

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| <b>Avant-propos</b> . . . . .  | 5  |
| <b>Chapitre 1. Filtrage adaptatif : le problème de base</b> . . . . .        | 13 |
| Jean-Marc BROSSIER, François MICHAUT   |    |
| 1.1. Traitement du signal et optimisation . . . . .                          | 13 |
| 1.1.1. Pourquoi du filtrage adaptatif? . . . . .                             | 13 |
| 1.1.2. Soustraction de bruit, égalisation et identification . . . . .        | 14 |
| 1.2. Estimation optimale . . . . .   | 16 |
| 1.2.1. Estimation non linéaire . . . . .                                     | 16 |
| 1.2.2. Estimation en moyenne quadratique (m.q.) . . . . .                    | 18 |
| 1.2.3. Deux approches de l'ELMQ : Wiener et Kalman . . . . .                 | 19 |
| 1.3. Le filtrage de Wiener RIF . . . . .                                     | 22 |
| 1.3.1. La solution RIF : équations normales . . . . .                        | 22 |
| 1.3.2. Le point de vue déterministe : moindres carrés . . . . .              | 23 |
| 1.4. Optimisation déterministe : les algorithmes . . . . .                   | 25 |
| 1.4.1. Gradient déterministe . . . . .                                       | 25 |
| 1.4.2. Newton et quasi-Newton . . . . .                                      | 27 |
| 1.4.3. Autres méthodes : gradient conjugué... . . . . .                      | 29 |
| 1.5. Passage aux algorithmes adaptatifs et rôle de l'ergodisme . . . . .     | 29 |
| 1.5.1. Choix du critère à optimiser . . . . .                                | 30 |
| 1.5.2. Choix d'un algorithme déterministe d'optimisation . . . . .           | 31 |
| 1.5.3. Algorithme stochastique et estimation statistique . . . . .           | 32 |
| 1.5.4. Le lien entre point de vue déterministe et probabiliste : l'ergodisme | 33 |
| 1.6. Bibliographie . . . . .   | 36 |
| <b>Chapitre 2. Filtrage adaptatif RIF</b> . . . . .                          | 39 |
| François MICHAUT, André GILLOIRE, Pascal SCALART                             |    |
| 2.1. Gradient stochastique . . . . .   | 39 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.1.1. Le gradient stochastique : LMS . . . . .                                 | 40        |
| 2.1.2. Convergence du LMS . . . . .   | 41        |
| 2.1.3. Variantes du LMS : NLMS, formes par blocs . . . . .                      | 50        |
| 2.2. Moindres carrés récurrents : RLS . . . . .                                 | 55        |
| 2.2.1. L'algorithme récurrent : RLS . . . . .                                   | 56        |
| 2.2.2. Algorithme adaptatif : facteur d'oubli . . . . .                         | 57        |
| 2.2.3. Convergence et propriétés statistiques . . . . .                         | 59        |
| 2.2.4. Simulations et comparaisons RLS-LMS . . . . .                            | 65        |
| 2.3. Algorithmes de projection affine . . . . .                                 | 69        |
| 2.3.1. Introduction . . . . .   | 69        |
| 2.3.2. Liens avec les autres familles d'algorithmes . . . . .                   | 72        |
| 2.3.3. Régularisation directe de la matrice de covariance des données . . . . . | 73        |
| 2.3.4. Convergence de l'algorithme APA . . . . .                                | 74        |
| 2.3.5. Complexité algorithmique et algorithmes rapides . . . . .                | 76        |
| 2.4. Structures en treillis . . . . .   | 77        |
| 2.4.1. Introduction . . . . .   | 77        |
| 2.4.2. Le treillis gradient et variantes . . . . .                              | 79        |
| 2.4.3. Le treillis Moindres carrés . . . . .                                    | 81        |
| 2.5. Performances comparées des algorithmes adaptatifs . . . . .                | 83        |
| 2.5.1. Performances de APA et NLMS . . . . .                                    | 83        |
| 2.5.2. Performances des algorithmes en treillis . . . . .                       | 86        |
| 2.6. Bibliographie . . . . .  | 90        |
| <b>Chapitre 3. Algorithmes adaptatifs : méthodes générales . . . . .</b>        | <b>93</b> |
| <b>Jean-Pierre DELMAS, Jean-Marc BROSSIER, François MICHAUT</b>                 |           |
| 3.1. Nécessité de traitements adaptatifs plus généraux . . . . .                | 94        |
| 3.1.1. Filtrage RII, modélisation ARMA . . . . .                                | 94        |
| 3.1.2. Egalisation linéaire aveugle . . . . .                                   | 95        |
| 3.1.3. Estimation de retards . . . . .  | 97        |
| 3.1.4. Approximation de sous-espaces, réseau de neurones . . . . .              | 97        |
| 3.1.5. Conception des algorithmes . . . . .                                     | 99        |
| 3.2. Forme générale d'algorithmes, méthodes pour la convergence (ODE) . . . . . | 101       |
| 3.2.1. Forme générale, vecteur d'état . . . . .                                 | 101       |
| 3.2.2. Algorithme déterministe et méthode de l'ODE . . . . .                    | 103       |
| 3.2.3. Stabilité de l'ODE et fonction de Liapounoff . . . . .                   | 107       |
| 3.2.4. Exemples : ODE, convergence, condition SPR . . . . .                     | 109       |
| 3.3. Algorithmes à pas constant : fluctuation stationnaire . . . . .            | 112       |
| 3.3.1. Fluctuation : approximation-diffusion gaussienne et EDS . . . . .        | 114       |
| 3.3.2. Exemples . . . . .   | 115       |
| 3.4. Poursuite de non-stationnarités . . . . .                                  | 117       |
| 3.4.1. Problématique de la poursuite . . . . .                                  | 118       |
| 3.4.2. Exemple de l'estimateur de moyenne . . . . .                             | 119       |
| 3.4.3. Méthode générale : diffusions gaussiennes et ODE . . . . .               | 122       |

|  |            |
|--|------------|
| 3.4.4. Le cas standard : LMS et RLS, exemples . . . . .                              | 125        |
| 3.5. Application : méthodes d'approximation de sous-espaces . . . . .                | 127        |
| 3.5.1. Construction des algorithmes . . . . .  | 128        |
| 3.5.2. Etude de convergence . . . . .  | 134        |
| 3.6. Conclusion . . . . .  | 137        |
| 3.7. Bibliographie . . . . .   | 138        |
| <b>Chapitre 4. Algorithmes rapides, vitesse et stabilité numérique . . . . .</b>     | <b>141</b> |
| Maurice BELLANGER  |            |
| 4.1. Introduction et notations . . . . .   | 141        |
| 4.2. Filtrages transverses rapides . . . . .   | 142        |
| 4.2.1. Equations de récurrence du filtre d'ordre $M$ . . . . .                       | 142        |
| 4.2.2. Relations entre les variables des Moindres carrés . . . . .                   | 144        |
| 4.2.3. Algorithme MCR basé sur les erreurs <i>a priori</i> . . . . .                 | 149        |
| 4.2.4. Algorithme MCR basé sur l'ensemble des erreurs de prédiction . . . . .        | 153        |
| 4.2.5. Conditions de stabilité et initialisation . . . . .                           | 155        |
| 4.2.6. Contrôle de l'accumulation des erreurs d'arrondi . . . . .                    | 160        |
| 4.2.7. Moindres carrés avec décimation . . . . .                                     | 162        |
| 4.3. Algorithmes en treillis . . . . .   | 163        |
| 4.3.1. Récurrences sur l'ordre pour les coefficients de prédiction . . . . .         | 163        |
| 4.3.2. Relations de récurrence sur l'ordre pour les coefficients du filtre . . . . . | 167        |
| 4.3.3. Relations de récurrence temporelle . . . . .                                  | 169        |
| 4.3.4. Algorithmes MCR pour les structures en treillis . . . . .                     | 170        |
| 4.3.5. Algorithmes pour treillis avec normalisation . . . . .                        | 172        |
| 4.3.6. Calcul des coefficients des filtres transversaux . . . . .                    | 177        |
| 4.4. Algorithmes de décomposition QR . . . . .                                       | 178        |
| 4.4.1. L'opération de rotation . . . . .   | 179        |
| 4.4.2. La décomposition QR . . . . .   | 179        |
| 4.4.3. Rotations en prédiction linéaire arrière . . . . .                            | 181        |
| 4.4.4. Rotation en prédiction linéaire avant . . . . .                               | 185        |
| 4.4.5. L'algorithme QR rapide . . . . .  | 187        |
| 4.4.6. Equivalence avec le treillis . . . . .  | 189        |
| 4.5. Conclusion . . . . .  | 190        |
| 4.6. Bibliographie . . . . .   | 191        |
| <b>Chapitre 5. Filtrage adaptatif RII . . . . .</b>                                  | <b>193</b> |
| Phillip REGALIA  |            |
| 5.1. Introduction . . . . .  | 193        |
| 5.2. Principes d'identification du système . . . . .                                 | 194        |
| 5.3. Méthode d'erreur d'équation . . . . .   | 194        |
| 5.3.1. Développement algorithmique . . . . .   | 198        |
| 5.3.2. Propriétés de modélisation . . . . .  | 200        |
| 5.4. Méthode de minimisation de l'erreur de sortie . . . . .                         | 203        |

|  |            |
|--|------------|
| 5.5. Méthode de Steiglitz et McBride . . . . .                 | 207        |
| 5.5.1. Développement algorithmique . . . . .                   | 208        |
| 5.6. Algorithmes à base d'hyperstabilité . . . . .             | 211        |
| 5.7. Algorithme hyperstable simplifié . . . . .                | 216        |
| 5.8. Convergence des algorithmes en erreur de sortie . . . . . | 217        |
| 5.8.1. Méthode de gradient . . . . .                           | 219        |
| 5.8.2. Algorithme de Steiglitz-McBride . . . . .               | 220        |
| 5.8.3. SHARF . . . . .   | 223        |
| 5.9. Approximation dans le cas sous-modélisé . . . . .         | 225        |
| 5.10. Conclusion . . . . .                                     | 229        |
| 5.11. Bibliographie . . . . .                                  | 229        |
| <b>Index . . . . .</b>   | <b>233</b> |