

RÉGULATION
ET AUTOMATISME
DES SYSTÈMES
FRIGORIFIQUES

La RPF & www.larpf.fr

L'offre d'information bimédia des professionnels de la réfrigération



10 numéros par an

- Une analyse détaillée des évolutions techniques et réglementaires.
- Des retours d'expériences d'installateurs sur des réalisations complexes.
- Une rubrique "spéciale ENR".
- L'actualité marquante du secteur commentée par les professionnels.



À tout moment sur www.larpf.fr avec vos codes d'accès

- Un accès aux ressources métiers en illimité à des documents de référence (textes législatifs, bases documentaires multimédia, schémas techniques,...).
- Des dossiers d'experts délivrés par des professionnels reconnus : des cas concrets, des retours d'expériences, etc.
- Tous les articles archivés de la RPF.
- Une base de données produits et services et un annuaire Pro.

Pour vous abonner, rendez-vous sur www.larpf.fr/Boutique
ou contactez-nous au 01 53 26 48 00

René Prigent
Mathieu Auclerc



RÉGULATION ET AUTOMATISME DES SYSTÈMES FRIGORIFIQUES

2^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © ras-slava – Fotolia.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	 <p>DANGER LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--	--

© Dunod, Paris, 2013

ISBN 978-2-10-059323-1

Première édition parue en 2010 aux éditions Dunod
dans la collection « Aide-mémoire de l'ingénieur »

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

La deuxième édition de cet ouvrage portant le titre de *Régulation et automatisation des systèmes frigorifiques* fait suite à un premier ouvrage édité en 2010 qui a connu un large succès auprès d'un public de professionnels et d'étudiants impliqués dans des études appliquées d'ingénieurs en génie frigorifique. Tout particulièrement les auditeurs de l'IFFI (Institut français du froid industriel et du génie climatique) ont pu apprécier la clarté, l'exhaustivité et le caractère concret de cet ouvrage ainsi que des exposés des auteurs qui interviennent régulièrement dans cet institut.

Depuis quelques années, le génie frigorifique connaît des évolutions techniques, réglementaires et professionnelles profondes. En effet, les contraintes réglementaires et économiques – que l'on sait durables – devraient favoriser dans les années à venir le développement et la mise en place d'équipements et de systèmes frigorifiques répondant à des exigences accrues de performance : fiabilité, sûreté, sobriété en fluide frigorigène mais également efficacité énergétique. Ce dernier point apparaît comme une nouvelle demande des exploitants et des maîtres d'ouvrage conscients de l'augmentation à venir des coûts énergétiques et soucieux de montrer au grand public leur attachement à une technologie frigorifique à moindre impact sur l'environnement.

Les composants majeurs (compresseurs, échangeurs de chaleur, dispositif de détente...) équipant les systèmes frigorifiques ont fait l'objet de nombreux développements techniques innovants pour répondre à ces exigences : rendement et efficacité élevés, dispositif d'adaptation aux charges frigorifiques variables, acceptation de fluides frigorigènes « nouveaux »...

Au-delà du développement de composants à haute performance, l'enjeu majeur pour les professionnels du génie frigorifique réside certainement dans la conception, la mise en œuvre et l'exploitation de systèmes frigorifiques intégrant ces différentes technologies de composants. Dans le processus de conception, c'est la cohérence dans la sélection des composants techniques

ainsi que la pertinence des modes et des techniques de régulation qui permettront d'obtenir un système frigorifique efficace, fiable et répondant aux exigences de l'exploitant. Lors de l'exploitation, sans aucun doute, l'obtention des performances nominales du système et le maintien dans le temps de celles-ci ne pourront être réalisés que grâce à un contrôle régulier des paramètres de la régulation et du pilotage de l'installation.

Il apparaît clairement que la maîtrise des méthodes et technologies des dispositifs de régulation et de pilotage des installations frigorifiques est l'une des compétences incontournable de tout professionnel du génie frigorifique.

En réponse à ces nouveaux défis techniques, nous devons à MM. Prigent et Auclerc d'avoir rédigé un ouvrage particulièrement pédagogique qui, sous une forme synthétique, aborde tous les éléments méthodologiques, techniques et applicatifs indispensables à la pratique de la régulation et des automatismes par les « frigoristes ». Nous ne pouvons que recommander à tous – étudiants, pédagogues et professionnels – la lecture et la mise en pratique des savoirs et des règles de l'art exposés dans cet ouvrage.

Christophe MARVILLET

Directeur de l'IFFI

(Institut français du froid industriel et du génie climatique)

Table des matières

Préface	V
Remerciements	XI
Introduction	1
Chapitre 1 : Les types d'actions en régulation	3
1.1 Régulation Tout Ou Rien	6
1.2 Action proportionnelle (P)	8
1.3 Action intégrale (I)	10
1.4 Action dérivée (D)	10
1.5 Action proportionnelle, intégrale et dérivée (PID)	11
1.6 Expression mathématique d'un PID mixte	15
1.7 Méthode Ziegler-Nichols (boucle fermée)	16
Chapitre 2 : Mesures	17
2.1 Signaux	17
2.2 Capteurs	19
Chapitre 3 : Les organes mécaniques de régulation	41
3.1 Thermostat	43
3.2 Pressostat	45
Chapitre 4 : Régulation de base	51
4.1 Thermostatique	51
4.2 Pressostatique	52
4.3 Mixte	52

Chapitre 5 : Cascade et plage neutre	57
5.1 Cascade pressostatique/thermostatique	58
5.2 Plage neutre pressostatique/thermostatique	63
Chapitre 6 : Les vannes de régulation	67
6.1 Critères de sélection d'une vanne	67
6.2 Les vannes Tout Ou Rien	69
6.3 Vanne amont et vanne aval	70
6.4 Vanne hydraulique	79
Chapitre 7 : Les détendeurs	81
7.1 Détendeur capillaire	81
7.2 Détendeur thermostatique interne et externe	82
7.3 Détendeur électrique	92
7.4 Détendeur industriel	93
Chapitre 8 : L'alimentation en fluide frigorigène	99
8.1 Flood (thermosiphon)	99
8.2 Régime noyé	104
8.3 Fluide frigorigène pompé	106
Chapitre 9 : Le dégivrage	111
9.1 Naturel	112
9.2 Électrique	113
9.3 À l'eau	117
9.4 Gaz chaud	117
Chapitre 10 : La chaîne de sécurité	123
10.1 Compresseur à pistons	124
10.2 Compresseur Scroll	124
10.3 Compresseur à vis	126

Chapitre 11 : La variation de vitesse	129
11.1 Constitution	129
11.2 La sélection	131
11.3 Précautions d'installation	131
11.4 Intérêts	133
11.5 Limites d'utilisation	134
Chapitre 12 : Le purgeur automatique	135
12.1 Fonction	135
12.2 Schéma de principe	136
12.3 Mise en œuvre	138
12.4 La recherche d'incondensables	138
12.5 Automatisation	141
Chapitre 13 : Les roof-tops	143
13.1 Composition	143
13.2 Positionnement	145
13.3 Régulation	146
Chapitre 14 : Les meubles frigorifiques de vente	149
14.1 Régulation « maître/maître »	151
14.2 Régulation « maître/esclave »	153
14.3 Points périphériques	154
Chapitre 15 : Automatismes	159
15.1 Architecture	159
15.2 Automate programmable et automate de régulation	161
15.3 Les langages de programmation	163
15.4 Les ressources internes	166
15.5 Les pupitres opérateurs	168
15.6 Chien de garde et précautions	168
15.7 Programme et structure	169
15.8 Définition des cartes entrées/sorties	170

Chapitre 16 : Supervision	171
16.1 Architecture	171
16.2 Fonctionnalités	171
16.3 Logiciels	173
16.4 Communication	175
16.5 Alarmes et communication à distance	178
Chapitre 17 : Cas d'études	181
17.1 Exemple 1	181
17.2 Exemple 2	183
17.3 Exemple 3	185
17.4 Exemple 4	186
17.5 Exemple 5	189
17.6 Exemple 6	189
17.7 Exemple 7	191
17.8 Exemple 8	194
17.9 Exemple 9	195
17.10 Exemple 10	199
17.11 Exemple 11	201
17.12 Exemple 12	203
Bibliographie	205
Index	207

Remerciements

Chères lectrices et cher lecteurs,

Lorsque ce projet de livre a été esquissé, j'étais loin de supposer que nous serions amenés à réaliser une deuxième édition et cela, dans un laps de temps aussi faible.

Cela démontre que les domaines du génie frigorifique et du génie climatique suscitent un intérêt marqué.

Puisque l'occasion m'en est donnée, je profite de la présente pour rappeler aux débutantes et débutants qu'ils doivent avoir un regard de curiosité dans leur démarche d'apprentissage.

Les éléments techniques abordés dans ce livre doivent susciter des réflexions donnant des points d'entrée sur des connaissances plus étendues.

Pour ce faire, ils rencontreront, dans leur carrière, de nombreux professionnels compétents qui pourront les aider à parfaire leur connaissance.

Cette démarche a été et est encore mienne.

Ce livre n'est que le reflet partiel du savoir des nombreuses personnes qui m'ont dispensé leur enseignement.

Il m'apparaît également important de souligner que les enseignants et les professionnels jouent un rôle déterminant dans la carrière d'une personne.

Aurions-nous ou prendrions-nous la même direction professionnelle si nous n'avions pas rencontré certaines personnes qui nous ont fortement guidés ou impressionnés par leur compétence ?

Pour ma part, la réponse me semble évidente et, pour cela, les remerciements sont des mots bien faibles qui ne correspondent pas à la grande gratitude que je ressens.

Enfin, je n'oublie pas la famille et les proches qui ont un rôle important dans l'épanouissement tant personnel que professionnel.

René PRIGENT

Cet ouvrage sera pour moi l'occasion de remercier l'ensemble de mon entourage professionnel.

À ce titre, je pense aussi bien aux différents acteurs de la Grande et Moyenne Surface que ceux de l'industrie frigorifique que j'ai la chance de côtoyer et avec qui je peux avoir de nombreux échanges.

Je tiens également à rendre hommage à une personne qui serait, je pense, fière de moi pour la participation à ce second ouvrage.

Enfin, merci encore une fois à ma famille pour leur attention, leur disponibilité et leur encouragement avec un clin d'œil particulier à Jackie pour sa patience et ses relectures.

Mathieu AUCLERC

Introduction

Qui douterait aujourd'hui du rôle de la régulation dans un système ?

Pour s'en convaincre, il suffit de faire l'analogie comparative avec la conduite d'une voiture qui peut être souple avec des accélérations finement dosées, mais aussi brusque avec des accélérations sans discernement. La différence de ces deux modes de conduite donnant, entre autres, une surconsommation et un vieillissement prématuré du matériel.

Ainsi, il en va de même des systèmes frigorifiques et climatiques pour lesquels les besoins doivent être en adéquation avec la production afin d'obtenir le résultat de la grandeur recherchée (température, pression, hygrométrie, etc.).

Une idée simpliste consisterait à utiliser des régulations élaborées pour obtenir des résultats dont la finesse ou l'élément commandé n'est pas en correspondance avec le but recherché.

Nous insistons sur le fait que les techniques simples sont aussi utiles que celles plus élaborées. Chaque technique doit être utilisée avec réflexion.

Il est important de noter que l'utilisation d'une technique simple ne rime pas avec une simplicité de raisonnement et peut même faire l'objet d'une recherche complexe avant sa mise en œuvre. Nous avons observé de nombreux écueils à ce sujet.

La régulation n'est pas un axe se greffant à un système mais une part entière du système qui doit impérativement s'inscrire dans un ensemble.

La maîtrise des techniques de régulation est l'élément clé d'un système, ce qui confère à l'intervenant dédié un statut particulier. Il intervient lorsque l'installation est finalisée ou en passe de l'être mais cette maîtrise nécessite de nombreuses connaissances de par la pluralité des techniques qui définissent l'ensemble du système (frigorifique, climatique, mécanique, électronique, pneumatique, informatique...).

Si les systèmes régulés peuvent faire l'objet de modélisation, il n'en reste pas moins vrai que la part liée à l'expérience reste de mise. Il est donc nécessaire d'être attentif au point de vue des aînés expérimentés sur les techniques employées. À ce niveau, la différence entre la théorie et la pratique peut être conséquente. Cependant, il ne faut pas en déduire que la théorie est inutile. Bien au contraire, l'addition des deux (théorie et pratique) permet d'optimiser les résultats.

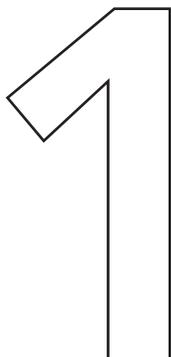
Dans cet ouvrage, nous nous sommes efforcés de décrire les méthodes des plus simples aux plus complexes. Comme indiqué précédemment, les techniques simples cachent souvent une bonne part de complexité. Nous attirons donc l'attention du lecteur sur le risque d'une lecture trop rapide sur ces points.

Nous avons émaillé cet ouvrage de remarques, qui ne sont bien entendu pas exhaustives mais qui nous paraissent les plus importantes.

Le lecteur trouvera dans ce livre la majeure partie des systèmes de régulation utilisés dans le génie frigorifique (au sens large du terme) intégrant les circuits simples, les centralisés employés dans le froid commercial mais aussi en froid industriel et dans le génie climatique. À ce titre, les techniques employées dans le froid commercial (voire ménager) n'ont rien à envier à celles utilisées en froid industriel et toute ségrégation à ce niveau ne serait pas opportune.

Enfin, nous espérons que ce modeste livre répondra aux interrogations de base des lecteurs et leur donnera envie de parfaire leur connaissance dans ce domaine.

Les Auteurs



Les types d'actions en régulation

La régulation est essentielle pour les circuits frigorifiques et permet de nombreuses actions nécessaires au fonctionnement du système. La régulation peut également compenser un certain nombre de mauvais fonctionnements liés à la conception ou à la mise en œuvre de ces circuits. Toutefois l'objectif principal est d'adapter au plus proche la production aux besoins.

Le système mis en œuvre pour la régulation est constitué principalement :

- ▶ d'un capteur (température, pression, etc.),
- ▶ d'un régulateur,
- ▶ d'un organe de réglage.

Le capteur va mesurer la grandeur à contrôler et envoyer l'information au régulateur.

Le régulateur compare l'information avec le point de consigne (grandeur souhaitée). Le résultat de cette comparaison est appelé écart ou encore erreur. Le régulateur va appliquer un algorithme de régulation à l'erreur afin de pouvoir transmettre un signal à l'organe de réglage dont la fonction est d'agir sur une capacité dans le but in fine de corriger l'erreur.

L'organe de réglage peut être une vanne de réglage, un compresseur, etc. La manière dont la grandeur mesurée est influencée par l'organe de réglage détermine le type de boucle de régulation. On distingue :

- ▶ La boucle ouverte : le capteur ne mesure pas la grandeur dans l'endroit où l'organe de grandeur agit. L'utilisation d'une boucle ouverte peut être

due à la difficulté de mesurer la grandeur régulée (chauffage central d'un immeuble avec sonde extérieure par exemple) ou à la connaissance du système régulé.

- La boucle fermée : le capteur mesure la grandeur dans l'endroit où l'organe de grandeur agit. Dans ce cas, on contrôle la grandeur souhaitée *via* l'erreur et on effectue les corrections nécessaires au fil du temps (climatisation d'une pièce avec une sonde d'ambiance par exemple).

Les régulateurs ont fortement évolué ces dernières années. Ces évolutions se sont traduites par des appareils moins chers, plus fiables et performants. Par ailleurs, des fonctions supplémentaires qui relevaient de fonctionnalités avancées sont devenues communément natives (port de communication avec les régulateurs électroniques par exemple). De même, les fournisseurs proposent une large gamme dans laquelle la quasi-globalité des algorithmes est abordée.

La figure 1.1 schématise un régulateur électronique avec une entrée et une sortie. Le régulateur peut comporter un grand nombre d'entrées et de sorties avec plusieurs algorithmes permettant ainsi des fonctions diverses telles que la régulation de la température d'une chambre froide, la gestion des dégivrages, les alarmes sur détection de seuil...

Le régulateur peut disposer de sorties supplémentaires (autres que pour l'organe de réglage) pour des fonctions telles que la recopie de lecture, l'alarme, la communication...

Dans la majorité des cas, l'algorithme utilisé est classiquement du Tout Ou Rien (TOR). L'utilisation du TOR reste simple et s'applique à un organe de réglage booléen (soit en service, soit à l'arrêt). Les régulateurs TOR sont généralement du type mécanique mais pas seulement, et cette régulation apporte dans la large majorité des cas la satisfaction désirée. Cependant, on peut être amené en fonction de l'application à utiliser d'autres lois afin de minimiser l'erreur.

On fait alors fréquemment appel à la régulation proportionnelle (P) qui commande un organe proportionnel (vanne deux voies ou trois voies par exemple).

L'avènement et la généralisation de l'électronique ont permis d'ajouter des correcteurs à la régulation proportionnelle, en la matière des fonctions intégrales (I) et dérivées (D).

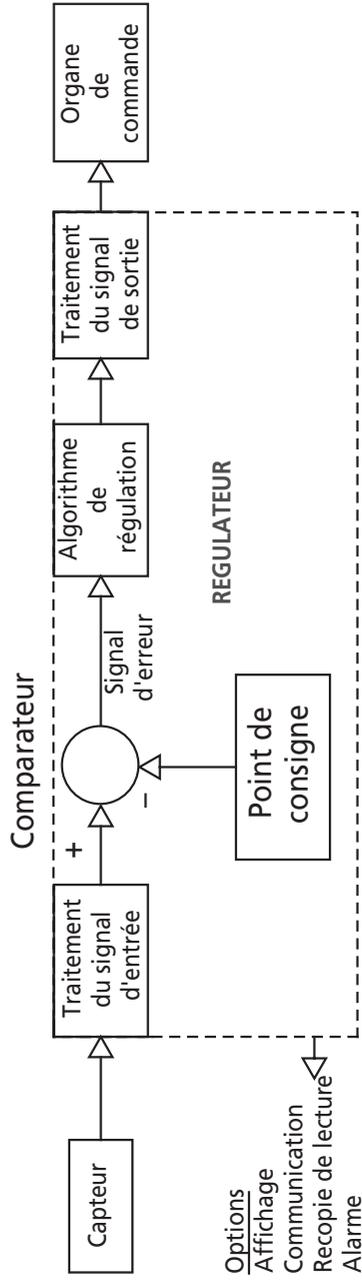


Figure 1.1 Schéma d'un régulateur à une entrée et à une sortie.

Dans certains cas (zone à risque d'explosion par exemple), on trouve des régulateurs pneumatiques. Comme leur nom l'indique, l'électricité est remplacée par un circuit d'air comprimé, ce qui supprime les sources d'ignition.

On peut rencontrer d'autres lois qui sortent du domaine de ce livre : la régulation auto-adaptative *via*, notamment, la régulation numérique par exemple.

1.1 Régulation Tout Ou Rien

La régulation Tout Ou Rien enclenche (Tout) ou arrête (Rien) l'organe de réglage. Par conséquent, on cherche à atteindre la grandeur souhaitée en utilisant l'organe de réglage entre sa capacité maximale et minimale.

Il en résulte un encadrement qui sera d'autant plus conséquent que les besoins seront disproportionnés à la production. Il est entendu qu'un réglage d'encadrement faible générera, entre autres, des courts cycles sur l'organe de réglage. Cet encadrement est appelé **différentiel**.

Le régulateur se paramètre en fixant un point de consigne et un différentiel. Le point de consigne correspond à la grandeur souhaitée (basse ou haute selon le régulateur).

La figure 1.2 montre l'évolution sinusoïdale de la grandeur en fonction du temps pour une régulation avec des caractéristiques de refroidissement.

La courbe représentant l'évolution de la grandeur dans le temps dépasse l'encadrement schématisé par les droites perpendiculaires à l'axe des abscisses.

Ce phénomène est dû aux différentes inerties du système engendrées notamment par :

- ▶ le temps de réaction du régulateur,
- ▶ le temps de réaction de l'organe de réglage et sa mise en température (à l'arrêt comme à l'enclenchement).

Par conséquent, le résultat obtenu n'est pas réellement celui souhaité.