

Table des matières

PRÉFACE	V
AVANT-PROPOS	VI
INTRODUCTION	1
1. ÉTUDE ET VÉRIFICATION DES RÉGULATEURS PID	5
1.1. Différents types de régulateurs	7
1.1.1. Constitution générale	7
1.1.2. Régulateur électronique	9
1.1.3. Régulateur numérique	11
1.1.4. Régulateur pneumatique	12
1.2. Signaux	13
1.2.1. L'échelon	13
1.2.2. La rampe	13
1.2.3. L'impulsion	13
1.3. Action proportionnelle	14
1.3.1. Fonction proportionnelle	14
1.3.2. Régulateur à action proportionnelle	15
1.3.2.1. Équation	15
1.3.2.2. Bande proportionnelle	16
1.3.2.3. Symbole de l'action proportionnelle	16
1.3.2.4. Réponse à un échelon	16
1.3.2.5. Réponse à une rampe	17
1.3.2.6. Vérification de l'action proportionnelle	17
1.4. Actions proportionnelle et intégrale	19
1.4.1. Notion pratique d'intégrale	19
1.4.2. Réponse d'un intégrateur	20
1.4.2.1. Réponse à un échelon	20
1.4.2.2. Dosage de l'action intégrale	21
1.4.3. Régulateur PI série	22
1.4.3.1. Équation	22
1.4.3.2. Symbole de l'action intégrale	23
1.4.3.3. Réponse à un échelon	23
1.4.3.4. Vérification de l'action intégrale	24
1.4.4. Régulateur PI parallèle	24

1.5. Actions proportionnelle et dérivée.....	26
1.5.1. Notion pratique de dérivée.....	26
1.5.2. Réponse d'un dérivateur.....	26
1.5.2.1. Réponse à une rampe.....	27
1.5.2.2. Dosage de l'action dérivée.....	28
1.5.3. Régulateur PD série.....	29
1.5.3.1. Équation.....	29
1.5.3.2. Symbole de l'action dérivée.....	29
1.5.3.3. Réponse à une rampe.....	29
1.5.3.4. Vérification de l'action dérivée.....	31
1.5.3.5. Régulateur PD avec dérivée sur la mesure.....	32
1.5.4. Régulateur PD parallèle.....	32
1.5.4.1. Régulateur PD avec dérivée sur l'écart.....	32
1.5.4.2. Régulateur PD avec dérivée sur la mesure.....	34
1.6. Structures des régulateurs PID.....	34
2. CARACTÉRISTIQUES DES PROCÉDÉS INDUSTRIELS.....	39
2.1. Procédés de fabrication continus et discontinus.....	42
2.1.1. Procédé continu.....	42
2.1.2. Procédé discontinu.....	42
2.2. Représentation d'un procédé et terminologie.....	43
2.2.1. Schéma de principe et schéma bloc.....	43
2.2.2. Procédé et instrumentation.....	44
2.3. Procédés monovarié et multivarié.....	46
2.4. Procédés stable et instable.....	48
2.4.1. Procédé stable.....	48
2.4.2. Procédé instable.....	49
2.5. Paramètres de la réponse d'un procédé.....	49
2.5.1. Procédé stable.....	50
2.5.2. Procédé instable.....	51
2.6. Caractéristique statique d'un procédé, linéarisation.....	52
2.6.1. Système linéaire.....	52
2.6.2. Caractéristique statique.....	53
2.6.2.1. Caractéristique statique d'un système non linéaire.....	53
2.6.2.2. Caractéristique statique d'un procédé industriel.....	53
2.6.2.3. Linéarisation de la caractéristique statique.....	55
2.7. Caractéristiques des vannes de régulation.....	56
2.7.1. Caractéristique intrinsèque de débit.....	56
2.7.1.1. Caractéristique de débit linéaire.....	56
2.7.1.2. Caractéristique de débit égal pourcentage.....	57
2.7.2. Vanne et circuit.....	57
2.7.3. Caractéristique installée.....	59
2.7.4. Application.....	61

3. PERFORMANCES D'UNE RÉGULATION.....	65
3.1. Stabilité.....	67
3.2. Paramètres de la réponse d'un système stable.....	68
3.2.1. Précision.....	68
3.2.2. Amortissement.....	69
3.2.3. Rapidité.....	70
3.3. Critères de performance d'une régulation.....	71
4. BOUCLES DE RÉGULATION.....	73
4.1. Régulation en boucle fermée.....	77
4.1.1. Principe.....	78
4.1.2. Rôle des actions PID dans la boucle fermée.....	79
4.1.2.1. Action proportionnelle.....	79
4.1.2.2. Action intégrale.....	82
4.1.2.3. Action dérivée.....	83
4.1.3. Méthodes de réglages d'une boucle fermée.....	84
4.1.3.1. Réglage par approches successives.....	85
4.1.3.2. Réglage à partir de l'identification du procédé.....	92
4.1.3.3. Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols en boucle fermée.....	96
4.2. Régulation en cascade.....	100
4.2.1. Étude du fonctionnement.....	101
4.2.1.1. Cascade sur grandeur réglante.....	101
4.2.1.2. Cascade sur grandeur intermédiaire.....	102
4.2.1.3. Terminologie utilisée.....	103
4.2.2. Mise au point de la régulation en cascade.....	104
4.2.2.1. Choix du sens d'action des régulateurs.....	104
4.2.2.2. Réglage de la boucle interne.....	104
4.2.2.3. Passage manuel/automatique/cascade sans à-coups.....	105
4.2.2.4. Réglage de la boucle externe.....	106
4.2.2.5. Résultats comparatifs.....	107
4.2.3. Exemples de régulations en cascade.....	107
4.3. Régulation de rapport.....	109
4.3.1. Principe.....	109
4.3.2. Exemple d'une régulation de rapport.....	110
4.3.3. Relation entrée sortie du relais de rapport.....	111
4.3.4. Mise au point de la régulation de rapport.....	112
4.3.4.1. Calcul des coefficients.....	113
4.3.4.2. Réglage de la boucle fermée.....	118
4.3.5. Exemple de régulations de rapport.....	118
4.4. Régulation a priori.....	121
4.4.1. Régulation en boucle ouverte ou a priori.....	121
4.4.2. Association boucle ouverte et boucle fermée.....	123
4.4.3. Étude du sommateur.....	123
4.4.4. Mise au point de la boucle ouverte et de la boucle fermée.....	124
4.4.4.1. Mise au point de la boucle ouverte.....	126
4.4.4.2. Mise au point de la boucle fermée.....	130
4.4.5. Exemples de régulation a priori.....	132
4.5. Régulation split-range.....	134
4.5.1. Principe.....	134
4.5.2. Applications.....	135

5. RÉGULATEURS ET RÉGULATION DISCONTINUS	137
5.1. Régulation par tout ou rien avec régulateur et organe de réglage à deux positions	140
5.1.1. Étude du régulateur	141
5.1.1.1. Constitution générale.....	141
5.1.1.2. Fonctionnement du régulateur	142
5.1.2. Étude de la régulation tout ou rien	142
5.1.2.1. Relations entre la grandeur réglée et le procédé.....	143
5.1.2.2. Régulation tout ou peu.....	144
5.1.3. Mise au point de la régulation T.O.R. avec seuil.....	145
5.1.4. Limites d'utilisation de la régulation T.O.R.....	145
5.1.5. Application pratique.....	146
5.2. Régulation avec régulateur discontinu modulé PID associé à un organe de réglage à deux positions	146
5.2.1. Études du régulateur.....	147
5.2.1.1. Présentation générale.....	147
5.2.1.2. Comportement en manuel.....	148
5.2.1.3. Étude du comportement en automatique.....	148
5.2.2. Mise au point de la régulation.....	153
5.2.2.1. Réglages par approches successives.....	153
5.2.2.2. Réglage des actions par la méthode des oscillations.....	154
5.2.3. Limite d'utilisation.....	155
5.2.4. Application.....	155
5.2.4.1. Réglage des actions par approches successives.....	155
5.2.4.2. Réglage des actions par la méthode des oscillations.....	157
5.3. Régulation chaud-froid avec régulateur discontinu modulé PID	158
5.3.1. Étude du régulateur.....	158
5.3.2. Fonctionnement de la régulation.....	159
5.3.3. Mise au point de la régulation.....	159
5.4. Régulation avec régulateur discontinu modulé PID et organe de réglage motorisé	160
5.4.1. Étude du régulateur.....	160
5.4.1.1. Présentation.....	160
5.4.1.2. Comportement du régulateur en manuel.....	162
5.4.1.3. Comportement du régulateur en automatique.....	163
5.4.2. Mise au point de la régulation.....	167
5.4.3. Applications.....	167
6. FONCTIONS DE TRANSFERT APPLIQUÉES A LA RÉGULATION	169
6.1. Expression temporelle d'un signal et transformé en p.....	172
6.2. Fonction de transfert et schéma fonctionnel.....	173
6.3. Fonction de transfert des modules PI et D.....	175
6.3.1. Module proportionnel.....	175
6.3.2. Module intégrateur.....	175
6.3.3. Module dérivateur.....	177
6.4. Association des schémas fonctionnels et fonctions de transfert équivalentes.....	178
6.5. Schémas fonctionnels des régulateurs.....	178
6.6. Module de retard pur.....	179
6.7. Système du premier ordre.....	180
6.7.1. Schéma fonctionnel d'un système du premier ordre.....	181

6.7.2. Système du premier ordre avec gain et retard.....	181
6.7.3. Mise en série de plusieurs systèmes du premier ordre.....	182
6.7.4. Filtrage.....	182
6.8. Module dérivée filtrée	184
6.8.1. Schéma fonctionnel et dérivée filtrée.....	184
6.8.2. Étude de la réponse à un échelon.....	185
6.9. Module avance retard de phase	186
6.9.1. Fonction de transfert et schéma fonctionnel.....	186
6.9.2. Réponse à un échelon.....	186
6.10. Fonction de transfert d'un procédé	187
6.10.1. Procédé stable.....	187
6.10.2. Procédé instable.....	192
6.11. Schéma fonctionnel d'une boucle de régulation	194
7. IDENTIFICATION DES PROCÉDÉS	195
7.1. Identification des procédés naturellement stables	197
7.1.1. Méthode d'identification en boucle ouverte.....	197
7.1.1.1. Procédure.....	198
7.1.1.2. Recherche des paramètres.....	198
7.1.1.3. Application.....	200
7.1.2. Méthode d'identification en boucle fermée.....	201
7.1.2.1. Procédure.....	201
7.1.2.2. Recherche des paramètres.....	203
7.1.2.3. Application.....	203
7.2. Identification des procédés naturellement instables	206
7.2.1. Méthode d'identification en boucle ouverte.....	206
7.2.1.1. Procédure.....	206
7.2.1.2. Recherche des paramètres.....	207
7.2.1.3. Application.....	208
7.2.2. Méthode d'identification en boucle fermée.....	209
7.2.2.1. Procédure.....	209
7.2.2.2. Recherche des paramètres.....	210
7.2.2.3. Application.....	210
8. SYSTÈMES NUMÉRIQUES DE CONTRÔLE COMMANDE DE PROCÉDÉ	213
8.1. De la régulation analogique à la régulation numérique	215
8.2. Introduction aux systèmes numériques	219
8.2.1. Informations numériques.....	219
8.2.1.1. Données numériques en binaire pur.....	220
8.2.1.2. Données codées.....	222
8.2.1.3. Instructions.....	223
8.2.2. Structure fonctionnelle d'un système numérique.....	223
8.3. Aspect matériel d'un système numérique	224
8.3.1. Unité centrale.....	224
8.3.2. Mémoires.....	225
8.3.2.1. Mémoires de travail.....	225
8.3.2.2. Mémoires de masse.....	226
8.3.3. Interfaces de procédés.....	227
8.3.3.1. Interfaces d'entrées analogiques, résolution quantum.....	228
8.3.3.2. Interfaces de sorties analogiques, résolution.....	229
8.3.3.3. Interfaces d'entrées et sorties logiques.....	230

8.3.4. Interfaces périphériques opérateur.....	230
8.3.5. Liaisons numériques.....	231
8.4. Aspect logiciel d'un système numérique.....	232
8.4.1. Langages de programmation.....	232
8.4.2. Configuration et programmation.....	234
8.4.2.1. Configuration.....	234
8.4.2.2. Programmation.....	235
8.5. Différents types de systèmes numériques de contrôle commande de procédés.....	235
8.5.1. Régulateurs numériques.....	236
8.5.2. Systèmes numériques modulaires.....	237
8.5.3. Systèmes numériques répartis.....	238
8.5.4. Systèmes numériques centralisés.....	239
8.6. Influence du traitement numérique sur la régulation.....	240
8.6.1. Temps de cycle de calcul.....	240
8.6.1.1. Choix T_e	240
8.6.1.2. Charge de l'unité centrale.....	241
8.6.1.3. Conclusions sur T_e	242
8.6.2. Application sur la stabilité d'une régulation numérique.....	242
9. BOUCLES DE RÉGULATION NUMÉRIQUES.....	245
9.1. Comment parvenir au correcteur idéal.....	248
9.1.1. Théorie sur l'asservissement d'une mesure.....	248
9.1.2. Correcteur idéal sur procédé du $n^{\text{ème}}$ ordre.....	250
9.1.3. Correcteur idéal sur procédé modélisé suivant un premier ordre avec retard...	251
9.1.4. Conclusions.....	251
9.2. Régulation par correcteur de SMITH.....	253
9.2.1. Étude de la régulation.....	253
9.2.1.1. Première forme.....	253
9.2.1.2. Deuxième forme.....	255
9.2.2. Mise au point d'une régulation par C.T.M.....	256
9.2.2.1. Identification.....	256
9.2.2.2. Réalisation du C.T.M.....	256
9.2.2.3. Sens d'action du C.T.M.....	257
9.2.2.4. Affichage et test des coefficients du C.T.M.....	259
9.2.2.5. Réglages définitifs du régulateur PI.....	261
9.2.3. Exemple pratique.....	261
9.2.3.1. Réglages.....	261
9.2.3.2. Comparaison entre le mode de régulation PI et le correcteur de SMITH.....	263
9.2.3.3. Conclusion.....	266
9.3. Régulation par correcteur à simulation interne.....	266
9.3.1. Principe de la commande.....	266
9.3.2. Recherche de la fonction de transfert du correcteur.....	267
9.3.2.1. Équation générale.....	267
9.3.2.2. Détermination de la fonction de transfert du correcteur sur un procédé modélisé suivant un premier ordre avec retard.....	268
9.3.3. Régulation par correcteur CZ.....	269
9.3.4. Commande par retour d'état sur procédé modélisé par un premier ordre avec retard.....	270
9.3.4.1. Philosophie générale de la commande.....	270
9.3.4.2. Recherche de l'algorithme de commande.....	272

9.3.5. Commande par retour d'état avec modèle de référence simplifié.....	276
9.3.6. Mise au point d'une régulation par correcteur à simulation interne.....	279
9.3.7. Exemple pratique.....	283
9.3.8. Généralisation de la commande par modèle interne de référence.....	285
9.3.9. Avantages d'une régulation numérique.....	286
10. RÉGULATION DES PROCÉDÉS MULTIVARIABLES.....	287
10.1. Définition d'un procédé multivariable.....	289
10.2. Exemples de procédés multivariables.....	291
10.2.1. Colonne à distiller.....	291
10.2.2. Mélangeur.....	292
10.3. Régulation de procédés multivariables.....	293
10.4. Objectifs d'une régulation multivariable.....	293
10.5. Découpleur.....	294
10.5.1. Rôle du découpleur.....	294
10.5.2. Recherche de la fonction de transfert du découpleur.....	295
10.6. Mise au point d'une régulation multivariable.....	296
ANNEXE, SYMBOLISATION.....	299
INDEX.....	303
BIBLIOGRAPHIE.....	305

Introduction

La régulation des procédés industriels regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une grandeur physique à régler, égale à une valeur désirée, appelée consigne.

Lorsque des perturbations ou des changements de consigne se produisent, la régulation provoque une action correctrice sur une grandeur physique du procédé, appelée grandeur réglante.

Dans l'exemple de la figure 1, la température d'un fluide est réglée en agissant sur le débit de vapeur de l'échangeur et ceci quelles que soient les perturbations : débit de charge, température d'entrée de la charge...

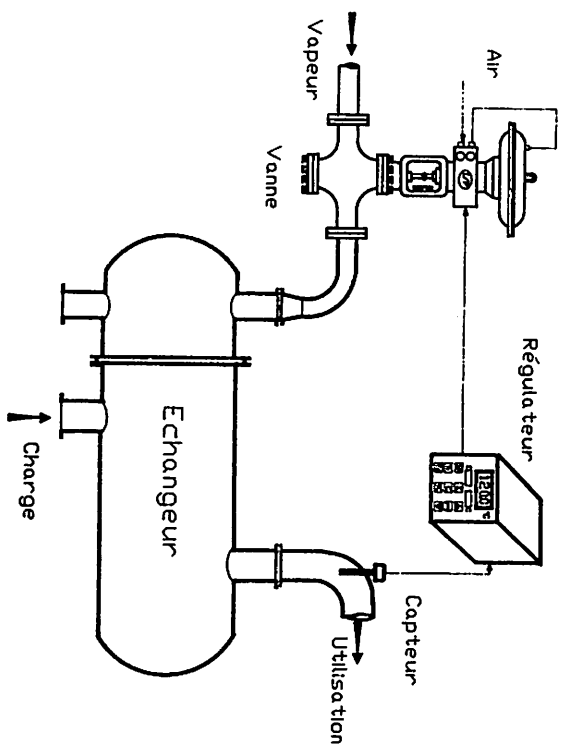


Fig. 1. : Régulation de température d'un échangeur thermique.

Dans le cas de la figure 1, le capteur de température, le régulateur et la vanne, représentent le matériel qui permet de réaliser la technique de régulation la plus courante qui est la boucle fermée.

Suivant les procédés et les objectifs à réaliser, il existe une grande variété de matériels et de techniques.

Parmi les matériels :

- Régulateurs monoblocs analogiques et numériques.
- Systèmes numériques de contrôle commande de procédé.
- Opérateurs de calcul arithmétiques et dynamiques.
- ...

Parmi les techniques :

- Régulation en boucle fermée.
- Régulation discontinue.
- Régulation cascade.
- Régulation à priori.
- Régulation split-range.
- Régulation de rapport.
- Régulation par correcteur de SMITH.
- Régulation par modèle de référence.

Cet ouvrage a pour but principal de faire le point sur le matériel, en privilégiant la fonction plutôt que la technologie, et d'expliquer le fonctionnement et la mise au point des boucles de régulation.

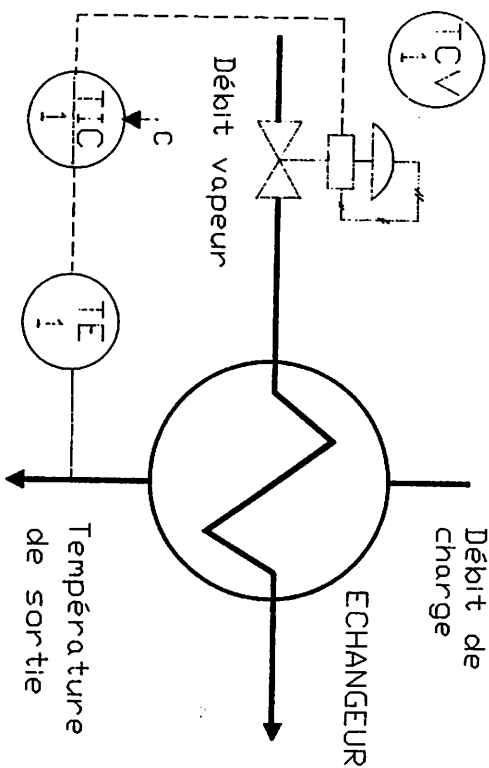


Fig.2 : P.C.F. d'un échangeur thermique.

Des éléments complémentaires indispensables tels que les notions pratiques sur les fonctions de transfert, l'identification des procédés et les systèmes numériques sont également développés.

La symbolisation des instruments utilisée dans les P.C.F. (plan de circulation des fluides) de cet ouvrage est donnée en annexe.

La figure 2, représente, par exemple, le P.C.F. du schéma de la figure 1.

Étude et vérification des régulateurs PID

1.1 Différents types de régulateurs PID.....	7
1.2 Signaux.....	13
1.3 Action proportionnelle.....	14
1.4 Actions proportionnelle et intégrale.....	18
1.5 Actions proportionnelle et dérivée.....	25
1.6 Structures des régulateurs.....	34

NOTATIONS UTILISÉES DANS LE CHAPITRE 1

a	: Amplitude d'un échelon ou pente d'une rampe.
BP %	: Bande proportionnelle.
C	: Consigne, signal de consigne.
D	: Dérivateur.
E	: Entrée ou signal d'entrée.
G	: Gain.
G_r	: Gain d'un régulateur.
I	: Intégrateur.
K	: Facteur de proportionnalité.
M	: Mesure, signal de mesure.
n	: Nombre de répétitions par unité de temps.
P	: Module proportionnel, action proportionnelle.
S	: Sortie, signal de sortie.
S_0	: Sortie d'un régulateur PI ou PID pour $M = C$.
S_0'	: Sortie d'un régulateur P ou PD pour $M = C$.
t	: Variable temps.
T_i	: Temps d'intégrale.
T_d	: Temps de dérivée.
x	: Écart mesure consigne.
∞	: Valeur (théorique) infiniment grande.
ΔC	: Variation de consigne.
ΔE	: Variation du signal d'entrée.
ΔM	: Variation du signal de mesure.
ΔS	: Variation du signal de sortie.
Δt	: Variation de temps.

Avant d'effectuer la mise au point d'une boucle de régulation, qui consiste à déterminer par différentes méthodes les valeurs des actions à afficher sur le régulateur, il est nécessaire d'étudier le régulateur seul, hors de la boucle. L'étude du régulateur se fait en trois étapes :

- Étude des fonctions proportionnelle P, intégrale I et dérivée D.
- Détermination de la structure qui consiste à rechercher l'équation mathématique (combinaison des fonctions P, I et D).
- Vérification de la validité des actions P, I et D affichées.

Ces trois points font l'objet du présent chapitre.

1.1 DIFFÉRENTS TYPES DE RÉGULATEURS

1.11 CONSTITUTION GÉNÉRALE

La figure 1.1 montre la constitution interne d'un régulateur. Quelle que soit la technologie, on distingue :

- *Les signaux :*

- 1 : Entrée mesure : ce signal issu du transmetteur, représente la grandeur à régler.
- 2 : Consigne externe : provient d'un instrument extérieur.
- 3 : Sortie : signal de commande de l'organe de réglage (vanne...)

L'échelle standard la plus utilisée est : 4 à 20 mA.

- *Les blocs :*

- 4 : Générateur de consigne.
- 5 : Module PID : en automatique, la sortie de ce bloc est celle du régulateur. La position automatique correspond au fonctionnement normal du régulateur.

- 6 : Limiteur de sortie : limite le signal de sortie en position automatique à des valeurs haute et basse préfixées.
 7 : Commande manuelle : Générateur de sortie manuelle.
 8 : Détecteur d'écart entre la mesure et la consigne.

— **Les réglages :**

- 9 : Réglage de consigne interne.
 10 : Réglage des actions P, I et D.
 11 : Réglage des limites haute et basse.
 12 : Réglage de la sortie du régulateur en position manuelle.

— **Les sélecteurs :**

- 13 : Sélecteur de consigne interne ou consigne externe.
 14 : Sélecteur du sens d'action du régulateur.
 15 : Sélecteur de fonctionnement automatique ou manuel.

— **Les indicateurs :**

- 16 : Indicateur de consigne.
 17 : Indicateur de mesure.
 18 : Indicateur d'écart Mesure — Consigne.
 19 : Indicateur de sortie.

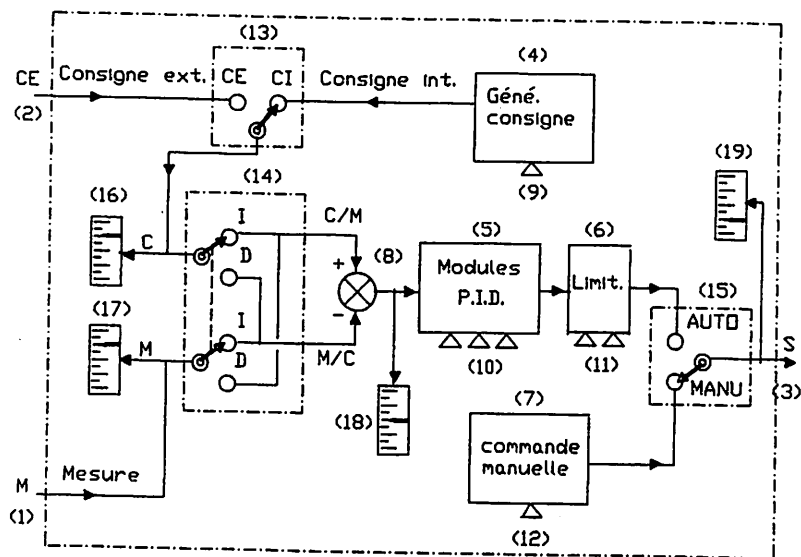


Fig. 1.1 : Constitution interne d'un régulateur.

Le tableau 1.1 indique les principaux symboles et appellations utilisés sur les régulateurs.

Tableau 1.1 : Symboles utilisés sur les régulateurs.

MESURE	M P.V. (process variable) X
SORTIE	S OUT ou OUTPUT Y
CONSIGNE	C S.P. (set point) W
Ecart (M - C)	x ou E (erreur)
CONSIGNE INTERNE ou EXTERNE	INT ou EX C.I. ou C. E. L (locale) ou D (distance) L (local) ou R (remote)
CONSIGNE SUIVEUSE (de mesure)	Tracking P.V.T. (process variable tracking)
DIRECT ou INVERSE	D ou I INC. (increase) ou DEC. (decrease) N ou U (+) ou (-)
MANUEL ou AUTO	M ou A MAN. ou AUT. MANUAL ou AUTO
LIMITES HAUTE et BASSE	O. L. et O. H. L. B. et L. H.

Pour l'étude des actions, seul le fonctionnement en automatique est pris en compte, d'où l'utilisation du schéma figure 1.2 que l'on retrouvera dans les paragraphes suivants.

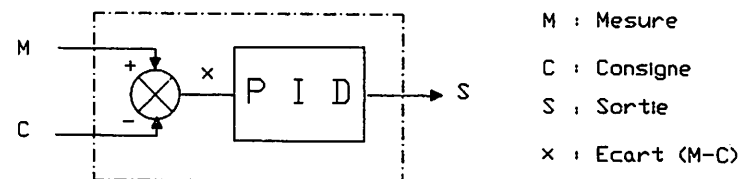


Fig. 1.2 : Représentation simplifiée d'un régulateur en fonctionnement automatique.

1.12 RÉGULATEUR ÉLECTRONIQUE

Ces régulateurs utilisent une électronique analogique, à base d'amplificateurs opérationnels. Ils cèdent le pas à la technologie numérique, mais sont encore nombreux dans l'industrie.

La figure 1.3 montre un exemple de réalisation où apparaissent les différents indicateurs, sélecteurs, et points de réglage correspondant au schéma de principe de la figure 1.1

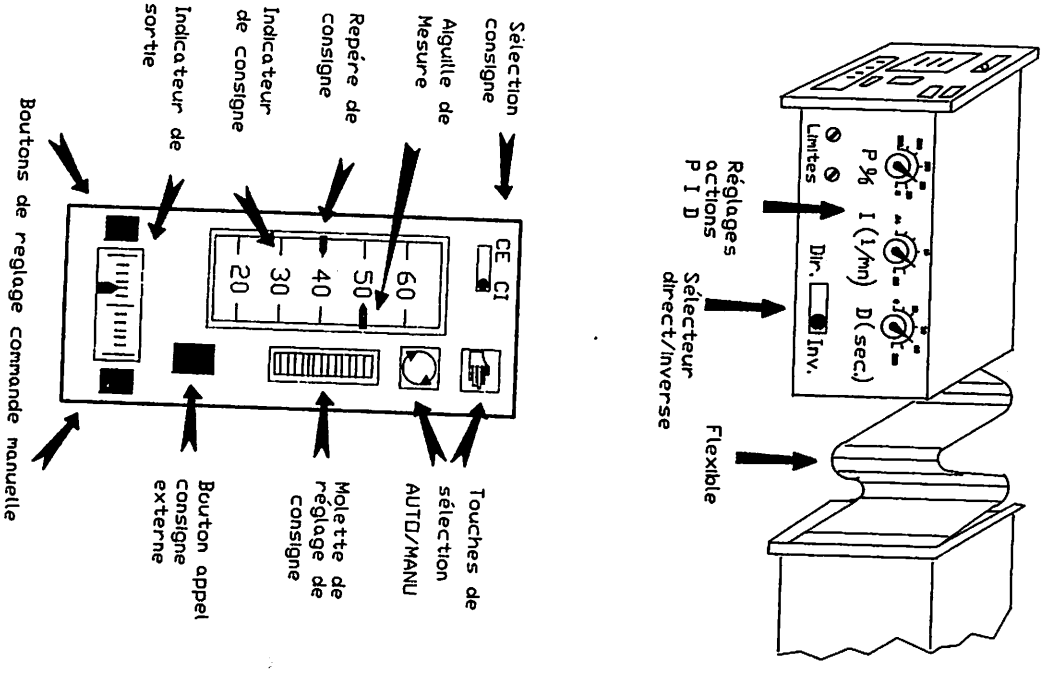


Fig. 1.3 : Exemple de régulateur électronique.

En ce qui concerne les valeurs d'actions, on peut donner comme exemples de plages de réglage :

- Bande proportionnelle : de 3 à 400 %.
- Intégrale : de 0.05 à 40 minutes.
- Dérivée : de 0 à 5 minutes.

Note : Le bouton poussoir d'équilibrage de consigne sert pour la commutation de consigne interne à consigne externe, sans perturber la sortie du régulateur. Il est utile dans le cas d'une régulation cascade. Le fait d'appuyer sur le bouton permet de visualiser la consigne externe à la place de la mesure.

1.13 RÉGULATEUR NUMÉRIQUE

La différence fondamentale dans la présentation de ces régulateurs est un clavier opérateur, intégré ou indépendant (microconsole), permettant d'émettre ou de recevoir des données (fig. 1.4).

La technologie numérique permet avec une grande souplesse, une extension des possibilités du régulateur.

Ci-dessous :

- Possibilité d'avoir plusieurs entrées.
- Choix du signal d'entrée (courant, tension, fréquence, couple thermique, sonde platine, ...).
- Traitement du signal d'entrée (extraction de racine carrée, filtrage, linéarisation, ...).
- Mise à l'échelle (valeur et format) des indicateurs.

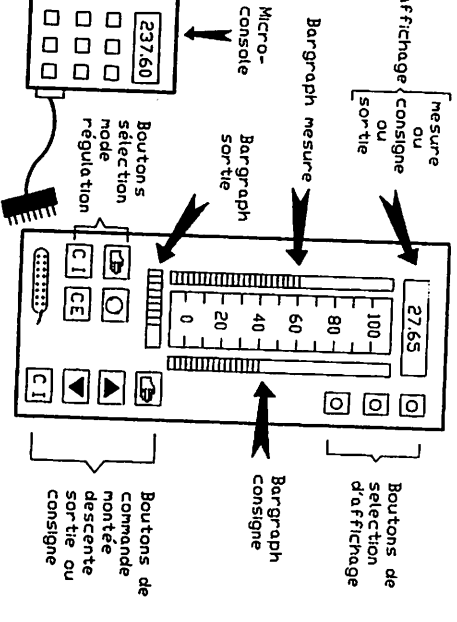


Fig. 1.4 : Exemple de face avant de régulateur numérique.

- Choix du type d'alarme, soit sur la mesure, soit sur l'écart.
- Affichage précis des données telles que actions, limites, ...
- Equilibrages automatiques.
- Choix du mode de dérivée, soit sur la mesure, soit sur l'écart.
- Consigne suivieuse (tracking) : en position manuelle, la consigne suit la mesure.

La technologie numérique permet, dans certains cas, au régulateur de calculer lui-même, les actions à afficher. On distingue :

- Les régulateurs auto-régulants qui calculent les actions PID à un point de fonctionnement donné, et ce à partir d'une intervention humaine.
- Les régulateurs auto-adaptifs qui calculent et ajustent en permanence les paramètres de leur algorithme (PID ou autres) en fonction de l'évolution du procédé.

Une liaison numérique (chapitre 8) permet de relier et de faire communiquer le régulateur avec d'autres instruments tels que : superviseur, calculateur ou autres régulateurs.

1.14 RÉGULATEUR PNEUMATIQUE

Les régulateurs pneumatiques (fig. 1.5) toujours présents sur le marché, ont un aspect similaire et des possibilités identiques à celles des régulateurs électroniques.

Les signaux d'entrée et de sortie, sont des pressions d'air modulées, dont l'échelle est généralement 0.2 à 1 bar. La consigne externe est souvent en option.

Un moteur pas à pas, permet de piloter le point de consigne dans le cas d'une commande par calculateur.

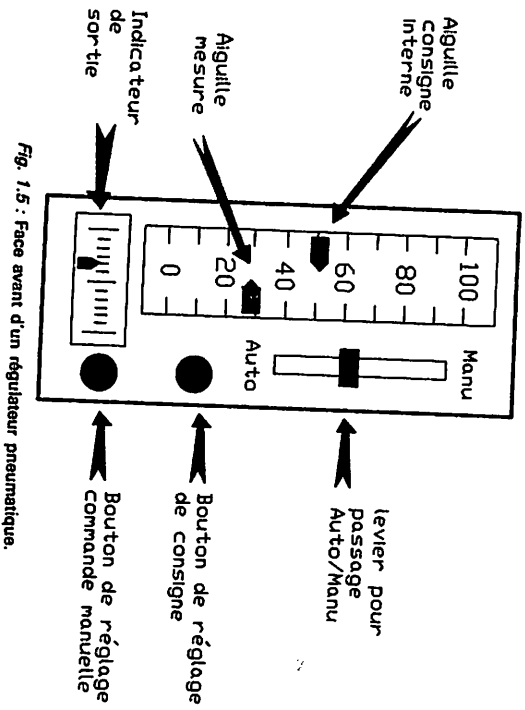


Fig. 1.5 : Face avant d'un régulateur pneumatique.

1.2 SIGNAUX

Pour vérifier un régulateur PID, on applique à son entrée soit un signal échelon pour la vérification de l'action proportionnelle et intégrale, soit un signal rampe pour la vérification de l'action dérivée. En plus de ces deux signaux, on peut observer sur la sortie d'un régulateur, le signal impulsion si la dérivée est présente.

1.21 L'ÉCHELON

Il correspond à une variation brusque, pour aboutir à une valeur constante indépendante du temps.

La variation d'amplitude se représente en fonction du temps par la relation : $E(t) = a$.

En pratique on écrit : $E = a$

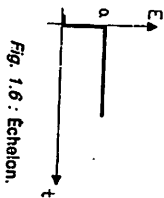


Fig. 1.6 : Echelon.

Le régulateur fonctionnant le plus souvent avec des signaux 4 à 20 mA, l'échelon est obtenu par un générateur de courant ou la sortie manuelle d'un simple détendeur.

1.22 LA RAMPE

Ce signal varie proportionnellement au temps. La vitesse de cette variation est appelée pente.

$E = a.t$

La pente a s'exprime en amplitude par unité de temps. (mA/mn, Volt/mn, %/s, etc...).

Pour élaborer une rampe on peut utiliser un générateur du type intégrateur ou un régulateur à action intégrale.

1.23 L'IMPULSION

Il s'agit d'une variation brutale de courte durée, observée par exemple à la sortie d'un régulateur à action dérivée, dont l'entrée est soumise à un échelon.

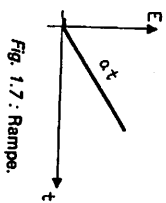


Fig. 1.7 : Rampe.

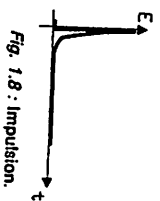


Fig. 1.8 : Impulsion.

1.3 ACTION PROPORTIONNELLE

1.31 FONCTION PROPORTIONNELLE

La majorité des instruments (transmetteur, convertisseur,...) ont leur entrée E et leur sortie S qui varie dans un rapport K constant.

$$\frac{S}{E} = K \text{ soit } \boxed{S = K.E}$$

Cette relation traduit la fonction proportionnelle, K est le facteur de proportionnalité dont l'unité dépend de celles de E et de S.

Exemple : Soit un transmetteur de pression :

- Échelle d'entrée : 0 à 5 bars.
- Échelle de sortie : 0 à 10 Volts.

$$K = \frac{10}{5} \text{ Volts par bar d'où } K = 2 \text{ Volts/bar.}$$

La sortie s'exprime par la relation : $S = 2.E$.

Dans le cas d'un régulateur, le facteur K est appelé gain G_r , du fait que les signaux d'entrée E et de sortie S s'expriment dans les mêmes unités ou en pourcentage.

La représentation graphique de la fonction proportionnelle peut s'effectuer de deux façons :

- la représentation de la sortie S d'un instrument en fonction de son entrée E.

La figure 1.9 représente la courbe théorique du transmetteur de l'exemple précédent.

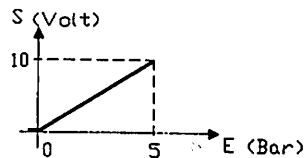


Fig. 1.9.

- la représentation de l'entrée et de la sortie en fonction du temps.

Si on soumet l'entrée d'un instrument du type proportionnel à un signal E qui évolue en fonction du temps, la variation de sortie ΔS est à chaque instant égale à la variation d'entrée ΔE multipliée par le gain G.

La figure 1.10 montre la réponse d'un instrument du type proportionnel de gain $G = 2$.

Module proportionnel ($G = 2$)

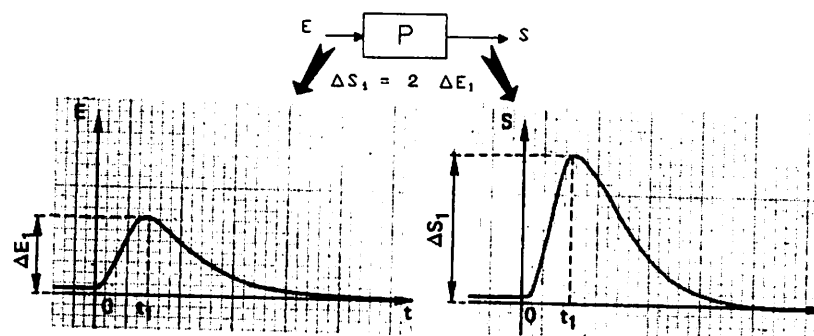


Fig. 1.10 : Réponse d'un instrument du type P.

1.32 RÉGULATEUR A ACTION PROPORTIONNELLE

1.321 Équation

L'entrée du bloc proportionnel reçoit l'écart mesure-consigne (fig. 1.11).

$$x = M - C$$

La sortie S d'un régulateur de sens direct est donnée par la relation :

$$\boxed{S = G_r (M - C) + S_0'}$$

G_r : gain du régulateur.

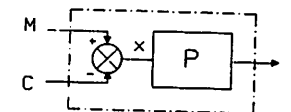
S_0' = Constante réglable ou préfixée généralement à 50 % du signal de sortie. S_0' correspond à la sortie du régulateur en automatique pour $M = C$. Ce terme s'appelle intégrale manuelle ou centrage de bande.

On distingue deux sens d'action :

- sens direct : dans ce cas les signaux de mesure et de sortie varient dans le même sens.
- sens inverse : dans ce cas les signaux de mesure et de sortie varient en sens opposés.

Dans le cas d'un régulateur de sens inverse $x = C - M$, la relation est :

$$\boxed{S = - G_r (M - C) + S_0'}$$



M : mesure
C : consigne
S : sortie
x : écart (M - C)
Fig. 1.11 : Sens direct.

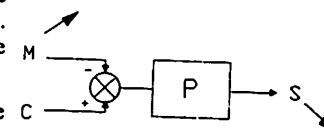


Fig. 1.12 : Sens inverse.

1.322 Bande proportionnelle

L'action proportionnelle d'un régulateur s'exprime soit par le gain G_r , soit par la bande proportionnelle BP. Cette dernière est définie comme la variation, en pourcentage, de l'entrée du régulateur nécessaire pour que la sortie varie de 100 %.

Les relations entre le gain G_r et la bande proportionnelle BP exprimée en % sont :

$$\text{BP \%} = \frac{100}{G_r} \quad \text{et} \quad G_r = \frac{100}{\text{BP \%}}$$

Le tableau 1.2 donne la correspondance de quelques valeurs.

Tableau 1.2 : Tableau de correspondance entre G_r et BP %.

G_r	0	0,2	0,4	0,5	0,8	1	1,2	1,4	1,8	2	2,5	3	4	5	∞
BP %	∞	500	250	200	125	100	83,3	71,4	55,5	50	40	33,3	25	20	0

1.323 Symboles de l'action proportionnelle

Les symboles utilisés par les constructeurs pour repérer l'action proportionnelle sont :

- Pour le gain : G, K, K_p, \dots
- Pour la bande proportionnelle : BP, PB, $Xp\%$, P %, ...

Lorsque S_0 est réglable, les symboles utilisés sont : MR, CB...

1.324 Réponse à un échelon

La figure 1.13 représente la réponse d'un régulateur P à un échelon. Les conditions initiales sont $M = C$ et $S = S_0$.

A l'instant t_0 , un échelon d'amplitude a , est effectué sur l'entrée mesure. La sortie du régulateur varie suivant un échelon d'amplitude $G_r a$.

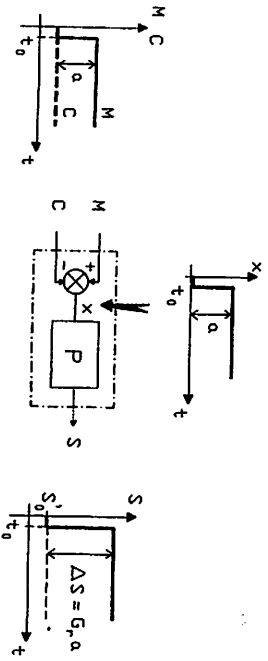


Fig. 1.13 : Réponse à un échelon de mesure.

Cette réponse montre que pour diminuer l'action proportionnelle, il faut diminuer G_r ou augmenter BP %.

1.325 Réponse à une rampe

La figure 1.14 représente la réponse d'un régulateur P à une rampe. Les conditions initiales sont $M = C$ et $S = S_0$.

A l'instant t_0 , une rampe de pente a , est effectuée sur l'entrée mesure. La sortie du régulateur varie suivant une rampe de pente égale à $G_r a$.

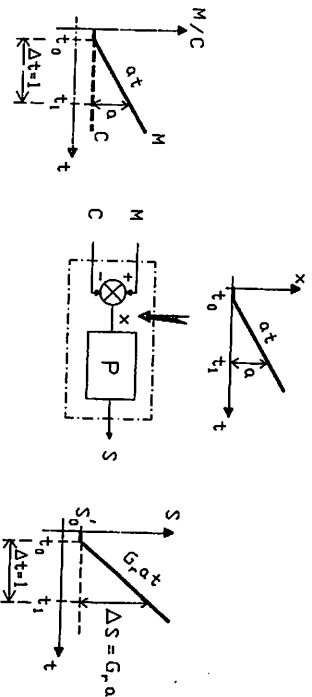


Fig. 1.14 : Réponse à une rampe de mesure.

1.326 Vérification de l'action proportionnelle

La figure 1.15 illustre le montage à effectuer pour la vérification de l'action proportionnelle d'un régulateur. Dans cet exemple la procédure est la suivante :

- Régler la sortie manuelle du régulateur à environ 50 %.
- Afficher le gain à vérifier, par exemple : $G_r = 2$ ou BP % = 50 %.
- Régler l'action intégrale au minimum (voir paragraphe 1.4).
- Supprimer l'action dérivée ($T_d = 0$).
- Annuler l'écart mesure consigne.
- Passer en automatique.
- Effectuer un échelon de mesure à l'aide du générateur.
- Mesurer sur l'enregistrement les variations de sortie ΔS et d'entrée ΔM du régulateur.

Le rapport $\Delta S/\Delta M$ est le gain réel du régulateur ; on vérifie qu'il correspond à celui affiché.

Il est conseillé de vérifier plusieurs valeurs de l'action proportionnelle.

La vérification peut également se faire en remplaçant l'enregistreur par des indicateurs. Le gain est égal au rapport des variations d'entrée et de sortie lues sur les indicateurs.

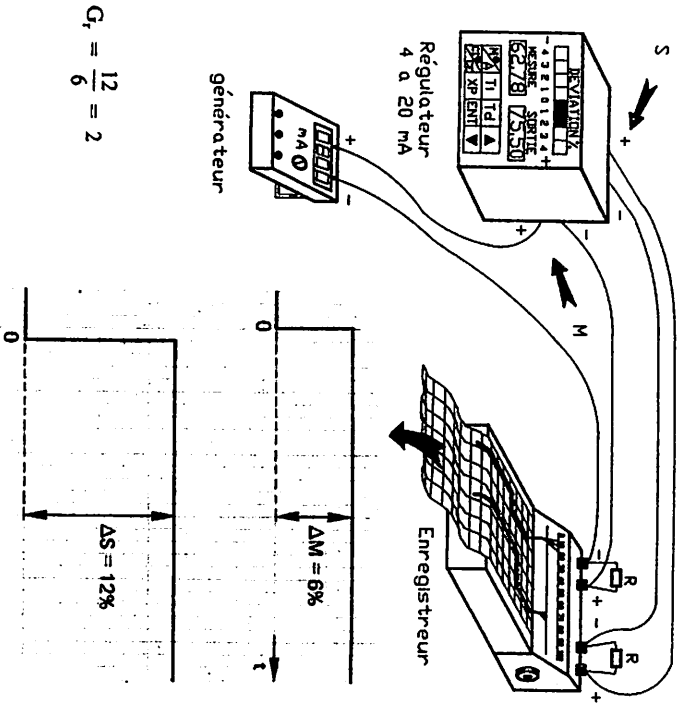


Fig. 1.15: Vérification de l'action P d'un régulateur électronique ou numérique.

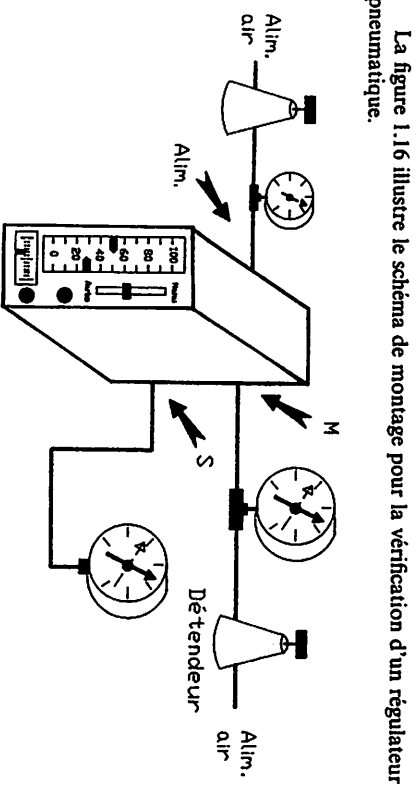


Fig. 1.16: Vérification de l'action P d'un régulateur pneumatique.

1.4 ACTIONS PROPORTIONNELLE ET INTÉGRALE

1.41 NOTION PRATIQUE D'INTÉGRALE

Considérons une fonction du temps $y = f(t)$, représentée par la courbe figure 1.17. Entre les temps 0 et t_1 la surface S_1 , délimitée par la courbe et l'axe des temps, représente l'intégrale de y .

Intégrale de y entre 0 et t_1 = surface S_1

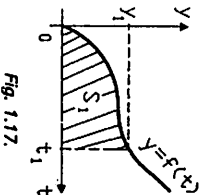


Fig. 1.17.

Retenons que la représentation de l'intégrale est essentiellement une surface. Considérons un intervalle de temps infiniment petit dt (fig. 1.18). On peut écrire :

Surface S_1 = Somme des surfaces élémentaires $y \cdot dt$.

Où $S_1 = \int_0^{t_1} y \cdot dt$

est le symbole de l'intégrale. Il représente la première lettre de somme

d'où : Intégrale de y s'écrit : $\int_0^{t_1} y \cdot dt$

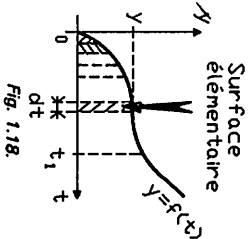


Fig. 1.18.

Il existe de nombreux exemples pratiques d'intégrale. Avez-vous réfléchi à la relation existant entre l'indicateur de vitesse et le compteur kilométrique de votre véhicule (fig. 1.19) ?

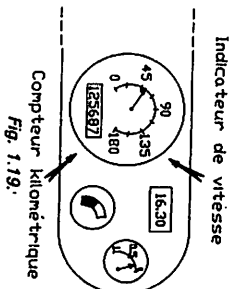


Fig. 1.19.

La figure 1.20 en correspondance avec la figure 1.17 représente l'évolution de la vitesse v . La distance parcourue e est représentée par la surface S_1 .

D'où $e = \int_0^{t_1} v \cdot dt$

Ce qui s'énonce par :

La distance parcourue (compteur kilométrique) est l'intégrale de la vitesse par rapport au temps.

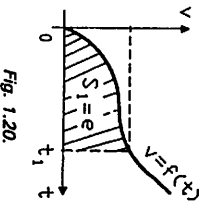


Fig. 1.20.

1.42 RÉPONSE D'UN INTÉGRATEUR

La sortie S d'un intégrateur est proportionnelle à l'intégrale de l'entrée.

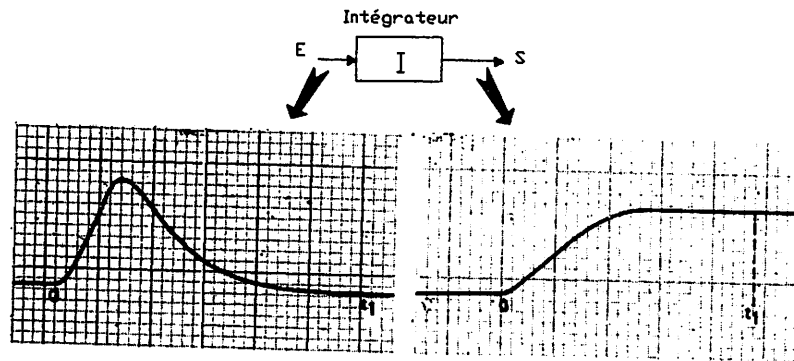


Fig. 1.21 : Réponse d'un intégrateur.

Dans le cas de la figure 1.21, le signal d'entrée E est tel que la surface augmente continuellement jusqu'au temps t_1 . La sortie représentant cette surface augmente également jusqu'au temps t_1 . A partir de t_1 , la surface ne varie plus, la sortie est constante (effet de mémoire).

1.421 Réponse à un échelon

Dans le cas d'un signal échelon, la surface augmente proportionnellement avec le temps. Un tel signal E à l'entrée d'un intégrateur, produit une sortie S sous forme de rampe (fig. 1.22).

Pour $E = a$ on a $S = a.t$ ce qui se traduit par :

$$\int_0^x a.dt = a.t$$

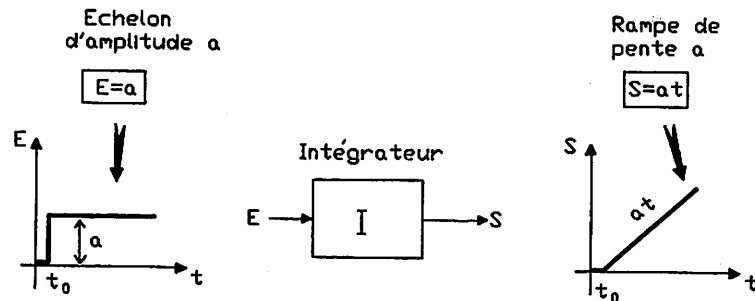


Fig. 1.22 : Réponse à un échelon.

1.422 Dosage de l'action intégrale

La sortie d'un intégrateur est proportionnelle à l'intégrale de l'entrée. En appelant n le coefficient réglable de proportionnalité on a :

$$S = n \int_0^t E.dt$$

Dans le cas d'une entrée échelon d'amplitude a, on obtient $S = n.a.t$. Les grandeurs S et a sont représentées par les mêmes unités (mA, %, ...), donc :

n est l'inverse d'un temps (1/mn ou 1/s)

n exprime également le nombre de fois que la sortie répète l'entrée dans l'unité de temps (mn, s).

La figure 1.23 montre que pour $t = 1$ on obtient $S = n.a$.

n est le nombre de répétitions par unité de temps (rep/mn, rep/s)

Le dosage de l'intégrale est également exprimé par le temps T_i qui représente le temps nécessaire pour que la variation de sortie soit égale à celle de l'entrée.

T_i : temps (mn ou s)

$$T_i = \frac{1}{n}$$

La relation entre T_i et n est :

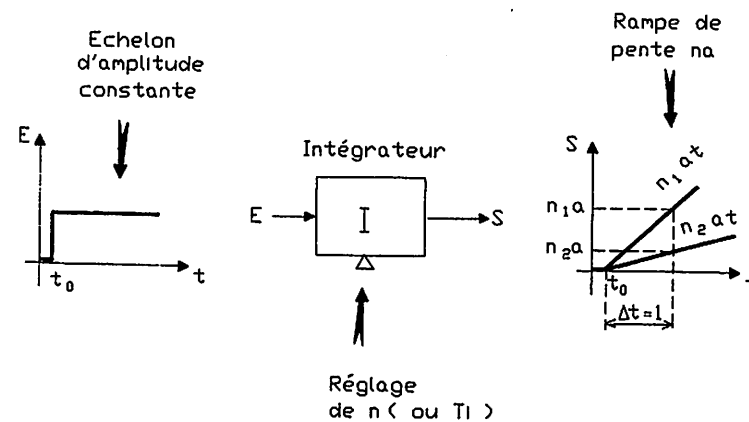
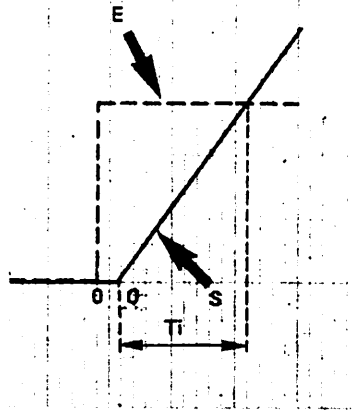


Fig. 1.23 : Réponse à un échelon pour différents n.

Exemple : La figure 1.24 montre les enregistrements d'entrée et de sortie d'un intégrateur.

On mesure $T_i = 42 \text{ s} = 0,7 \text{ mn}$.

Soit : $n = \frac{1}{T_i} = 1,42 \text{ rep/mn}$ (1/mn ou mn^{-1}).



Un petit carreau = 4 secondes.

Fig. 1.24.

1.43 RÉGULATEUR PI SÉRIE

1.431 Équation

Les modules P et I sont placés en série (fig. 1.25 (a)), pour réaliser les fonctions proportionnelle et intégrale (fig. 1.25 (b)).

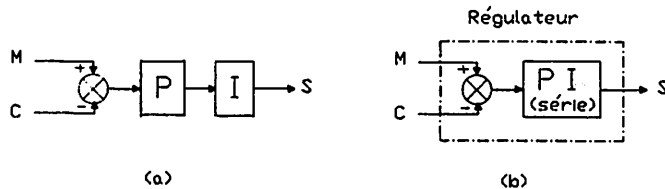


Fig. 1.25 : Régulateur PI série.

La sortie S pour un régulateur de sens direct, est :

$$S = G_r(M - C) + \frac{G_r}{T_i} \int_0^t (M - C) dt + S_0$$

$G_r(M - C)$: représente l'action proportionnelle.

$\frac{G_r}{T_i} \int_0^t (M - C) dt$: représente l'action intégrale.

S_0 : représente la valeur de S pour $M = C$.

Remarques :

- Du fait de la structure série, l'action intégrale est influencée par le gain, G_r .
- $\int_0^t (M - C) dt$: représente la surface entre M et C.
- L'effet de mémoire de l'action intégrale entraîne un S_0 variable qui prend une valeur quelconque comprise entre 0 et 100 %, lorsque $M = C$.

1.432 Symboles de l'action intégrale

Les symboles utilisés pour repérer l'action intégrale sont :

- Pour le temps : $T_i, T_n, TR, \text{mn/rep}, \dots$
- Pour les répétitions : $1/\text{mn}, \text{rep/mn}, \dots$

1.433 Réponse à un échelon

La figure 1.26 représente la réponse d'un régulateur PI à un échelon.

Les conditions initiales sont $M = C$ et $S = S_0$.

A l'instant t_0 un échelon d'amplitude a est effectué sur l'entrée mesure. La sortie du régulateur fait une variation brusque d'amplitude $G_r a$ due à l'action proportionnelle puis une rampe de pente $G_r a / T_i$ due à l'action intégrale.

Dans ce cas T_i représente le temps mis par l'action intégrale pour répéter l'action proportionnelle $G_r a$.

$$S = G_r a + \frac{G_r}{T_i} a t + S_0 \quad \text{Pour } t = T_i \quad \text{on a } S = 2G_r a + S_0$$

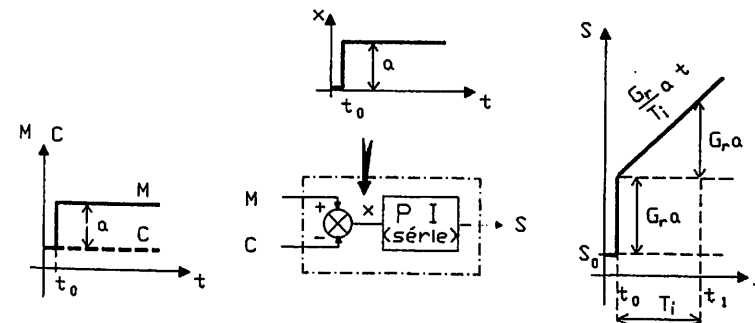


Fig. 1.26 : Réponse d'un régulateur PI à un échelon.

- afficher un $G_r = 2$ et un $T_i = 1$ mn ;

• observer la réponse à un échelon identique au précédent. Si la pente de l'action intégrale est modifiée le régulateur est de structure série, dans le cas contraire la structure est parallèle.

1.5 ACTIONS PROPORTIONNELLE ET DÉRIVÉE

1.51 NOTION PRATIQUE DE DÉRIVÉE

La figure 1.30, représente la fonction $y = f(t)$. Considérons les points P et P' de cette courbe et faisons tendre P' vers P. Quand P' se confond avec P, la sécante PP' devient la tangente (tg) T au point P. Cette tangente détermine un angle α avec l'axe des temps tel que :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad \text{ou} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dt}$$

Δ désigne un intervalle infiniment petit.

Par définition la dérivée au point P est la pente de la tangente T.

Dérivée au point P = $\operatorname{tg} \alpha$ = pente de T au point P

Symbole de la dérivée : $\frac{d}{dt}$

Valeurs particulières :

Pour $\alpha = 0^\circ$ on a $\operatorname{tg} \alpha = 0$ soit une dérivée nulle.
 Pour $\alpha = 90^\circ$ on a $\operatorname{tg} \alpha = \infty$ soit une dérivée infinie.

Retenons essentiellement que l'image de la dérivée en différents points d'une courbe est donnée par la tangente en ces points (fig. 1.31).

Elle exprime aussi une vitesse de variation.

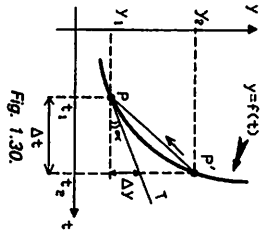


Fig. 1.30.

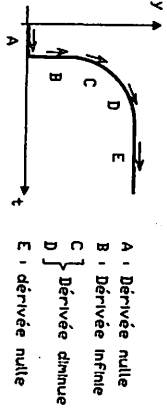


Fig. 1.31.

1.52 RÉPONSE D'UN DÉRIVATEUR

La sortie d'un dérivateur est proportionnelle à la dérivée de l'entrée. Dans le cas de la figure 1.32, le signal d'entrée E est tel que la tangente est nulle à l'origine, puis augmente pour redevenir nulle au temps t_2 .

Le signal de sortie qui représente la dérivée du signal d'entrée, part d'une valeur nulle, passe par une valeur maximum (au temps t_1), puis redevient nul au temps t_2 .

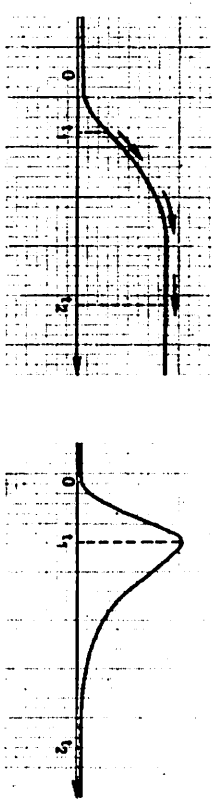
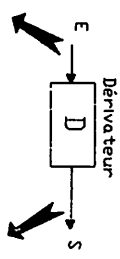


Fig. 1.32 : Réponse d'un dérivateur.

En comparant la figure 1.32 avec la réponse de l'intégrateur de la figure 1.21, on constate que les allures des signaux d'entrée et sortie sont inversées, ce qui montre, pratiquement, que l'intégrale et la dérivée sont des fonctions inverses.

1.521 Réponse à une rampe

Dans le cas d'une entrée rampe, la pente de la tangente ne varie pas. La sortie du dérivateur, après une variation d'amplitude a , reste constante (fig. 1.33).

Donc pour : $E = a.t$ on a $S = a$

$$\text{D'où } \frac{d(a.t)}{dt} = a$$

Ce qui se traduit par : la dérivée d'une rampe est un échelon.

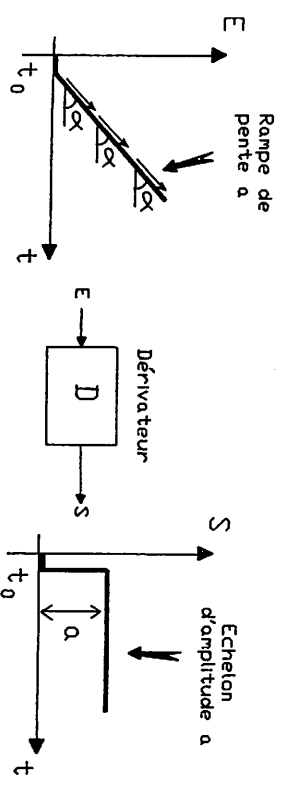


Fig. 1.33 : Réponse à une rampe.

1.522 Dosage de l'action dérivée

La sortie d'un dérivateur est proportionnelle à la dérivée de l'entrée E. En appelant T_d le coefficient de proportionnalité :

$$S = T_d \cdot \frac{dE}{dt}$$

Dans le cas d'une entrée rampe de pente a, la sortie est $S = T_d a$.

a représente une vitesse (mA/s,...).

S représente une amplitude (mA,...).

T_d représente donc un temps.

T_d s'exprime en unité de temps (mn, s)

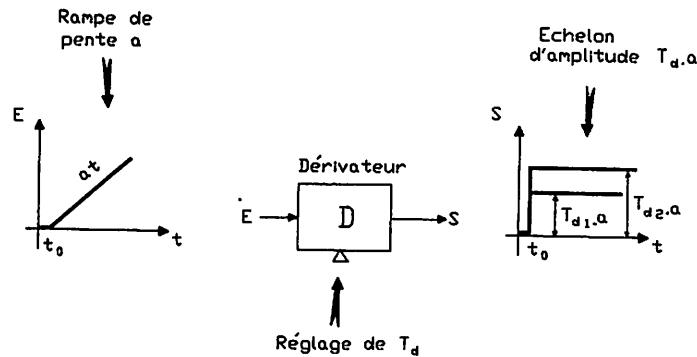
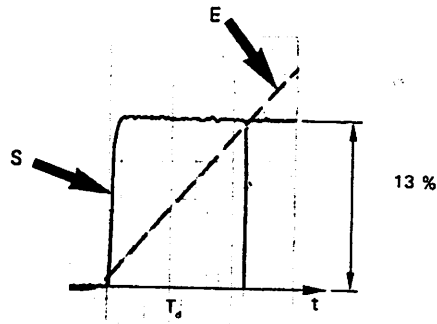


Fig. 1.34 : Réponses à une rampe pour différents T_d .

Exemple : La figure 1.35 montre les enregistrements d'entrée et de sortie d'un dérivateur.



Un petit carreau = 1 seconde.

Fig. 1.35.

On mesure sur l'enregistrement :

$T_d a = 13 \%$.

a = 1 % par seconde.

1.53 RÉGULATEUR PD SERIE

1.531 Équation

Les modules P et D sont mis en série (fig. 1.36 (a)), pour obtenir les fonctions proportionnelle et dérivée (fig. 1.36 (b)).

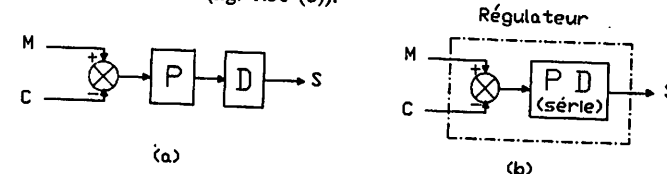


Fig. 1.36.

La sortie S pour un régulateur de sens direct est :

$$S = G_r(M - C) + G_r T_d \frac{d(M - C)}{dt} + S_0'$$

$G_r(M - C)$: représente l'action proportionnelle.

$G_r T_d \frac{d(M - C)}{dt}$: représente l'action dérivée.

S_0' : correspond à la sortie du régulateur pour $M = C$. (voir régulateur P.)

Remarques :

- du fait de la structure série, l'action dérivée est influencée par le gain ;
- la dérivée est sur l'écart mesure-consigne.

1.532 Symboles de l'action dérivée

Les symboles utilisés pour repérer l'action dérivée, sont : T_d, T_v, \dots

1.532 Réponse à une rampe

La figure 1.37 représente la réponse d'un régulateur à une rampe. Les conditions initiales sont $M = C$ et $S = S_0'$.

A l'instant t_0 on effectue une rampe de pente a sur l'entrée mesure. La sortie du régulateur fait une variation d'amplitude $G_r T_d a$, due à l'action dérivée puis une rampe de pente $G_r a$ due à l'action proportionnelle.

En effet, si on applique l'équation générale à une entrée rampe, on obtient :

$$S = G_r a t + G_r T_d a + S_0'$$

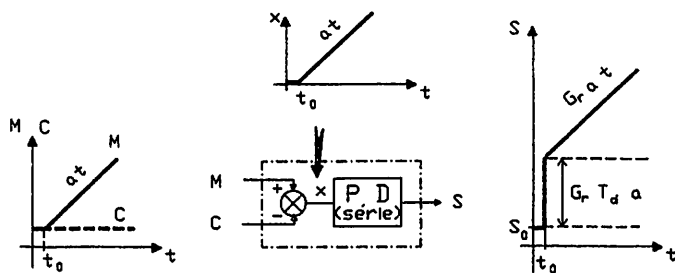


Fig. 1.37 : Réponse d'un régulateur PD à une rampe.

De l'équation on déduit que pour :

$$t = T_d$$

$$S = 2.G_r.T_d.a + S_0'$$

Reporté sur le graphe de la figure 1.38, ce résultat montre que T_d représente l'écart, en temps, entre les réponses proportionnelle seule et proportionnelle plus dérivée.

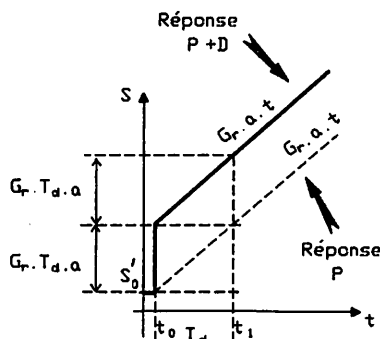


Fig. 1.38.

Dans ce cas on peut définir T_d comme le temps d'avance d'une réponse proportionnelle plus dérivée par rapport à une réponse en proportionnelle seule.

Pour diminuer l'action dérivée, il faut diminuer le temps de dérivée T_d . Une dérivée nulle correspond à $T_d = 0$.

En pratique la réponse relevée est celle de la figure 1.39, ceci du fait du filtrage de la dérivée (chapitre 6).

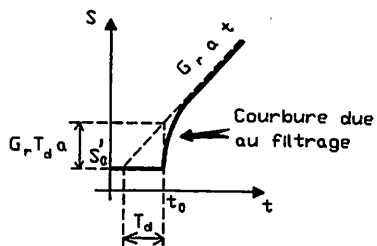
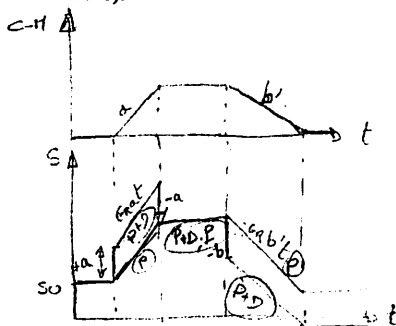


Fig. 1.39.

1.534 Vérification de l'action dérivée

a) Montages

Le montage pour vérifier l'action dérivée d'un régulateur est identique à celui utilisé pour l'action proportionnelle, dans le cas où on utilise un générateur de rampe (fig. 1.40). Pour élaborer la rampe d'entrée on peut utiliser également un régulateur PI (fig. 1.41).

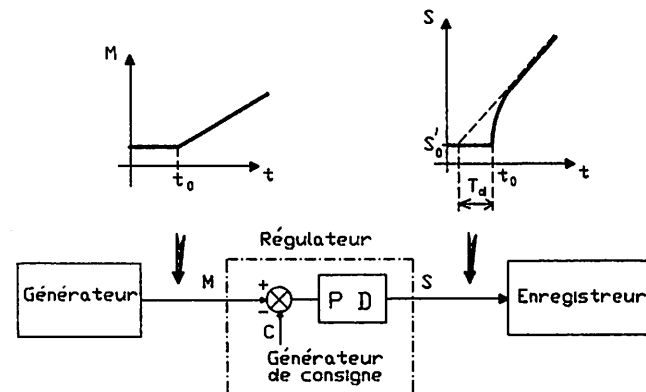


Fig. 1.40 : Vérification de T_d avec un générateur de rampe.

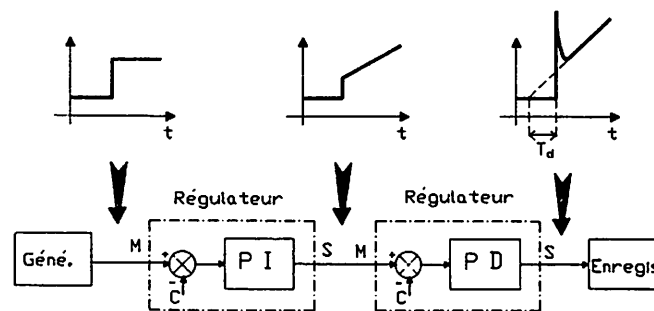


Fig. 1.41 : Vérification de T_d avec un régulateur PI.

b) Procédure avec un générateur de rampe

- Régulateur en manuel.
- Afficher un gain G_r et un temps de dérivée T_d .
- Afficher une intégrale minimum (T_i maxi ou n mini).
- Annuler l'écart mesure-consigne.
- Passer en automatique.
- Faire une rampe sur l'entrée mesure.
- Attendre que la sortie du régulateur ait suffisamment évolué (fig. 1.42) et passer de nouveau en manuel.

c) Exploitation de l'enregistrement

T_d est lu directement sur l'enregistrement. Dans l'exemple de la figure 1.42, on trouve $T_d = 2,8$ s.

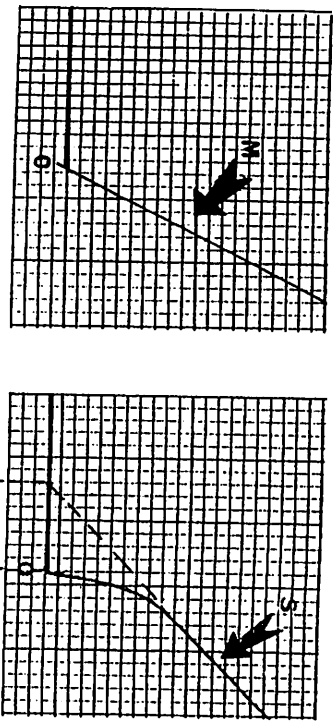


Fig. 1.42 : Vérification pratique de la dérivée. Un petit carreau = 0,4 s.

1.535 Régulateur PD série avec dérivée sur la mesure

Le schéma est celui de la figure 1.43. Le régulateur se comporte en PD sur l'entrée mesure et en P seul sur une variation de consigne. Cette structure évite d'avoir de brusques variations en sortie du régulateur, lorsque l'opérateur modifie la consigne.

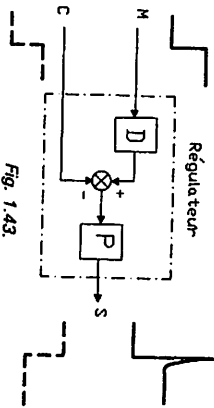


Fig. 1.43.

Pour déterminer si le régulateur a la dérivée sur l'écart ou sur la mesure, il suffit de faire un échelon de consigne (mesure fixe). Dans le premier cas la réponse est une impulsion, ce qui témoigne de la présence de la dérivée, dans le second cas la réponse est un échelon. Très souvent, sur un régulateur, la sélection est possible entre dérivée sur l'écart ou sur la mesure.

1.54 RÉGULATEUR PD PARALLÈLE

1.541 Régulateur PD parallèle avec dérivée sur l'écart

Les modules de proportionnelle et de dérivée sont disposés en parallèle (fig. 1.44).

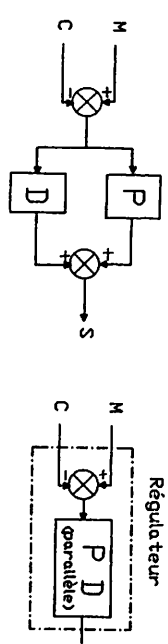


Fig. 1.44 : Régulateur PD parallèle.

La sortie S, pour un régulateur de sens direct, est :

$$S = G_p(M - C) + T_d \frac{d(M - C)}{dt} + S_0$$

La seule différence, par rapport à un PD série, est que le gain G_p n'influe pas sur l'action dérivée.

La réponse à une rampe de pente a sur l'écart est donnée par la relation :

$$S = G_p a t + T_d a + S_0$$

Ce qui conduit à la figure 1.45, où l'on constate que l'avance due à la dérivée correspond à :

$$\frac{T_d}{G_p}$$

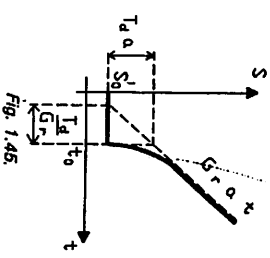


Fig. 1.45.

La vérification de l'action dérivée d'un régulateur suppose que l'on connaisse sa structure. Dans le cas contraire on peut :

Soit afficher un gain $G_p = 1$, auquel cas, les structures série ou parallèle donnent la même réponse.

Soit déterminer la structure du régulateur en effectuant les essais suivants (tableau 1.4) :

Tableau 1.4 : Détermination pratique de la structure d'un Régulateur PD.

Actions affichées	Réponse du régulateur à une entrée rampe	
	Structure série	Structure parallèle
(1 ^{er} essai) $G_p = 1$ $T_d = 30$ s		
(2 ^e essai) $G_p = 2$ $T_d = 30$ s		
Conclusions	G_p n'influe pas sur la mesure de T_d .	G_p influe sur la mesure de T_d .

- Afficher un $G_r = 1$ et un $T_d = 30$ s.
- Observer la réponse à une rampe de mesure.
- Afficher un $G_r = 2$.
- Observer la réponse à une rampe identique à la précédente. Si la valeur de x mesurée s'est modifiée, la structure est parallèle (on mesure T_d / G_r), et elle est série dans le cas contraire.

1.542 Régulateur PD parallèle avec dérivée sur la mesure

Le schéma est celui de la figure 1.46. Le régulateur se comporte en PD parallèle sur l'entrée mesure et en P seule sur une variation de consigne.

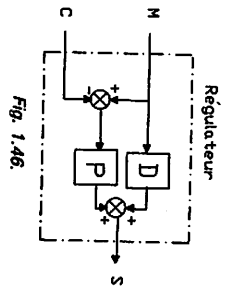


Fig. 1.46.

1.6 STRUCTURES DES RÉGULATEURS PID

Il existe un grand nombre de possibilités d'associer les modules P, I et D. Le tableau 1.5 donne les structures les plus utilisées.

Tableau 1.5 : Structures des régulateurs PID.

Type	Schéma	
	Dérivée sur écart	Dérivée sur la mesure
SÉRIE	$S = G_r \left(T_d \frac{d}{dt} + 1 \right) X M - C + \frac{G_r}{T_i} \int (M - C) dt + G_r T_d \frac{d(M - C)}{dt} + S_0$	
PARALLÈLE	$S = G_r (M - C) + \frac{1}{T_i} \int (M - C) dt + T_d \frac{d(M - C)}{dt} + S_0$	
MIXTE	$S = G_r (M - C) + \frac{G_r}{T_i} \int (M - C) dt + G_r T_d \frac{d(M - C)}{dt} + S_0$	

La réponse à un échelon de mesure est d'allure identique quelle que soit la structure. Pour des régulateurs PID structures série et mixte, les courbes sont données figures 1.47 et 1.48.

Fig. 1.47 : Réponse d'un régulateur PID série à un échelon de mesure d'amplitude a.

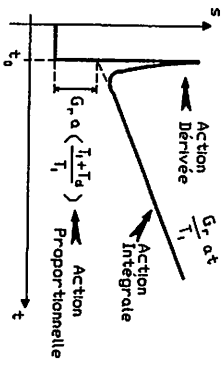
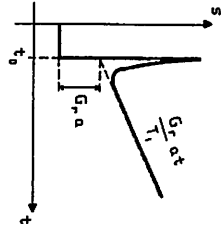


Fig. 1.48 : Réponse d'un régulateur PID mixte à un échelon de mesure d'amplitude a.



La détermination des actions d'un régulateur par le calcul, pour la mise au point d'une boucle de régulation, nécessite la connaissance de sa structure (chapitre 4).

Le tableau 1.6 résume les modes P, PI, PD et PID d'un régulateur de structure série.

Tableau 1.6 : Régulateur de structure série.


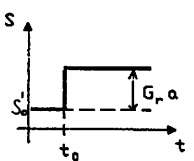
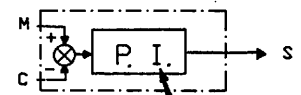
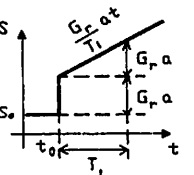
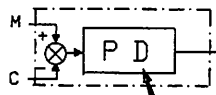
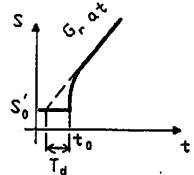

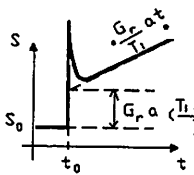
Type	Schéma et équation	Réponse à un échelon
P	 <p>Repère (AP) en gain G K K_p en bande proport. BP BP% PB% P%</p> <p>Equation $S = G_r (M - C) + S_0'$</p>	 <p>Réponse à un échelon de mesure d'amplitude a au temps t_0</p>
PI	 <p>Repère (AI) en temps T_i T_n T_r mn en répét. $\frac{1}{mn}$ $\frac{REP}{mn}$</p> <p>Equation $S = G_r (M - C) + \frac{G_r}{T_i} \int (M - C) dt + S_0$</p>	 <p>Réponse à un échelon de mesure d'amplitude a au temps t_0</p>

Tableau 1.6 : (suite).

Type	Schéma et équation	Réponse
PD	 <p>Repère (AD) en temps T_d T_v</p> <p>Equation $S = G_r (M - C) + G_r T_d \frac{d(M - C)}{dt} + S_0'$</p>	 <p>Réponse à une rampe de pente a, au temps t_0</p>
PID	 <p>Equation $S = G_r (M - C) \left(\frac{T_i + T_d}{T_i} \right) + \frac{G_r}{T_i} \int (M - C) dt + G_r T_d \frac{d(M - C)}{dt} + S_0$</p>	 <p>Réponse à un échelon de mesure d'amplitude a au temps t_0</p>