d'état | 230 |
| 3.1. Principe | 230 |
| 3.2. Cellule KHN | 230 |
| 3.3. Cellule de Tow et Thomas | 233 |
| 3.4. Cellule d'Akerberg et Mossberg | 237 |
| 3.4.1. Filtres passe-bas | 237 |
| 3.4.2. Filtres passe-haut | 238 |
| 3.4.3. Filtres passe-bande | 240 |
| 3.4.4. Filtres coupe-bande | 241 |
| 4. Récapitulatif | 243 |
| 5. Filtres RC actifs intégrés | 243 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 5.1. Filtres passe-bas | 244 |
| 5.2. Filtres universels | 245 |
| Références bibliographiques | 246 |

Chapitre 10

| | |
|---|------------|
| Les circuits à capacités commutées | 247 |
| Introduction | 247 |
| 1. Principe des circuits à capacités commutées | 248 |
| 1.1. Émulation d'une résistance | 248 |
| 1.1.1. Principe | 248 |
| 1.1.2. Généralisation | 250 |
| 1.2. Analyse des circuits à capacités commutées utilisant deux phases d'horloge | 251 |
| 1.3. Réalisation des circuits à capacités commutées | 252 |
| 1.3.1. Horloges | 252 |
| 1.3.2. Rappels sur les transistors MOS | 253 |
| 1.3.3. Capacités | 254 |
| 1.3.4. Interrupteurs | 255 |
| 2. Étude d'un exemple | 256 |
| 2.1. Phase 1 (horloge ϕ_1 active) | 257 |
| 2.2. Phase 2 (horloge ϕ_2 active) | 257 |
| 3. Les intégrateurs à capacités commutées | 259 |
| 3.1. Principe | 259 |
| 3.1.1. Intégrateur DDI | 260 |
| 3.1.1.1. Phase 1 (horloge ϕ_1 active) | 260 |
| 3.1.1.2. Phase 2 (horloge ϕ_2 active) | 260 |
| 3.1.2. Intégrateur LDI | 262 |
| 3.1.3. Effet des capacités parasites | 262 |
| 3.2. Suppression de l'influence des capacités parasites | 263 |
| 3.2.1. Intégrateur non-inverseur | 263 |
| 3.2.2. Intégrateur inverseur | 264 |
| 3.3. Récapitulatif | 265 |
| 4. Les amplificateurs à capacités commutées | 266 |
| 4.1. Principe | 266 |
| 4.1.1. Phase 1 (horloge ϕ_1 active) | 267 |
| 4.1.2. Phase 2 (horloge ϕ_2 active) | 267 |
| 4.2. Suppression de l'influence des capacités parasites | 268 |
| 4.3. Sommateur | 270 |
| 5. Imperfections dans les circuits à capacités commutées | 270 |
| 5.1. Imperfections liées aux commutateurs | 270 |
| 5.1.1. Injection d'horloge | 270 |
| 5.1.2. Réduction des effets de l'injection d'horloge | 274 |
| 5.1.2.1. Réduction de $(\Delta v_o)_{OL}$ | 274 |
| 5.1.2.2. Réduction de $(\Delta v_o)_{CH}$ | 275 |
| 5.2. Influence du gain statique de l'amplificateur opérationnel | 276 |
| 5.2.1. Phase 1 (horloge ϕ_1 active) | 277 |
| 5.2.2. Phase 2 (horloge ϕ_2 active) | 277 |
| 5.3. Influence de la valeur finie du produit gain-bande de l'amplificateur opérationnel | 278 |

| | |
|--|-----|
| 5.4. Bruit dans les circuits à capacités commutées | 279 |
| 5.4.1. Commutateurs | 279 |
| 5.4.2. Amplificateurs opérationnels | 279 |
| 6. Correspondance entre les plans complexes P et Z | 280 |
| 6.1. Transformation TAB | 280 |
| 6.2. Transformation BET | 284 |
| 6.3. Transformation FET | 285 |
| 6.4. Transformation LDI | 287 |
| Références bibliographiques | 290 |
| I. Ouvrages | 290 |
| II. Articles | 290 |

Chapitre 11

| | |
|---|------------|
| Analyse et synthèse des filtres à capacités commutées _____ | 293 |
| Introduction | 293 |
| 1. Analyse des circuits à capacités commutées | 293 |
| 1.1. Analyse nodale | 294 |
| 1.2. Utilisation de graphes opérationnels | 294 |
| 1.3. Utilisation de modèles dans le plan Z | 296 |
| 2. Synthèse en cascade | 296 |
| 2.1. Cellules du premier ordre | 297 |
| 2.1.1. Filtres passe-bas | 297 |
| 2.1.2. Filtre passe-haut | 299 |
| 2.1.3. Utilisation d'amplificateurs opérationnels à sortie différentielle | 300 |
| 2.2. Cellules du second ordre | 301 |
| 2.2.1. Schéma électrique | 301 |
| 2.2.2. Dimensionnement des capacités | 304 |
| 2.2.3. Biquad à fort coefficient de surtension | 305 |
| 2.3. Synthèse en cascade | 307 |
| 2.4. Biquads intégrés | 310 |
| 2.4.1. Filtres passe-bas | 310 |
| 2.4.2. Filtres universels | 311 |
| 2.4.2.1. LMF100 | 311 |
| 2.4.2.2. LTC1068 | 315 |
| 2.4.2.3. MAX26x | 315 |
| 3. Synthèse leapfrog | 317 |
| Références bibliographiques | 321 |

Chapitre 12

| | |
|--|------------|
| Filtres actifs à temps continu sans résistances _____ | 323 |
| Introduction | 323 |
| 1. Filtres Gm-C | 324 |
| 1.1. Circuits élémentaires utilisant des OTA | 324 |
| 1.1.1. Rappels | 324 |
| 1.1.2. Simulation d'une résistance | 326 |
| 1.1.3. Amplificateurs | 326 |
| 1.1.4. Intégrateurs | 327 |
| 1.1.5. Simulation d'une impédance | 328 |

| | |
|---|------------|
| 1.2. Cellules de filtrage Gm-C | 329 |
| 1.2.1. Cellules du premier ordre | 329 |
| 1.2.1.1. Filtres passe-bas | 329 |
| 1.2.1.2. Filtres passe-haut | 330 |
| 1.2.2. Cellules du second ordre | 330 |
| 1.2.3. Cellules à variables d'état | 333 |
| 1.2.4. Simulation d'un filtre LC | 335 |
| 1.2.4.1. Synthèse par copie des éléments | 335 |
| 1.2.4.2. Synthèse leapfrog | 336 |
| 1.3. Mode courant et mode tension | 338 |
| 1.3.1. Circuits élémentaires en mode courant | 339 |
| 1.3.2. Cellules à variables d'état en mode courant | 340 |
| 1.3.3. Synthèse leapfrog en mode courant | 341 |
| 1.4. Linéarisation des OTA | 342 |
| 1.4.1. Atténuation du signal d'entrée | 342 |
| 1.4.2. Utilisation d'une contre-réaction | 343 |
| 1.4.3. Commande adaptative du courant de réglage | 344 |
| 1.4.4. Paire pseudo-différentielle | 345 |
| 1.4.5. Paires différentielles à couplage croisé | 346 |
| 2. Filtres MOS-C | 347 |
| 2.1. Intégrateur MOS-C | 348 |
| 2.2. Additionneurs et soustracteurs à MOS | 351 |
| 2.3. Amplificateurs | 354 |
| 2.4. Filtres du premier ordre | 355 |
| 2.5. Biquads | 356 |
| 3. Stabilisation des filtres à temps continu | 357 |
| 3.1. Stabilisation de f_0 | 359 |
| 3.1.1. Stabilisation par résistance | 359 |
| 3.1.2. Stabilisation par boucle à verrouillage de phase | 359 |
| 3.2. Stabilisation de Q | 361 |
| 3.2.1. Stabilisation par détection d'enveloppe | 361 |
| 3.2.2. Stabilisation par algorithme LMS | 362 |
| Références bibliographiques | 365 |
| I. Filtres utilisant des OTA | 365 |
| II. Mode courant | 366 |
| III. Stabilisation du filtre | 368 |
| Annexe | 371 |
| A1. Filtres de Butterworth | 371 |
| A2. Filtres de Tchebychev de type I | 373 |
| A3. Filtres de Legendre | 375 |
| A4. Filtres de Bessel | 376 |
| Index | 377 |