

Daniel Dindeleux
Bernard Poussery

PRATIQUE DE LA RÉGULATION INDUSTRIELLE

DUNOD

Direction artistique : Nicolas Wiel

Graphisme de couverture : Elizabeth Riba

Illustration de couverture : Tum2282/AdobeStock

© Dunod, 2022

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083608-6

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° 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.

Table des matières

Avant Propos	IX
Remerciements	XI
Légendes des courbes d'un régulateur	XI
Glossaire	XIII
1 Notions fondamentales	1
1.1 Pourquoi réguler ?	1
1.2 La boucle de régulation	2
1.2.1 Constitution d'une boucle de régulation	2
1.2.2 Rôle de la boucle de régulation	3
1.3 Le régulateur	3
1.3.1 Rôle	3
1.3.2 Présentation du régulateur	3
1.3.3 Algorithmes de régulation	4
1.3.4 Présentation de la face avant d'un régulateur	4
1.3.5 Éléments constitutifs d'une face avant	5
1.3.6 Architecture d'un régulateur	6
1.3.7 Sens d'action du régulateur – Rôle et choix	7
1.4 Modes d'un régulateur	12
1.4.1 Mode automatique	13
1.4.2 Mode manuel	13
1.4.3 Autres modes	14
1.5 Consigne fixe ou suiveuse	15
1.5.1 Régulateur en consigne fixe	15
1.5.2 Régulateur en consigne suiveuse	16

1.6 Régimes de fonctionnement d'une boucle de régulation	16
1.7 Qualité d'une boucle de régulation	17
1.8 Les actions proportionnelle intégrale et dérivée	18
1.8.1 Action proportionnelle (P)	18
1.8.2 Régulateur à action intégrale (I)	25
1.8.3 Actions proportionnelle et intégrale associées	29
1.8.4 Action dérivée (D)	32
1.8.5 Action proportionnelle + intégrale + dérivée	32
1.8.6 Synthèse des actions P, I et D	34
1.8.7 Caractéristiques des régulateurs	35
1.9 Mise en œuvre et configuration d'un régulateur	35
1.9.1 Configuration de l'entrée	35
1.9.2 Configuration de l'affichage de la mesure	36
1.9.3 Configuration de la consigne interne	36
1.9.4 Configuration de la consigne externe	36
1.9.5 Configuration du bloc régulation	36
1.9.6 Sens d'action du régulateur	36
1.9.7 Configuration de la sortie	36
1.10 Vérification d'un régulateur	37
1.10.1 Vérification de la sortie	37
1.10.2 Vérification de l'affichage de la mesure	37
1.10.3 Vérification de la consigne externe	37
1.10.4 Vérification de l'action proportionnelle	38
1.10.5 Vérification du sens d'action	38
1.10.6 Vérification action intégrale	38
1.10.7 Vérification action dérivée	38
1.11 Réglage d'une boucle de régulation	39
1.11.1 Réglage intuitif ou par approches successives des actions PID	39
1.11.2 Comparaison entre les valeurs de T_d et de T_i	40
1.11.3 Choix des actions	41
1.12 Équations des régulateurs et notion de structures	41
1.12.1 Position de la dérivée	41
1.12.2 Schémas des différentes structures	42
1.12.3 Formules de transformation de structure	45

1.13 Performances d'une boucle de régulation	53
1.14 Technologie des solutions industrielles de régulation	54
1.14.1 Historique	54
1.14.2 Régulateurs pneumatiques	55
1.14.3 Régulateurs électroniques analogiques	58
1.14.4 Technologie de régulation numérique	60
1.14.5 Systèmes numériques de contrôle-commande (SNCC)	72
1.14.6 Approche hétérogène : automate programmable + superviseur	81

2 Procédés industriels et identification **91**

2.1 Notions de procédés industriels – Systèmes mono et multivariables	91
2.1.1 Notion de procédé, définition	91
2.1.2 Procédés multivariables	92
2.1.3 Procédés monovariabiles	93
2.2 Analyse du comportement d'un procédé industriel	94
2.2.1 L'échelon	95
2.2.2 Impulsion unité ou impulsion de Dirac	95
2.2.3 Séquence binaire pseudo-aléatoire (SBPA)	96
2.2.4 Perturbations « naturelles » du procédé	98
2.2.5 Comparaison des différentes approches	98
2.3 Classification des procédés industriels en fonction de l'allure de leur réponse indicielle	99
2.3.1 Les régimes de fonctionnement	99
2.3.2 Procédés stables (ou autorégulants)	100
2.3.3 Procédés instables ou intégrateurs	101
2.3.4 Procédés à minimum de phase ou systèmes à déphasage non minimal apériodique	102
2.4 Caractérisation d'un procédé stable – Première approche, premier modèle	104
2.4.1 Gain statique G_s (ou K_s)	105
2.4.2 Constante de temps θ	106
2.4.3 Retard pur τ ou temps mort	107
2.4.4 Procédé à plusieurs constantes de temps	108

2.5 Caractérisation d'un procédé instable ou intégrateur	110
2.6 Variabilité du procédé	111
2.6.1 Notions de linéarité et de non-linéarité	111
2.6.2 Les différents types de non-linéarités	112
2.6.3 Correction des non-linéarités	115
2.7 Approche théorique des systèmes monovariables	119
2.7.1 Loi générale de classification des systèmes monovariables	119
2.7.2 Schémas fonctionnels	123
2.8 Pratique de l'identification de procédés	127
2.8.1 Les différentes approches	128
2.8.2 Méthodes d'identification en boucle ouverte pour procédés stables	128
2.8.3 Identification des procédés intégrateurs par une méthode de boucle ouverte	153
2.8.4 Méthode d'identification des procédés en boucle fermée (méthode de Dindeleux)	154
2.9 Approche des techniques numériques d'identification	161
2.9.1 Classification des méthodes numériques	161
3 Détermination des réglages d'un régulateur	179
3.1 Les différentes approches	179
3.2 Approche directe : méthode de Ziegler et Nichols	179
3.2.1 Approche de réglage en boucle fermée	181
3.2.2 Approche de réglage en boucle ouverte	190
3.2.3 Variantes	194
3.2.4 Conclusions relatives aux approches directes	199
3.3 Approche structurée : calcul des réglages à partir des paramètres du procédé obtenus par une identification du procédé	199
3.3.1 Analyse théorique d'une boucle de régulation	200
3.3.2 Détermination du type de régulateur	202
3.3.3 Exemples de choix de régulateur	204
3.3.4 Régulation proportionnelle et intégrale d'un système stable du premier ordre	208

3.3.5 Régulation proportionnelle et intégrale d'un système du premier ordre stable avec retard pur	211
3.3.6 Régulation proportionnelle, intégrale et dérivée d'un système stable du premier ordre avec retard pur	213
3.3.7 Régulation proportionnelle d'un système intégrateur pur	215
3.3.8 Régulation proportionnelle dérivée et proportionnelle intégrale d'un système intégrateur avec retard pur	216
3.4 Choix d'un régulateur et calcul du réglage des actions P, I, D	218
3.4.1 Choix pratique d'un régulateur	218
3.4.2 Détermination des actions du régulateur	219
3.5 Les fonctions d'autoréglage	230
3.5.1 Principe général de l'autoréglage	230
3.5.2 Réalité de l'autoréglage	231
3.6 Synthèse des réglages des régulateurs PID	237
4 Régulation multiboucles	241
4.1 Limites de la régulation PID	241
4.1.1 Procédés stables	241
4.1.2 Procédés instables (ou intégrateurs)	242
4.1.3 Autres procédés inappropriés aux PID	242
4.1.4 Solutions envisageables	242
4.2 Les schémas multiboucles	243
4.2.1 Définitions	243
4.2.2 Régulation en <i>split range</i>	243
4.2.3 Régulation override ou autosélective	254
4.2.4 Régulation cascade	264
4.2.5 Régulation de tendance	280
4.2.6 Régulation de rapport	294
5 Régulation des procédés retardés et notions de régulation avancée	301
5.1 Régulation des procédés avec retard	301
5.1.1 Introduction	301
5.1.2 Régulation des procédés retardés	304

5.2 Notions de contrôle avancé et de régulation avancée	332
5.2.1 Définition	332
5.2.2 Régulation par modèle de référence (ou modèle interne)	333
5.2.3 Régulation qualitative optimale (RQO)	333
5.3 Conclusions – ce qu’il faut retenir	362
Conclusion générale	363
Liste des Annexes	364
Index	365

Avant Propos

Lors de nos interventions sur des sites industriels, nous sommes souvent surpris de trouver des boucles de régulation dont les réglages laissent à désirer.

La majorité des boucles de régulation ne réclame pas un réglage optimal, la mesure doit rejoindre la consigne dans un temps compatible avec la marche du procédé, sans dépassement excessif et avec un amortissement convenable.

Le réglage d'une boucle de régulation ne s'improvise pas, des connaissances ainsi qu'une méthodologie appropriée sont nécessaires.

En rédigeant ces lignes, les auteurs de ce livre souhaitent faire partager au lecteur leur expérience acquise au cours de nombreuses années de pratiques industrielles.

Ce livre s'adresse à toute personne confrontée à cette Divinité Mystérieuse qu'est la régulation.

L'ouvrage développe principalement les aspects pratiques de mise en œuvre et de réglage des boucles. Cependant, régulation ne rime pas avec bricolage. Les démarches décrites s'appuient sur des concepts théoriques ; nous les avons résumés. Le lecteur peut sauter ces passages pour se focaliser sur les résultats concrets qui en découlent.

Pratique de la régulation industrielle décrit en cinq parties les principales facettes de la régulation.

La première partie expose les connaissances permettant de comprendre l'objectif de la régulation industrielle. Cette partie apporte les éléments fondamentaux pour appréhender le fonctionnement des boucles de régulation. Les différents aspects des régulateurs PID sont détaillés.

La deuxième partie aborde le procédé et ses comportements car une régulation performante nécessite de connaître et comprendre le procédé à contrôler. Différentes méthodes sont présentées pour caractériser le système et obtenir les paramètres d'un modèle.

Le choix d'une stratégie de régulation, ainsi que la détermination des réglages sont développés dans la troisième partie de l'ouvrage.

La quatrième partie précise les limites de la régulation PID et présente les principaux schémas améliorant le fonctionnement des boucles simples vis-à-vis des perturbations. Cette partie traite également les schémas *split range*, *override* et régulation de rapport.

Enfin, la dernière partie développe les stratégies de régulation avancées permettant de parfaitement contrôler les procédés à retard. Les régulations à modèle interne, faciles à mettre en œuvre dans les solutions numériques, sont présentées.

Les annexes téléchargeables sur le site de l'éditeur¹, regroupent les outils mathématiques utilisés dans les développements théoriques (Transformée de Laplace-Carson, Fonction de transfert, Systèmes asservis, Critère du Revers).

¹ <https://www.dunod.com/>

Remerciements

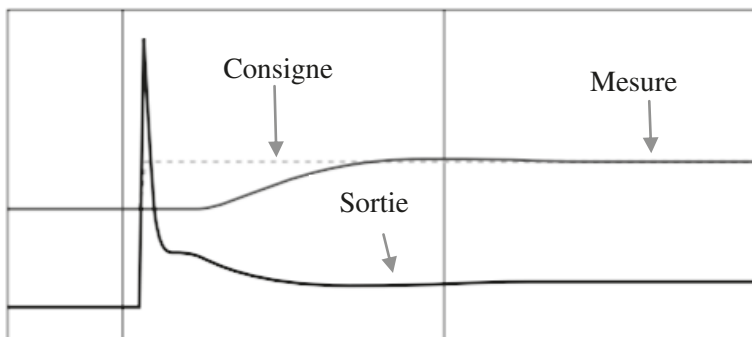
Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à notre collègue et ami Michel Feuillent pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée dans la rédaction de cet ouvrage. Qu'il soit remercié pour la mise au point des simulations et des feuilles de calcul. Sa relecture attentive, ses remarques constructives et pertinentes nous ont été d'une aide immense.

Merci à nos collègues du Groupe SPC (RJD, HSE, JPA, ...) pour leur apport lors de la rédaction des différents thèmes du livre.

Merci également à nos interlocuteurs de Dunod pour leurs conseils, la reprise du graphisme des figures, leur travail de relecture et de correction et également pour leur patience.

Légendes des courbes d'un régulateur

Cet ouvrage comporte de nombreuses figures représentant les signaux délivrés par les régulateurs lors des différents essais. Pour éviter d'annoter individuellement toutes ces courbes, nous avons utilisé la représentation suivante :



Glossaire

Sigle	Signification
AI	Analog Input : entrée analogique
AO	Analog output : sortie analogique
API	Automate programme industriel
BP	Bande proportionnelle
BP _c	Bande proportionnelle critique
C	Consigne du régulateur
CV	Coefficient de dimensionnement d'une vanne de régulation
DCS	Distributed Control System
E	Écart
FCV	Vanne régulatrice de débit
FMA	Vanne fermée par manque d'air
FT	Sur un schéma procédé : débitmètre Dans une équation : fonction de transfert
FY	Module de calcul sur un débit
G(p)	Fonction de transfert du régulateur
G _B	Gain de boucle
G _m	Fonction de transfert du modèle
G _R ou G _r	Gain du régulateur
G _{rc}	Gain critique du régulateur
G _S	Gain statique du procédé
G _{SM}	Gain statique du modèle
H _i (p)	Fonction de transfert
ITAE	Integrated Time of Absolute Error

Sigle	Signification
K	Coefficient de sensibilité d'un procédé intégrateur
K	Constante
K _{BC}	Gain de boucle critique
K _r ou K _R	Gain du régulateur
K _{RC}	Gain critique du régulateur
K _{RM}	Gain d'un régulateur de structure mixte
K _{RM1}	Gain d'un régulateur de structure mixte1
K _{RM2}	Gain d'un régulateur de structure mixte2
K _{RP}	Gain du régulateur de structure parallèle
K _{RS}	Gain du régulateur de structure série
K _u	Gain ultime
K _v	Coefficient de débit d'une vanne
LIC	Régulateur de niveau
LL	<i>Lead Lag</i> : module avance retard
LSH	Sécurité de niveau haut
LT	Capteur de niveau
M	Mesure
M	Grandeur de sortie
n	Ordre
OMA	Vanne ouverte par manque d'air
P	Opérateur de Laplace
P	Action Proportionnelle ou régulateur à action proportionnelle
PI	Actions proportionnelle et intégrale ou régulateur à actions proportionnelle et intégrale

Sigle	Signification
PIC	Régulateur de pression
PID	Actions proportionnelle, intégrale et dérivée ou régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée
PSL	Sécurité pression basse
PT	Capteur de température
Q_c, Q_f	Débit fluide chaud, débit fluide froid
Q_e, Q_s	Débit d'entrée, débit de sortie
Rpm	Répétitions par minute
RSP	<i>Remote Set point</i> : Consigne externe du régulateur
S_0	Sortie initiale
S	Sortie du régulateur
SBPA	Séquence binaire pseudo aléatoire
SM	Fonction de transfert servomoteur
SNCC	Système numérique de contrôle commande
SP	<i>Set point</i> : Consigne du régulateur
T_1, T_2	Température ou temps
T_d	Temps de dérivée
T_{dM1}	Temps de dérivée régulateur de structure mixte1
T_{dM2}	Temps de dérivée régulateur de structure mixte2
T_{dP}	Temps de dérivée régulateur de structure parallèle
T_{dS}	Temps de dérivée régulateur de structure série
T_i	Temps d'intégrale
T_{iM1}	Temps d'intégrale régulateur de structure mixte1
T_{iM2}	Temps d'intégrale régulateur de structure mixte2
T_{iP}	Temps d'intégrale régulateur de structure parallèle
T_{iS}	Temps d'intégrale régulateur de structure série
TIC	Régulateur de température

Sigle	Signification
TM	Temps de montée
TOR	Régulateur Tout Ou Rien
T_{osc}	Période des oscillations
Tr	Fonction de transfert du transmetteur (capteur)
TT	Capteur de température
TY	Module de calcul sur une température
U ou u	Signal d'excitation
V ou v	Commande
VA	Fonction de transfert vanne de régulation
W	Consigne du régulateur
X	Mesure
$X(p)$	Sortie
XV	Vanne de sectionnement
Y ou y	Sortie du régulateur
$Y_i(p)$	Entrée
Lettres grecques	
α (Alpha)	Coefficient d'interaction
ε (Epsilon)	Ecart mesure consigne
Δ (Delta)	Variation d'un paramètre Discriminant
θ (Tèta)	Constante de temps
$\theta_1, \theta_2,$	Température fluide caloporteur
λ (lambda)	Coefficient, gain de boucle
$\phi_e, \phi_s,$ (Phi)	Flux d'entrée, flux de sortie d'un système
φ	Déphasage
ω (Oméga)	Pulsation
τ (Tau)	Retard pur, temps mort

Notions fondamentales

1.1 Pourquoi réguler ?

Considérons un échangeur thermique, équipement process très répandu dans le monde industriel. Sous sa forme la plus simple un échangeur est constitué de deux tubes concentriques, dans lesquels circulent en général en sens inverse (on dit à contre-courant) deux fluides. Le tube intérieur contient le fluide (process) dont on veut modifier la température – l'augmenter ou la diminuer. Dans le tube extérieur circule un fluide caloporteur ou frigorigène qui apporte ou enlève de la chaleur au fluide process. Les échanges thermiques s'effectuent par conduction et par convection (Figure 1.1).

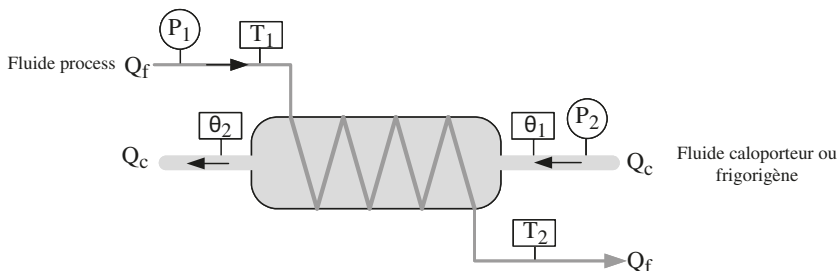


Figure 1.1

Le fonctionnement d'un échangeur dépend de grandeurs physiques décrites dans le Tableau 1.1.

Tableau 1.1

Fluide process	Fluide caloporteur
Pression d'entrée P_1	Pression d'entrée P_2
Débit massique Q_f	Débit massique Q_c
Température d'entrée T_1	Température d'entrée θ_1
Température de sortie T_2	Température de sortie θ_2
Caractéristiques du fluide : chaleur massique, conductivité thermique, etc.	Caractéristiques du fluide : chaleur massique, conductivité thermique, etc.

D'autres paramètres conditionnent le fonctionnement de l'échangeur : régime d'écoulement, surface d'échange, entartrage...

Dans un échangeur, on souhaite maintenir la température de sortie du fluide process à une certaine valeur ; cette grandeur est nommée la grandeur réglée. Cet objectif est atteint si toutes les grandeurs régissant le fonctionnement de l'équipement sont stables. L'évolution d'une des grandeurs entraînera la modification de la grandeur réglée. Les grandeurs modifiant la grandeur réglée sont appelées des perturbations.

Une perturbation est une grandeur non désirée qui interfère dans le fonctionnement d'un procédé. Pour un échangeur thermique, les pressions, débits, températures d'entrée, etc. sont des grandeurs perturbatrices. Leur effet sur la température de sortie est quasiment immédiat. D'autres perturbations peuvent avoir des effets à plus long terme, par exemple l'encrassement ou l'entartrage de l'échangeur.

Tous les procédés font l'objet de perturbations. C'est la présence de ces perturbations qui nécessite de mettre en place des boucles de régulation.

1.2 La boucle de régulation

1.2.1 Constitution d'une boucle de régulation

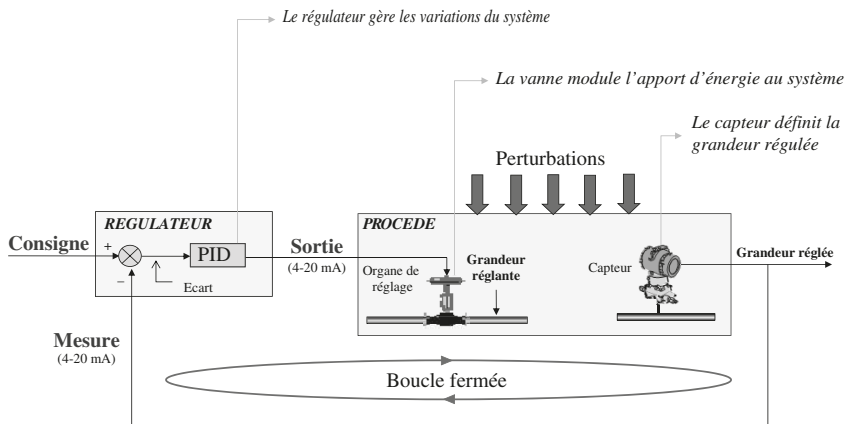


Figure 1.2 – Schéma de principe d'une boucle simple

Une boucle de régulation (voir Figure 1.2), sous sa forme la plus simple, se compose toujours des éléments suivants :

- un capteur délivrant un signal proportionnel à la grandeur mesurée, généralement un signal 4-20 mA¹ ;
- un régulateur qui commande *via* un signal normalisé 4-20 mA ;
- un organe de réglage, généralement une vanne de régulation.

1. Ces notions sont largement développées dans *Le Carnet du régleur*, Éditions Dunod.

1.3 Le régulateur

Le schéma de la Figure 1.2 est une structure en boucle fermée : le régulateur agit sur le procédé *via* l'organe de réglage et contrôle l'évolution de la grandeur réglée représentée par la mesure. Nous verrons dans la suite de ce livre que la régulation industrielle met en œuvre un algorithme de calcul appelé PID, ces lettres désignant les actions du régulateur dénommées : proportionnelle, intégrale et dérivée.

1.2.2 Rôle de la boucle de régulation

Les lois physiques qui lient grandeur réglante et grandeur réglée peuvent être altérées sous l'action des grandeurs non désirées : les perturbations.

Le rôle de la boucle de régulation est de compenser **automatiquement** et **en permanence** toute variation de la grandeur réglée afin qu'elle soit le plus proche de la consigne.

1.3 Le régulateur

1.3.1 Rôle

Dans une boucle de régulation, le régulateur joue un rôle stratégique : lors des variations de consigne, amener la mesure le plus rapidement possible sur la consigne, puis agir pour ramener la mesure sur la consigne lors d'une perturbation.

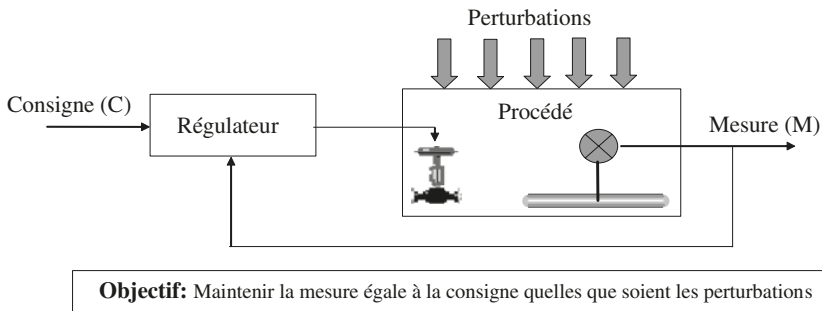


Figure 1.3 – Objectif de la régulation

1.3.2 Présentation du régulateur

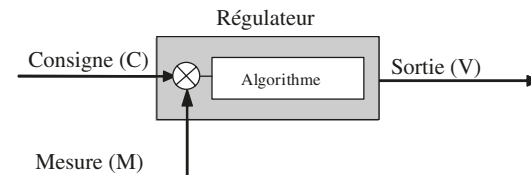


Figure 1.4 – Schéma de principe d'un régulateur

En première approche, un régulateur est une boîte matérielle ou logicielle comprenant deux entrées et une sortie. Les deux entrées sont :

- la mesure, signal délivré par le capteur qui est l'image du procédé ;
- la consigne, qui permet à l'utilisateur d'indiquer à l'appareil la valeur « cible » que doit atteindre la grandeur réglée. Cette consigne peut être :
 - ▷ interne : introduite à partir de la face avant de l'appareil. Un dispositif approprié permet à l'utilisateur d'ajuster l'amplitude de la consigne interne à la valeur désirée ;
 - ▷ externe : la valeur est délivrée par un autre dispositif (module de calcul, séquence, autre régulateur, etc.). Elle est introduite dans le régulateur, *via* une connexion particulière.

La sortie est calculée par un algorithme de régulation.

1.3.3 Algorithmes de régulation

L'écart mesure-consigne est calculé par un algorithme. On trouve sur le marché des régulateurs mettant en œuvre différents traitements : TOR (tout ou rien), PID (proportionnelle, intégrale, dérivée), à logique floue, multivariable, etc.

Compte tenu de l'orientation de ce livre et de l'offre du marché, nous aborderons dans la suite de ce texte principalement les régulateurs industriels PID.

1.3.4 Présentation de la face avant d'un régulateur

Comme nous le verrons à la section 1.14, consacrée à la technologie des régulateurs, un régulateur est disponible sous deux formes. La Figure 1.5 présente deux exemples de réalisation : un appareil indépendant prévu pour être installé dans un tableau (voir Figure 1.5b), et un bloc de fonction implanté dans un automate programmable industriel (API) ou dans un système numérique de contrôle commande (SNCC, voir Figure 1.5a).

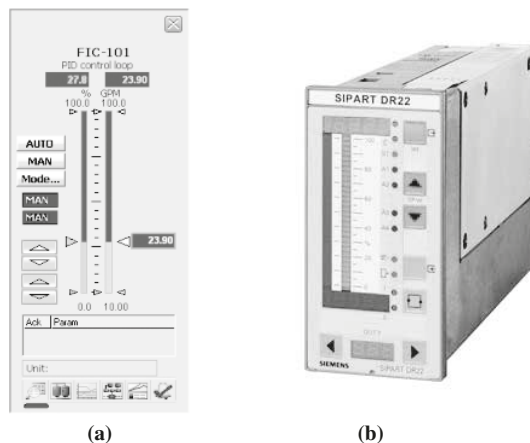


Figure 1.5 – Exemples de face avant. a : face avant régulateur, système Emerson Delta V ; b : face avant régulateur, Siemens Sipart DR22

Quelle que soit la solution adoptée, un régulateur est muni d'une interface homme-machine appelée face avant. Cette interface sert d'une part à afficher les informations de la boucle de régulation et d'autre part à donner à l'utilisateur les accès nécessaires à la manipulation de l'appareil, voire à sa configuration.

1.3.5 Éléments constitutifs d'une face avant

Les régulateurs industriels sont composés des mêmes éléments, cependant chaque constructeur en organise librement la disposition. La Figure 1.6 présente une synthèse des informations et commandes disponibles sur un régulateur.

Les informations comprennent :

- L'affichage de la mesure (signal issu du capteur), qui est généralement donné en échelle physique, sauf pour les niveaux, qui sont exprimés en pourcentage. La présentation peut être effectuée soit au moyen d'un barregraphe, soit sous forme numérique, ou les deux (voir Figure 1.5, face avant du Delta V) ;
- la consigne, qui est sur la même échelle que la mesure : les deux affichages sont disposés côte à côte pour faciliter la comparaison ;
- la sortie du régulateur, qui est le signal appliqué à l'organe de commande, typiquement un signal 4-20 mA. L'affichage de la valeur est effectué en pourcentage : 0 % = 4 mA, 100 % = 20 mA.

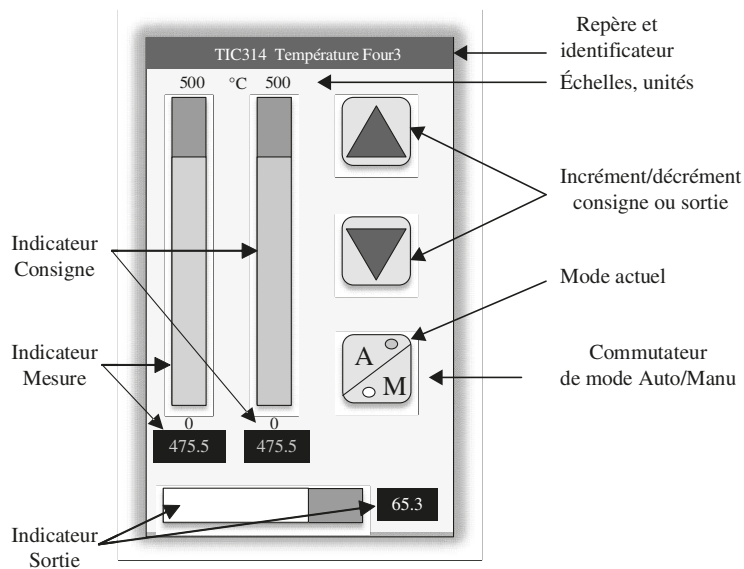


Figure 1.6 – Synthèse d'une face avant

Les commandes comprennent le bouton de mode automatique/manuel et le ou les dispositifs de réglage de la consigne interne ou de la sortie. Le réglage, autrefois effectué par un potentiomètre, se fait aujourd'hui par des touches d'incrément-décrément, par un curseur ou par introduction d'une valeur numérique selon la technologie employée.