

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrotechnique et  
Automatique**



**Support de cours pédagogique**

**Intitulé :**

**REGULATION INDUSTRIELLE**

**Réalisé par : Dr. BOUCERREDJ LEILA**

**ANNEE UNIVERSITAIRE : 2021-2022**

# AVANT PROPOS

Ce cours est destiné aux étudiants de Licence et Master : Electromécanique, Electrotechnique et Automatique au département de Génie Electrotechnique et Automatique à l'université 8 mai 1945 de Guelma concernés par l'étude de la régulation Industrielle.

La notion de régulation est basée essentiellement sur le principe de rétroaction : ce sont les variations relatives des variables observées par rapport aux variables de consigne qui provoquent l'évolution des variables de commande. La construction du système de régulation d'un processus nécessite une analyse préalable de celui-ci et une modélisation de son comportement, celle-ci pouvant être éventuellement très simple. Dans tous les cas les modélisations sur lesquelles sont basées toutes les synthèses de régulateurs ne sont pas parfaites, ceux-ci doivent posséder l'effet d'être le moins sensible aux erreurs de modélisation et assurer le bon fonctionnement du processus même en présence d'erreurs ou de perturbations.

L'objectifs de ce cours est de maîtriser le principe et la structure des boucles de régulation. Choisir le régulateur approprié pour un procédé industriel afin d'avoir des performances requises (stabilité, précision).

Cette polycopie s'articule autour de quatre chapitres :

- ✓ Le premier est dédié à des notions sur la régulation industrielle
- ✓ Le deuxième chapitre traite le régulateur tout-ou-rien.
- ✓ Le troisième est consacré à l'étude des régulateurs standards : P, PI, PD, PID.
- ✓ Le chapitre quatre est consacré à l'étude du Choix et dimensionnement des régulateurs
- ✓ Le cinquième chapitre traite quelques applications industrielles.

Nous espérons contribuer à la formation de nos futurs diplômés, ce document a pour seule ambition d'apporter les contenus les mieux adaptés à leurs besoins.

# Table des matières

Avant-propos.....	iv
Chapitre 1 : Introduction à la régulation Industrielle	
1.1 Notions de la technique de régulation .....	1
1.1.2 Définition.....	2
1.1.2.1 La régulation :.....	2
1.1.2.2 La grandeur réglée :.....	2
1.1.2.3 La consigne :.....	2
1.1.2.4 La grandeur réglante :.....	2
1.1.2.5 Les grandeurs perturbatrices :.....	2
1.1.2.6 L'organe de réglage :.....	2
1.1.3 Principe de base d'une régulation.....	3
1.2. Schéma fonctionnel .....	3
1.3 Notion de procédé Industriel .....	4
1.4. Organe d'une boucle de régulation.....	4
1.5. Boucles de régulation .....	4
1.5.1 Boucle de régulation fermée.....	4
1.5.2 Boucle de régulation ouverte.....	5
1.6. Rôle des principaux constituants d'une boucle de régulation1. ....	5
1.6.1 Instrumentation Principale.....	5
1.6.2 Instruments périphériques.....	6
1.7 Schémas de représentation.....	6
1.7.1 Schéma TI ou PCF .....	6
1.7.1.1 Principe.....	6
1.7.1.2 Lettres pour le schéma TI.....	7
1.7.1.3 Exemple.....	7
1.7.2 Principaux schémas .....	7
1.7.3 Symbolisation :.....	8
1.7.4 Signification des lettres .....	9
1.8 Critères de performance d'une régulation.....	10
Exercice : .....	11

## Chapitre 2 : Régulateur Tout-Ou-Rien

2.1	Régulateur tout ou rien (TOR).....	12
	Exemple 2.1 .....	12
2.2	Régulateur TOR avec seuil.....	15
	Exemple 2.2:.....	16
2.3	Régulateur tout-ou-rien avec hystérésis .....	16
	Exemple 2.3:.....	17
2.4	Régulateur tout-ou-rien avec seuil et hystérésis .....	19
	Exercice .....	19

## Chapitre 3 : Les régulateur standards P, PI, PD, PID

3.	Les régulateurs standards : P, PI, PD, PID .....	22
3.1	Régulateur à action proportionnelle (P) :.....	22
	Effet du régulateur: .....	23
	Réalisation pratique du régulateur P :.....	24
3.2	Régulateurs à action proportionnelle-intégrale (PI) : .....	24
	Effet du régulateur : .....	25
	Réalisation pratique : .....	26
3.3	Régulateurs à action proportionnelle dérivé (PD) : .....	26
	Effet du régulateur : .....	27
	Réalisation pratique : .....	28
3.4	Régulateur à action Proportionnel-Intégral-Dérivée (PID) : .....	28
	Effet du régulateur : .....	28
3.5	Différente structures du régulateur PID :.....	29
	3.5.1 PID série et parallèle.....	29
	3.5.2 PID standard, mixte ou idéal .....	30
3.6	Régulateur PID pneumatique.....	30
	3.6.1 Action de contrôle proportionnel.....	30
	3.6.2 Action de contrôle dérivé .....	32
	3.6.3 Action de contrôle intégrale .....	33
	Exercice : .....	35

## Chapitre 4 : Choix et dimensionnement des régulateurs

4.	Choix et dimensionnement des régulateurs .....	36
4.1	Critère méplat .....	36
4.2	Critère sur la réponse harmonique symétrique (ou plus court : critère symétrique) .....	38
4.3.	Méthode pratique de Ziegler -Nichols pour le réglage d'un correcteur P.I.D .....	39
4.3.1	Méthode de Ziegler&Nichols en boucle ouverte.....	39
4.3.1.1	Mode opératoire.....	39
4.3.1.2	Exploitation de la réponse indicielle .....	39
4.3.1.3	Réglage du régulateur PID .....	40
4.3.1.	Méthode de Ziegler&Nichols en boucle fermée.....	42
4.3.1.1	Mode opératoire.....	42
4.3.1.2	Exploitation du résultat de pompage de la boucle .....	43
4.3.1.3	Réglage du régulateur PID .....	43
Exercice 1 :	.....	45
Exercice 2	.....	45
Exercice 3 :	.....	45

## Chapitre 5 : Applications industrielles

5.1	Régulation de température.....	46
5.1.1	Régulateur de température industrielle.....	46
5.1.2	Avantages à installer un régulateur thermique dans une usine.....	46
5.1.3	Le régulateur thermique marche/arrêt .....	46
5.2	Qu'est-ce qu'un régulateur de débit ?.....	47
5.2.1	Le régulateur de débit .....	47
5.3.	Exemples de systèmes de régulation : .....	48
5.3.1	Exemple 1 .....	48
5.3.2	Exemple 2 .....	48
Exercice 1 :	.....	48
Exercice 2 :	.....	48
Exercice 3 :	.....	49

Solutions des exercices.....	50
------------------------------	----

Bibliographie .....	59
---------------------	----

## 1.1 Notions de la technique de régulation

La régulation est un processus dans un système dans lequel une grandeur de sortie à réguler est enregistrée en continu et comparée à la grandeur d'entrée. Le résultat de cette comparaison est renvoyé au système via un régulateur et influence son comportement de la manière souhaitée. L'objectif est que la grandeur de sortie corresponde à la grandeur d'entrée. Dès lors, les influences des perturbations peuvent également être compensées. La régulation se caractérise donc par la séquence d'actions dans une boucle de régulation fermée.

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, appelé **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**.

Le régulateur industriel est un appareil qui a pour rôle essentiel de contrôler le procédé, d'une autre façon de garantir les comportements dynamique et statique du procédé conformes au cahier des charges défini. Ceci est réalisé par réglage et adaptation des paramètres de sa fonction de transfert au procédé à contrôler.

Les notions de la technique de régulation sont décrites ici en prenant l'exemple de la régulation du niveau (voir figure 1.1).

La boucle de régulation comporte :

- **le système réglé**

Les systèmes réglés sont l'ensemble des systèmes, installations et appareils dont le comportement doit être contrôlé par la régulation. Dans l'exemple de la figure 1.1, le système réglé est le réservoir.

- **l'organe de mesure**

Les organes de mesure sont les capteurs de tous types qui enregistrent les valeurs de processus du système réglé. Dans l'exemple 1.1, l'organe de mesure est le capteur de niveau.

- **le régulateur**

Dans l'exemple de la figure 1.1, le régulateur est le composant qui contrôle. Il ordonne à l'actionneur d'exécuter des actions.

- **l'actionneur**

Les actionneurs sont des éléments qui influencent le processus dans le sens du régulateur. Dans l'exemple 1.1, la vanne de régulation avec entraînement dans l'arrivée du réservoir.

- **le capteur**

Le capteur prélève sur le système la grandeur réglée (information physique) et la transforme en un signal compréhensible par le régulateur (le plus souvent une tension électrique).

- **le dispositif de régulation**

Le dispositif de régulation se compose du régulateur et du comparateur.

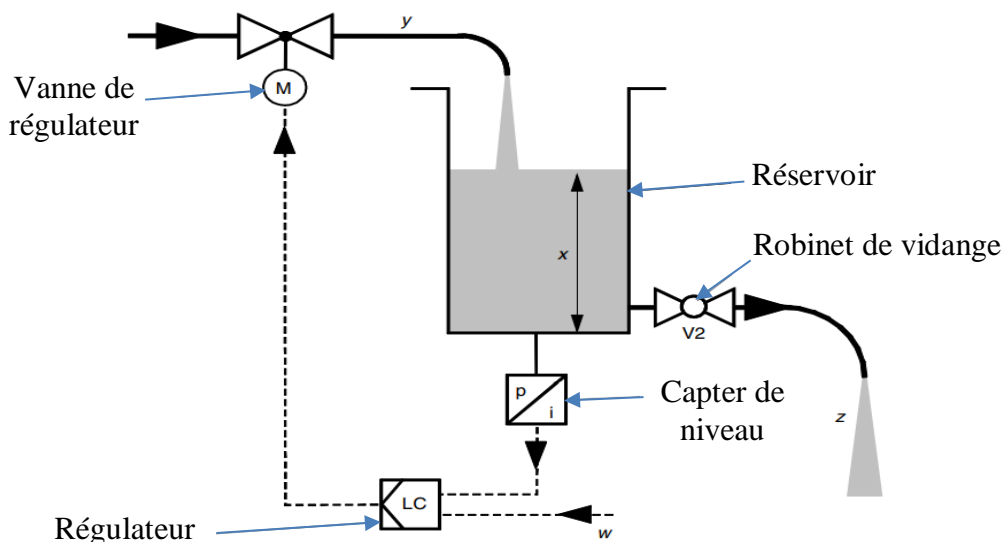


Figure 1.1. Composants d'une régulation du niveau.

### 1.1.2 Définition

#### 1.1.2.1 La régulation :

Regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Exemples de grandeur physique : Pression, température, débit, niveau etc...

#### 1.1.2.2 La grandeur réglée :

C'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Exemple : une régulation de température.

#### 1.1.2.3 La consigne :

C'est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.

#### 1.1.2.4 La grandeur réglante :

Est la grandeur physique qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Elle n'est généralement pas de même nature que la grandeur réglée.

#### 1.1.2.5 Les grandeurs perturbatrices :

Sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont généralement pas de même nature que la grandeur réglée.

#### 1.1.2.6 L'organe de réglage :

Est l'élément qui agit sur la grandeur réglante.

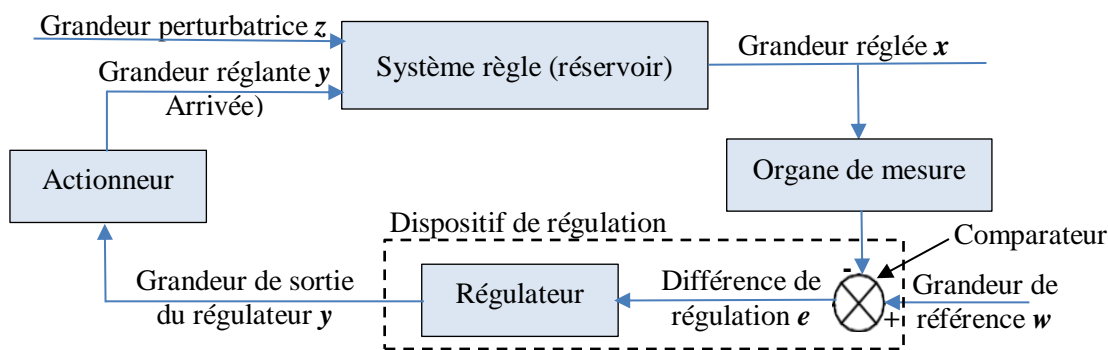


Figure 1.2. Éléments et grandeurs de mesure dans la boucle de régulation sous forme de schéma fonctionnel.

Les grandeurs de mesure dans la boucle de régulation de la figure 1.2, sont :

• **la grandeur réglée  $x$**

Dans l'exemple de la figure 1.1, le niveau réel dans le réservoir (valeur réelle).

• **la grandeur de référence  $w$**

Niveau souhaité (valeur de consigne).

• **la grandeur réglante / grandeur de sortie du régulateur  $y$**

En l'occurrence, l'arrivée dans le réservoir ou le signal de commande transmis par le régulateur à l'actionneur.

• **la grandeur perturbatrice  $z$**

En l'occurrence, l'écoulement du réservoir (voir figure 1.1).

• **la différence de régulation  $e$**

Écart entre la grandeur réglée  $x$  (valeur réelle) et la grandeur de niveau souhaitée  $w$  (valeur de consigne).

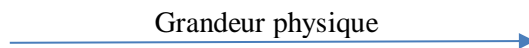
**1.1.3 Principe de base d'une régulation**

Le principe de base d'une régulation est que la **grandeur réglée  $x$**  d'un système réglé doit être maintenue à une certaine valeur indépendamment des influences perturbatrices. Pour ce faire, la grandeur réglée est mesurée et comparée à la **grandeur de référence  $w$**  (valeur souhaitée) dans un dispositif de régulation. Si une **différence de régulation  $e$**  apparaît, le régulateur tente, selon une loi de régulation déterminée, de commander le système réglé via la **grandeur réglante  $y$**  de sorte que la grandeur réglée se rapproche à nouveau de la grandeur de référence.

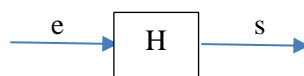
**1.2. Schéma fonctionnel**

Le schéma fonctionnel tente de représenter les relations entre les différentes grandeurs physiques des boucles de régulation. Il sera composé uniquement des éléments suivants :

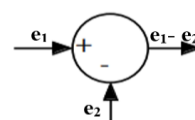
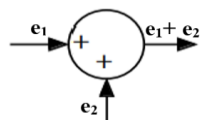
- Des lignes de parcours d'une grandeur physique. Ces lignes représentent le parcours d'une grandeur physique de la boucle de régulation :



- Des blocs qui représentent un ou plusieurs éléments de la chaîne de régulation qui assure la relation entre deux grandeurs physiques, relation caractérisée par la fonction de transfert. La fonction de transfert permet pour tous types de signaux d'avoir la relation suivante :  $s = H \times e$

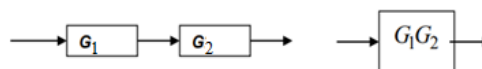


- Les sommateurs ou comparateurs, qui permettent l'addition ou la soustraction de grandeurs physiques

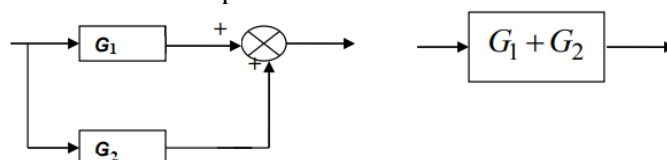


- Réduction des schémas fonctionnels :

- ✓ Association des éléments en séries

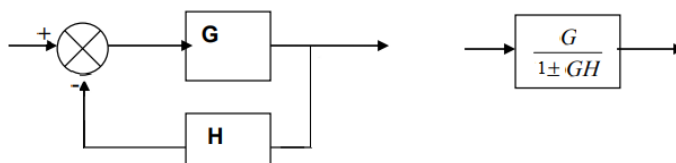


- ✓ Association des éléments en parallèle

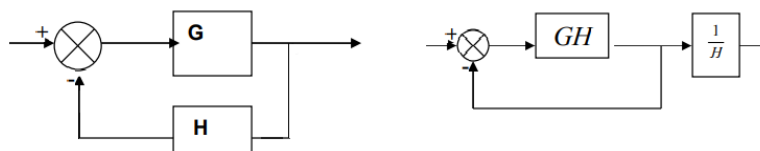




- ✓ Elimination d'une boucle de retour



- ✓ Boucle à retour unitaire



### 1.3 Notion de procédé Industriel

Un **procédé industriel** est un **procédé** de nature mécanique ou chimique destiné à produire des objets ou à synthétiser des produits chimiques, en grande quantité et dans des conditions techniquement et économiquement acceptables.

### 1.4. Organe d'une boucle de régulation

Pour réguler un système physique, il faut :

**Mesurer** la grandeur réglée avec un capteur. **Réfléchir** sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.

**Agir** sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage. On peut représenter une régulation de la manière suivante :

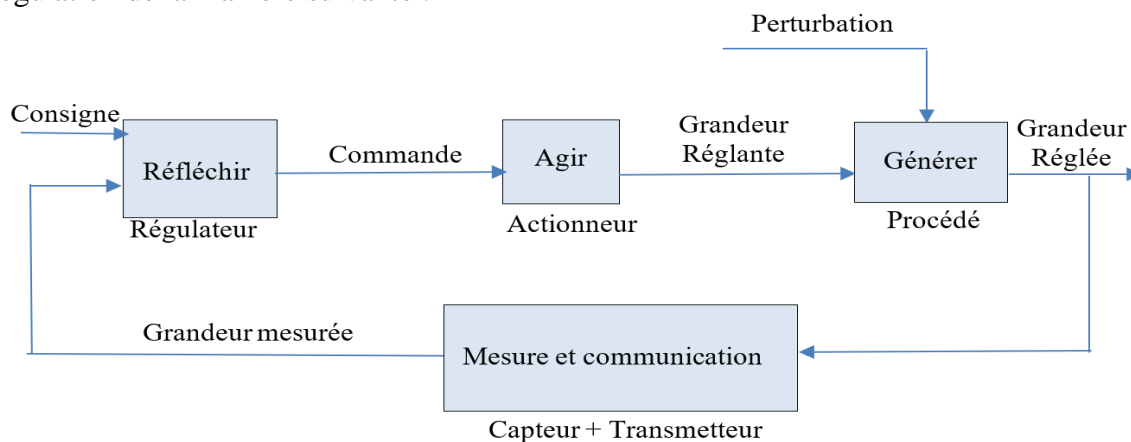


Figure 1.3. Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.

### 1.5. Boucles de régulation

#### 1.5.1 Boucle de régulation fermée

On parle de "**Boucle fermée**" lorsque la régulation agit directement sur la valeur mesurée. Pour cela, la valeur à régler doit être mesurée et revenir en information à l'entrée du régulateur.

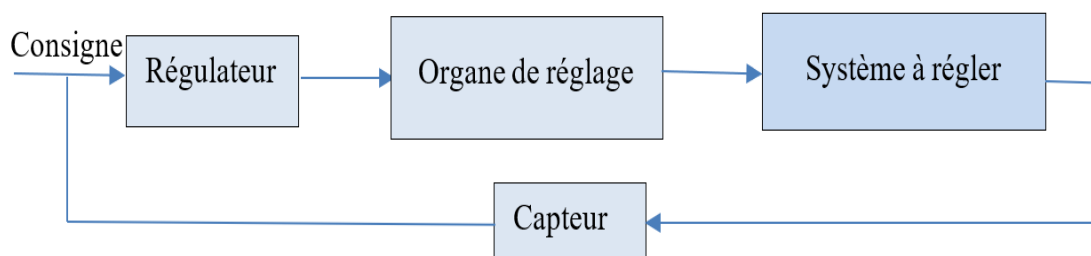


Figure 1.4. Boucle de régulation fermée.

### 1.5.2 Boucle de régulation ouverte

On parle de "Boucle ouverte" lorsqu'on ne mesure pas la valeur sur laquelle on agit. Le régulateur n'a donc aucune information de résultat sur son action et ne peut donc pas la corriger.

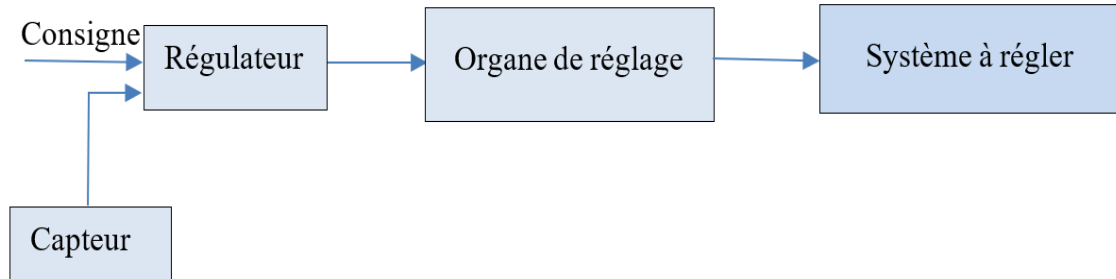


Figure 1.5. Boucle de régulation ouverte.

### 1.6. Rôle des principaux constituants d'une boucle de régulation1.

#### 1.6.1 Instrumentation Principale

NOM DE L'INSTRUMENT	FONCTION – ROLE
<b>CAPTEUR</b> <math>\left\{ \begin{array}{l} \text{TRANSMETTEUR} \\ \text{CONVERTISSEUR} \end{array} \right.</math>	Élément servant à l'acquisition d'une grandeur physique et à la convertir en un signal standard
<b>REGULATEUR PNEUMATIQUE</b> <b>CORRECTEUR NUMERIQUE</b> <b>S.N.C.C. / A.P.I</b> <b>CALCULATEUR</b>	Comparaison entre la grandeur réglée et la consigne (calcul de l'écart $x$ ).  Traitement du Signal $x$ par un algorithme de régulation.
<b>ORGANE DE REGLAGE :</b>  VANNE AUTOMATIQUE UNITE A THYRISTOR MOTEUR VENDELLES	Action de correction sur la grandeur réglante.  Peuvent être commandés directement par des signaux standards d'instrumentation ou indirectement par l'intermédiaire d'un convertisseur.

### 1.6.2 Instruments périphériques

- **Fonction de tendance** : Indicateur.
- **Fonction de mémorisation** : Enregistreur.
- **Fonction de calcul** : Sommation, multiplication, division, racine carrée intégrateur...
- **Fonction de sécurité** : Pressostat, alarme, relais à seuil...

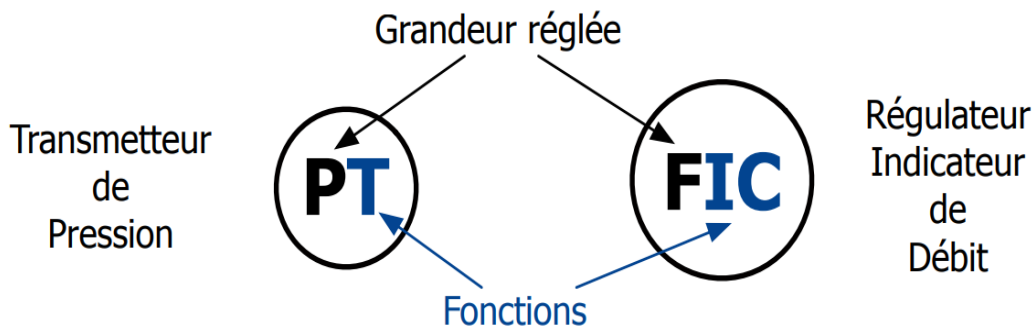
## 1.7 Schémas de représentation

### 1.7.1 Schéma TI ou PCF

Un **schéma tuyauterie et instrumentation** (*Piping and instrumentation diagram* en anglais, P&ID) est un diagramme qui définit tous les éléments d'un procédé chimique. Il est le schéma le plus précis et le plus complet utilisé par les ingénieurs-chimistes pour la description d'un procédé.

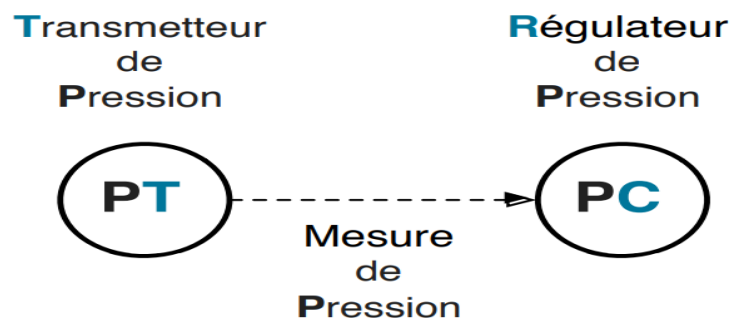
#### 1.7.1.1 Principe

La norme **NF E 04-203** définit la représentation symbolique des régulations, mesures et automatisme des processus industriels. Les instruments utilisés sont représentés par des cercles entourant des lettres définissant la grandeur physique réglée et leur (s) fonction (s). La première lettre définit la grandeur physique réglée, les suivantes la fonction des instruments.



**Figure 1.6. Schéma TI - Représentation de l'instrumentation.**

Les parcours de l'information est matérialisé par une flèche dont l'allure dépend du support de l'information.

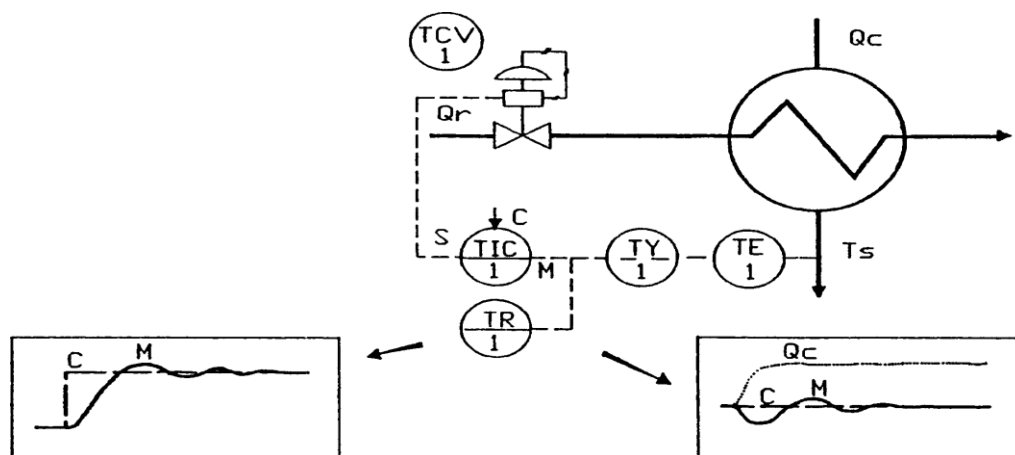


**1.7.1.2 Lettres pour le schéma TI**

Première lettre		Les suivantes	
Grandeur réglée	Lettre	Fonction	Lettre
Pression	<b>P</b>	Indicateur	<b>I</b>
Température	<b>T</b>	Transmetteur	<b>T</b>
Niveau	<b>L</b>	Enregistreur	<b>R</b>
Débit	<b>F</b>	Régulateur	<b>C</b>
Analyse	<b>A</b>	Capteur	<b>E</b>

**1.7.1.3 Exemple**

La figure suivante représente le schéma PCF d'un échangeur Thermique.



- TE : capteur de température
- TY : relais de température
- TR : Enregistreur de température
- TIC : Régulateur indicateur de température.
- TCV : Vanne de Régulation de Température

**1.7.2 Principaux schémas**

- { PID : Piping and Instrument Diagram (ISA)
- { TI : Tuyauteries et Instrumentation (AFNOR)
- { FLOW SHEET
- { PCF: Plan de Circulation de Fluide
- { LOOP DIAGRAMME SCHEMA DE BOUCLE

### 1.7.3 Symbolisation :

Principaux symboles des schémas d'instrumentation (PCF et TI)

N°	Dénomination	Symbole
1.4.1	Point de mesure	
1.4.2	Instrument	
1.4.4	Instrument de tableau	
1.4.5	Organe de réglage	
1.4.5.1	Actionneur manuel	
1.4.7	Dispositif réglant (Symbole général)	
1.6.1.2	Croisements sans raccordement	
	Croisements avec raccordement	

1.6.1.2	Sens de l'écoulement	
1.6.1.3	Sens de l'information	
2.3.1	Signal électrique	
2.3.2	Signal pneumatique	
2.3.8	Interliaison logicielle ou bus	
2.5.1.1	Elément primaire de mesure de débit	
2.5.1.2	Diaphragme	
2.7.3.2.2	Régulateur autonome (régulation aval) avec prise interne. (Détendeur)	
2.10.3.3	Actionneur pneumatique à membrane avec positionneur	
3.4.2	Calculateur de processus (Système de contrôle-commande)	

3.4.3	Calculateur de supervision (superviseur)	
3.4.4	Automate	
3.5.2	Convertisseur de signal: a vers b A : analogique B : binaire D : numérique E : tension H : hydraulique I : courant O : électromagnétique ou sonique P : Pneumatique R : Résistance	  Exemple : convertisseur courant vers tension sur une boucle de température : 
3.5.3.1	opérateur d'addition	
3.5.3.2	opérateur de différence	
3.5.3.4	opérateur de gain	
3.5.3.7	opérateur de multiplication	
3.5.3.8	opérateur de division	
3.5.3.9	opérateur d'extraction de racine carrée	

	Pompe	
	Pompe volumétrique	
	Electrovanne	

D'autres symboles peuvent être utilisés en fonction des besoins mais dans ce cas leur signification est explicitée.

### 1.7.4 Signification des lettres

	<i>GRANDEUR PHYSIQUE MESURE PREMIERE LETTRE</i>	<i>FONCTION DES INSTRUMENTS AUTRES LETTRES</i>
<b>A</b>	ANALYSE	ALARME
<b>B</b>	COMBUSTION	AU CHOIX DE L'UTILISATEUR
<b>C</b>	CONDUCTIVITE ELECTRIQUE	REGULATION
<b>D</b>	MASSE VOLUMIQUE	DIFFERENCE
<b>E</b>	TENSION, FORCE ELECTROMOTRICE	ELEMENT PRIMAIRE
<b>F</b>	DEBIT	RAPPORT (FRACTION), FERME
<b>G</b>	LAISSE AU CHOIX DE L'USAGER	GLACE (SANS MESURE)
<b>H</b>	COMMANDE MANUELLE	H – HAUT. HH – TRES HAUT
<b>I</b>	INTENSITE D'UN COURANT ELECTRIQUE	INDICATION
<b>J</b>	PUISSANCE	SCRUTATION
<b>K</b>	TEMPS OU PROGRAMMATION	POSTE DE CONTROLE
<b>L</b>	NIVEAU	L – BAS. LL – TRES BAS, LAMPE TEMOIN
<b>M</b>	HUMIDITE	MOYEN INTERMEDIAIRE
<b>N</b>	VISCOSITE	LAISSE AU CHOIX DE L'USAGER
<b>O</b>	LAISSE AU CHOIX DE L'USAGER	OUVERT DIAPHRAGME (RESTRICTION)
<b>P</b>	PRESSION OU DEPRESSION (VIDE)	POINT D'ESSAI
<b>Q</b>	QUALITE, COMPTAGE	INTEGRE OU TOTALISE INTEGRATION OU TOTALISATION
<b>R</b>	RAYONNEMENT	ENREGISTREMENT OU IMPRIMEUR
<b>S</b>	VITESSE OU FREQUENCE	COMMUNICATION, SECURITE
<b>T</b>	TEMPERATURE	TRANSMISSION
<b>U</b>	A VARIABLES MULTIPLES	MULTIFONCTION
<b>V</b>	GRANDEURS MECANIQUES (VIBRATIONS)	VANNE
<b>W</b>	MASSE OU FORCE	PROTECTION DOIGT DE GANT
<b>X</b>	LAISSE AU CHOIX DE L'USAGER	COORDONNEE
<b>Y</b>	EVENEMENT	RELAIS
<b>Z</b>	POSITION, LONGUEUR	ELEMENT DE REGULATION FINAL

## 1.8 Critères de performance d'une régulation

Pour un système de régulation, les spécifications restent souvent vagues en raison surtout de la grande diversité de problèmes de régulation. Les critères qualitatifs à imposer dépendent d'abord de la nature du processus à régler. A titre d'exemple, on ne peut imposer aveuglément un processus transitoire rapide ou un taux d'amortissement de 0,75 pour n'importe quel système. En effet l'asservissement d'un ascenseur (qui nécessite un confort pour les passagers) ne tolère pas par exemple d'accélération. Les dépassements de la pression régulée dans un réacteur nucléaire ne doivent pas atteindre les seuils limites de tarage des soupapes de sécurité etc...

En règle générale, on cherche à obtenir un temps de réponse  $T_e$  et un amortissement par période faibles.

On peut retenir le chiffre de 15% comme valeur moyenne acceptable de dépassement.

Insistons sur le fait que si la mise au point de la régulation est effectuée à partir d'une réponse due à des changements de consigne, c'est généralement à des variations de grandeurs perturbatrices que la régulation est soumise. La théorie montre que si la stabilité qui est la condition indispensable, est assurée dans le premier cas, elle le sera dans le second, mais l'allure du transitoire sera différente.

Les performances d'une régulation peuvent se définir à partir de l'allure du signal de mesure suite à un échelon de consigne.

Notons toutefois que les critères de performances classiques peuvent se résumer comme suit

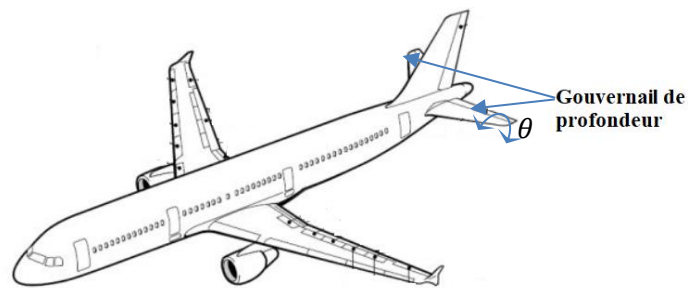
- **Stabilité** : La qualité essentielle pour un système régulé, et donc exigée à tout prix, est la stabilité. En effet un système instable se caractérise soit par des oscillations d'amplitude de plus en plus grande de la grandeur observée soit par une croissance irréversible négative ou positive de la grandeur observée.
- **Précision** : L'exploitant demande à ce que le système possède une bonne précision en régime permanent, Elle est définie à partir de l'erreur statique  $\varepsilon$  en régime stable.
- **Rapidité** : On demande en pratique que le système soit capable rapidement de compenser les perturbations et de bien suivre la consigne.  
La rapidité d'un système régulé s'évalue par le temps nécessaire à la mesure pour entrer dans une zone  $\pm 5\%$  de sa valeur finale (soit entre 95% et 105%). Le système régulé est d'autant plus rapide que le temps de réponse à 5% est court.
- **Dépassement** : En général on recommande un système de régulation dont le régime transitoire soit bien amorti et dont le dépassement ne dépasse pas 5 à 10% la valeur nominale.

**Exercice :****1. Régulation de vitesse d'un moteur**

On veut conserver constante, quelle que soit la charge (couple résistant), la vitesse de rotation de l'arbre d'un moteur à courant continu, commandes en tension. L'actionneur est un amplificateur de puissance. On utilisera, comme capteur de vitesse, une génératrice tachymétrique (elle délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation). Un potentiomètre gradué en vitesse permet d'afficher la vitesse de consigne, la variation de charges sera considérée comme une entrée de perturbations. Faire l'analyse fonctionnelle de cette régulation.

**2. Pilote automatique d'un avion (commande de l'altitude)**

Le pilote automatique d'un avion (voir Figure 2) est utilisé notamment, pour commander l'attitude par l'intermédiaire de gouvernail de profondeur. Pour une première approche, le pilote automatique reçoit un signal électrique qui l'informe de l'attitude  $h$  de l'avion, ce signal proportionnel à  $h$  est fourni par l'altimètre. Il est comparé à un signal de consigne et proportionnelle à l'altitude choisie  $h_c$  par le pilote et donne le signal d'erreur  $e$ . Un régulateur électrique traite l'erreur  $e$  et délivrés un signal de commande  $u$  à un actionneur électrohydraulique chargé de mouvoir le gouvernail de profondeur. Faire l'analyse fonctionnelle de ce pilote automatique



**Figure 1.7. Pilote automatique d'un avion.**



### 2.1 Régulateur Tout-Ou-Rien (TOR)

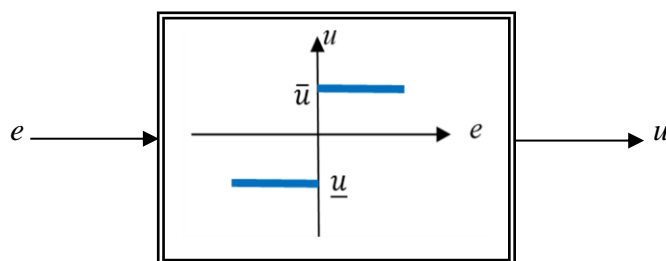
Les systèmes dits à fonctionnement Tout-Ou-Rien (TOR) sont caractérisés par une sortie qui ne peut prendre que deux (parfois trois) valeurs distinctes. La valeur de sortie est généralement déterminée par l'intervalle dans lequel se trouve la valeur d'entrée. Comme son nom l'indique, la régulation TOR est connue par son action sur l'organe de réglage qui ne peut être que ON (fonctionne à 100%) ou OFF (arrêt 0%). Ce genre de régulateurs trouve son application dans la vie quotidienne pour les cas de systèmes de : chauffage et de climatisation, four, réfrigérateur, ... etc.

Un régulateur génère la grandeur de commande  $u$  en fonction de l'écart  $e$  (voir figure 2.1). Le cas le plus simple est celui où l'action se fait en considérant uniquement le signe de l'écart :

$$u = \begin{cases} \bar{u} & \text{si } e > 0 \\ \underline{u} & \text{si } e \leq 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

$\bar{u}$  et  $\underline{u}$  sont des nombres réels fixes; suivant les applications, on choisit  $\underline{u} = 0$  ou  $\underline{u} = -\bar{u}$ .

La fonction  $e \mapsto u$  est schématisée dans la figure 2.1.



**Figure 2.1. Régulateur tout-ou-rien.**

#### Exemple 2.1

L'entraînement électrique en position d'un moteur à courant continu et à excitation séparée entraînant une charge, sans couple résistant parasite est décrit par l'équation ci-dessous:

$$\ddot{\theta}(t) + \frac{1}{J} \left( f + \frac{(K\Phi)^2}{R} \right) \dot{\theta}(t) = \frac{K\Phi}{JR} u(t) \quad 2.2$$

avec des valeurs numériques:

$$\frac{1}{J} \left( f + \frac{(K\Phi)^2}{R} \right) = 2 \quad 2.3$$

$$\frac{K\Phi}{JR} = 4$$

Donc on trouve :

$$\ddot{\theta}(t) + 2\dot{\theta}(t) = 4u(t) \quad 2.4$$

On prend une consigne  $\theta_c$  constante ; par conséquent, en dérivant deux fois l'égalité  $e(t) = \theta_c + \theta(t)$  :

$$\dot{\theta}(t) = -\dot{e}(t)$$

$$\ddot{\theta}(t) = -\ddot{e}(t)$$

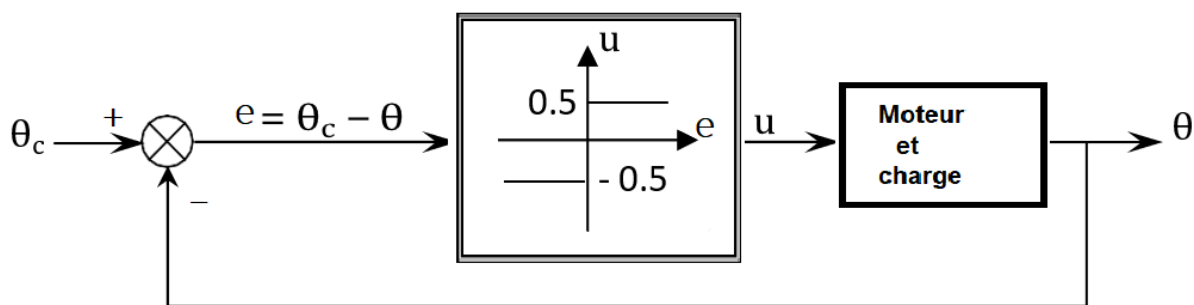
Par substitution dans l'équation (2.4), on trouve (la grandeur de commande est en boucle fermée):

$$\ddot{e}(t) + 2\dot{e}(t) = -4u(e(t)) \quad 2.5$$

Un régulateur tout-ou-rien est utilisé :

$$u(e) = \begin{cases} 0.5 & \text{si } e > 0 \\ -0.5 & \text{si } e \leq 0 \end{cases}$$

Nous aboutissons le schéma fonctionnel de la figure suivant :



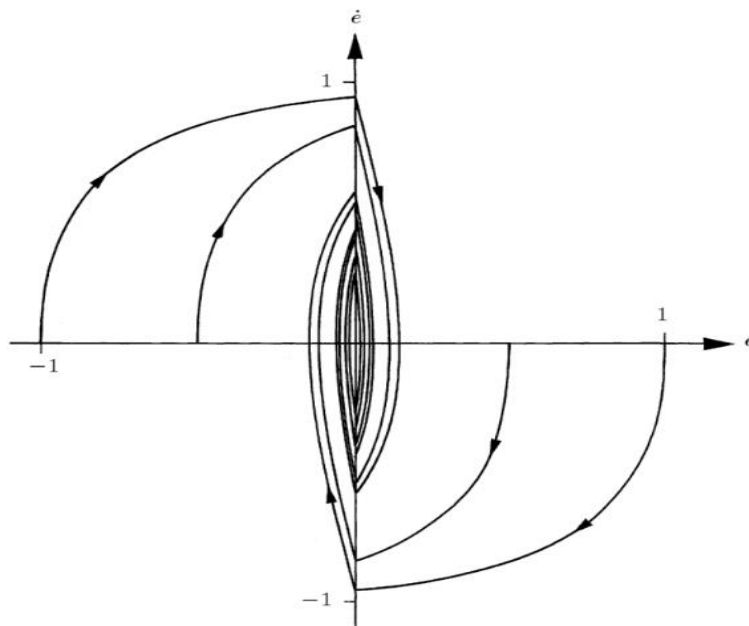
**Figure 2.2. Schéma fonctionnel de la commande tout ou rien de la position d'un entraînement électrique.**

Initialement, la position  $\theta(0)$  et la vitesse  $\dot{\theta}(0)$  sont toutes deux nulles, de sorte que :

$$e(0) = \theta_c - \theta(0) = \theta_c$$

$$\dot{e}(0) = -\dot{\theta}(0) = 0$$

Des trajectoires de phase sont reportées dans la figure 2.3 pour diverses valeurs de la consigne  $\theta_c = e(0)$ .



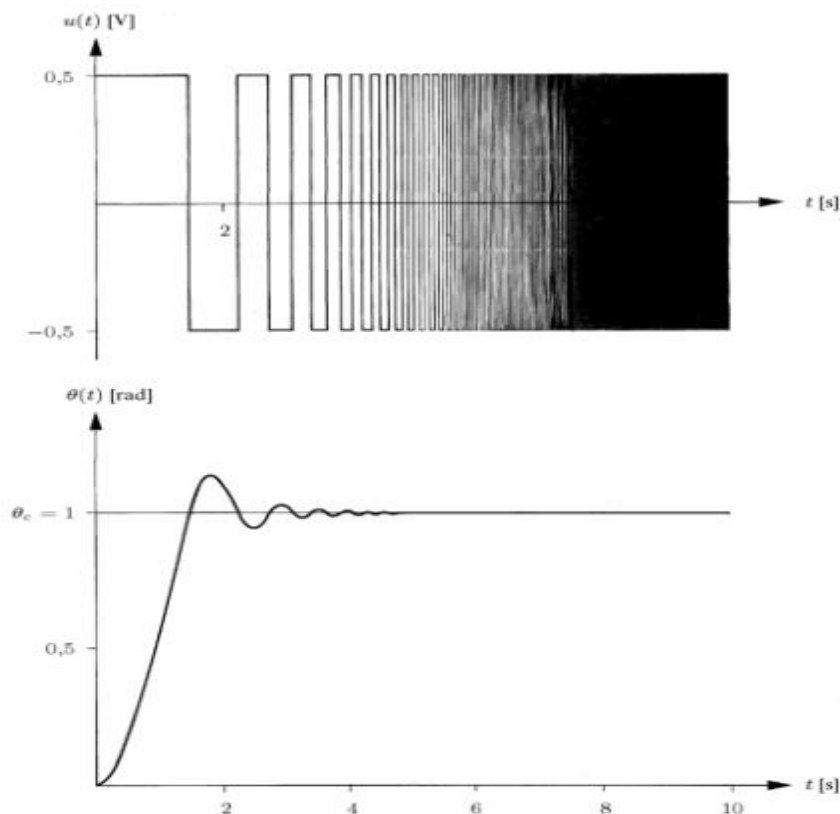
**Figure 2.3 . Plan de phase pour la commande tout ou rien de la position d'un entraînement électrique.**

Les commutations ont lieu pour  $e = 0$ , sur l'axe des ordonnées, qui est dit **droite de commutation**.

On remarque que les trajectoires convergent toutes vers l'origine du plan de phase, quelle que soit la consigne  $\theta_c$ , donc :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} \dot{e}(t) = 0$$

La consigne est par conséquent assignée à la grandeur à commander  $\theta(t)$ : la fonction d'asservissement est parfaitement réalisée, la fréquence des commutations *augmente* au fur et à mesure que l'on s'approche de l'origine du plan de phase. Ces communications sont aussi bien visibles dans la figure 2.4, montrant la tension d'alimentation  $u(t)$  et la position  $\theta(t)$  dans le cas  $\theta_c = 1$ . Le phénomène peut provoquer une usure prématurée des composants, par exemple un réducteur entre le moteur et la charge.



**Figure 2.4 . Tension d'alimentation et position pour une commande tout ou rien d'un entraînement électrique.**

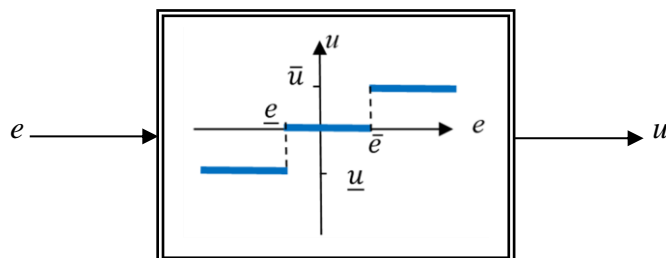
**2.2 Régulateur TOR avec seuil**

Un régulateur tout ou rien avec seuil fournit une grandeur de commande nulle lorsque l'écart est nul dans un intervalle comprenant l'origine :

$$u = \begin{cases} \bar{u} & \text{si } e > \bar{e} \\ 0 & \text{si } \underline{e} \leq e \leq \bar{e} \\ \underline{u} & \text{si } e < \underline{e} \end{cases} \quad (2.6)$$

Les nombres réels  $\bar{u}$ ,  $\underline{u}$ ,  $\bar{e}$  et  $\underline{e}$  sont fixes; suivent, on prend  $\underline{e} = -\bar{e}$  et  $\underline{u} = -\bar{u}$ .

La fonction  $e \mapsto u$ , non linéaire, est représentée dans la figure 2.5.



**Figure 2.5. Régulateur tout-ou-rien avec seuil.**

**Exemple 2.2:**

Soit l'exemple de la figure 2.6, qui représente l'évolution de la commande  $Y$  et de la mesure  $X$  en fonction du temps avec un régulation TOR à un seuil  $C$ .

Donc en dessous d'une valeur de consigne  $C$  le dispositif fonctionne, au-dessus de cette valeur de consigne  $C$  le dispositif s'arrête. De ce fait :

$$\text{Si } X < C \text{ alors } Y = 100\% \text{ si non } Y = 0\%$$

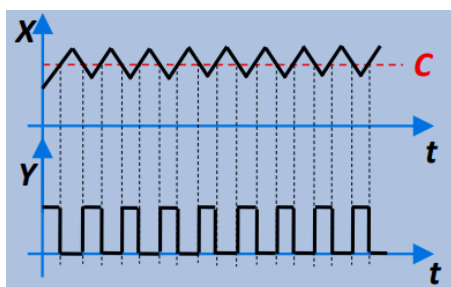


Figure 2.6.1. Evolution de la commande  $Y$  et de la mesure  $X$  en fonction du temps : Régulation TOR à un seuil  $C$

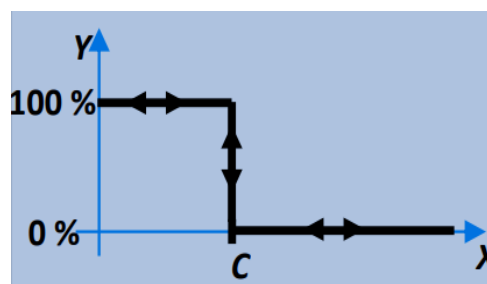


Figure 2.6.2. Variation de la commande  $Y$  en fonction de la mesure  $X$  : Régulation TOR à un seuil  $C$

### 2.3 Régulateur tout-ou-rien avec hystérésis

Un régulateur tout ou rien avec hystérésis déplace le point de commutation selon le sens de variation de l'écart, en introduisant une forme de retard dans la commutation, comme cela est montré dans la figure 2.7 :

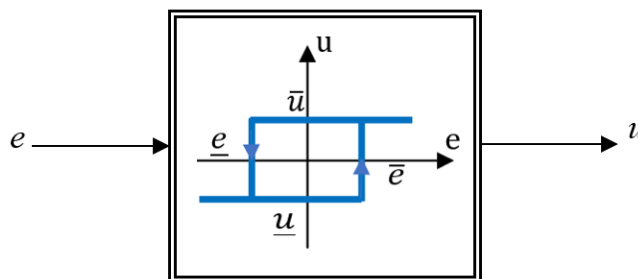


Figure 2.7. Régulateur tout-ou-rien avec hystérésis.

Les nombre réels  $\bar{u}$ ,  $\underline{u}$ ,  $\bar{e}$  et  $\underline{e}$ , sont fixes; on a souvent  $\underline{e} = -\bar{e}$  et  $\underline{u} = 0$  ou  $\underline{u} = -\bar{u}$ . Les commutations ont lieu pour  $e = \bar{e}$  si  $\dot{e} > 0$  et  $e = \underline{e}$  si  $\dot{e} < 0$ . Cette caractéristique n'est pas une fonction au sens mathématique du terme car elle associe, pour une valeur de  $e \in [\underline{e}, \bar{e}]$ , deux nombres  $\bar{u}$  et  $\underline{u}$ .

L'hystérésis provoque une imprécision en forçant le système à osciller avec une fréquence finie autour de  $e = 0$ . Ce mouvement oscillatoire naturel est appelé **cycle limite**. Ainsi, l'hystérésis, considérée habituellement comme un défaut, est ici exploitée pour limiter la fréquence des oscillations.

**Exemple 2.3:**

L'entraînement électrique en vitesse d'un moteur à courant continu et à excitation séparée entraînant une charge, sans couple résistant parasite est décrit par l'équation ci-dessous:

$$\dot{\omega}(t) + \frac{1}{J} \left( f + \frac{(K\Phi)^2}{R} \right) \omega(t) = \frac{K\Phi}{JR} u(t) \quad 2.7$$

avec les valeurs numériques suivantes :

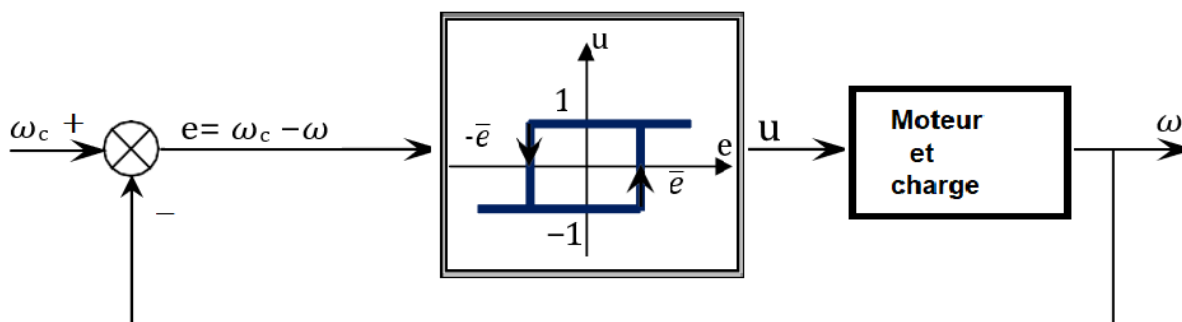
$$\frac{1}{J} \left( f + \frac{(K\Phi)^2}{R} \right) = 2 \quad 2.8$$

$$\frac{K\Phi}{JR} = 4$$

Donc on trouve :

$$\dot{\omega}(t) + 2\omega(t) = 4u(t) \quad 2.9$$

Le schéma fonctionnel de la grandeur de commande par un régulateur tout ou rien avec hystérésis, est représenté par la figure suivante :



**Figure 2.8. Schéma fonctionnel de la vitesse d'entraînement électrique par la commande tout-ou-rien avec hystérésis.**

Les figures ci-dessous représentent les réponses indicielles pour  $\bar{e} = 0.5$  et  $\bar{e} = 0.1$

✓ Pour  $\bar{e} = 0.5$

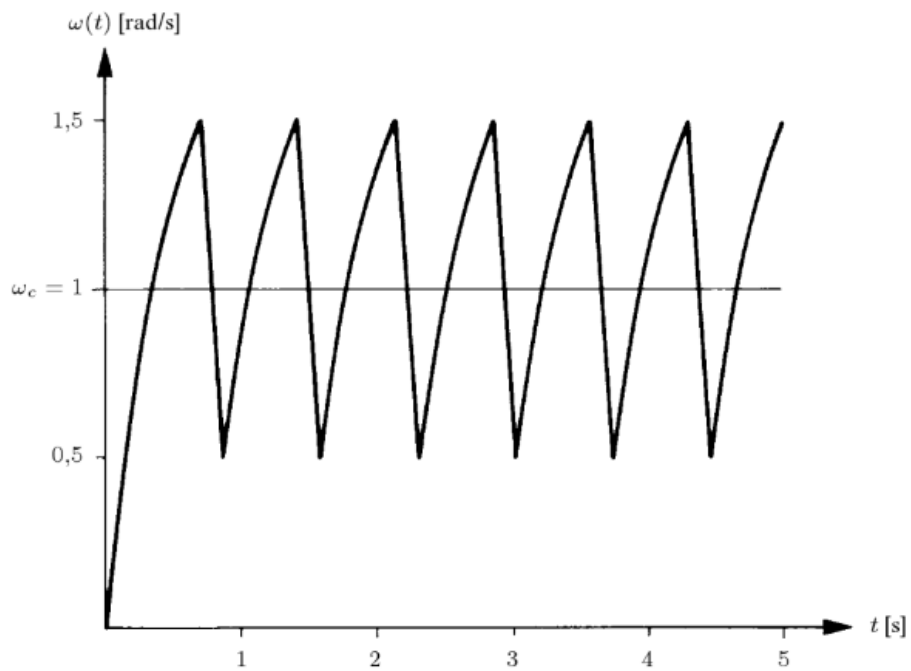


Figure 2.9 . La vitesse d'un entraînement électrique par une commande tout ou rien avec hystérésis ( $\bar{e} = 0.5$ ).

✓ Pour  $\bar{e} = 0.1$

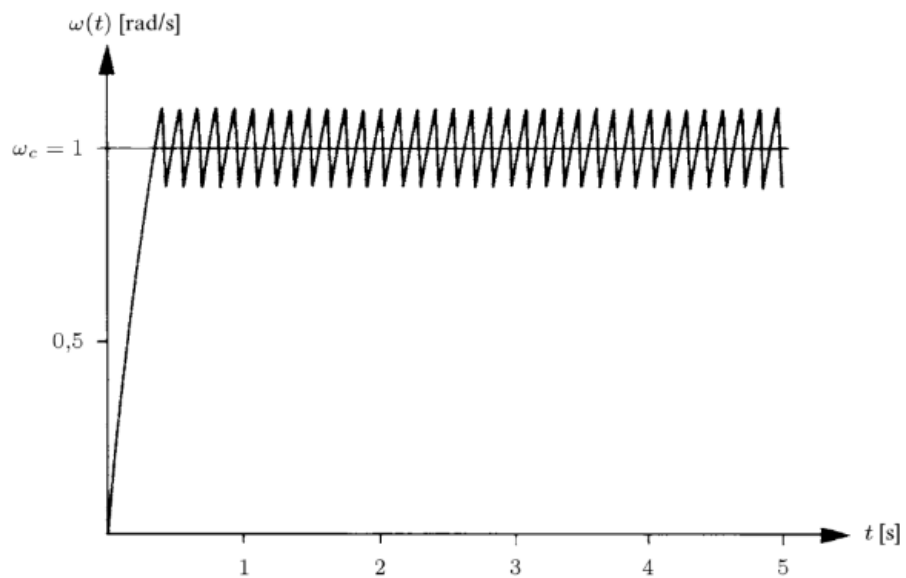


Figure 2.10 . La vitesse d'un entraînement électrique par une commande tout ou rien avec hystérésis ( $\bar{e} = 0.1$ ).

D'après les figures 2.9 et 2.10, on remarque bien qu'il y a un cycle limite autour de la valeur de consigne et l'amplitude des oscillations est égale à l'hystérésis  $\bar{e}$ . Cette amplitude diminue donc avec  $\bar{e}$ , en contrepartie la fréquence des oscillations augmente.

#### 2.4 Régulateur tout-ou-rien avec seuil et hystérésis

La caractéristique d'un régulateur tout ou rien avec seuil et hystérésis apparaît dans la figure 2.11.

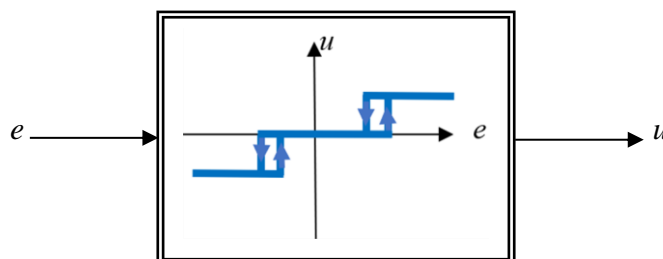
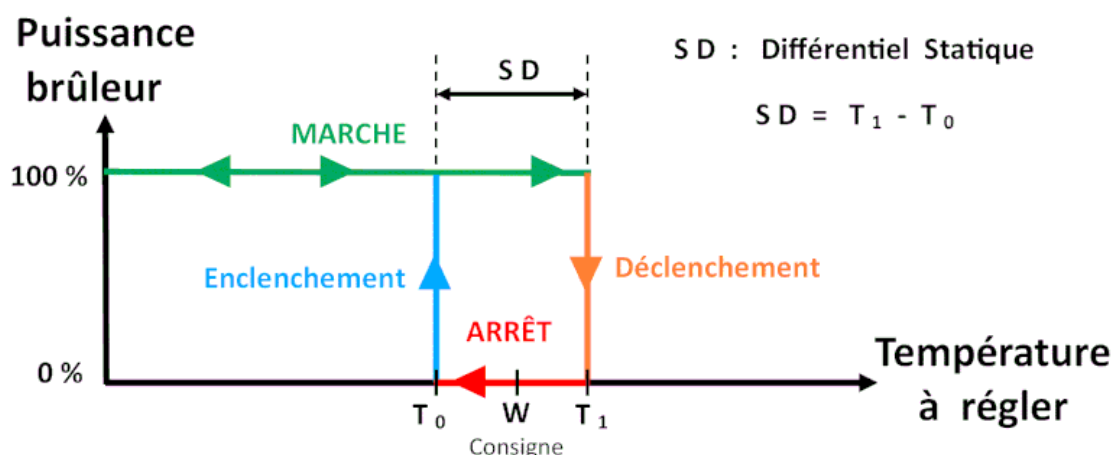


Figure 2.11. Régulateur tout-ou-rien avec seuil et hystérésis

Les régulateurs tout ou rien, bien que très simples à réaliser, moins chers souffrent de l'inconvénient inhérent de mal pondérer leur action en fonction de l'écart. Si l'hystérésis n'est pas correctement réglée, la déviation par rapport à la consigne sera grande. Ils sont souvent exploités dans des applications relativement simples, sans spécification sévère, où une analyse et une synthèse soignée superflues.

#### Exercice

On parle de régulation **TOUT ou RIEN (T.O.R.)** lorsque l'organe qui agit sur la grandeur à régler fournit soit 100% de ses possibilités, soit 0% (arrêt).



**Le brûleur est mis en marche et commence à chauffer l'eau. Il fournit la TOTALITÉ de sa puissance (100 %).**

**Lorsque la température de l'eau dépasse la consigne et atteint la valeur  $T_1$ , l'aquastat déclenche l'arrêt du brûleur.**



**Pendant l'arrêt du brûleur (0 %), l'eau refroidit.**

**Lorsque la température de l'eau repasse en-dessous de la consigne et atteint la valeur  $T_0$ , l'aquastat enclenche la remise en marche du brûleur.**

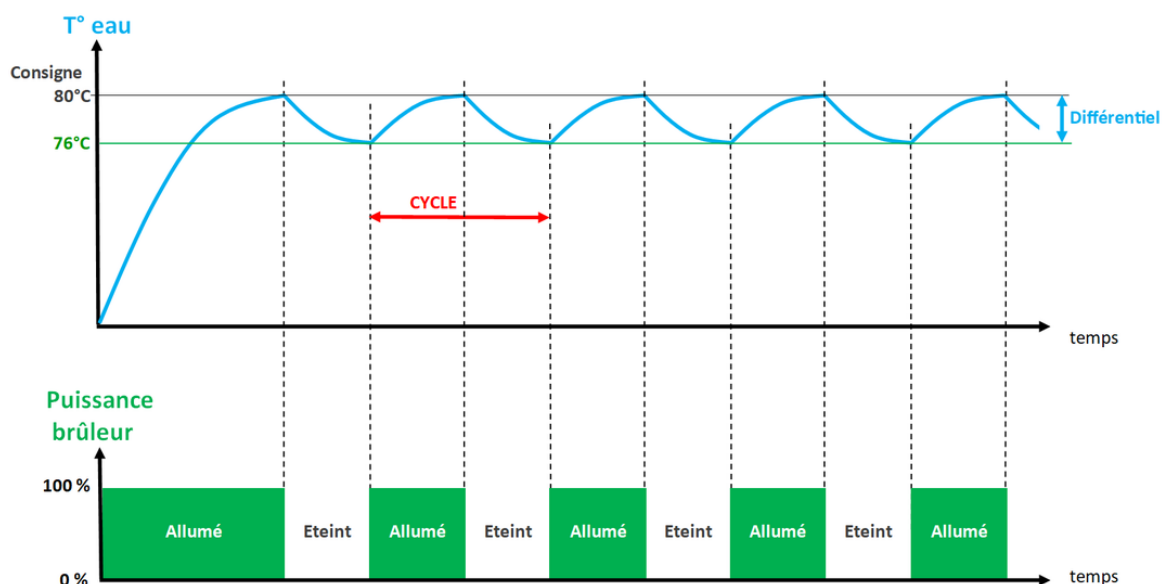
**Le brûleur fournit à nouveau la TOTALITÉ de sa puissance pour chauffer l'eau..., et le cycle recommence.**

La température souhaitée est appelée "consigne W". Elle est réglable en tournant le bouton de l'aquastat, situé généralement sur la face avant de la chaudière.

L'aquastat ne parvient pas à maintenir avec exactitude l'eau à la valeur de consigne. La température varie entre  $T_0$  et  $T_1$ . L'écart de température entre la mise en marche et à l'arrêt du brûleur est appelé "DIFFÉRENTIEL".



**Figure1. Aquastat réglable avec bulbe.**



Ci-dessus, le brûleur de la chaudière s'éteint lorsque la température de l'eau atteint 80°C.

Il redémarre lorsque la température de l'eau redescend en-dessous de 76°C.

Le brûleur maintient donc la température d'eau entre 76 et 80°C.

1. Calculer le différentiel ‘‘S.D’’ de l’aquastat.
2. Pendant un cycle de régulation, la durée du fonctionnement du brûleur dépend du rapport entre la puissance totale des émetteurs installés (radiateur, plancher chauffants...) et celle de brûleur.

Une brûleur de 21KW alimentant en chaleur 7KW de radiateur.

3. Calculer le rapport de cycle de fonctionnement (marche) de la brûleur.
4. Quel est donc le rapport à l'arrêt de brûleur.
5. Représenter ce phénomène de régulation tout ou rien sur un graphe.

### 3. Les régulateurs standards : P, PI, PD, PID

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir.

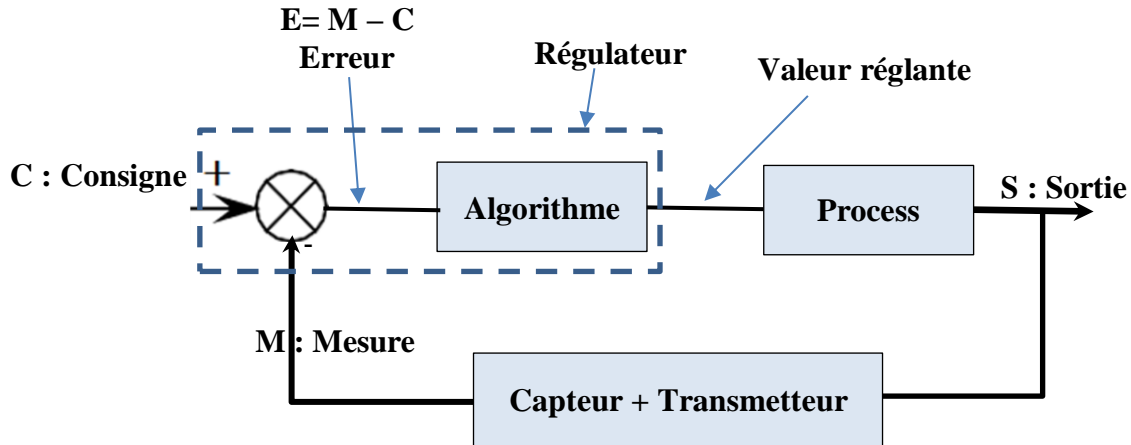


Figure 3.1 : schéma fonctionnelle d'un régulation automatique.

#### 3.1 Régulateur à action proportionnelle (P) :

Le régulateur (correcteur) à action proportionnelle, ou régulateur P est une actionsimple puisqu'il construit une commande  $u(t)$  proportionnelle à l'erreur  $e(t)$ . Le correcteur P ne permet pas de régler indépendamment la rapidité, la précision et les marges de stabilité.

- Loi de commande du régulateur P :

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

- Fonction de transfert du régulateur P :

$$G_c = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p$$

- Schéma fonctionnel du régulateur P :

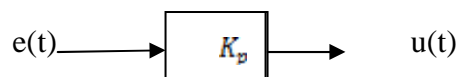


Figure 3.2 : Schéma fonctionnel d'un régulateur P.

- La réponse indicielle et la réponse fréquentielle du régulateur P sont données par les figures 3.3 et 3.4 respectivement.

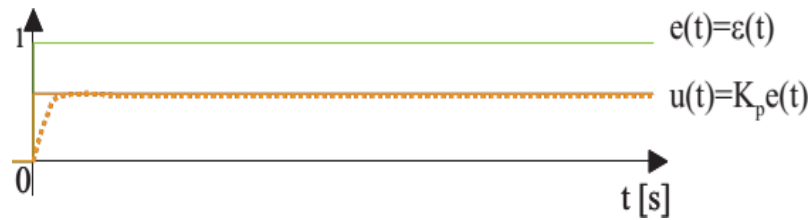


Figure 3.3 : Réponse indicielle du régulateur P (idéal).

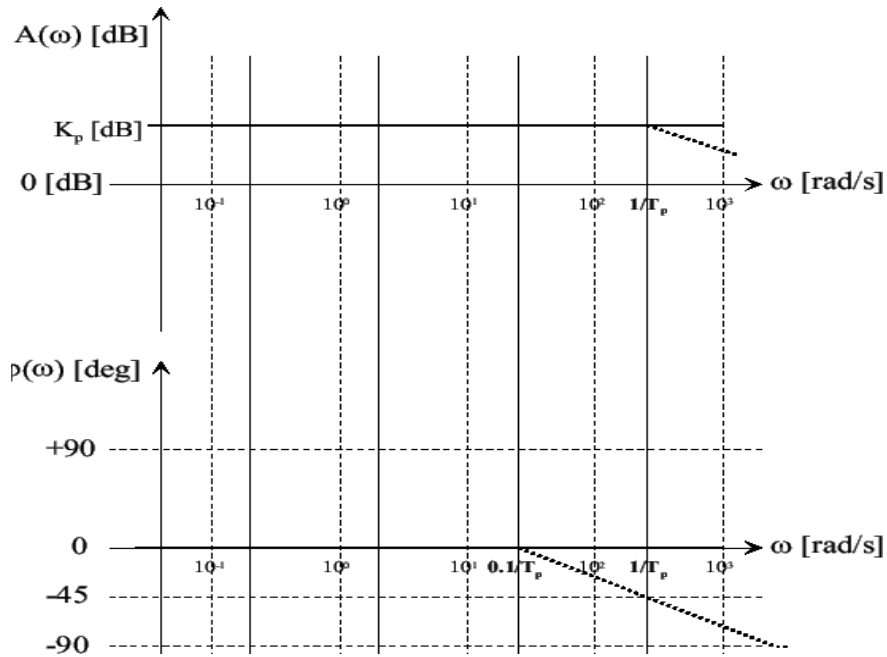
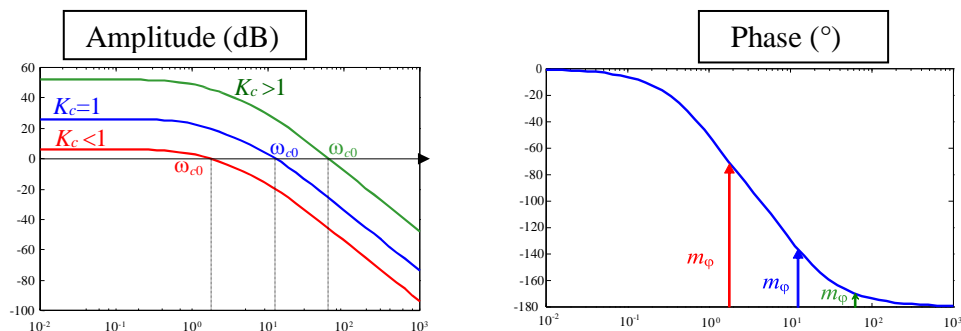


Figure 3.4 : Réponse harmonique du régulateur P.

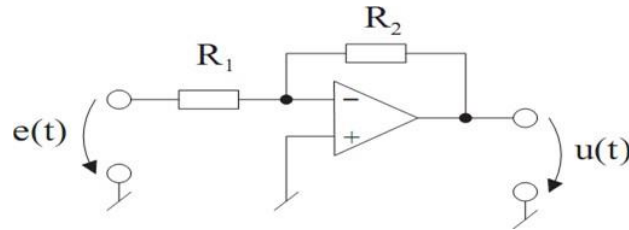
**Effet du correcteur :**

- Modification du gain du système en Boucle Ouverte (BO)
- Si  $K_c > 1$  (amplification)
  - translation du diagramme de gain de Bode vers le haut
  - augmentation de  $\omega_{co} \Rightarrow$  augmentation de la rapidité
  - diminution de la marge de phase (dégradation de la stabilité en BF)
  - amélioration de la précision du système en BF
- Si  $K_c < 1$  (atténuation)
  - translation du diagramme de gain de Bode vers le bas
  - diminution de  $\omega_{co} \Rightarrow$  diminution de la rapidité
  - Augmentation de la marge de phase (amélioration stabilité)
  - diminution de la précision du système en BF



**Réalisation pratique du régulateur P :**

La figure (3.5) présente le schéma électronique d'un régulateur P.



$$G_c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = - \frac{R_2}{R_1}$$

**Figure 3.5: Schéma électronique d'un régulateur P.**

On peut écrire la relation générale au nœud (-) de l'amplificateur

$$u_x \frac{1}{R_1} = u_y \frac{1}{R_2}$$

Et finalement la fonction de transfert est :

$$G_R(P) = \frac{U_y(P)}{U_x(P)} = \frac{R_2}{R_1}$$

**3.2 Régulateurs à action proportionnelle-intégrale (PI) :**

C'est la combinaison de P et de I

La combinaison des actions proportionnelles (P) et intégrales (I) permet d'associer l'avantage du régulateur P, c'est à dire la réaction rapide à un écart de réglage, à l'avantage du régulateur I qui est l'élimination de l'écart statique.

En général, le régulateur ne fonctionne pas en action intégrale pure (trop instable). Il fonctionne en correcteur Proportionnel Intégral (PI).

➤ Loi de commande :

$$u(t) = K_p \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_{-\infty}^t e(\tau) d\tau$$

Où  $T_i$  est la constante d'intégration

➤ Fonction de transfert du régulateur PI :

$$G_c(P) = \frac{U(P)}{E(P)} = K_p \frac{1 + PT_i}{P \cdot R_i}$$

➤ Schéma fonctionnel :

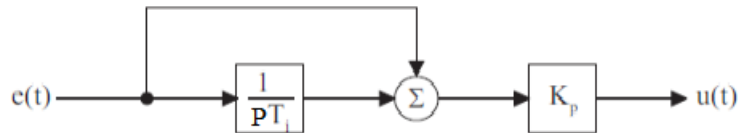


Figure 3.6: Schéma fonctionnel d'un régulateur PI.

➤ La réponse indicielle du régulateur PI est donnée par la figure 3.7 et la réponse harmonique est donnée par la figure 3.8.

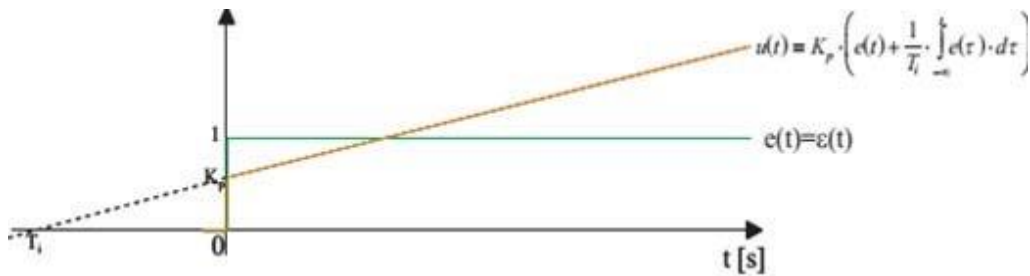


Figure 3.7: Réponse indicielle du régulateur PI.

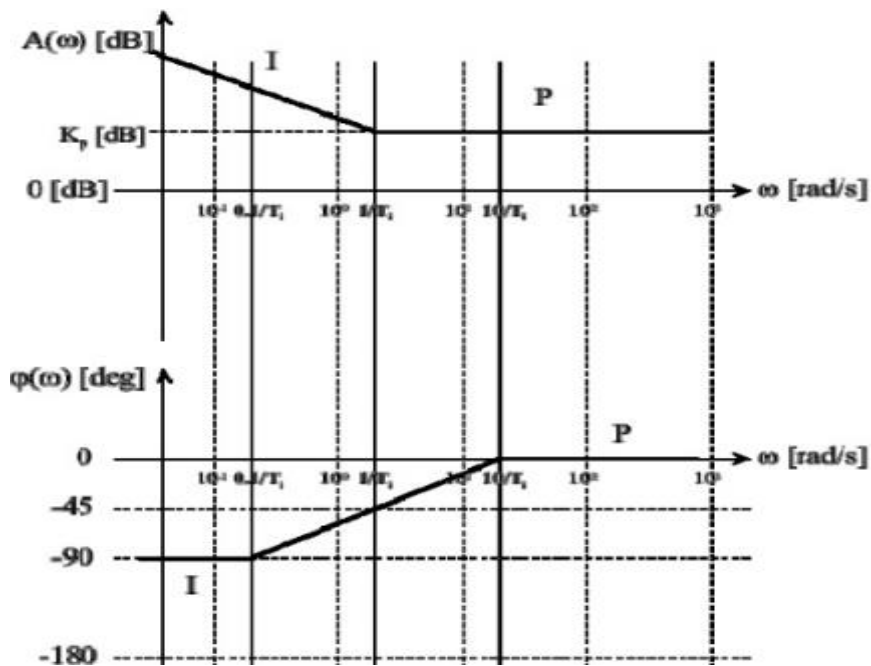
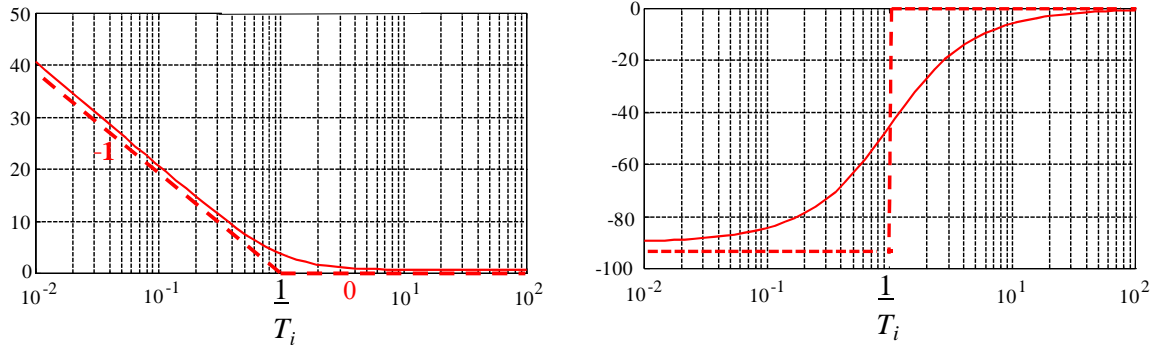


Figure 3.8 : Réponse harmonique du régulateur PI.

**Effet du régulateur :**

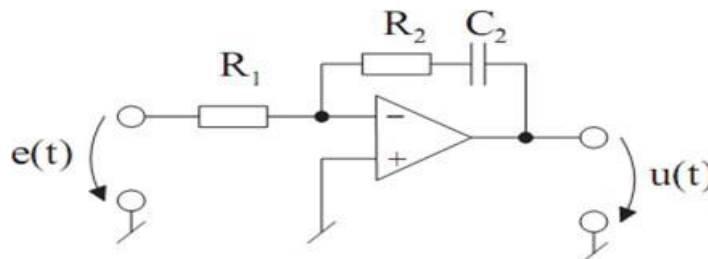
- Introduction d'un intégrateur
- Gain en basses fréquences ( $\omega \ll 1/T_i$ ) infini  $\Rightarrow$  erreur statique nulle
- Le gain du système corrigé ne sera pas modifié en hautes fréquences si  $\frac{1}{T_i} \ll \omega_{co}$   
 $\Rightarrow \omega_{co}$  ( $\Rightarrow$  rapidité) non modifiée
- La phase du système corrigé n'est modifiée qu'en basses fréquences (au contraire de I)

- La marge de phase n'est pas modifiée si  $\frac{1}{T_i} \ll \omega_{c0}$



**Réalisation pratique :**

La figure 3.9 présente le schéma électronique d'un régulateur PI (proportionnel-intégrateur).



**Figure 3.9: Schéma électronique du régulateur PI.**

Il possède un circuit de contre-réaction formé d'un condensateur  $C_2$  mis en série avec la résistance  $R_2$ . On peut écrire la relation générale au nœud (-) de l'amplificateur :

$$U_x \frac{1}{R_1} = U_y \frac{1 + P \cdot R_2 \cdot C_2}{P \cdot C_2}$$

Et finalement la fonction de transfert :

$$G_c(P) = \frac{U_y(P)}{U_x(P)} = \frac{R_2}{R_1} \frac{1 + PR_2C_2}{PR_2C_2}$$

Avec  $T_i = R_2 C_2$  et  $K_p = \frac{R_2}{R_1}$

Le régulateur PI est le régulateur le plus utilisé en pratique

**3.3 Régulateurs à action proportionnelle dérivé (PD) :**

Il combine l'action proportionnelle (P) et l'action dérivée (D).

- Loi de commande du régulateur PD :

$$u(t) = K_p \cdot (e(t) + T_d \cdot \frac{de}{dt})$$

Où  $T_d$  est la constante de dérivation plus  $T_d$  est grande, plus l'action dérivée est importante.

➤ Fonction de transfert :

$$G_c(P) = \frac{U(P)}{E(P)} = K_p (1 + P \cdot T_d)$$

➤ Schéma fonctionnel :

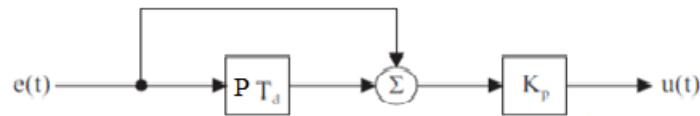


Figure 3.10: Schéma fonctionnel d'un régulateur PD.

➤ La réponse indicielle du régulateur PD est donnée par la figure 3.11 et la réponse harmonique est donnée par la figure 3.12.

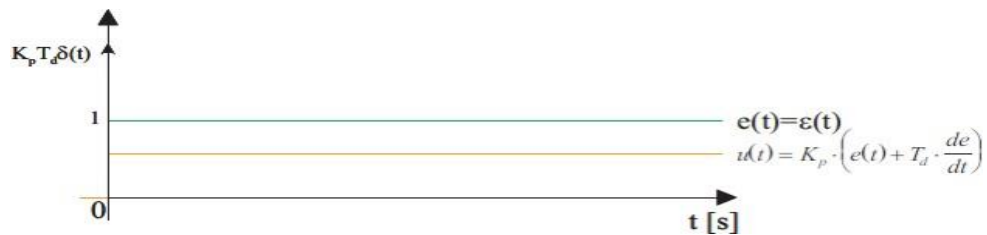


Figure 3.11: Réponse indicielle du régulateur PD.

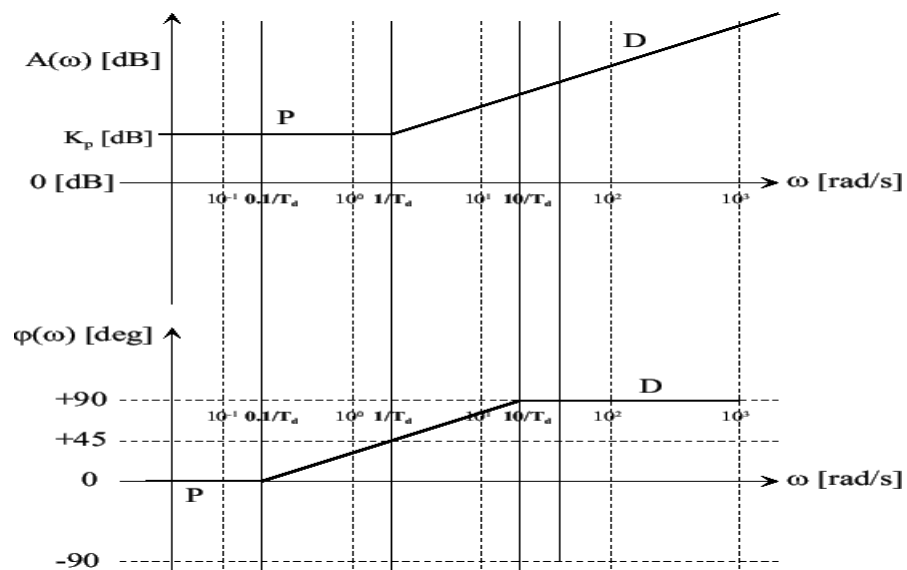
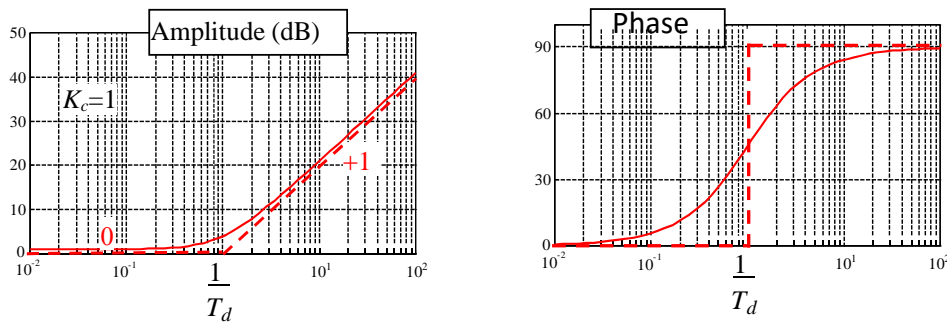


Figure 3.12: Réponse harmonique du régulateur PD.

**Effet du régulateur :**

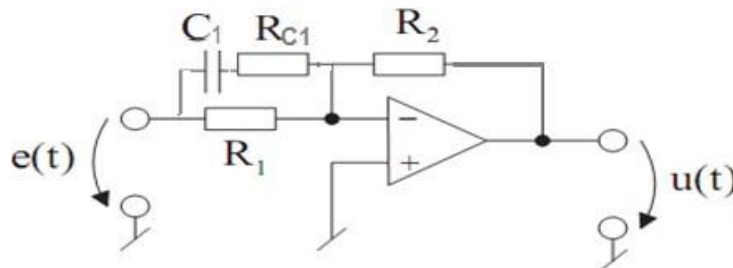
- Avance de phase maximale de 90° pour  $\omega \gg 10/T_d \Rightarrow$  amélioration de la stabilité (marge de phase)
- Augmentation de la pulsation  $\omega_{co} \Rightarrow$  amélioration de la rapidité ( $t_{r,5\%}, t_m \downarrow$ )
- Amplification en hautes fréquences (pour  $\omega > 1/T_d$ )  $\Rightarrow$  élargissement de la BP du système en BF  $\Rightarrow$  sensibilité aux bruits
- Diminution de l'erreur permanente





**Réalisation pratique :**

La Figure 3.13 présente le schéma électronique d'un régulateur PD (proportionnel-dérivateur).



**Figure 3.13: Schéma électronique du régulateur PD.**

**3.4 Régulateur à action Proportionnel-Intégral-Dérivée (PID) :**

PID : combinaison des correcteurs P, I et D

Par la présence de l'action intégrale, il permet d'annuler l'écart statique. La présence de l'action dérivée permet d'améliorer la stabilité et la rapidité du système.

La fonction de transfert :

$$C_P = \frac{U(P)}{E(P)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i P} + T_d P\right)$$

$T_i$  : constante d'intégration

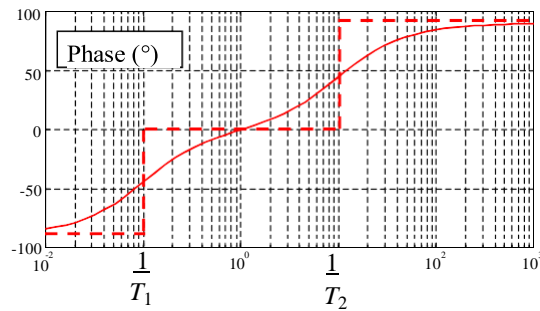
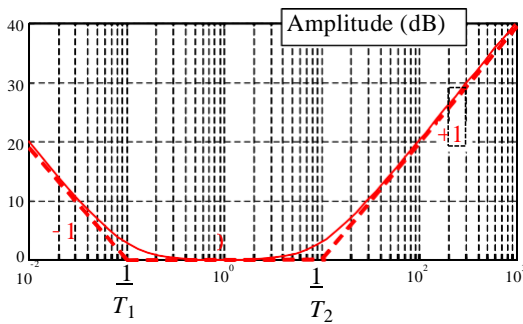
$T_d$  : constante de dérivation

➤ Loi de commande du régulateur PID

$$u(t) = K_c \cdot e(t) + \frac{K_c}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_c T_d \frac{de(t)}{dt}$$

**Effet du régulateur :**

- Avance de phase en hautes fréquences
- Amplification en hautes fréquences  
 ➡ Effet PD en hautes fréquences
- Gain infini en basses fréquences
- Retard de phase en basses fréquences  
 ➡ Effet PI en basses fréquences
- Fréquences moyennes : peu d'influence du correcteur



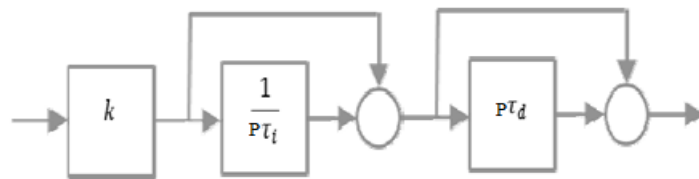
**3.5 Différente structures du régulateur PID :**

Dans un régulateur PID, il existe plusieurs façons d’associer les paramètres P, I et D. en effet, le correcteur PID peut avoir une structure série, parallèle ou mixte. Les valeurs des paramètres PID ne donnent pas le même comportement du procédé selon que la structure est parallèle ou mixte. C’est pourquoi il est primordial la connaissance de la structure existante du régulateur. La structure est imposée par le fabricant du régulateur.

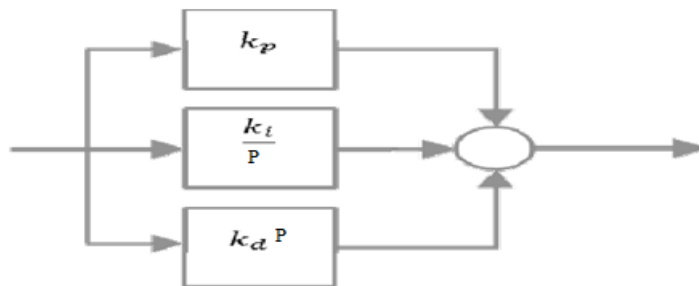
**3.5.1 PID série et parallèle**

Ces deux formes sont décrites pas les équations ci-dessous :

$$C_{serie}(P) = k (1 + 1/(PT_i))(1 + PT_d)$$



$$C_{parallele}(P) = k_p + \frac{K_i}{P} + K_d \cdot P$$



Ce qui est important de remarquer, c’est que ces deux formes sont mathématiquement équivalentes. Ainsi un régulateur sous forme série pourra être mis sous forme parallèle à partir des équations de transformation suivante :

$$K_p = K (1 + \frac{\tau_d}{\tau_i})$$

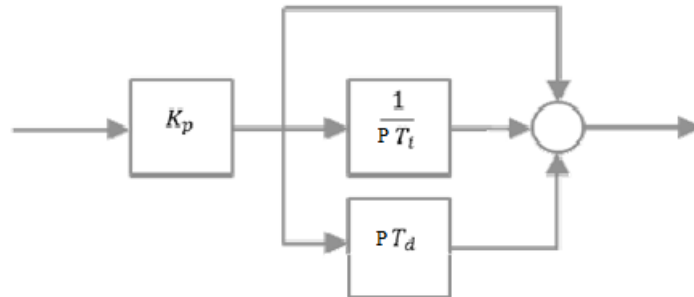
$$K_i = \frac{K}{\tau_i}$$

$$K_d = K \tau_d$$

### 3.5.2 PID standard, mixte ou idéal

Une 3<sup>ème</sup> forme de PID existe, celle-ci est appelée "standard", "mixte" ou parfois "idéal". Elle est définie par l'équation ci-dessous :

$$C_{structurel}(P) = K_P \left( 1 + \frac{1}{PT_i} + PT_d \right)$$



Cette forme standard se rapproche beaucoup de la forme parallèle et les équations de transformation entre les deux sont évidentes. La transformation de la forme série en forme standard s'obtient par les équations suivantes :

$$K_P = K \left( 1 + \frac{\tau_d}{\tau_i} \right)$$

$$T_i = \frac{\tau_d}{\tau_i} + \tau_d$$

$$T_d = \frac{\tau_d \tau_i}{(\tau_d + \tau_i)}$$

La principale différence entre ces différentes formes concerne l'effet des coefficients de réglage sur le comportement du régulateur. Ainsi la forme parallèle permet de découpler complètement les actions proportionnelle, intégrale et dérivée entre elles. Alors que dans la forme standard, une modification sur la valeur du coefficient  $K_p$  va modifier simultanément les actions proportionnelles, intégrale et dérivée. À ce titre, certaines personnes, qui règlent des PID de manière manuelle, préfèrent la forme parallèle.

## 3.6 Régulateur PID pneumatique

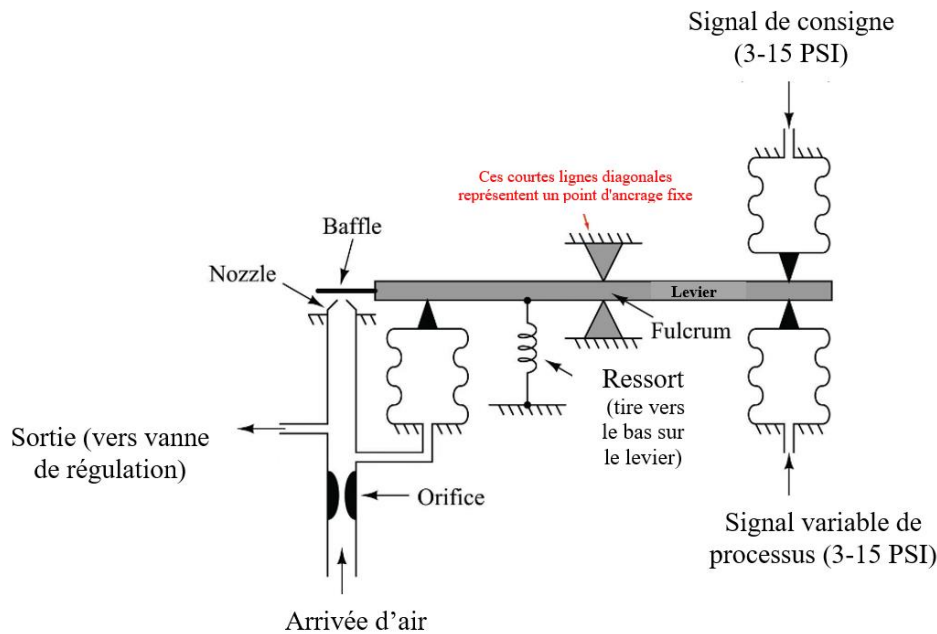
Un régulateur pneumatique reçoit un signal Variable de Processus (PV) en tant que pression d'air variable, compare ce signal à une valeur de point de consigne (SP) souhaitée, puis génère mécaniquement un autre signal de pression d'air en tant que sortie, entraînant un élément de contrôle final.

Dans cette section, on présente le développement des actions de régulateur pneumatique P, I et D.

### 3.6.1 Action de contrôle proportionnel

De nombreux régulateur PID pneumatiques utilisent le principe de l'équilibre des forces. Un ou plusieurs signaux d'entrée (sous forme de pressions pneumatiques) exercent une force sur une poutre en agissant à travers des diaphragmes, des soufflets et/ou des tubes de Bourdon, qui est ensuite gênée par la force exercée sur la même poutre par un air de pression de sortie agissant à travers un diaphragme, un soufflet ou un tube de bourdon. Le système mécanique auto-équilibrant essaie de maintenir le faisceau immobile grâce à un équilibrage exact des forces, la position du

faisceau étant précisément détectée par un mécanisme de buse/défecteur :



**Figure 3.14. Régulateur proportionnel pneumatique.**

L'action de ce régulateur particulier est directe, car une augmentation du signal variable de procédé (pression) entraîne une augmentation du signal de sortie (pression). L'augmentation de la pression variable de procédé (PV) tente de pousser l'extrémité droite du faisceau vers le haut, ce qui amène le déflecteur à se rapprocher de la buse. Ce blocage de la buse provoque une augmentation de la contre-pression pneumatique de la buse, augmentant ainsi la quantité de force appliquée par le soufflet de rétroaction de sortie à l'extrémité gauche du faisceau et ramenant le clapet (presque) à sa position d'origine. Si on souhaite inverser l'action du régulateur, il suffirait d'échanger les connexions de signal pneumatique entre les soufflets d'entrée, de sorte que la pression PV soit appliquée au soufflet supérieur et la pression SP au soufflet inférieur.

Tout facteur influençant le rapport de la/des pression(s) d'entrée sur la pression de sortie peut être exploité comme un réglage de gain (bande proportionnelle) dans ce mécanisme. La modification de la zone du soufflet (soit les soufflets PV et SP de manière égale, soit le soufflet de sortie par lui-même) influencerait ce rapport, tout comme un changement de position du soufflet de sortie (de sorte qu'il appuie contre le faisceau à une certaine distance du point d'appui).

#### ✓ Modes automatiques et manuels

Un mécanisme de régulateur proportionnel pneumatique plus pratique est présenté dans la figure 3.15, avec des réglages de point de consigne et de biais, et un mode de contrôle manuel.

Dans ce régulateur pneumatique, le transfert automatique/manuel sans à-coups est effectué par l'opérateur en faisant attention à l'indicateur d'équilibre révélant toute différence de pression d'air entre le soufflet de sortie et le régulateur de pression de réglage de sortie. En mode automatique, un passage en mode manuel consiste à ajuster le régulateur de sortie jusqu'à ce que l'indicateur d'équilibre enregistre une différence de pression nulle, puis à basculer la vanne de transfert en position "manuel". La sortie du régulateur est alors à la commande directe du régulateur de pression de réglage de sortie et ne répondra pas aux changements de PV ou de SP. Le retour "sans à-coups" en mode automatique nécessite que le régulateur de pression de consigne soit ajusté jusqu'à ce que l'indicateur d'équilibre enregistre à nouveau une différence de pression nulle, puis bascule la vanne de transfert en position "auto". La sortie du régulateur répondra à nouveau aux changements de PV et SP.

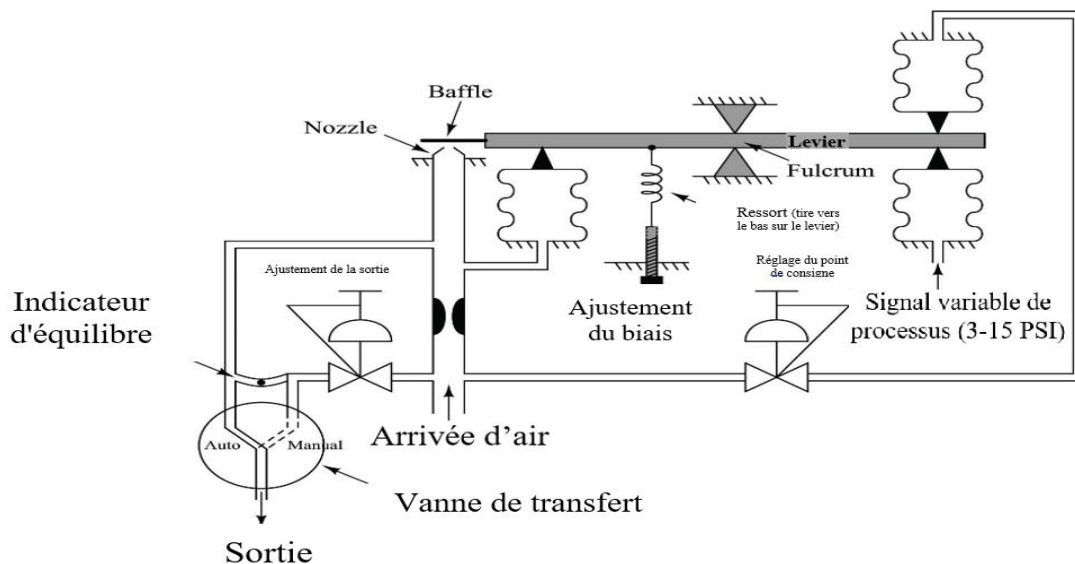


Figure 3.15. Modes automatiques et manuels de régulateur proportionnel pneumatique.

### 3.6.2 Action de contrôle dérivé

L'action de commande dérivée est relativement facile à ajouter à ce mécanisme de commande pneumatique. Tout ce que à faire est de placer une soupape de restriction entre le tube de la buse et le soufflet de rétroaction de sortie, ce qui fait que le soufflet retarde le remplissage ou la vidange de sa pression d'air au fil du temps :

Si un changement soudain se produit dans PV ou SP, la pression de sortie saturera avant que le soufflet de sortie n'ait la possibilité d'égaliser la pression avec le tube de signal de sortie. Ainsi, la pression de sortie "monte" avec tout "changement d'étape" soudain dans l'entrée : exactement comme une action de contrôle dérivée.

Si le PV ou le SP augmente avec le temps, le signal de sortie augmentera en proportion directe (action proportionnelle), mais il y aura également un décalage supplémentaire de pression au niveau du signal de sortie afin de maintenir l'air entrant ou sortant du soufflet de sortie à un taux constant pour générer la force nécessaire pour équilibrer le changement de signal d'entrée. Ainsi, l'action dérivée fait monter ou descendre la pression de sortie (selon la direction du changement d'entrée) plus qu'elle ne le ferait avec une action proportionnelle seule en réponse à une entrée en rampe : exactement ce que nous attendrions d'un contrôleur avec les deux et les actions de contrôle dérivées.

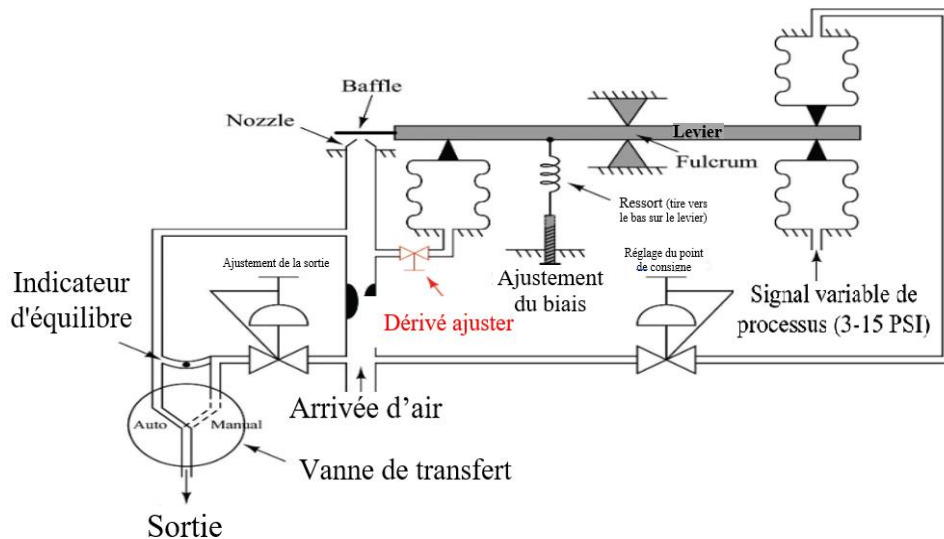


Figure 3.16. Régulateur pneumatique à action de contrôle dérivé.

### 3.6.3 Action de contrôle intégrale

L'ajout d'une action intégrale au mécanisme de régulateur pneumatique hypothétique nécessite le placement d'un second soufflet (un soufflet de « réinitialisation ou remise à zéro ») en face du soufflet de rétroaction de sortie, et une autre soupape de restriction au mécanisme :

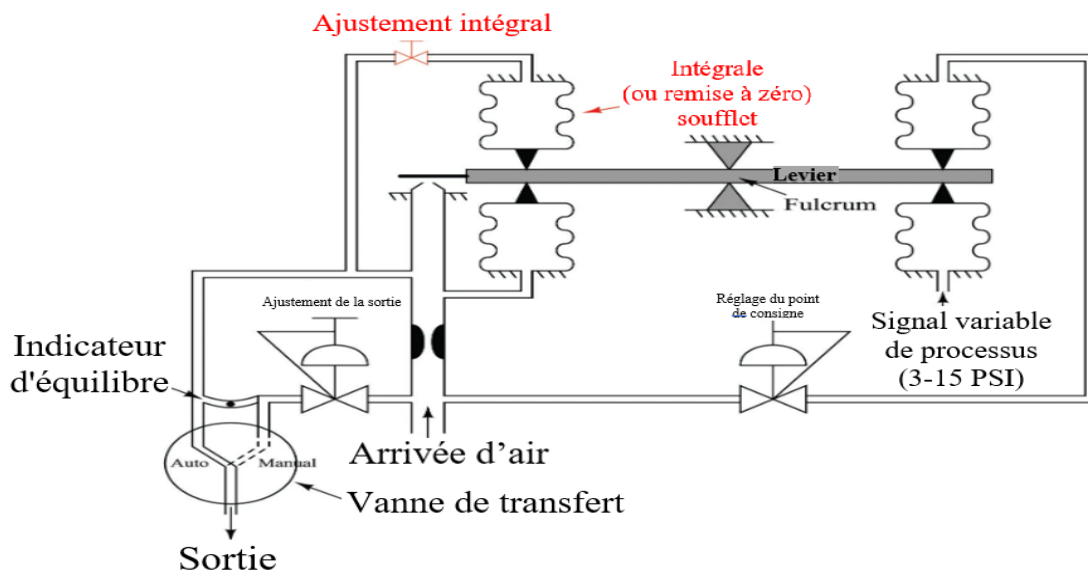
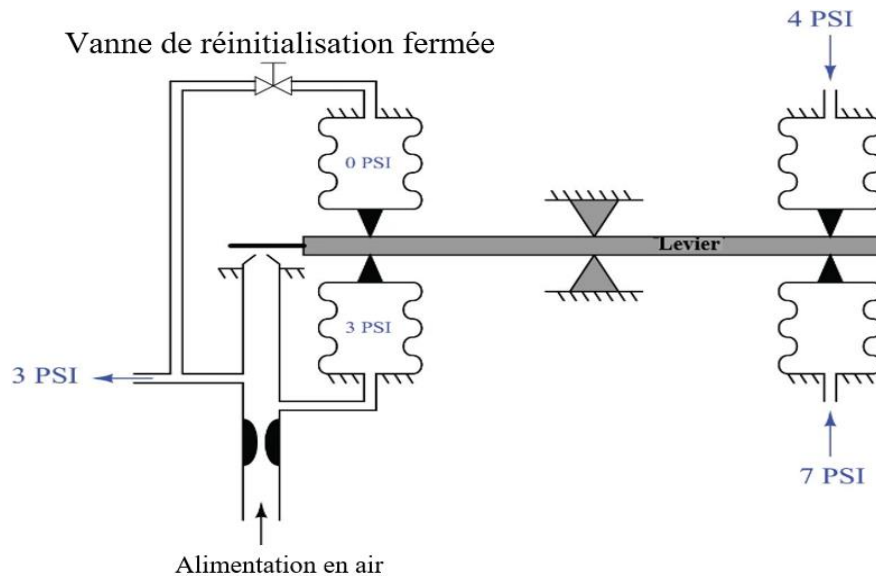


Figure 3.17. Régulateur pneumatique à action de contrôle intégrale.

Ce deuxième soufflet prend la pression d'air de la ligne de sortie et la traduit en force qui s'oppose au soufflet de rétroaction d'origine. Au premier abord, cela peut sembler contre-productif, car cela annule la capacité de ce mécanisme à équilibrer en permanence la force générée par les soufflets PV et SP. En effet, cela rendrait le système d'équilibre des forces complètement inefficace si ce nouveau soufflet de « réinitialisation » pouvait se gonfler et se dégonfler sans délai. Cependant, avec un décalage dans le temps apporté par la restriction de la vanne de réglage intégrée et du volume du soufflet pneumatique, la force d'annulation de ce soufflet est retardée dans le temps. Au fur et à mesure que ce soufflet se remplit (ou se vide) lentement d'air sous pression provenant de la buse, Pour mieux comprendre cette action intégratrice, réalisons une « expérience de pensée »

sur une version simplifiée du contrôleur. Le mécanisme suivant a été dépouillé de toute complexité inutile afin que nous puissions nous concentrer uniquement sur les actions proportionnelles et intégrales. Ici, nous envisageons que les signaux de pression d'air PV et SP diffèrent de 3 PSI, ce qui fait que le mécanisme d'équilibre des forces répond instantanément avec une pression de sortie de 3 PSI au soufflet de rétroaction (en supposant un emplacement de point d'appui central, donnant un gain de contrôleur de 1). La vanne de réinitialisation (intégrale) a été complètement fermée au début de cette expérience de pensée :



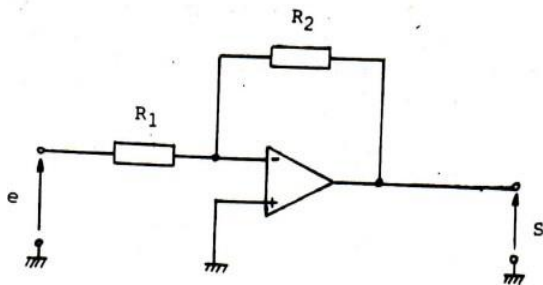
**Figure 3.18. Régulateur pneumatique à action de contrôle proportionnelle et intégrale.**

Avec 0 PSI de pression d'air dans le soufflet de réinitialisation, c'est comme si le soufflet de réinitialisation n'existait pas du tout. Le mécanisme est un simple contrôleur pneumatique uniquement proportionnel.

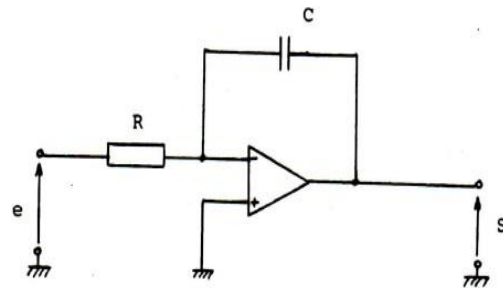
Maintenant, imaginez ouvrir un peu la vanne de réinitialisation, de sorte que la pression d'air de sortie de 3 PSI commence à remplir lentement le soufflet de réinitialisation. Au fur et à mesure que le soufflet de réinitialisation se remplit d'air sous pression, il commence à pousser vers le bas sur l'extrémité gauche du faisceau de force. Cela force le déflecteur à se rapprocher de la buse, provoquant une augmentation de la pression de sortie. Le soufflet de sortie régulier n'a pas de soupape de restriction pour empêcher son remplissage, et il applique donc immédiatement plus de force vers le haut sur le faisceau avec la pression de sortie croissante. Avec cette pression plus élevée, le soufflet de réinitialisation a une pression « finale » encore plus grande à atteindre, et ainsi son taux de remplissage continue. Le résultat des forces opposées de ces deux soufflets (instantané, temporisé) est que la pression du soufflet inférieur doit toujours être en avance de 3 PSI sur la pression du soufflet supérieur afin de maintenir une différence de pression de 3 PSI nécessaire pour équilibrer la force avec les soufflets PV et SP (dont les pressions diffèrent de 3 PSI). Cela crée une pression différentielle constante de 3 PSI à travers la soupape de restriction de réinitialisation, ce qui entraîne un flux constant d'air dans le soufflet de réinitialisation à un débit déterminé par cette chute de pression et l'ouverture de la soupape de restriction. Finalement, cela entraînera la pression de sortie à saturer au maximum, l'importance pratique de cette action de pression croissante est que le mécanisme présente maintenant une réponse de contrôle intégrale à l'erreur constante entre PV et SP : Plus la différence de pression entre PV et SP est grande (c'est-à-dire plus l'erreur est grande), plus la chute de pression se développera à travers la vanne de réinitialisation, provoquant le remplissage (ou le vide, selon le signe de l'erreur) du soufflet de réinitialisation avec de l'eau comprimée.

**Exercice :**

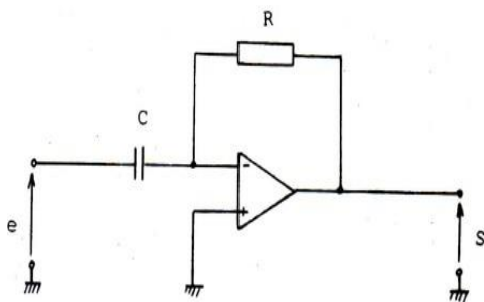
Soit les correcteurs suivants :



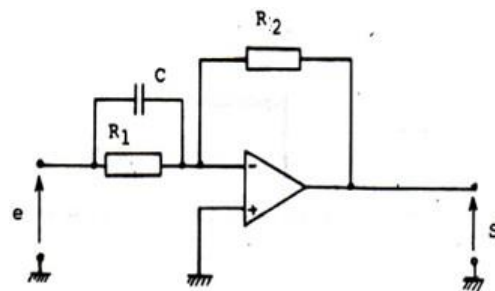
**Figure 3.1**



**Figure 3.2**



**Figure 3.3**



**Figure 3.4**

1. Déterminer la fonction de transfert de chaque correcteur  $S_i(P)/E_i(P)$ .
2. Déterminer la nature de chaque correcteur.
3. Tracer la réponse indicielle  $S_i(t)$  de chaque correcteur en fonction du temps 't'.



#### 4. Choix et dimensionnement des régulateurs

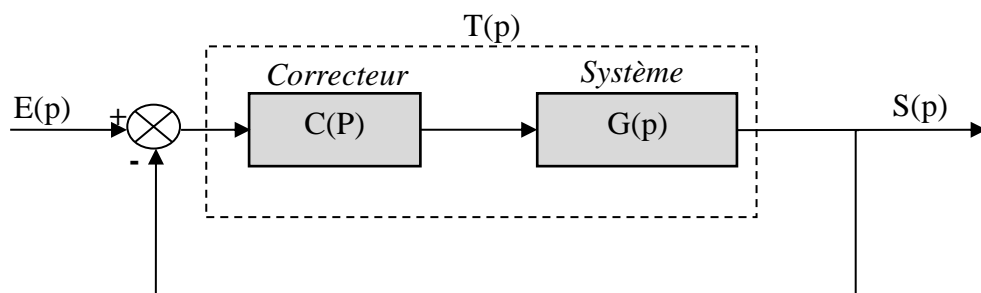
Cela consiste à établir des critères qui permettent de choisir le type de régulateur et d'en déterminer les coefficients (constante de temps) dans le but d'aboutir à une régulation stable et amortie.

Il existe plusieurs méthodes pour le dimensionnement des régulateurs standard qui permettent de calculer les paramètres des régulateurs, comme le critère de Ziegler-Nichols. Dans le domaine des réglages industriels, on utilise d'autres critères qui donnent des résultats plus satisfaisants, à savoir :

- critère méplat ;
- critère symétrique.

##### 4.1 Critère méplat

Considérons le système asservi à retour unitaire de la figure ci-dessous



$G(p)$  la fonction de transfert du système (d'ordre  $n$ ) à régler :

$$G(p) = \frac{K}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p) \dots (1 + \tau_n p)} \quad 1$$

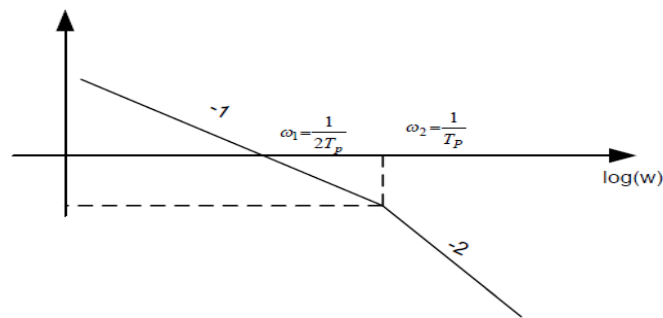
avec  $\tau_1 \geq \tau_2 \geq \tau_3 \geq \tau_4 \dots \geq \tau_n$

$T(p)$  fonction de transfert en boucle ouverte :

La fonction de transfert en boucle fermée  $F(p)$  vaut :

$$F(p) = \frac{T(p)}{1 + T(p)}$$

Avec le critère méplat, on cherche à obtenir pour le système réglé la bande passante la plus large possible en évitant que le facteur de résonance dépasse 1. La réponse harmonique en boucle ouverte ( $T(p)$ ) correspondante à cet objectif est donnée par la figure ci-dessous.



**Figure 4.1: Réponse harmonique de T(p), dimensionnement du régulateur selon le critère méplat.**

On pose  $T_r(p)$  fonction de transfert en boucle ouverte recherchée :

$$T_r(p) = \frac{1}{2T_p p (1 + T_p p)} \quad 2$$

Pour obtenir donc  $T_r(p) \approx T(p)$ , on aligne la (ou les) pulsation(s) de coupure du correcteur ( $1/T_1$ , le cas échéant  $1/T_2$ ) sur la (ou les) pulsations de coupures du système à régler ( $1/\tau_1$ , le cas échéant  $1/\tau_2$ ).

La fonction de transfert du régulateur est alors :

$$C(p) = \frac{(1 + T_n p)(1 + T_v p)}{T_i p} \quad 3$$

$T_n$  : Constante de temps d'intégration ;

$T_v$  : Dosage de corrélation de dérivée ;

$T_i$  : Dosage de corrélation d'intégrale.

En substituant (3) dans (1), on obtient :

$$T(p) = \frac{(1 + T_n p)(1 + T_v p)}{T_i p} \times \frac{K}{(1 + \tau_1 p)(1 + \tau_2 p) \dots (1 + \tau_n p)}$$

$$T(p) = \frac{K}{T_i p \prod_{i=3}^n (1 + \tau_i p)} \quad 4$$

En comparant (2) et (4), nous aurons :

$$\frac{K}{T_i} = \frac{1}{2T_p}$$

$$T_i = 2KT_p \quad 5$$

$$\prod_{i=3}^n (1 + \tau_i p) = (1 + T_p p) \Rightarrow T_p = \sum_{i=3}^n \tau_i \quad \text{quand} \quad \tau_i \ll 1$$

$$T_p = \sum_{i=3}^n \tau_i \quad 6$$

Les coefficients des régulateurs déterminés selon le critère méplat sont donnés par le tableau suivant :

$n_s$	Type de régulateur	$T_n$	$T_v$	$T_i$
1	PI	$T_1$	-	$2K T_p$
2	PID	$T_1$	$T_2$	$2K T_p$

$n_s$  étant l'ordre du système à régler.

#### 4.2 Critère sur la réponse harmonique symétrique (ou plus court : critère symétrique)

L'emploi du critère méplat pose des problèmes lorsque le système à régler possède un comportement intégral. De même, si les constantes de temps dominantes sont élevées (le temps de réglage pour annuler l'influence de la grandeur de perturbation devient trop long).

Pour pallier ces inconvénients, on peut dimensionner le régulateur selon le critère sur la réponse harmonique symétrique (ou plus court : critère symétrique).

*Formulation de critère :*

- ✓ La réponse harmonique du circuit de réglage ouvert doit prendre une forme symétrique ;
- ✓ Amplification élevée de cette réponse aux faibles valeurs de la pulsation  $\omega$ .

Les coefficients du régulateur calculés selon le critère symétrique sont donnés dans le tableau suivant :

$n_s$	Type de régulateur	$T_n$	$T_v$	$T_i$
1	PI	$4T_p$	-	$8 \frac{K}{T_1} T_p^2$
2	PID	$8T_p$	$8T_p$	$128 \frac{K}{T_1 T_2} T_p^3$

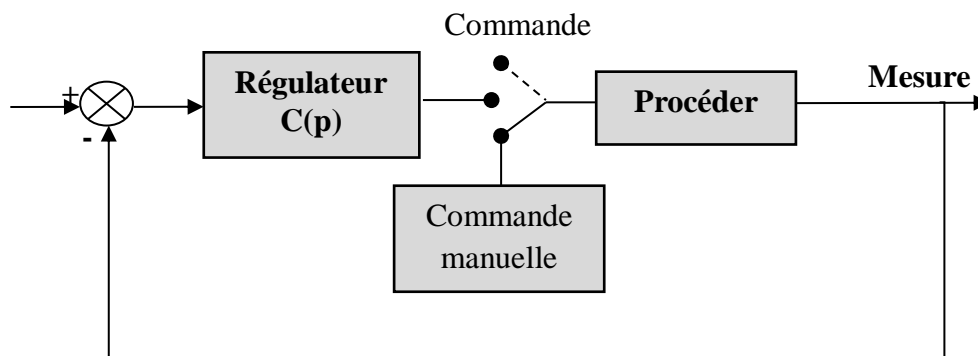
### 4.3. Méthode pratique de Ziegler -Nichols pour le réglage d'un correcteur P.I.D

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposée deux approches heuristiques basées sur leur expérience et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs **P**, **PI** et **PID**. La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système boucle à sa limite de stabilité. Il est important de souligner que ces méthodes ne s'appliquent en général qu'à des systèmes sans comportement oscillant et dont le déphasage en hautes fréquences dépasse  $-180$  degrés. Ces systèmes possèdent souvent un retard pur et/ou plusieurs constantes de temps. On les rencontre surtout dans les processus physicochimiques tels que les réglages de température, de niveau, de pression, etc.

La méthode développée par Ziegler et Nichols n'est utilisable que si le système étudié supporte les dépassements. Elle consiste à augmenter progressivement le gain d'un correcteur proportionnel pur jusqu'à l'obtention de l'oscillation. A partir de ces valeurs Ziegler et Nichols proposent des valeurs permettant le réglage des correcteurs P, P.I et P.I.D.

#### 4.3.1. Méthode de Ziegler&Nichols en boucle ouverte.

##### 4.3.1.1 Mode opératoire



- Le régulateur est en mode automatique et la boucle est dans état stabilisé. La sortie du régulateur indique une commande  $u_0$  et la sortie du procédé indique une valeur  $y_0$ .
- On affiche la valeur  $u_0$  sur le module de la commande manuelle.
- On met le régulateur en mode manuel c'est-à-dire qu'il est déconnecté de la boucle.
- On envoie une variation constante du signal de commande sur l'entrée procédé et on enregistre sur une table traçante la variation du signal de mesure à la sortie du procédé.

Il s'agit donc de l'enregistrement de la réponse indicielle du procédé seul.

##### 4.3.1.2. Exploitation de la réponse indicielle

Sur l'enregistrement de la réponse indicielle ci-dessous, on trace le mieux possible la tangente au point d'inflexion Q de la courbe. On mesure ensuite le temps  $T_u$

correspondant au point d'intersection entre l'axe des abscisses et la tangente ainsi que le temps  $T_a$  « temps de montée de la tangente ».

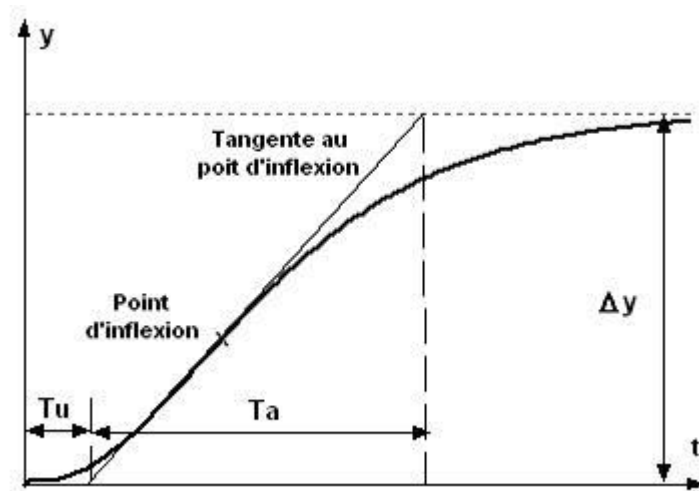


Figure 4.2: Réponse indicielle.

### 4.3.1.3. Réglage du régulateur PID

Ziegler&Nichols proposent de calculer les paramètres du régulateur P, PI ou PID à l'aide des recommandations suivantes :

Réglage des paramètres			
Régulateur	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P : $C(P) = K_p$	$\frac{T_a}{T_u} \frac{1}{K}$	-	-
PI : $C(P) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right)$	$\frac{T_a}{T_u} \frac{0.9}{K}$	3.33 $T_u$	-
PID : $C(P) = K_p \left( 1 + T_d p + \frac{1}{T_i p} \right)$	$\frac{T_a}{T_u} \frac{1.2}{K}$	2.0 $T_u$	0.5 $T_u$

Une illustration de cette démarche est donnée ci-dessous pour la réponse indicielle d'un procédé à un échelon unité.

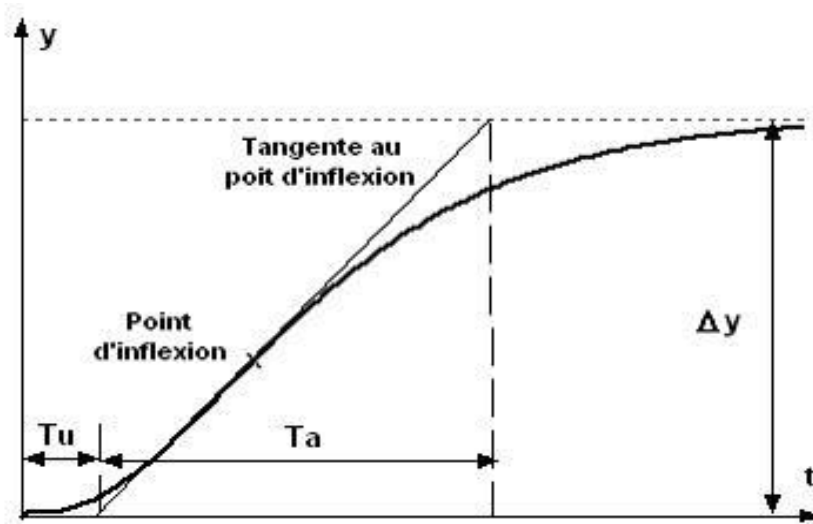


Figure 4.3: Réponse indicielle d'un procédé à un échelon unité.

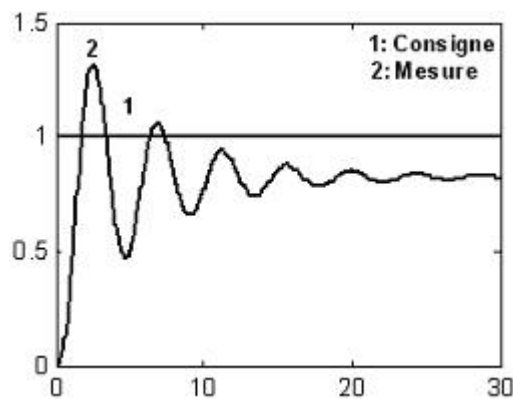
On relève les paramètres suivants :

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{0.5}{1} = 0.5 \quad T_u = 0.8 \quad T_a = 3.7$$

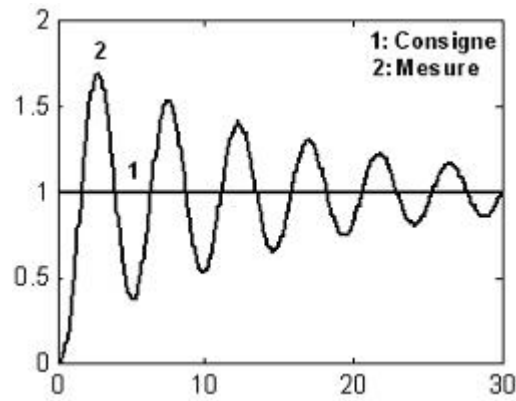
Le tableau de réglage proposé par Ziegler&Nichols est :

Action	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	9.25	-	-
PI	8.33	2.66	-
PID	11	16	04

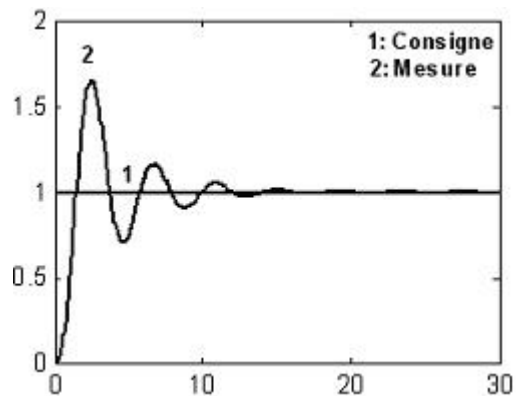
Les réponses indicielles en boucle fermée sont données par les figures suivantes avec une consigne égale à 1.



Régulation P



Régulation PI



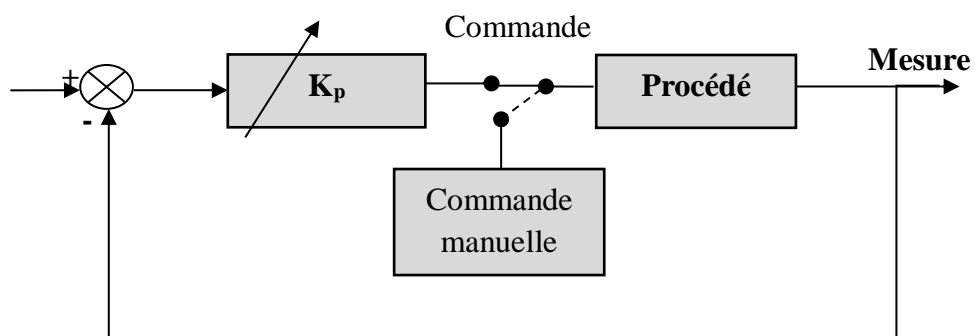
Régulation PID

**Figure 4.4: Les réponses indicielles en boucle fermée d'un procédé à un échelon unité.**

Généralement les gains proportionnels ( $K_p$ ) proposés par Ziegler&Nichols sont trop élevés et conduisent à un dépassement supérieur à 20%. Il ne faut pas craindre de réduire ces gains d'un facteur 2 pour obtenir une réponse satisfaisante.

### 4.3.2. Méthode de Ziegler&Nichols en boucle fermée.

#### 4.3.2.1. Mode opératoire

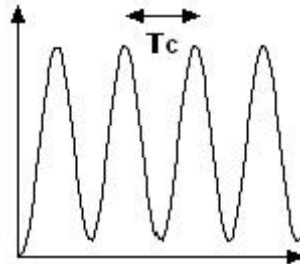


- Le régulateur est en mode automatique avec une faible valeur de  $K_p$ . Les actions I et D sont inhibées en mettant  $T_i = T_{i\max}$  et  $T_d = 0$ .

- On augmente progressivement le gain  $K_p$  du correcteur proportionnel agissant seul jusqu'à l'obtention de la juste oscillation de la boucle (pompage).

#### 4.3.2.2. Exploitation du résultat de pompage de la boucle

On relève le gain limite ( $K_{pc}$ ) conduisant au pompage de la boucle et la période des oscillations  $T_c$  (voir figure ci-dessous) correspondant à ce fonctionnement à partir de n'importe quel point d'observation (sortie du régulateur, sortie du procédé...).



#### 4.3.2.3. Réglage du régulateur PID

Ziegler & Nichols proposent de calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide des recommandations suivantes :

Réglage des paramètres			
Régulateur	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P : $C(P) = K_p$	$0.5 K_{pc}$	-	-
PI : $C(P) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right)$	$0.45 K_{pc}$	$0.83 T_c$	-
PID : $C(P) = K_p \left(1 + T_d p + \frac{1}{T_i p}\right)$	$0.6 K_{pc}$	$0.5 T_c$	$0.125 T_c$

Pour illustrer cette démarche, on considère le même système considéré plus haut et pour lequel on a les résultats du pompage suivants :  $K_{pc}=16$  et  $T_c = 3.63$  (l'unité du temps n'est pas précisée ici)

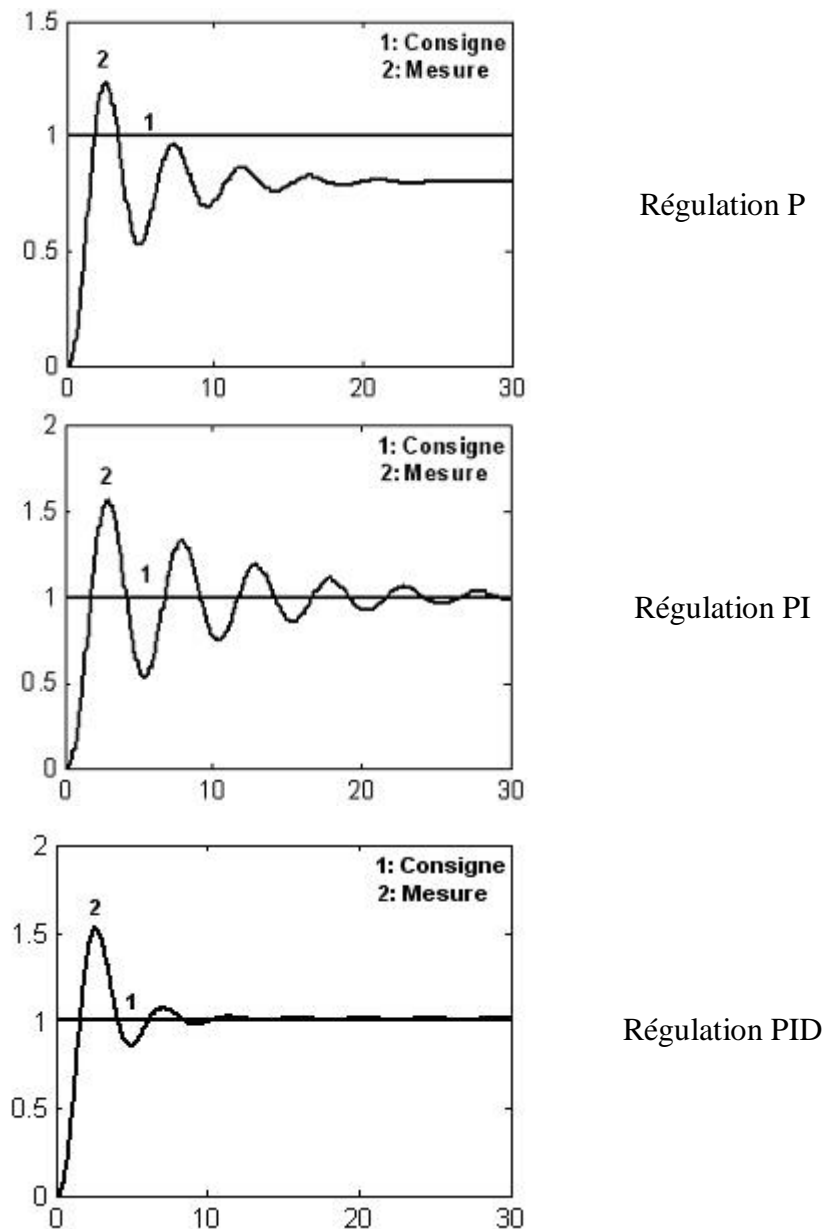
Le tableau de réglage proposé par Ziegler&Nichols est :

Action	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	8	-	-
PI	7.2	3	-
PID	9.6	1.82	0.45



On note au passage que les deux méthodes de Ziegler&Nichols conduisent à des valeurs très proches pour les paramètres du régulateur et par conséquent les performances seront similaires.

En effet, les réponses indicielles en boucle fermée sont données par les figures suivantes avec une consigne égale à 1.

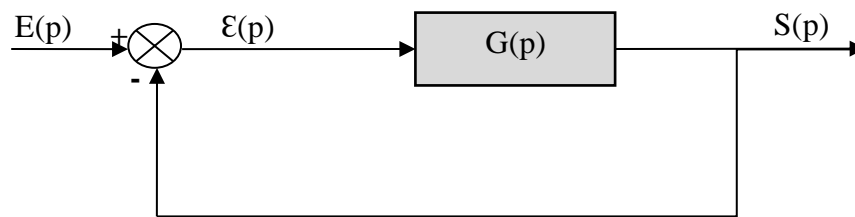


**Figure 4.5: les réponses indicielles en boucle fermée.**

Les valeurs proposées par Ziegler&Nichols ont été testées dans de très nombreuses situations. Elles conduisent également à un temps de montée relativement court assorti d'un dépassement élevé.

**Exercice 1 :**

Considérons le système asservi ci-dessous :



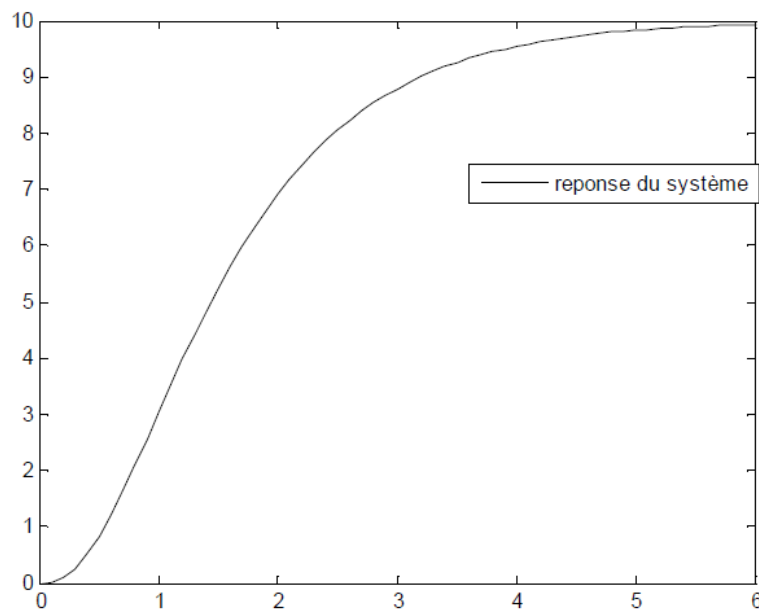
avec :

$$G(P) = \frac{10}{(1+2p)(1+0,1p)} \quad > 0$$

En utilisant le critère méplat, donner les correcteurs correspondants.

**Exercice 2 :**

En utilisant la méthode de Ziegler-Nichols, donner les paramètres des trois correcteurs (P, PI et PID) correspondants au système dont la réponse indicielle est donnée ci-dessous :

**Exercice 3 :**

Un signal échelon de -15% apparaît à l'entrée d'un régulateur à action proportionnelle dont la consigne d'entrée est réalisée à 45%.

Si le gain est de 2 et que la sortie du régulateur est réglée à 50%, quelle va être la réponse en sortie ?

Calculer et représenter sur un graphe votre réponse.

## 5.1 Régulation de température

Les régulateurs de température industriels servent à mesurer et à **réguler la température d'une usine** selon ses besoins en énergie. C'est un dispositif très important car il sert à **économiser l'énergie** tout en permettant à l'usine de fonctionner de façon optimale. Dans notre article, on vous explique tout ce qu'il y a à savoir sur les **régulateurs de températures industriels**, leur fonctionnement et les avantages qu'ils représentent dans l'industrie.

### 5.1.1 Régulateur de température industrielle

Comme son nom l'indique, le régulateur de température industriel permettra le réglage de la température d'une usine. Son alimentation se fait grâce à une sonde de température. Pour lui permettre de la réguler, il est lié à un **dispositif de refroidissement** (comme un ventilateur) et de chauffage (une résistance par exemple). De plus, le régulateur en question est alimenté grâce à un thermocouple. C'est un capteur qui permet à la machine de mesurer et d'enregistrer la température extérieure et de la comparer à la température souhaitée, dans le but de la régler en la refroidissant ou en la chauffant.

Le fonctionnement est assez simple ; il y a tout d'abord une électrode qui **mesure la température de l'environnement**. Ensuite, cette température est comparée à la température souhaitée par l'industriel. Enfin, c'est en confrontant les deux températures que le dispositif se mettra en place. Il réchauffera ou refroidira le local. Ainsi, la température à l'intérieur de la pièce sera toujours la même, quelles que soient **les changements de température** de l'environnement. Gardez bien en tête que le rôle du régulateur de température est d'économiser de l'énergie, mais ce système doit être accompagné d'une **bonne isolation du local**. Surtout dans le cas d'une usine avec des locaux très vastes. Une bonne isolation est donc nécessaire.

### 5.1.2 Avantages à installer un régulateur thermique dans une usine

Le premier avantage auquel on pense, c'est la rentabilité. Surtout pour une usine où on doit produire la meilleure qualité possible aux tarifs les plus bas. **La facture de l'électricité** peut diminuer de 22 % avec un régulateur de température installé dans l'usine. Si vous avez l'habitude de chauffer les locaux vers les 19°C et que la température augmente qu'à peine 1°C, votre facture augmentera à son tour de plus de 8 % annuellement. C'est énorme à l'échelle d'une usine et c'est une perte financière très importante. Le dispositif du régulateur de température permet de baisser le niveau d'énergie consommée et par conséquent, vous **économisez une somme d'argent importante** sur tous les frais qu'engendre l'entretien d'une manufacture ou même de bureaux.

De plus, le régulateur de température a un aspect pratique, les techniciens de l'usine n'ont plus besoin de **surveiller la température et de la réguler** selon la saison ou le temps qu'il fait. Il y a aussi la possibilité de programmer la température souhaitée à des heures précises. La nuit, une température faible qui augmentera le matin à l'arrivée des ouvriers.

### 5.1.3 Le régulateur thermique marche/arrêt

Appelé aussi le régulateur « tout ou rien », c'est un peu le modèle de base. Il est néanmoins très fiable et une entreprise peut investir dans ce modèle **pour équiper ses usines**.

Ce modèle ne comporte pas d'état intermédiaire, c'est-à-dire que la sortie de la machine est soit activée soit désactivée. C'est avec cette sortie que **le chauffage se régule**. Si la température des locaux est inférieure à la température programmée, alors la sortie s'active. A contrario, si elle est plus élevée, la sortie se désactive.

**Le régulateur thermique industriel** numérique comporte :

- Un bouton marche/ arrêt ;
- Un régulateur de température ;
- Un **contrôleur d'étanchéité des fenêtres** ;
- Un marquage à chaud.

En résumé, il est très important pour une usine de se munir d'un régulateur de température. C'est un investissement qui vous fera économiser de l'énergie et donc de l'argent.

## 5.2 Qu'est-ce qu'un régulateur de débit ?

Les régulateurs de débit dans l'industrie son utilisation principale est de contrôler le débit d'eau dans un système. On retrouve différents régulateurs de débit avec de différents débits, ce qui signifie qu'on en retrouve un pour toutes les applications. Bien que tous les régulateurs de débit effectuent le même travail, ils peuvent être conçus de manière légèrement différente.

Dans cette partie on parlera des 3 caractéristiques principales que nous pensons devoir connaître sur les régulateurs de débit et l'importance de maintenir un débit constant dans le régulateur.

### 5.2.1 Le régulateur de débit

Les régulateurs de débit ou les valves de régulation de débit servent principalement à limiter le débit précis à la sortie. Les régulateurs de débit sont autonettoyants. Ils sont spécialement conçus pour rester précis à moins de 15 % des valves, mesurés en gallons par minute (GPM). Pour les chutes de pression, ils peuvent aller jusqu'à 125 PSI. Ils contiennent un orifice flexible à l'intérieur qui limite le volume d'eau qui peut être écoulé.

Trois caractéristiques principales

#### ✓ *Gestion de l'eau*

Un régulateur de débit permet une bonne gestion de l'eau. Lorsqu'on conçoit correctement les systèmes d'eau avec un régulateur de débit, une quantité précise d'eau sera fournie à toutes les zones souhaitées. En incluant un régulateur dans un système, pour économiser de l'eau, ce qui épargner de l'argent. C'est une victoire pour l'être humain et pour l'environnement.

#### ✓ *Un trou contre trois trous*

Plus communs, on retrouve des régulateurs de débit avec une conception à un ou trois trous. Le modèle à un trou a tendance à être plus bruyant, mais plus le port est grand, moins il risque d'avoir de l'obstruction. Il est plus accepté sur le marché. Les modèles à trois trous sont plus silencieux, mais les petits ports ont plus de chances d'être obstrués.

#### ✓ *Variations de pression*

Un régulateur de débit précis améliorera les performances des systèmes. Il fonctionne bien à basse et à haute pression. Lorsqu'on n'a pas d'écoulement, le joint torique est relâché. Lorsque la pression commence lentement à augmenter, le joint torique se resserre dans la zone de siège et continue à se comprimer jusqu'à ce que la pression diminue, permettant ainsi au joint torique de se relâcher.

### 5.3 . Exemples de systèmes de régulations :

#### 5.3.1 Exemple 1 :

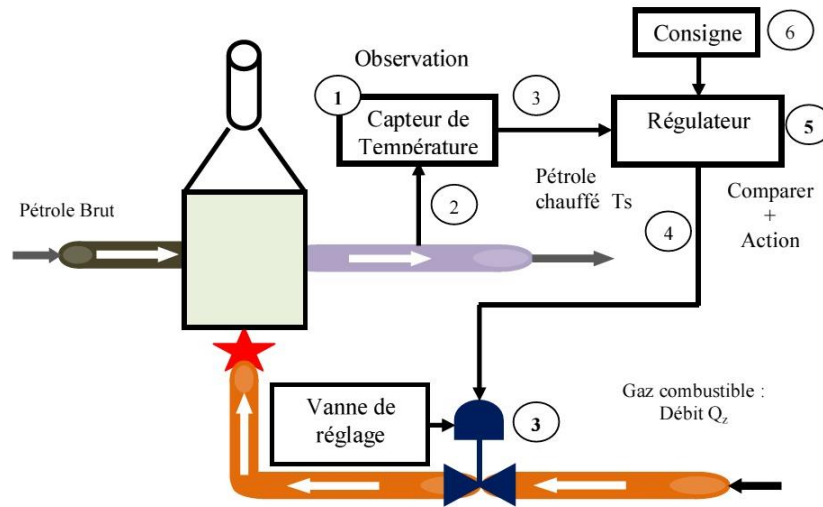


Figure 5.1 Régulation de température.

(1) **Capteur** : contrôle la grandeur réglée (2) et en rend compte au régulateur. Il doit en donner une image fidèle. Sa sensibilité impose les limites de la précision de la régulation.

(3) **Actionneur (organe de réglage)** : il maîtrise la puissance à fournir au processus à partir du signal issu du régulateur (4).

(5) **Régulateur** : il élabore un signal de commande à partir de l'écart (erreur) entre l'entrée (consigne) (6) et la mesure (3) et permet d'améliorer les performances du système.

➤ **Remarque :**

Avant de pouvoir réguler  $y(t)$ , il faut pouvoir agir sur  $y(t)$  par modification d'une grandeur de commande  $x(t)$ . Par exemple dans le cas du four, en supposant que c'est un four à gaz, on pourra agir sur la température en faisant varier **le débit** de gaz dans les injecteurs par l'intermédiaire d'une petite **vanne proportionnelle** motorisée.

#### 5.3.2 Exemple 2 :

Soit la figure 5.2, qui représente la régulation de vitesse. Que l'on veuille maintenir constante la vitesse ( $V$ ) d'une voiture. A la valeur ( $V$ ) de la vitesse correspond une valeur ( $e$ ) de la course de l'accélérateur. Il suffirait donc, en principe, de maintenir ( $e$ ) constant pour que ( $V$ ) le soit. Chacun sait que la réalité est différente. En effet, le vent, les variations de pente et le mauvais état de la route modifient ( $V$ ). Ces paramètres extérieurs qui influent sur la vitesse sont appelés **grandeurs perturbatrices** ou **perturbations**. Si elles n'existaient pas, la boucle de régulation serait inutile.

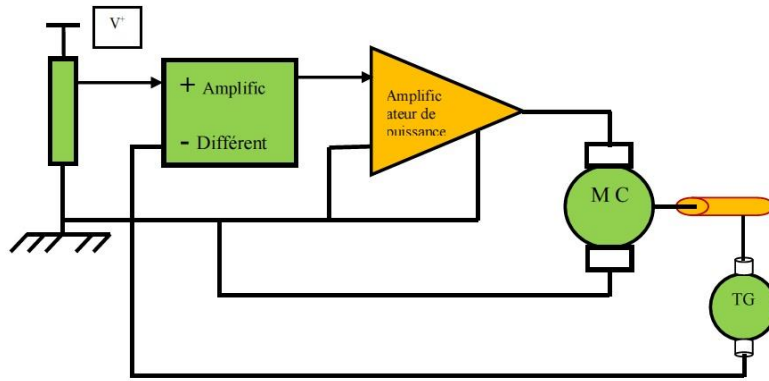


Figure 5.2 Régulation de vitesse

**Exercice 1**

Quel type de contrôleur est affiché par l'équation ci-dessous ?

$$c(t) = K_c \left[ e(t) + \frac{1}{T} \int e(t) dt \right]$$

- Anticipation
- PID
- Dérivateur
- Proportionnel-Intégral

**Exercice 2**

Quel type de contrôleur augmente la vitesse de réponse pour atteindre le point de consigne souhaité le plus rapidement tout en éliminant le décalage ?

- Marche à l'arrêt
- Proportionnel
- Intégrale
- Proportionnel-Intégral

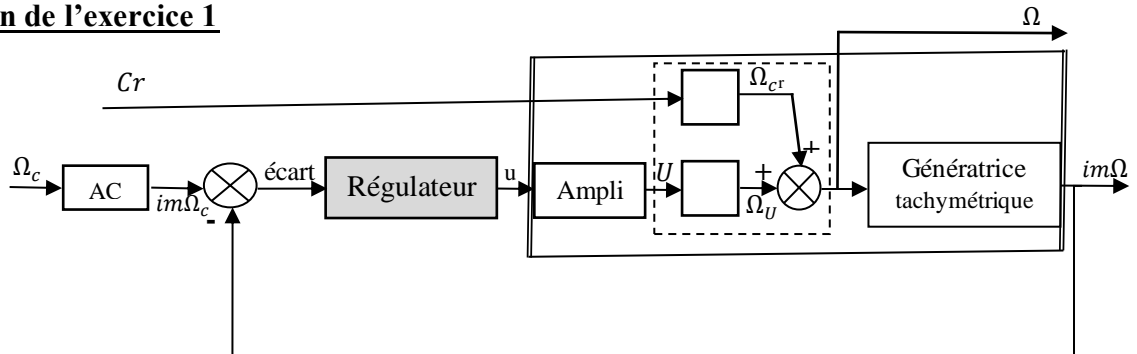
**Exercice 3**

Quel type de contrôleur augmente la stabilité du système en le maintenant à un réglage constant ?

- Dérivé
- Proportionnel
- T.O.R
- Intégral

## Solutions des exercices

## ➤ Exercice du chapitre 1

Solution de l'exercice 1

tel que:

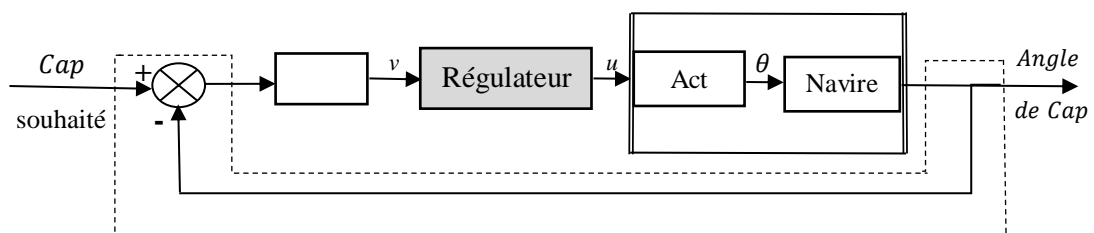
$\Omega_c$  : Vitesse de consigne.

$\Omega_U$  : Vitesse du moteur fonction de la tension  $U$ .

$\Omega_{cr}$  : Variation de vitesse due au couple résistant  $Cr$  (fonction de la charge).

$\Omega$  : vitesse résultante.

$im\Omega_c$  et  $im\Omega$  sont des tensions

Solution de l'exercice 2

L'ensemble en pointillé représente ce que fait le compas.

$v$  : tension, images de l'erreur de cap.

$\theta$  : position angulaire du gouvernail.

## ➤ Exercice du chapitre 2

Solution de l'exercice 1

1. Le différentiel « S.D. » de l'aquastat.

$$80-76=4^{\circ}\text{C}.$$

Le différentiel de l'aquastat est donc de  $4^{\circ}\text{C}$ .

2.

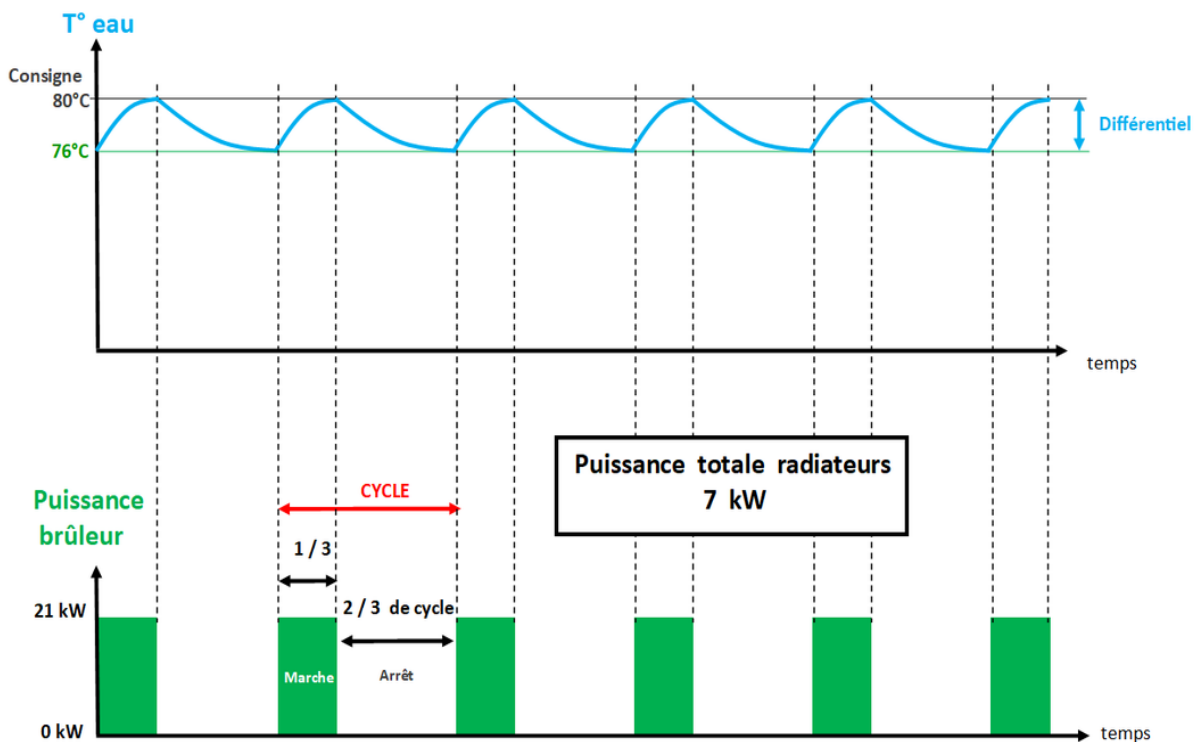
3. Le rapport de cycle de fonctionnement (Marche) de brûlure est :

$$\frac{7}{21} = \frac{1}{3}.$$

Un brûleur de 21 kW alimentant en chaleur 7 kW de radiateurs fonctionnera un tiers du temps.

4. Le brûleur sera donc à l'arrêt les deux autres tiers du temps :  $\frac{2}{3}$ .

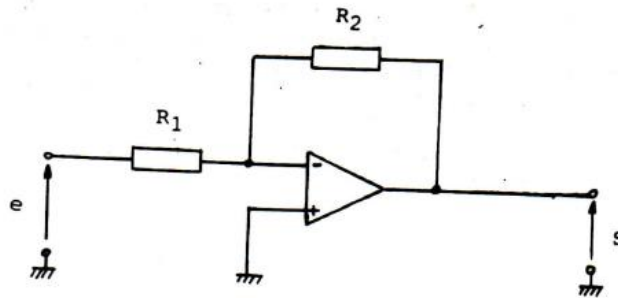
5. La représentation de ce phénomène de régulation TOR sur un graphe





➤ Exercice du chapitre 3

**Figure 3.1**



1. La fonction de transfert (TF) de ce réseau s'écrit :

$$H(p) = \frac{S(p)}{E(p)} = -\frac{Z_2(p)}{Z_1(p)}$$

Avec :

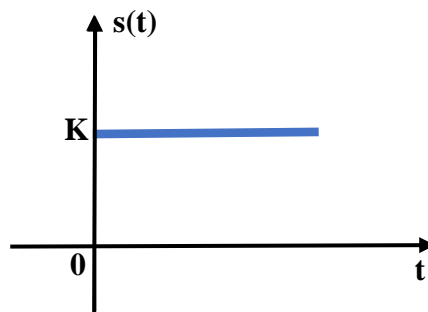
$$\left. \begin{array}{l} Z_1 = R_1 \\ Z_2 = R_2 \end{array} \right\} \Rightarrow H(P) = -\frac{S(P)}{E(P)} = -\frac{R_2}{R_1} = K = \text{constante}$$

**K : gain**

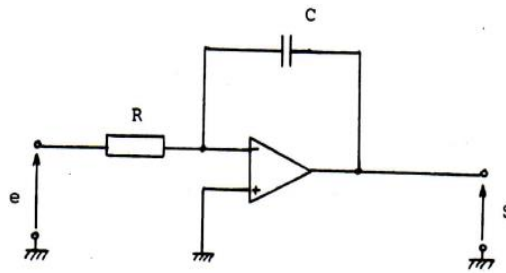
2. Correcteur proportionnel [P]

3. la réponse indicielle  $S_1(t)$  en fonction du temps 't'.

$$s(t) = K e(t)$$



**Figure 3.1.1 Réponse indicielle du correcteur proportionnel [P]**

**Figure 3.2**

1. La fonction de transfert de régulateur de la figure 3.2 s'écrit :

$$\left. \begin{array}{l} Z_1 = R \\ Z_2 = \frac{1}{CP} \end{array} \right\} \Rightarrow H(P) = -\frac{S(P)}{E(P)} = \frac{1}{RCP} = \frac{1}{T_i P}$$

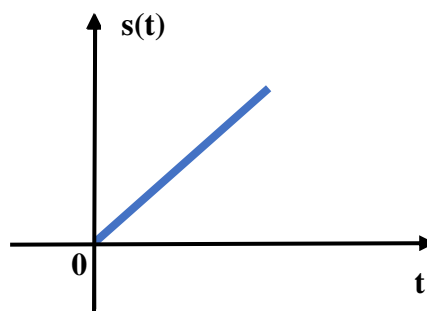
Où  $T_i = RC$

$T_i$  est appelée **la constante de temps d'intégration**.

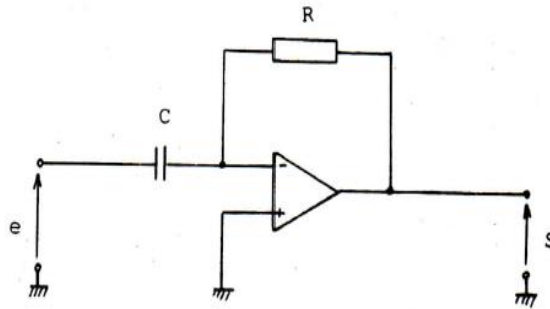
2. **Correcteur intégral [I]**

3. La réponse indicielle  $S_2(t)$  en fonction du temps 't'.

$$s(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt$$



**Figure 3.2.1 Réponse indicielle du correcteur intégral [I]**

**Figure 3.3**

1. La fonction de transfert de régulateur de la figure 3.3 s'écrit :

$$\left. \begin{array}{l} Z_1 = \frac{1}{CP} \\ Z_2 = R \end{array} \right\} \Rightarrow H(P) = -\frac{S(P)}{E(P)} = RCP = T_d P$$

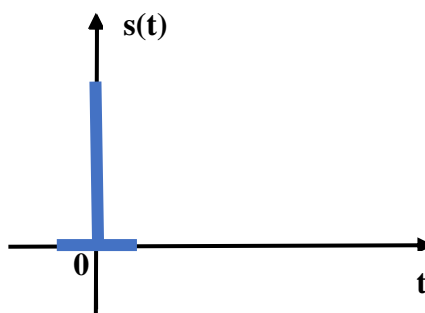
Où  $T_d = RC$

$T_d$  est appelée **la constante de temps de dérivation**.

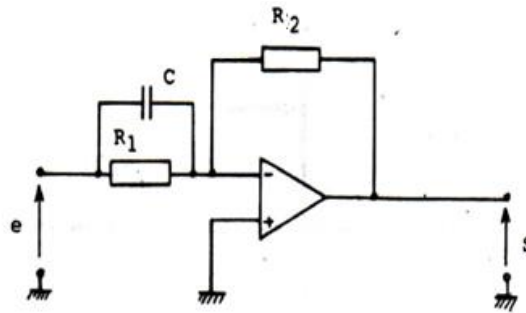
2. **Correcteur différentiateur [D]**

3. La réponse indicielle  $S_3(t)$  en fonction du temps 't'.

$$s(t) = T_d \frac{de(t)}{dt}$$



**Figure 3.3.1 Réponse indicielle du correcteur différentiateur [D]**

**Figure 3.4**

1. La fonction de transfert de régulateur de la figure 3.4 s'écrit :

$$\left. \begin{array}{l} Z_1 = \frac{R_1}{1 + R_1 C P} \\ Z_2 = R_2 \end{array} \right\} \Rightarrow H(P) = -\frac{S(P)}{E(P)} = \frac{R_2}{R_1} (1 + R_1 C P) = K(1 + T_d P)$$

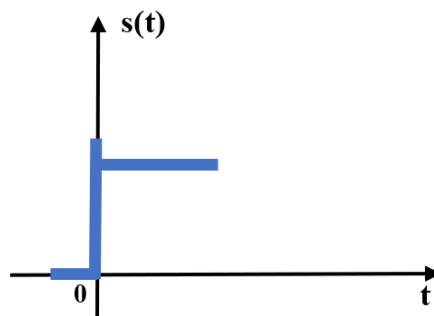
$$\text{Où : } \begin{cases} K = \frac{R_2}{R_1} \\ T_d = R_1 C \end{cases}$$

**K** : gain

$T_d$  est appelée la constante de temps de dérivation.

2. Correcteur proportionnel dérivateur [PD]
3. La réponse indicielle  $S_d(t)$  en fonction du temps 't'.

$$s(t) = K e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt}$$



**Figure 3.4.1** Réponse indicielle du correcteur proportionnel dérivé [PD]

➤ **Exercice du chapitre 4**

**Solution de l'exercice 1 :**

$$C(p) = \frac{(1 + T_n p)(1 + T_v p)}{T_i p}$$

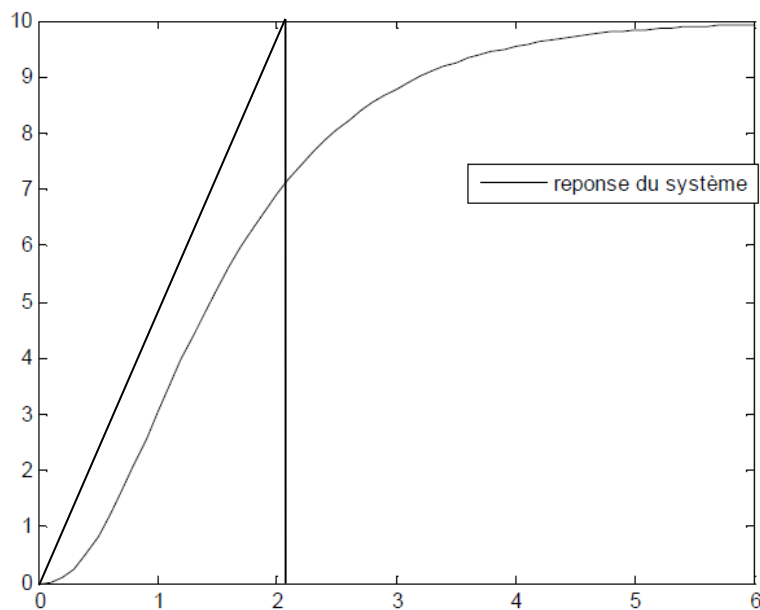
$$\prod_{i=3}^n (1 + \tau_i p) = (1 + T_p p) \Rightarrow T_p = \sum_{i=3}^n \tau_i \quad \text{quand} \quad \tau_i \ll 1$$

$$T_p = \sum_{i=3}^n \tau_i$$

Les coefficients des régulateurs déterminés selon le critère méplat sont donnés par le tableau suivant :

$n_s$	Type de régulateur	$T_n$	$T_v$	$T_i$
1	PI	2	-	$2KT_p$
2	PID	2	0,1	$2KT_p$

**Solution de l'exercice 2 :**



D'après la figure on trouve :

$$K_p = 10$$

$$T_u = 0,3$$

$$T_a = 2,5 - 0,3 = 2,2$$

Ziegler&Nichols proposent de calculer les paramètres du régulateur P, PI ou PID à l'aide des recommandations suivantes :

Réglage des paramètres			
Régulateur	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P : $C(P) = K_p$	$\frac{T_a}{T_u} \frac{1}{K}$	-	-
PI : $C(P) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right)$	$\frac{T_a}{T_u} \frac{0.9}{K}$	3.33 Tu	-
PID : $C(P) = K_p \left( 1 + T_d p + \frac{1}{T_i p} \right)$	$\frac{T_a}{T_u} \frac{1.2}{K}$	2.0 Tu	0.5 Tu

Donc on trouve les paramètres des trois correcteurs (P, PI et PID):

Réglage des paramètres			
Régulateur	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P : $C(P) = K_p$	0,73	-	-
PI : $C(P) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i p} \right)$	0,66	0,999	-
PID : $C(P) = K_p \left( 1 + T_d p + \frac{1}{T_i p} \right)$	0,88	0,6	0,15

### Solution de l'exercice 3 :

La sortie étant déjà réglée à 50% (réglage généralement utilisé quand  $M=C$ , c'est le « centrage de bande »

$$\text{Consigne} - \text{Mesure} = C - M = -15\%$$

La mesure est donc supérieure à la consigne, la sortie doit donc diminuer.

On peut donc en déduire l'équation :

$$S = G \times (C - M) + S_0$$

Avec:

**S** : sortie du régulateur en %

**G** : gain du régulateur

**C – M** : écart consigne-mesure

**S<sub>0</sub>** : sortie du régulateur quand la consigne égale la mesure

$$S = 2 \times (-15) + 50 = 20\%$$

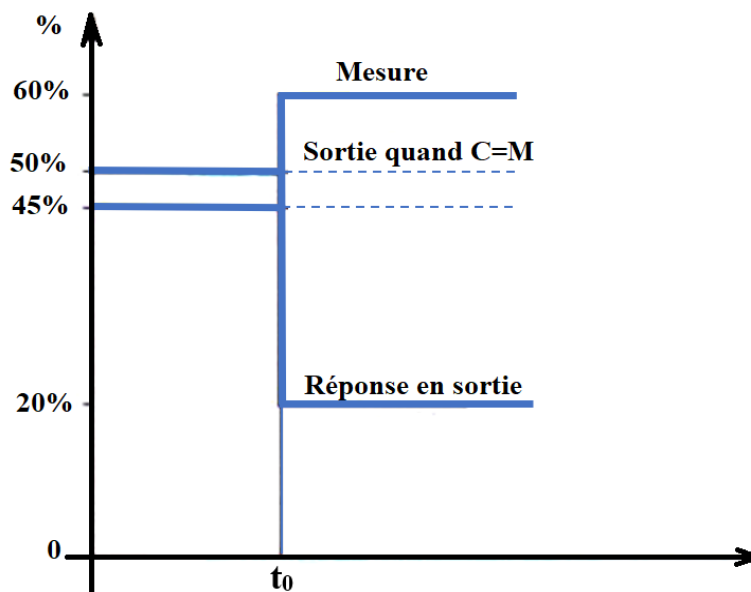


Figure 4.3. Réponse à un signal d'entrée échelon

➤ **Exercice du chapitre 5**

**Solution de l'exercice 1 :**

d. Proportionnel Intégral.

**Solution de l'exercice 2 :**

d. Proportionnel-Intégral.

**Solution de l'exercice 3 :**

a. Dérivé.

## Bibliographie

- [1] Emmanuel G., *et coll.*, Régulation industrielle Outils de modélisation, méthodes et architectures de commande, © Dunod, ISBN 978-2-10-080045-2.
- [2] Poussery B., Dindeleux D., Pratique de la régulation industrielle, 352 pages, Librairie Eyrolles, Dunod.
- [3] RT Principes de base de la technique de régulation, Connaissances de base V 1.9 05/2021 FR,
- [4] Longchmap R., Commande numérique de systèmes dynamiques : cours d'automatique,
- [5] [http://php.iai.heig-vd.ch/~mee/cours/cours\\_ra/Chap\\_04/html/node6.htm](http://php.iai.heig-vd.ch/~mee/cours/cours_ra/Chap_04/html/node6.htm).
- [6] <http://vivekbose.com/introduction-to-pid-controller-with-detailed-ppipd-pd-control>.
- [7] <http://asi.insa-rouen.fr/enseignement/siteUV/auto/didacticiel/notions/correcteurs.htm>
- [8] Introduction-a-la-regulation.pdf (technologuepro.com)
- [9] Principe de la régulation - M2E-MarcSeguin (nouvenergie.fr)
- [10] PARTIE G- le contrôle et la régulation (ac-montpellier.fr)
- [11] Résumé de Théorie et Guide de travaux pratiques. Installation, Dépannage : Instrumentation Industrielle.
- [12] De Larminat P., Automatique appliquée. Hermès Lavoisier, 2009.
- [13] Boudries Z., cours commande des machines électriques, université de Bejaia.
- [14] <http://www.specialautom.net/synthese-empirique.htm>.
- [15] Dieulesaint E, D Royer., Automatique appliquée, 2001.
- [16] De Larminat P., Automatique : Commande des systèmes linéaires. Editions Hermes, 1993.
- [17] <https://control.com/textbook/process-dynamics-and-pid-controller-tuning/tuning-pid-controllers/>.
- [18] <https://control.com/textbook/process-dynamics-and-pid-controller-tuning/process-characteristics/>
- [19] Astrom, K. J., and Hagglund. T., PID Controllers: Theory, Design and Tuning, Instrument Society of America, Research Triangle Park, NC, 1995.
- [20] Datta, A., Ho, M. T., and Bhattacharyya, S. P. Structure and Synthesis of PID Controllers, Springer-Verlag, London, UK, 2000.
- [21] Flaus, J-M., La régulation industrielle, Editions Hermes 1995.
- [22] <https://control.com/textbook/process-dynamics-and-pid-controller-tuning/>
- [23] Borne P., Analyse et régulation des processus industriels : Régulation continue. Editions Technip.
- [24] Hans T., Guyenot P., Régulation et asservissement Editions Eyrolles.
- [25] <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/r%C3%A9gulation-1/principe-r%C3%A9gulation/>
- [26] Rivoire M., Ferrier J. L., Groleau J., Exercice d'automatique Tome2, Chihab-Eyrolles.