



Jean-Baptiste Bouvenot
& Bernard Flament

Génie climatique et énergétique

Régulation des systèmes
de chauffage, de ventilation
et de climatisation

Théorie et problèmes
d'application résolus

Éditions
EYROLLES

Sommaire

Préambule.....	1
Nomenclature.....	3
PARTIE 1. Formulaire et bases théoriques	
CHAPITRE 1. Les boucles de régulation.....	11
CHAPITRE 2. Loi d'eau.....	15
CHAPITRE 3. Rappels sur les échangeurs de chaleur.....	23
CHAPITRE 4. Comportement des échangeurs dans une boucle de régulation....	27
CHAPITRE 5. Étude des vannes de réglage.....	39
CHAPITRE 6. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs.....	53
CHAPITRE 7. Pertes de charge.....	63
CHAPITRE 8. Modèles de comportement des systèmes.....	65
CHAPITRE 9. Méthodes d'identification des modèles de comportement.....	77
CHAPITRE 10. Les régulateurs.....	83
CHAPITRE 11. Schémas de régulation en génie climatique.....	103
PARTIE 2. Problèmes	
PROBLÈMES 1. Réglage de puissance des échangeurs.....	135
PROBLÈMES 2. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs.....	185
PROBLÈMES 3. Modèles de comportement.....	225
PROBLÈMES 4. Identification des modèles de comportement.....	251
PROBLÈMES 5. Régulateurs PID.....	257
PROBLÈMES 6. Schémas de régulation.....	291
Bibliographie.....	319

Table des matières

Préambule	1
Nomenclature.....	3

PARTIE 1

Formulaire et bases théoriques

CHAPITRE 1. Les boucles de régulation.....	11
1.1 Boucle de régulation fermée.....	12
1.2 Boucle de régulation ouverte.....	13
CHAPITRE 2. Loi d'eau.....	15
CHAPITRE 3. Rappels sur les échangeurs de chaleur.....	23
3.1 Hypothèses et définitions.....	24
3.2 Méthode du DTLM.....	25
3.3 Méthode du NUT.....	26

CHAPITRE 4. Comportement des échangeurs dans une boucle de régulation	27
4.1 Réglage de puissance thermique d'un échangeur.....	27
4.2 Réglage de puissance thermique par variation de débit.....	28
4.2.1 Échangeur à co-courant.....	28
4.2.2 Échangeur à contre-courant.....	30
4.2.3 Réglage de puissance thermique d'une batterie par variation de débit..	32
4.3 Réglage de puissance thermique par variation de température.....	34
4.4 Applications aux échangeurs de chaleur en génie climatique.....	36
4.4.1 Émetteurs de chaleur pour le chauffage.....	36
4.4.2 Échangeurs de chaleur en refroidissement/climatisation.....	38
CHAPITRE 5. Étude des vannes de réglage	39
5.1 Définitions et caractéristiques de vannes de régulation.....	40
5.1.1 Débits normalisés K_v et K_{vs}	40
5.1.2 Caractéristiques d'une vanne de réglage.....	41
5.1.3 L'autorité.....	42
5.1.4 Les vannes indépendantes de la pression différentielle.....	46
5.2 Étude des vannes trois voies.....	47
5.2.1 Technologies.....	48
5.2.2 Montages hydrauliques.....	49
5.2.3 Règles de dimensionnement.....	51
CHAPITRE 6. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs	53
6.1 Les variateurs électroniques de vitesse (VEV).....	53
6.2 Régulation d'émetteurs par pompes équipées de VEV.....	54
6.2.1 Principe.....	54
6.2.2 Stratégies de régulation de puissance thermique à variation de vitesse..	58
6.2.3 Notion de surface de pompe/courbes de pompes artificielles.....	61
6.2.4 Choix du type de régulation.....	62
CHAPITRE 7. Pertes de charge	63

CHAPITRE 8. Modèles de comportement des systèmes	65
8.1 Modélisation adaptée à la conception d'un système de régulation.....	65
8.2 Modèles de comportement.....	66
8.2.1 Forme générale d'un modèle de comportement	66
8.2.2 Transformées de Laplace.....	66
8.2.3 Fonctions de transfert.....	69
8.2.4 Schéma bloc.....	69
8.3 Réponse temporelle d'un système	70
8.3.1 Réponse temporelle à des entrées apériodiques	70
8.3.2 Paramètres caractéristiques d'une réponse indicelle.....	73
8.4 Modèles de comportement : systèmes bouclés.....	75
 CHAPITRE 9. Méthodes d'identification des modèles de comportement	 77
9.1 Objectif de l'identification.....	77
9.2 Méthodes graphiques	77
9.2.1 Systèmes apériodiques avec retard en boucle ouverte (BO)	77
9.2.2 Identification en boucle fermée (BF)	80
9.3 Comportement dynamique des équipements climatiques	81
 CHAPITRE 10. Les régulateurs	 83
10.1 Rôle d'un régulateur	83
10.2 Équation générale d'une boucle de régulation.....	84
10.3 Les régulateurs PID.....	84
10.3.1 Action proportionnelle P.....	85
10.3.2 Action intégrale I.....	87
10.3.3 Action dérivée D.....	90
10.3.4 Actions combinées PID.....	91
10.3.5 Bilan	92
10.3.6 Les architectures de PID.....	92
10.4 Méthodes de paramétrage des régulateurs PID	93
10.4.1 Méthodes basées sur la réponse à un échelon	93
10.4.2 Méthodes de réglages « terrain »	96
10.4.3 Méthodes auto-adaptatives.....	97

10.5	Régulateurs non progressifs.....	98
10.5.1	Régulateurs TOR.....	98
10.5.2	Régulateurs à positions multiples.....	99
10.5.3	Régulateurs TOR modulés.....	99
10.6	Les boucles de régulation en cascade.....	100
10.7	Bilan sur les régulateurs.....	101
CHAPITRE 11. Schémas de régulation en génie climatique.....		103
11.1	Fonctions élémentaires.....	103
11.2	Régulateurs.....	104
11.3	Compensateurs.....	104
11.4	Limiteurs.....	106
11.5	Sélecteur.....	107
11.6	Séquenceur.....	109
11.7	Organes de sécurité.....	110
11.7.1	Sécurité antigel.....	110
11.7.2	Pressostat différentiel.....	111
11.7.3	Sécurité antigel des récupérateurs de chaleur.....	112
11.8	Autres concepts.....	113
11.8.1	<i>Change over</i>	113
11.8.2	<i>Free cooling</i>	114
11.9	Schémathèque.....	114
11.9.1	Régulation d'une installation de chauffage en boucle ouverte.....	114
11.9.2	Régulation d'une installation de chauffage en boucle fermée par vannes thermostatiques (VT).....	115
11.9.3	Régulation d'une installation de chauffage collectif en boucle fermée par vannes thermostatiques.....	116
11.9.4	Régulation d'un plancher chauffant/rafraichissant en boucle ouverte avec sécurité anticondensation.....	117
11.9.5	Régulation d'une chaufferie à chaudières modulantes sur la température de départ.....	118
11.9.6	Régulation d'une chaufferie à chaudières modulantes sur la température de retour.....	119
11.9.7	Régulation d'une CTA en boucle ouverte (mode ventilation et chauffage).....	120

11.9.8	Régulation d'une CTA en boucle fermée (mode ventilation, chauffage et refroidissement).....	121
11.9.9	Régulation d'une CTA avec recyclage en boucle fermée (mode ventilation, chauffage, refroidissement et <i>free cooling</i>)	121
11.9.10	Régulation d'une CTA en boucle fermée (mode chauffage, refroidissement, humidification et déshumidification).....	123
11.9.11	Régulation d'une CTA d'une piscine en boucle fermée.....	124
11.9.12	Régulation en cascade d'une CTA en boucle fermée.....	125
11.9.13	Régulation en cascade d'une CTA en boucle fermée + régulation de la qualité de l'air par sondes CO ₂ et VEV (sans <i>free cooling</i>).....	126
11.9.14	Régulation en cascade d'une CTA en boucle fermée + régulation de la qualité de l'air par sondes CO ₂ et registres d'air conjugués (avec <i>free cooling</i>)	127
11.9.15	Régulation d'une CTA en boucle ouverte équipée d'une roue enthalpique.....	128
11.9.16	Régulation d'une CTA en boucle ouverte équipée d'un échangeur à plaques et d'un by-pass	129
11.9.17	Régulation d'une CTA équipée d'un récupérateur de chaleur à plaques, d'un by-pass et d'une batterie de préchauffage.....	130
11.9.18	Régulation d'une CTA en boucle ouverte équipée d'un caloduc et d'un by-pass	131
11.9.19	Régulation d'une CTA en boucle ouverte équipée d'un récupérateur de chaleur à batteries à eau glycolée.....	132

PARTIE 2

Problèmes

Problèmes 1. Réglage de puissance des échangeurs.....	135
1.1 Loi d'eau	135
1.2 Caractéristique idéale de vanne	138
1.3 Caractéristique d'un échangeur à co-courant	142
1.4 Caractéristique d'un échangeur à contre-courant	147
1.5 Réglage de puissance d'un échangeur par vanne trois voies.....	152
1.6 Réglage de puissance d'un plancher chauffant	156
1.7 Étude partielle du réglage de puissance d'une sous-station de réseau urbain	159
1.8 Réglage de puissance d'un ventilo-convecteur.....	163

1.9	Réglage de puissance d'un système de chauffage raccordé à un système solaire combiné (SSC).....	165
1.10	Étude du réglage de puissance d'une tour de refroidissement	169
1.11	Étude du réglage de puissance d'une batterie froide par vanne deux voies	172
1.12	Sous-station d'un réseau de chaleur urbain.....	178
Problèmes 2. Variation de vitesse des pompes et des ventilateurs.....		185
2.1	Réglage de puissance d'un émetteur par variation de vitesse de pompe	185
2.2	Réglage de puissance d'une batterie froide de CTA par variation de vitesse	192
2.3	Régulation de la qualité de l'air par variation de vitesse de ventilateurs (1/2)	199
2.4	Régulation de la qualité de l'air par variation de vitesse de ventilateurs (2/2)	204
2.5	Qualité de régulation d'un émetteur de chaleur et variation de vitesse de pompe.....	210
Problèmes 3. Modèles de comportement.....		225
3.1	Régulation de la température d'ECS.....	225
3.2	Étude analytique de la réponse en température d'un petit pavillon à un échelon de flux de chauffage.....	228
3.3	Étude d'un système de chauffage mixte par plancher chauffant et radiateur.....	240
3.4	Régulation de chauffage par radiateur	246
Problèmes 4. Identification des modèles de comportement.....		251
4.1	Identification d'un modèle de comportement d'une batterie chaude..	251
4.2	Identification graphique et choix d'un régulateur	252

Problèmes 5. Régulateurs PID	257
5.1 Régulation de la température d'eau en sortie de chaudière.....	257
5.2 Règle de paramétrage d'un PID.....	261
5.3 Régulation de la température d'eau d'un plancher chauffant.....	264
5.4 Régulation de la température d'eau chaude sanitaire.....	266
5.5 Choix et réglage d'un mode de régulation.....	270
5.6 Réponses d'un régulateur à un transfert perturbateur.....	271
5.7 Étude de l'action D seule.....	279
5.8 Étude d'une boucle de régulation.....	281
5.9 Boucle de régulation sur CO ₂	284
 Problèmes 6. Schémas de régulation	 291
6.1 Schéma de régulation d'une installation climatique d'un <i>data center</i>	291
6.2 Schéma de régulation d'une installation climatique en zone industrielle.....	295
6.3 Schéma de régulation d'une installation climatique tertiaire.....	301
6.4 Schéma de régulation d'un centre commercial.....	307
6.5 Schéma de régulation d'un centre universitaire.....	312
 Bibliographie	 319