

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	11
<b>Introduction</b> . . . . .	15
<b>PARTIE 1. SYSTEMES DE COMMANDE ET REGULATION ANALOGIQUE</b> . . . . .	21
<b>Chapitre 1. Modèles de processus dynamiques</b> . . . . .	23
1.1. Introduction aux processus dynamiques . . . . .	23
1.1.1. Définition, hypothèses et notations. . . . .	23
1.1.2. Implications des hypothèses. . . . .	24
1.1.3. Modèle dynamique au sens de l'automatique . . . . .	25
1.2. Fonctions de transfert . . . . .	26
1.2.1. Conditions d'existence. . . . .	26
1.2.2. Construction . . . . .	26
1.2.3. Structure générale d'une fonction de transfert . . . . .	28
1.2.4. Outils d'analyse des propriétés de fonctions de transfert. . . . .	28
1.2.5. Cas des fonctions de transfert d'ordre 1 et 2 . . . . .	28
1.3. Modèles d'état . . . . .	32
1.3.1. Définition. . . . .	32
1.3.2. Exemple illustratif . . . . .	33
1.3.3. Structure générale du modèle d'état . . . . .	34
1.4. Modèles d'état linéaires à paramètres constants . . . . .	35
1.4.1. Construction par linéarisation. . . . .	35
1.4.2. Structure d'un modèle d'état linéaire à paramètres constants . . . . .	36

1.4.3. Propriétés d'un modèle sans retard pur d'entrée ( $\tau_0 = 0$ ) . . . . .	38
1.4.3.1. Stabilité . . . . .	38
1.4.3.2. Commandabilité . . . . .	38
1.4.3.3. Stabilisabilité . . . . .	39
1.4.3.4. Observabilité . . . . .	39
1.4.3.5. Détectabilité . . . . .	40
1.5. Transformation de similarité . . . . .	40
1.6. Exercices corrigés . . . . .	41

## **Chapitre 2. Approche de modélisation expérimentale des processus dynamiques . . . . . 59**

2.1. Introduction à la modélisation expérimentale . . . . .	59
2.1.1. Problématique . . . . .	59
2.1.2. Principe de modélisation expérimentale . . . . .	59
2.1.3. Méthodologie de modélisation expérimentale . . . . .	60
2.1.3.1. Inspection du site du processus réel . . . . .	60
2.1.3.2. Expérimentation . . . . .	62
2.1.3.3. Prétraitement . . . . .	63
2.1.3.4. Choix structurel . . . . .	63
2.1.3.5. Estimation paramétrique . . . . .	63
2.1.3.6. Post-traitement . . . . .	64
2.1.3.7. Analyse . . . . .	64
2.2. Modélisation basée sur la réponse à l'échelon . . . . .	64
2.2.1. Cas d'un modèle d'ordre 1 . . . . .	64
2.2.2. Cas d'un modèle d'ordre 2 sous-amorti ( $\xi < 1$ ) . . . . .	64
2.2.3. Cas d'un modèle amorti d'ordre $\geq 2$ (Méthode de Strejc) . . . . .	66
2.3. Modélisation basée sur la réponse en fréquence . . . . .	70
2.4. Modélisation basée sur un modèle ARMA . . . . .	72
2.4.1. Notion de modèle ARMA . . . . .	72
2.4.2. Estimation paramétrique d'un modèle ARMA . . . . .	75
2.5. Modélisation expérimentale assistée par Matlab . . . . .	77
2.6. Exercices corrigés . . . . .	79

## **Chapitre 3. Revue des systèmes de commande et régulation analogique . . . . . 93**

3.1. Commande analogique en boucle ouverte . . . . .	93
3.1.1. Principe . . . . .	93
3.1.2. Problème de la commande en boucle ouverte . . . . .	93
3.2. Système de régulation analogique . . . . .	94

3.3. Performances d'un système de régulation analogique . . . . .	95
3.3.1. Fonctions de transfert en boucle fermée. . . . .	95
3.3.2. Grandeurs de performance. . . . .	96
3.4. Régulateurs analogiques simples . . . . .	96
3.5. Régulateurs PID/PIDF . . . . .	97
3.5.1. Structure et rôle des paramètres d'un régulateur PID/PIDF . . . . .	97
3.5.2. Calcul des paramètres par les méthodes de Ziegler-Nichols . . . . .	99
3.5.3. Calcul des paramètres par positionnement de pôles. . . . .	99
3.5.4. Calcul direct des paramètres optimaux PID . . . . .	101
3.5.5. Calcul indirect par LQR des paramètres optimaux PID . . . . .	105
3.5.6. Mise en œuvre des régulateurs analogiques . . . . .	105
3.6. Régulateurs décrits dans l'espace d'état . . . . .	106
3.6.1. Principe et schéma bloc d'une rétroaction d'état linéaire. . . . .	106
3.6.2. Techniques de calcul du gain de retour d'état . . . . .	107
3.6.3. Retour d'état avec action intégrale . . . . .	108
3.6.4. Retour d'état avec action intégrale et observateur . . . . .	110
3.6.5. Retour d'état avec compensateur d'erreur de sortie . . . . .	112
3.7. Principe d'équivalence entre régulateurs PID et LQR. . . . .	113
3.7.1. Démonstration du principe d'équivalence . . . . .	113
3.7.2. Relation d'équivalence. . . . .	116
3.7.3. Étude de cas . . . . .	116
3.8. Exercices corrigés . . . . .	119

## **PARTIE 2. SYNTHÈSE ET SIMULATION PAR ORDINATEUR**

### **DES SYSTEMES DE REGULATION NUMERIQUE . . . . . 143**

#### **Chapitre 4. Synthèse dans le domaine fréquentiel**

#### **des systèmes de régulation numérique . . . . . 145**

4.1. Méthodologie de synthèse . . . . .	145
4.2. Fonction de transfert $G(z)$ d'un processus dynamique. . . . .	145
4.2.1. Notion de modèle dynamique échantillonné . . . . .	145
4.2.2. Discrétisation de $G_c(p)$ si le retard d'entrée $\tau_0 = 0$ . . . . .	146
4.2.2.1. Principe du bloqueur d'ordre zéro . . . . .	146
4.2.2.2. Calcul de $G(z)$ à partir de $G_c(p)$ . . . . .	147
4.2.3. Discrétisation de $G_c(p)$ si le retard d'entrée $\tau_0 \neq 0$ . . . . .	148
4.2.3.1. Discrétisation de $G_c(p)$ à partir de la transformée de Padé. . . . .	148
4.2.3.2. Discrétisation de $G_c(p)$ par la transformée en $z$ . . . . .	149
4.2.3.3. Structure d'une fonction de transfert en $z$ . . . . .	150
4.2.3.4. Propriétés de $G(z)$ . . . . .	151

4.2.4. Exemples de calcul de $G(z)$ par discrétisation de $G_c(p)$ . . . . .	152
4.2.4.1. Calcul de $G(z)$ avec la table des transformées de Laplace . . . . .	152
4.2.4.2. Utilisation des commandes spécialisées de Matlab . . . . .	155
4.3. Fonction de transfert $D(z)$ : méthode de discrétisation . . . . .	156
4.3.1. Intérêt de la discrétisation . . . . .	156
4.3.2. Discrétisation de $D_c(p)$ par les méthodes d'invariance . . . . .	157
4.3.2.1. Méthode d'invariance impulsionnelle . . . . .	157
4.3.2.2. Discrétisation de $D_c(z)$ par invariance indicielle . . . . .	158
4.3.3. Discrétisation de $D_c(p)$ par les méthodes de transformation . . . . .	158
4.3.3.1. Discrétisation par la transformation d'Euler d'ordre 1 . . . . .	158
4.3.3.2. Discrétisation par la transformation d'Euler d'ordre 2 . . . . .	159
4.3.3.3. Discrétisation de $D_c(p)$ par transformation de Tustin . . . . .	160
4.3.3.4. Discrétisation par transformation pôle(s) et zéro(s) . . . . .	160
4.3.4. Fonctions de transfert en $z$ des régulateurs simples . . . . .	161
4.3.5. Structure générale de $D(z)$ et équation de récurrence . . . . .	163
4.3.6. Discrétisation des fonctions de transfert avec Matlab . . . . .	165
4.4. Fonction de transfert $D(z)$ : méthode de modèle . . . . .	165
4.4.1. Principe de la méthode de modèle . . . . .	165
4.4.2. Exemples de conception directe de régulateurs numériques . . . . .	166
4.4.2.1. Exemple 1 . . . . .	166
4.4.2.2. Exemple 2 . . . . .	166
4.4.2.3. Exemple 3 . . . . .	167
4.4.3. Conditions d'utilisation de l'approche de modèle . . . . .	167
4.4.3.1. Condition de réalisabilité au sens strict de $F(z)$ . . . . .	168
4.4.3.2. Condition de stabilité due aux zéros de $G(z)$ . . . . .	168
4.4.3.3. Condition de précision statique . . . . .	168
4.4.3.4. Condition de rapidité . . . . .	168
4.4.4. Règles pratiques d'utilisation de l'approche du modèle . . . . .	168
4.4.4.1. Règle applicable pour $G(z)$ d'ordre 1 . . . . .	168
4.4.4.2. Règle applicable pour $G(z)$ d'ordre 2 . . . . .	169
4.4.4.3. Règle applicable pour $G(z)$ d'ordre $n > 2$ . . . . .	169
4.4.4.4. Règles de validation des fonctions $F(z)$ et $D(z)$ calculées . . . . .	169
4.5. Schéma bloc discret de régulation numérique . . . . .	170
4.5.1. Fonctions de transfert caractéristiques en boucle fermée . . . . .	171
4.5.2. Fréquence d'échantillonnage . . . . .	171
4.5.2.1. Choix pratiques de la fréquence d'échantillonnage . . . . .	171
4.5.2.2. Fréquence d'échantillonnage d'un processus d'ordre 1 . . . . .	172
4.5.2.3. Période d'échantillonnage d'un processus d'ordre 2 . . . . .	172
4.5.2.4. Fréquence d'échantillonnage d'un processus d'ordre $n > 2$ . . . . .	173
4.6. Exercices corrigés . . . . .	173

<b>Chapitre 5. Simulation assistée par ordinateur des systèmes de régulation numérique . . . . .</b>	<b>195</b>
5.1. Approches de simulation assistée par ordinateur . . . . .	195
5.2. Programmation des équations de récurrence conjointes . . . . .	196
5.2.1. Formulation . . . . .	196
5.2.2. Exemple de programmation avec Matlab . . . . .	196
5.2.2.1. Choix de la période d'échantillonnage . . . . .	197
5.2.2.2. Calcul de $G(z)$ par discrétisation de $G_c(p)$ . . . . .	198
5.2.2.3. Calcul de $D(z)$ par la méthode d'invariance indicielle . . . . .	198
5.2.2.4. Simulation en boucle fermée basée sur les équations de récurrence . . . . .	199
5.3. Simulation par macro-programmation Matlab . . . . .	200
5.4. Simulation graphique . . . . .	204
5.5. Étude de cas : simulation des servomécanismes . . . . .	205
5.5.1. Simulation d'un servomécanisme de vitesse . . . . .	205
5.5.1.1. Fonction de transfert $G(z)$ du processus . . . . .	205
5.5.1.2. Fonctions de transfert $D(z)$ du régulateur à action PIDF . . . . .	207
5.5.1.3. Simulation en boucle fermée du servomécanisme de vitesse . . . . .	208
5.5.2. Simulation d'un servomécanisme de position . . . . .	209
5.5.2.1. Fonction de transfert $G(z)$ en boucle ouverte . . . . .	209
5.5.2.2. Spécification du régulateur PI à discrétiser . . . . .	211
5.5.2.3. Simulation en boucle fermée du servomécanisme de position . . . . .	211
5.6. Exercices corrigés . . . . .	211
 <b>Chapitre 6. Modèles d'état discrets de processus dynamiques . . . . .</b>	 <b>217</b>
6.1. Discrétisation du modèle d'état d'un processus dynamique . . . . .	217
6.1.1. Discrétisation d'un modèle d'état . . . . .	218
6.1.2. Discrétisation d'un modèle d'état à retard d'entrée . . . . .	219
6.2. Calcul des paramètres $\{A, B, C, D\}$ d'un modèle d'état discret . . . . .	222
6.2.1. Calcul de $A = e^{AT}$ . . . . .	222
6.2.1.1. Calcul de $A = e^{AT}$ par diagonalisation au sens de Jordan . . . . .	222
6.2.1.2. Calcul de $A = e^{AcT}$ par la série de Taylor . . . . .	223
6.2.1.3. Calcul de $A = e^{AT}$ par la transformée de Laplace . . . . .	224
6.2.2. Calcul de $B$ . . . . .	224
6.2.3. Calcul de $C$ et $D$ . . . . .	227
6.3. Propriétés d'un modèle d'état discret $\{A, B, C, D\}$ . . . . .	227

6.3.1. Infinité de modèles d'état d'un même processus dynamique . . .	227
6.3.2. Condition de stabilité. . . . .	228
6.3.3. Commandabilité et stabilisabilité. . . . .	228
6.3.4. Observabilité et détectabilité . . . . .	228
6.4. Exercices corrigés . . . . .	229
<b>Annexe 1. Table des transformées en z . . . . .</b>	<b>233</b>
<b>Annexe 2. Éléments de Matlab utilisés dans l'ouvrage . . . . .</b>	<b>235</b>
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>239</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>243</b>