

# Table des matières

|   |          |
|---|----------|
| Avant-propos  | vii      |
| <b>PREMIÈRE PARTIE Outils de base</b>   | <b>1</b> |
| <b>CHAPITRE 1 Introduction à la commande automatique</b>                                | <b>3</b> |
| 1.1 Introduction  | 3        |
| 1.2 Qu'est-ce l'automatique?  | 4        |
| 1.3 Approche systémique   | 12       |
| 1.4 Définitions   | 19       |
| 1.4.1 Montage en asservissement   | 19       |
| 1.4.2 Montage en régulation   | 20       |
| 1.4.3 Montage en asservissement et régulation   | 22       |
| 1.4.4 Analyse et synthèse des systèmes automatiques                                     | 23       |
| 1.5 Propriétés d'une architecture à rétroaction   | 30       |
| 1.5.1 Préambule   | 30       |
| 1.5.2 Stabilité   | 30       |
| 1.5.3 Précision en régime permanent   | 32       |
| 1.5.4 Robustesse  | 33       |
| 1.5.5 Amortissement du régime transitoire   | 34       |
| 1.5.6 Sensibilité   | 36       |
| 1.5.7 Bande passante  | 37       |
| 1.5.8 Complexité  | 40       |
| 1.6 Régulateur tout-ou-rien   | 40       |
| 1.6.1 Régulateur tout-ou-rien   | 40       |
| 1.6.2 Régulateur tout-ou-rien avec seuil  | 44       |
| 1.6.3 Régulateur tout-ou-rien avec hystérésis   | 47       |
| 1.6.4 Régulateur tout-ou-rien avec seuil et hystérésis                                  | 52       |
| 1.7 Régulateur proportionnel intégral dérivé  | 53       |
| 1.7.1 Régulateur proportionnel  | 53       |
| 1.7.2 Régulateur proportionnel intégral   | 56       |
| 1.7.3 Régulateur proportionnel dérivé   | 58       |
| 1.7.4 Régulateur proportionnel intégral dérivé  | 62       |
| 1.7.5 Synthèse des régulateurs P, PI et PID<br>par les méthodes de Ziegler-Nichols      | 67       |
| 1.7.6 Synthèse des régulateurs PI, PD et PID<br>par imposition d'un modèle à poursuivre | 73       |
| 1.8 Rôles de l'ordinateur en automatique  | 76       |

|            |  |     |
|------------|--|-----|
| 1.9        | Principes de la commande numérique . . . . .                                 | 80  |
| 1.9.1      | Aspects matériel et logiciel . . . . .                                       | 80  |
| 1.9.2      | Commentaires . . . . .   | 82  |
| 1.9.3      | Atouts et faiblesses de la commande numérique . . . . .                      | 84  |
| 1.10       | Nécessité d'une théorie des systèmes échantillonnés . . . . .                | 85  |
| 1.10.1     | Imprécision de la numérisation . . . . .                                     | 85  |
| 1.10.2     | Potentiel numérique inexploité . . . . .                                     | 90  |
| 1.10.3     | Phénomènes inexplicés . . . . .  | 91  |
| 1.10.4     | Systèmes intrinsèquement discrets . . . . .                                  | 91  |
| 1.11       | Problèmes . . . . .  | 97  |
| CHAPITRE 2 | Echantillonnage et reconstruction . . . . .                                  | 107 |
| 2.1        | Introduction . . . . .   | 107 |
| 2.2        | Echantillonnage . . . . .  | 108 |
| 2.3        | Théorème de l'échantillonnage . . . . .                                      | 111 |
| 2.4        | Filtre de garde . . . . .  | 115 |
| 2.5        | Reconstruction . . . . .   | 118 |
| 2.6        | Choix de la période d'échantillonnage . . . . .                              | 120 |
| 2.7        | Problèmes . . . . .  | 121 |
| CHAPITRE 3 | Systèmes discrets . . . . .  | 125 |
| 3.1        | Introduction . . . . .   | 125 |
| 3.2        | Systèmes discrets au repos, linéaires, causals<br>et stationnaires . . . . . | 126 |
| 3.2.1      | Définitions . . . . .  | 126 |
| 3.2.2      | Produit de convolution . . . . .   | 132 |
| 3.3        | Systèmes représentés par des équations<br>aux différences . . . . .          | 137 |
| 3.4        | Opérateurs avance et retard . . . . .  | 141 |
| 3.5        | Problèmes . . . . .  | 142 |
| CHAPITRE 4 | Transformée en $z$ . . . . .   | 145 |
| 4.1        | Introduction . . . . .   | 145 |
| 4.2        | Définitions . . . . .  | 146 |
| 4.3        | Propriétés de la transformée en $z$ . . . . .                                | 149 |
| 4.3.1      | Linéarité . . . . .  | 149 |
| 4.3.2      | Décalages temporels . . . . .  | 151 |
| 4.3.3      | Dérivation complexe . . . . .  | 153 |
| 4.3.4      | Changement d'échelle complexe . . . . .                                      | 154 |
| 4.3.5      | Valeurs initiale et finale . . . . .   | 155 |
| 4.3.6      | Produit de convolution . . . . .   | 157 |
| 4.3.7      | Accumulation . . . . .   | 159 |
| 4.3.8      | Différence . . . . .   | 159 |
| 4.3.9      | Grammaire et dictionnaire de<br>la transformée en $z$ . . . . .              | 160 |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 4.4  | Calcul de la transformée en $z$ inverse . . . . .  | 163        |
| 4.4.1  | Décomposition en éléments simples . . . . .  | 163        |
| 4.4.2  | Intégration dans le plan complexe . . . . .  | 170        |
| 4.4.3  | Inversion numérique . . . . .  | 172        |
| 4.4.4  | Nature temporelle des signaux discrets . . . . .   | 174        |
| 4.5  | Fonction de transfert . . . . .  | 175        |
| 4.5.1  | Fonction de transfert d'un système<br>au repos, linéaire, causal et stationnaire . . . . . | 175        |
| 4.5.2  | Fonction de transfert d'un système<br>décrit par une équation aux différences . . . . .    | 180        |
| 4.6  | Problèmes . . . . .  | 186        |
| <b>DEUXIÈME PARTIE Analyse et synthèse des systèmes automatiques</b> |  | <b>195</b> |
| CHAPITRE 5   | Fonction de transfert du système bouclé  | 197        |
| 5.1  | Introduction . . . . .   | 197        |
| 5.2  | Echantillonnage du système à commander . . . . .   | 198        |
| 5.2.1  | Fonction de transfert échantillonnée<br>du système à commander . . . . .                   | 198        |
| 5.2.2  | Transformation des pôles par échantillonnage . . . . .                                     | 203        |
| 5.3  | Algorithme de commande . . . . .   | 206        |
| 5.3.1  | Modèle temporel . . . . .  | 206        |
| 5.3.2  | Fonction de transfert . . . . .  | 209        |
| 5.3.3  | Considérations pratiques . . . . .   | 211        |
| 5.4  | Fonctions de transfert du système bouclé . . . . .   | 213        |
| 5.4.1  | Montage en asservissement . . . . .  | 213        |
| 5.4.2  | Montage en régulation . . . . .  | 215        |
| 5.4.3  | Montage en asservissement et régulation . . . . .  | 220        |
| 5.4.4  | Cas général . . . . .  | 221        |
| 5.5  | Problèmes . . . . .  | 224        |
| CHAPITRE 6   | Réponse harmonique   | 231        |
| 6.1  | Introduction . . . . .   | 231        |
| 6.2  | Fonction de transfert harmonique . . . . .   | 232        |
| 6.2.1  | Définitions . . . . .  | 232        |
| 6.2.2  | Représentation de la fonction<br>de transfert harmonique . . . . .                         | 238        |
| 6.3  | Réponse harmonique en boucle ouverte . . . . .   | 246        |
| 6.3.1  | Echantillonnage à impulsions . . . . .   | 246        |
| 6.3.2  | Cas simplifié . . . . .  | 249        |
| 6.3.3  | Cas général . . . . .  | 258        |
| 6.4  | Problèmes . . . . .  | 261        |
| CHAPITRE 7   | Stabilité  | 265        |
| 7.1  | Introduction . . . . .   | 265        |
| 7.2  | Stabilité BIBO . . . . .   | 266        |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| 7.3        | Critères algébriques . . . . .                                | 270 |
| 7.3.1      | Transformation bilinéaire . . . . .                           | 270 |
| 7.3.2      | Critère de Jury . . . . .                                     | 272 |
| 7.4        | Critère de Nyquist . . . . .                                  | 275 |
| 7.4.1      | Préambule . . . . .   | 275 |
| 7.4.2      | Critère de Nyquist complet . . . . .                          | 279 |
| 7.4.3      | Critère de Nyquist simplifié . . . . .                        | 288 |
| 7.5        | Robustesse de la stabilité . . . . .                          | 291 |
| 7.6        | Ecart permanents . . . . .                                    | 300 |
| 7.6.1      | Montage en asservissement . . . . .                           | 300 |
| 7.6.2      | Montage en régulation . . . . .                               | 308 |
| 7.6.3      | Montage en asservissement et régulation . . . . .             | 313 |
| 7.7        | Performance en régime harmonique . . . . .                    | 314 |
| 7.8        | Problèmes . . . . .   | 318 |
| CHAPITRE 8 | Numérisation . . . . .  | 331 |
| 8.1        | Introduction . . . . .  | 331 |
| 8.2        | Numérisation d'un régulateur analogique . . . . .             | 334 |
| 8.2.1      | Synthèse d'un régulateur analogique . . . . .                 | 334 |
| 8.2.2      | Echantillonnage du régulateur analogique . . . . .            | 334 |
| 8.2.3      | Approximations numériques . . . . .                           | 336 |
| 8.2.4      | Commentaires . . . . .  | 343 |
| 8.3        | Régulateur proportionnel intégral dérivé numérique . . . . .  | 346 |
| 8.3.1      | Forme position . . . . .                                      | 346 |
| 8.3.2      | Forme incrémentale . . . . .                                  | 349 |
| 8.3.3      | Forme à dérivation séparée . . . . .                          | 349 |
| 8.3.4      | Forme non filtrée . . . . .                                   | 349 |
| 8.3.5      | Mesure anti-emballement de l'intégrateur . . . . .            | 353 |
| 8.4        | Problèmes . . . . .   | 358 |
| CHAPITRE 9 | Synthèse directe . . . . .                                    | 363 |
| 9.1        | Introduction . . . . .  | 363 |
| 9.2        | Performance en régime permanent . . . . .                     | 364 |
| 9.3        | Robustesse de la stabilité . . . . .                          | 365 |
| 9.4        | Amortissement du régime transitoire . . . . .                 | 366 |
| 9.4.1      | Préambule . . . . .   | 366 |
| 9.4.2      | Condition absolue d'amortissement . . . . .                   | 366 |
| 9.4.3      | Condition relative d'amortissement . . . . .                  | 368 |
| 9.4.4      | Conditions absolue et relative<br>d'amortissement . . . . .   | 371 |
| 9.4.5      | Relation empirique entre marges<br>et amortissement . . . . . | 371 |
| 9.4.6      | Spécifications sur la réponse indicielle . . . . .            | 372 |
| 9.5        | Sensibilité . . . . .   | 373 |
| 9.6        | Fonction de transfert harmonique en boucle fermée . . . . .   | 376 |
| 9.7        | Synthèse du régulateur dans le lieu des pôles . . . . .       | 381 |

|   |  |            |
|---|--|------------|
| 9.7.1                                     | Préambule . . . . .  | 381        |
| 9.7.2                                     | Définition et propriétés du lieu des pôles . . . . .   | 383        |
| 9.7.3                                     | Synthèse du régulateur proportionnel . . . . .   | 398        |
| 9.7.4                                     | Déformation du lieu des pôles et synthèse<br>du régulateur proportionnel dérivé . . . . .                  | 399        |
| 9.7.5                                     | Dipôle et synthèse du régulateur<br>proportionnel intégral . . . . .                                       | 404        |
| 9.7.6                                     | Correcteur par avance-retard de phase et synthèse<br>du régulateur proportionnel intégral dérivé . . . . . | 412        |
| 9.8                                       | Synthèse du régulateur dans les diagrammes de Bode . . . . .   | 416        |
| 9.8.1                                     | Calibrage de la fonction de transfert<br>en boucle ouverte . . . . .                                       | 416        |
| 9.8.2                                     | Synthèse du régulateur proportionnel . . . . .   | 425        |
| 9.8.3                                     | Correction par avance de phase et synthèse<br>du régulateur proportionnel dérivé . . . . .                 | 426        |
| 9.8.4                                     | Correction par retard de phase et synthèse<br>du régulateur proportionnel intégral . . . . .               | 432        |
| 9.8.5                                     | Correction par avance-retard de phase et synthèse<br>du régulateur proportionnel intégral dérivé . . . . . | 436        |
| 9.9                                       | Prédicteur de Smith . . . . .  | 441        |
| 9.10                                      | Commande a priori . . . . .  | 446        |
| 9.11                                      | Problèmes . . . . .  | 454        |
| <b>TROISIÈME PARTIE Méthodes avancées</b> |  | <b>471</b> |
| <b>CHAPITRE 10 Régulateur RST</b>         |  | <b>473</b> |
| 10.1                                      | Introduction . . . . .   | 473        |
| 10.2                                      | Définitions . . . . .  | 474        |
| 10.3                                      | Synthèse algébrique du régulateur RST . . . . .  | 479        |
| 10.3.1                                    | Principe de la synthèse . . . . .  | 479        |
| 10.3.2                                    | Imposition du modèle à poursuivre . . . . .  | 482        |
| 10.3.3                                    | Equation de Diophante . . . . .  | 491        |
| 10.3.4                                    | Existence et unicité d'un régulateur RST<br>causal à degré minimal . . . . .                               | 498        |
| 10.3.5                                    | Choix du modèle à poursuivre . . . . .   | 503        |
| 10.3.6                                    | Algorithmes de synthèse du régulateur RST . . . . .  | 513        |
| 10.4                                      | Commentaires . . . . .   | 529        |
| 10.4.1                                    | Influence d'un intégrateur . . . . .   | 529        |
| 10.4.2                                    | Amplitudes de la grandeur de commande . . . . .  | 532        |
| 10.5                                      | Variantes du régulateur RST . . . . .  | 533        |
| 10.5.1                                    | Mise en évidence de la commande a priori . . . . .   | 533        |
| 10.5.2                                    | Simplification de pôles et de zéros . . . . .  | 535        |
| 10.5.3                                    | Poursuite et régulation à objectifs différents . . . . .   | 537        |
| 10.5.4                                    | Synthèse par calibrage fréquentiel . . . . .   | 539        |
| 10.6                                      | Problèmes . . . . .  | 541        |

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| CHAPITRE 11 | Identification   | 545 |
|             | 11.1 Introduction  | 545 |
|             | 11.2 Régression linéaire   | 546 |
|             | 11.3 Application à l'identification des systèmes dynamiques                | 558 |
|             | 11.4 Méthode des moindres carrés   | 569 |
|             | 11.5 Méthode des moindres carrés pondérés                                  | 577 |
|             | 11.6 Méthode des moindres carrés récurrents                                | 581 |
|             | 11.7 Méthode des moindres carrés pondérés récurrents                       | 592 |
|             | 11.8 Problèmes   | 594 |
| CHAPITRE 12 | Commande adaptative  | 603 |
|             | 12.1 Introduction  | 603 |
|             | 12.2 Commande adaptative par imposition d'un modèle                        | 604 |
|             | 12.2.1 Schéma indirect   | 604 |
|             | 12.2.2 Schéma direct   | 611 |
|             | 12.3 Auto-ajustement du régulateur   | 614 |
|             | 12.4 Régulateur à gains programmés   | 628 |
|             | 12.5 Problèmes   | 630 |
| CHAPITRE 13 | Commande floue   | 635 |
|             | 13.1 Introduction  | 635 |
|             | 13.2 Définitions   | 636 |
|             | 13.3 Caractéristiques d'un ensemble flou                                   | 644 |
|             | 13.4 Opérations sur les ensembles flous                                    | 646 |
|             | 13.5 Structure d'une commande floue  | 651 |
|             | 13.5.1 Préambule   | 651 |
|             | 13.5.2 Principes de la commande floue                                      | 655 |
|             | 13.5.3 Fuzzification   | 659 |
|             | 13.5.4 Inférence floue   | 661 |
|             | 13.5.5 Défuzzification   | 670 |
|             | 13.6 Analyse d'un régulateur flou  | 676 |
|             | 13.6.1 Préambule   | 676 |
|             | 13.6.2 Propriétés de la caractéristique entrée-sortie d'un régulateur flou | 679 |
|             | 13.7 Commentaires  | 688 |
|             | 13.8 Problèmes   | 689 |
| ANNEXE I    | Compléments mathématiques  | 697 |
|             | I.1 Critères de D'Alembert et de comparaison                               | 697 |
|             | I.2 Principe de l'argument   | 698 |
|             | I.3 Transformation conforme  | 699 |
|             | I.4 Théorème sur le rang du produit de deux matrices                       | 702 |
| ANNEXE II   | Commande analogique  | 703 |
|             | II.1 Introduction  | 703 |

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| II.2       | Systèmes analogiques .....  | 704 |
| II.2.1     | Produit de convolution .....  | 704 |
| II.2.2     | Transformée de Laplace .....  | 704 |
| II.2.3     | Réponse harmonique .....  | 706 |
| II.3       | Analyse des systèmes automatiques analogiques .....                       | 712 |
| II.3.1     | Fonctions de transfert du système bouclé .....                            | 712 |
| II.3.2     | Stabilité .....   | 714 |
| II.4       | Synthèse des régulateurs analogiques .....                                | 724 |
| II.4.1     | Spécifications .....  | 724 |
| II.4.2     | Synthèse dans le lieu des pôles .....                                     | 725 |
| II.4.3     | Synthèse par calibrage de la boucle .....                                 | 727 |
| II.4.4     | Commande cascade .....  | 732 |
| ANNEXE III | Guide d'utilisation succinct des applications<br>contenues dans le CD-ROM | 739 |
|            | Bibliographie   | 743 |
|            | Notations   | 749 |
|            | Index   | 759 |

