



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



Support de cours: Régulation Industrielle

Proposé par: RESFA ABBES

Discipline : Génie électrique (3ème Année Licence électrotechnique)

Année Universitaire: 2020-2021

Sommaire

Sommaire	page 01
Sommaire	page 02
Sommaire	page 03
Chapitre I.....	page 04
1.Introduction.....	page 05
1.1.1 Grandeurs physiques.....	page 05
1.1.2 Type de grandeurs physique.....	page 05
2. Généralités.....	page 05
2.1. Définitions.....	page 05
2.2. Influence de la régulation.....	page 06
2.2.1. Baisse du coût de la transformation.....	page 06
2.2.2. Baisse du coût de l'installation et gain de temps.....	page 06
2.2.3. Exemple industriel.....	page 06
3.Représentation d'un procédé et terminologie.....	page 07
3.1 Boucle ouverte, boucle fermée.....	page 07
3.2 Qualités d'une bonne régulation.....	page 09
3.3 Transmetteurs, capteurs et actionneurs.....	page 10
3.3.1 Transmetteur.....	page 10
3.3.2 Capteur.....	page 10
3.3.3 Actionneurs.....	page 11
4.1.1 Régulation ou Asservissement.....	page 13
4.1.2 Comportement en régulation.....	page 13
4.2. Les servomécanismes.....	page 14
4.2.1 Principe de fonctionnement.....	page 14
4.2.2 Fonctionnement en boucle ouverte (Manuel).....	page 14
4.2.3 Fonctionnement en boucle fermée (Automatique).....	page 14
5. Schémas de représentation.....	page 15
5.1. Schéma TI Principe.....	page 15
5.1.2. Exemple.....	page 15
5.1.3. Signification des lettres(Tableau).....	page 16
5.1.4. Les symbols.....	page 17
5.2. Schéma fonctionnel.....	page 18
5.3. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation.....	page 18
6. Caractéristiques statiques et dynamiques d'un procédé.....	page 20
6.1. Stabilité -6.1.1. Procédés stables.....	page 20
6.1.2. Procédé instable.....	page 20
6.1.3. Procédé intégrateur.....	page 20
6.2. Régime transitoire - Régime permanent.....	page 20
6.3. Caractéristiques statiques d'un procédé.....	page 21
6.3.1. Courbe caractéristique.....	page 21
6.3.2. Gain statique.....	page 21
6.3.3. Erreur statique.....	page 21
6.3.4. Linéarité.....	page 21
6.4. Caractéristiques dynamiques - 6.4.1.Temps de réponse.....	page 21
6.4.2. Dépassement.....	page 22
7. Les régulateurs.....	page 22
7.1. Structure de principe d'un régulateur.....	page 22
7.2. Choix du sens d'action d'un régulateur.....	page 23
7.2.1. Définition.....	page 23
7.2.2. Règle de stabilité.....	page 23
7.2.3. Mise en œuvre pratique.....	page 23

7.3. Raccordements électriques - 7.3.1.Le transmetteur.....	page 24
7.3.2. Schéma de principe d'une boucle de courant.....	page 24
7.3.3 Générateur ou récepteur.....	page 24
7.3.4 Mise en œuvre pratique.....	page 24
7.3.5. Schéma de câblage d'une boucle de régulation de débit.....	page 25
7.3.6. Astuce de calcul.....	page 25
Chapitre II - Régulateurs "tout ou rien"	page 26
1.1. Définition.....	page 27
1.2. Domaine d'utilisation.....	page 27
1.3. Fonctionnement d'un régulateur «tout ou rien».....	page 27
2.1. Action continue - Action discontinue.....	page 28
2.2. Présentation.....	page 28
2.3. Fonctionnement.....	page 28
2.4. Influence du paramètre seuil.....	page 28
Chapitre III Identification des systèmes en boucle ouverte et fermée.....	page 29
1. Introduction.....	page 30
1.1 Le but de l'identification.....	page 30
1.2 Les méthodes générales.....	page 30
1.3 Les méthodes proposées.....	page 30
1.4 Le choix du modèle.....	page 31
2 Identification en chaîne ouverte.....	page 31
2.1 Méthodologie - 2.1.1 Les signaux d'entrées.....	page 31
2.1.2 Les signaux d'entrées.....	page 32
3.1.1 identification des procedes industriels.....	page 33
3.1.2 Méthodes d'identification en Boucle Fermée.....	page 33
3.1.3 Le modèle recherché	page 33
3.1.4 Premier essai :Recherche du gain statique G_s	page 34
3.1.5 Deuxième essai : Recherche des paramètres t et	page 34
4.1. Méthode de ZIEGLER & NICHOLS.....	page 36
4.1.2 Procédés naturellement instables.....	page 36
4.1.3. Le modèle recherché.....	page 37
4.2. Mode opératoire.....	page 37
Chapitre IV Structures des régulateurs PID (parallèle, série, mixte).....	page 38
1.1 Principe.....	page 39
1.2. Instruments Périphériques.....	page 40
1.3. Schémas de représentation - 1.3.1 Schéma TI ou PCF.....	page 40
2.1. Principaux schémas.....	page 42
2.1.2. Schéma TI d'une régulation de pression.....	page 42
2.1.3. Schéma fonctionnel.....	page 42
3.1. Régulation en boucle fermée - 3.1.1. Principe.....	page 43
3.1.2. Choix du sens d'action du régulateur.....	page 44
3.2. Synthèse du régulateur PID.....	page 44
3.2.1 Rôle de l'action proportionnelle (P).....	page 44
3.2.2. Régulateur proportionnel P-Régulateur.....	page 45
3.2.3. Bande proportionnelle : BP.....	page 46
3.2.4. Réponse indicielle de P-régulateur.....	page 46
4.1.1. Rôle et domaine d'utilisation de l'action intégrale.....	page 46
4.1.2. Fonction de transfert.....	page 47
4.1.3. Réponse indicielle.....	page 47

4.1.4. La Bande Proportionnelle BP.....	page 47
4.1.5. Rôle de l'action Intégrale.....	page 48
5.1.1. Rôle de l'action dérivée.....	page 49
5.1.2. Actions des Régulateurs.....	page 50
5.1.3. Fonction de transfert.....	page 50
5.1.4. Réponse indicielle.....	page 50
5.1.5. La Bande Proportionnelle BP.....	page 50
6.1. Résumé des actions P,I,D.....	page 52
6.1.1. Réglage des paramètres des régulateurs.....	page 53
6.1.2. Problématique.....	page 53
6.1.3. Réalisation des actions PID.....	page 54
6.1.3.1 Serie.....	page 54
6.1.3.2. Parallèle.....	page 54
6.1.3.3. Mixte.....	page 54
 Chapitre V Choix et dimensionnement des régulateurs.....	page 55
1.1.Choix et dimensionnement des régulateurs.....	page 56
a)Réponse indicielle.....	page 56
b)Réponse fréquentielle.....	page 56
1.2. Critères de choix.....	page 57
2.1. 1. Méthodes de dimensionnement.....	page 58
2.1.2 Méthodes de Ziegler et Nichols (ZN).....	page 58
a- Méthode de la réponse indicielle.....	page 58
b- Méthode du point critique.....	page 58
3.1. 1. Réglage des Régulateurs par imposition d'un modèle de poursuite	page 59
3.1.2. Méthode de la réponse indicielle.....	page 60
3.1.3. Méthode du point critique.....	page 60
4.1.1. Méthodes de réglage des actions.....	page 61
4.1.2. Méthode par approches successives.....	page 61
4.1.3. Méthode nécessitant l'identification du procédé	page 61
4.1.4. Méthode de Ziegler et Nichols.....	page 62
4.1.5. Réglage par approches successives.....	page 62
4.1.6. Réglage de l'action proportionnelle.....	page 62
4.1.7. Réglage de l'action dérivée	page 63
5.1.1. RRéglage de l'action intégrale	page 64
5.1.2. Cas d'un procédé instable.....	page 64
5.1.3. Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols.....	page 66
5.1.4. Mode opératoire.....	page 66
5.1.5. Calcul des actions.....	page 67
6.1. Régulation cascade / 6.1.1 Présentation.....	page 67
6.1.2. Cascade sur grandeur réglante.....	page 68
Références bibliographiques.....	page 70

Introduction à la régulation industrielle

Objectifs

- Savoir les différents composants dans une chaîne de régulation: transmetteur, capteur, actionneur, correcteurs....

Pré-requis

- Boucle d'asservissement.
- Performances d'un système asservi: stabilité, rapidité et précision

Elément de contenu

Chapitre 1. Introduction à la régulation industrielle (2 Semaines)

Notions de procédé industriel, Organes d'une boucle de régulation (procédé industriel, actionneurs, capteurs, régulateurs, conditionneur des signaux, consigne, mesure, perturbation, grandeurs caractéristiques, grandeurs réglantes, grandeurs réglées, grandeurs perturbatrices), Schéma d'un système régulé, Eléments constitutifs d'une boucle de régulation, symboles, schémas fonctionnels et boucles, critères de performance d'une régulation.

Moyens Pédagogiques

- Vidéo projecteur.
- Tableau

Durée

01 séance de cours.

01 séance de TD.

1. Introduction

La régulation des procédés regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir une **grandeur physique à régler**, égale à une valeur désirée, appelée **consigne**. Lorsque des perturbations ou des changements de consigne se produisent, la régulation provoque une action correctrice sur une grandeur physique du procédé, appelée **grandeur réglant** (ou **commande**).

Dans ce cours, on s'intéressera aux moyens matériels et techniques de mise en œuvre de la régulation. Les techniques décrites sont universelles et peuvent s'appliquer à tout procédé. Les régulateurs PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) sont très répandus et conviennent dans environ 80 % des boucles de régulation. Pour les 20 % restant, il est nécessaire d'avoir recours à des régulations de type avancé pour lesquelles une modélisation du procédé est indispensable. Les régulateurs PID se présentent soit sous la forme d'un boîtier autonome (régulateur de tableau) qui se fixe en face avant d'une armoire de contrôle-commande, soit programmés dans un automate ou dans un calculateur industriel. Les régulateurs de type avancé sont en général programmés sur calculateur industriel équipé du nombre d'entrées- sorties nécessaire à la commande de l'installation.

Pour la plupart des applications avec PID où les contraintes sur la grandeur réglée ne sont pas fortes (précision faible, temps de montée non critique, dépassement autorisé, etc.).

1.1.1 Grandeurs physiques: La plus part des processus industriels nécessitent de contrôler un certain nombre de paramètres (grandeurs physiques).

1.1.2 Type de grandeurs physique: On peut classer les grandeurs physiques en six (06) familles, chaque capteur s'associant à l'une de 6 familles.

- Thermique: (température, capteur thermique, flux thermique).
- Électrique : (courant, tension, charge, impédance, diélectrique).
- Mécanique: (déplacement, force, masse, débit, ect...)
- Magnétique : (champ magnétique, perméabilité).
- Radiative: (lumière visible, rayon X, micro-onde).
- Biochimique : (humidité, gaz, hormone, molécule,)

2. Généralités

2.1. Définitions

- La **régulation** regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Exemples de grandeur physique: Pression, température, débit, niveau etc...
- 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.
- La **consigne**: C'est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.
- 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.
- Les **grandeurs perturbatrices** sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles sont généralement pas de même nature que la grandeur réglée.
- **L'organe de réglage** est l'élément qui agit sur la grandeur réglante.

2.2. Influence de la régulation

2.2.1. Baisse du coût de la transformation

La bonne régulation amène une plus grande précision sur la grandeur réglée, permettant une diminution de la consigne pour un fonctionnement à la limite.

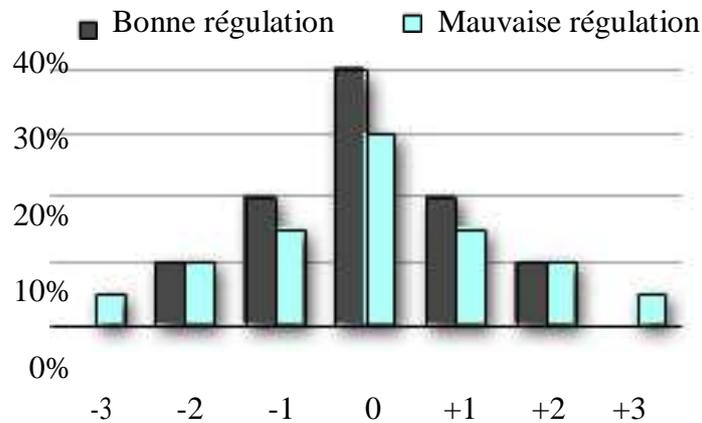


Figure 1.A –influence de la précision sur la régulation

Dans l'exemple ci-dessus, la diminution de la disparité dans la valeur de la grandeur réglée, entraîne une diminution de la consigne de 1 μm pour l'obtention d'une épaisseur minimale sur toutes les pièces.

2.2.2. Baisse du coût de l'installation et gain de temps

On reconnaît une bonne régulation par sa capacité à accélérer le système sans entraîner de dépassement de la consigne. Dans l'exemple ci-dessous une bonne régulation entraîne une diminution du temps nécessaire à l'élévation de la température, ainsi que l'économie d'un dispositif de refroidissement.

2.2.3. Exemple industriel

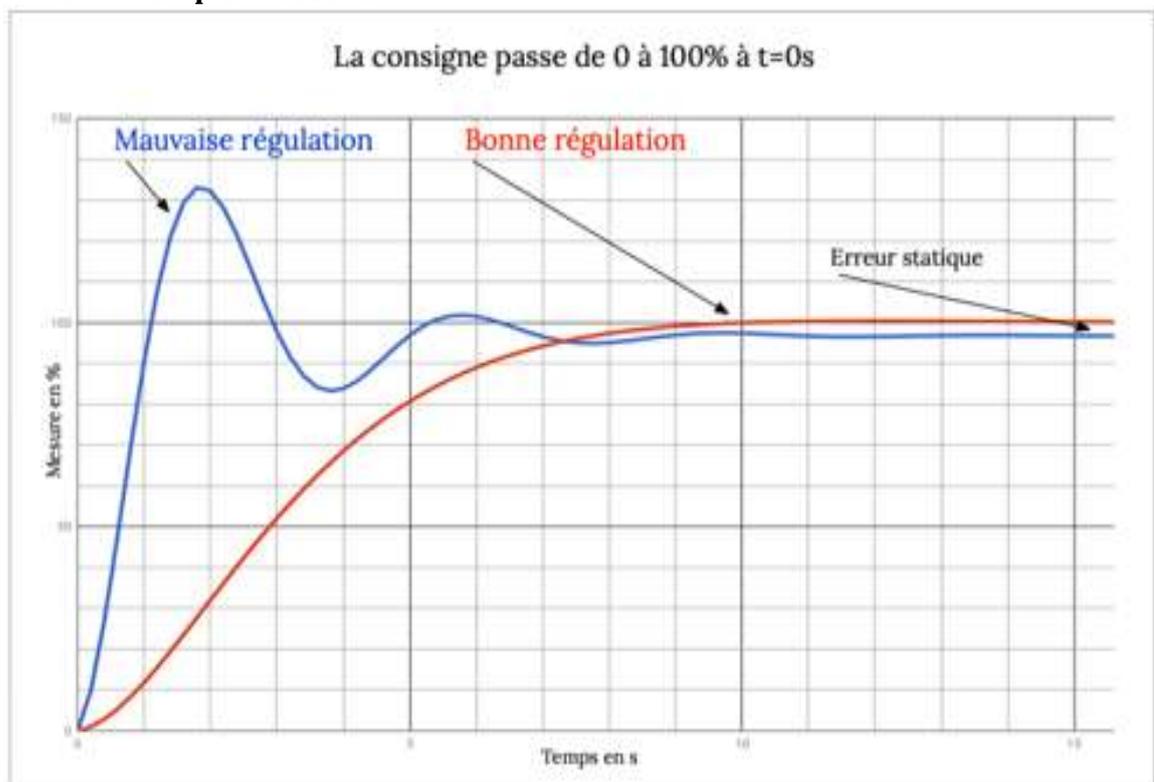


Figure 1.B – Une bonne régulation entraîne une diminution du temps nécessaire.

3.Représentation d'un procédé et terminologie

Pour décrire les techniques de régulation, nous prendrons souvent l'exemple d'un four qui servira de fil conducteur, sachant que ces techniques restent valables quelle que soit l'application.

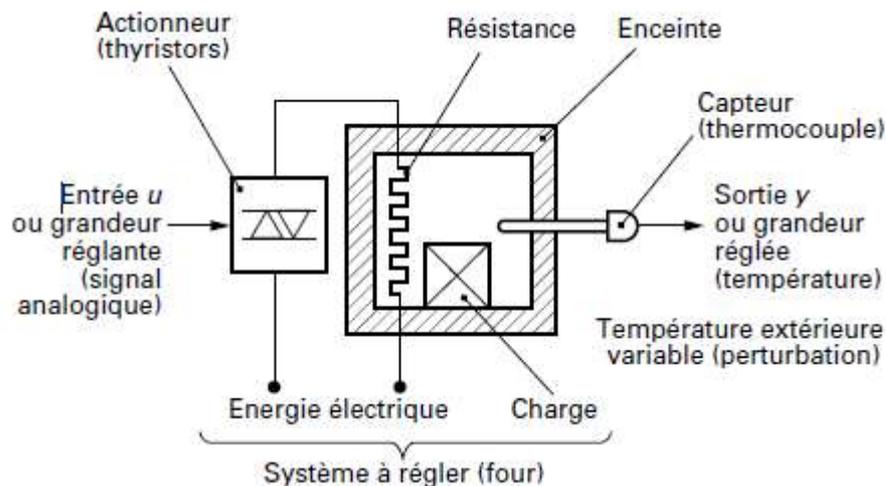


Figure 1.1 – Système en boucle ouverte

3.1 Boucle ouverte, boucle fermée

Considérons un four représenté schématiquement par la figure suivante :

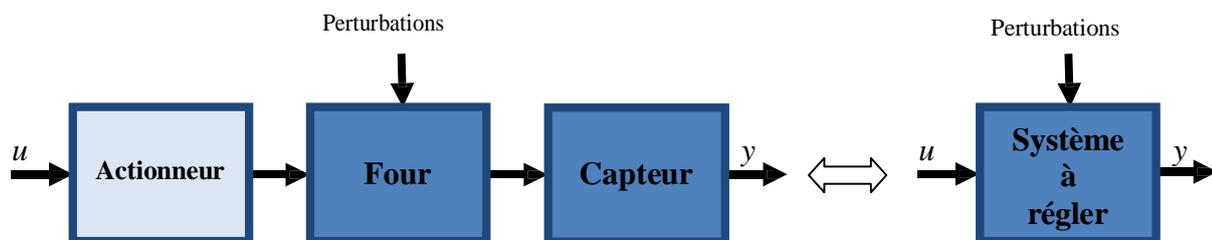


Figure 1.2 – Schéma fonctionnel équivalent de la figure 1.1

Un tel système est en boucle ouverte. La sortie y peut être réglée en agissant sur l'entrée u . Cette situation présente deux inconvénients majeurs :

- on ne sait pas a priori à quelle valeur va se stabiliser y et en combien de temps
- y va varier en fonction des perturbations extérieures (par exemple variation de la température externe).

Ce mode de fonctionnement est obtenu, sur les régulateurs PID du commerce, en position manuelle. Ce mode présente un intérêt lorsque la régulation est déficiente ou lorsque l'utilisateur veut piloter le système dans des cas particuliers.

Nous n'avons plus ces inconvénients en **refermant la boucle** par un régulateur, ce qui conduit au schéma de la figure 1.3, représentant la boucle de régulation de base.

On cherche à maintenir la **grandeur à régler y** à une **valeur de consigne y_c** en agissant sur la **commande u** par la loi de commande (ou correcteur) (figure 1.4). Analysons le fonctionnement de cette boucle (figure 1.3).

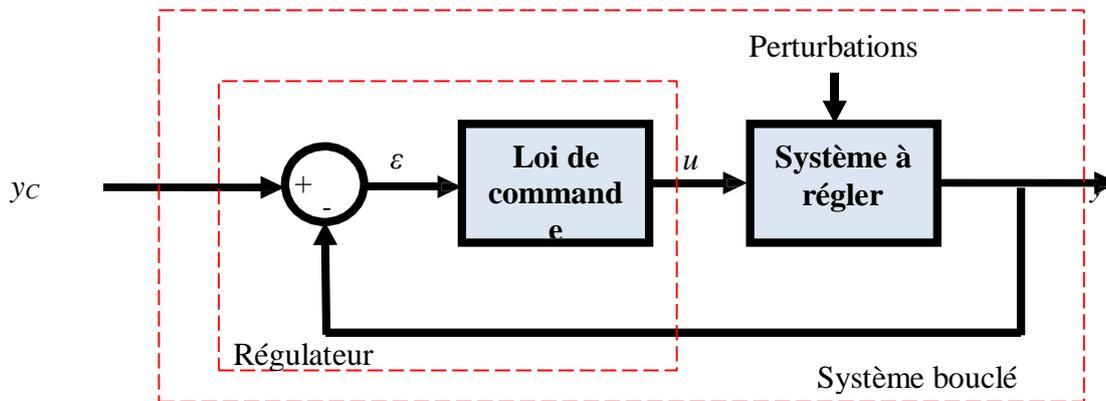


Figure 1.3 – Système en boucle fermée

Le système bouclé a pour entrée y_c et pour sortie y . Le régulateur possède 2 entrées (y_c et y) et une sortie u . Il se compose de la loi de commande et d'un comparateur qui élabore l'**erreur de régulation** $\varepsilon = y_c - y$.

La loi de commande a pour entrée e et pour sortie u .

Exemple : Le capteur mesure la température (y) de l'enceinte thermique.

Cette mesure est comparée à la consigne (y_c) pour élaborer un **signal d'écart**. Suivant le signe et l'amplitude de ce dernier, la loi de commande dosera l'alimentation (u) de la résistance afin que la température dans le four reste la plus proche possible de la consigne.

Dans toutes les boucles de régulation, on retrouvera les éléments suivants :

- un capteur ;
- une consigne (fixe ou variable dans le temps) ;
- un comparateur délivrant un signal d'écart ;
- une loi de commande qui calcule le signal à envoyer sur l'actionneur ;
- un actionneur ;
- le système physique à commander et soumis à des perturbations.

Il est bon de faire la distinction entre **boucle d'asservissement** et **boucle de régulation**. Toutes les deux fonctionnent sur le même principe, mais leur finalité diffère sensiblement:

- l'asservissement consiste à maintenir une grandeur de sortie identique ou proportionnelle à une grandeur d'entrée (ex : poursuite de trajectoire \hat{U} consigne variable) ;
- la régulation impose à la grandeur de sortie d'atteindre une valeur de consigne et d'y rester quelles que soient les perturbations éventuelles (ex : régulation de pression, de température

\hat{U} consigne fixe).

La distinction est importante car les réglages optimaux ne sont en général pas les mêmes dans les deux cas. En asservissement, les réglages dépendent de la dynamique propre du système (constante de temps, gain statique), alors qu'en régulation, ils dépendent surtout de la dynamique des perturbations (ouverture de porte, variation de la tension réseau, température extérieure variable, etc.).

3.2 Qualités d'une bonne régulation

Les qualités exigées d'une régulation industrielle sont définies par les critères suivants (figure 1.5) :

- stabilité : elle doit toujours converger vers un point d'équilibre stable, et ne doit pas osciller autour du point de consigne ;
- précision : maintenue en permanence au plus près de la consigne ;
- rapidité : on cherchera à atteindre le point d'équilibre en prenant le moins de temps possible.

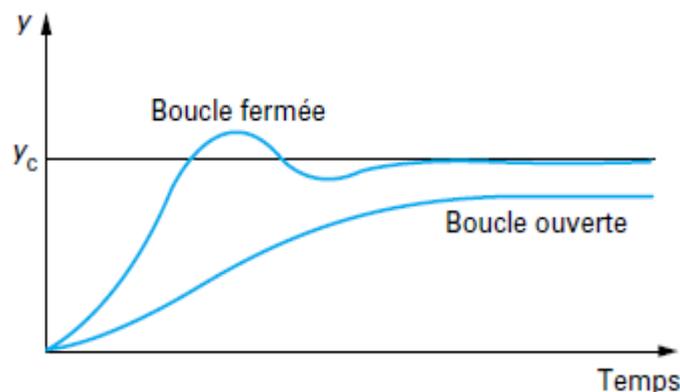


Figure 1.4 – Réponse du système en boucle ouverte et en boucle fermée

Il existe deux types d'erreur pour les processus non intégrateurs:

- l'erreur statique : pour une entrée de type échelon (ex : consigne y_c fixe) ;
- l'erreur dynamique (ou erreur de traînage) : pour une entrée de type rampe (ex : consigne y_c variable en fonction du temps).

Pour éliminer ces erreurs, le régulateur doit comporter un ou plusieurs intégrateurs (action intégrale).

Nota : un processus est dit **intégrateur** lorsque la sortie varie linéairement en fonction du temps quand l'entrée ou la consigne est constante, ex : vanne motorisée, vérin.

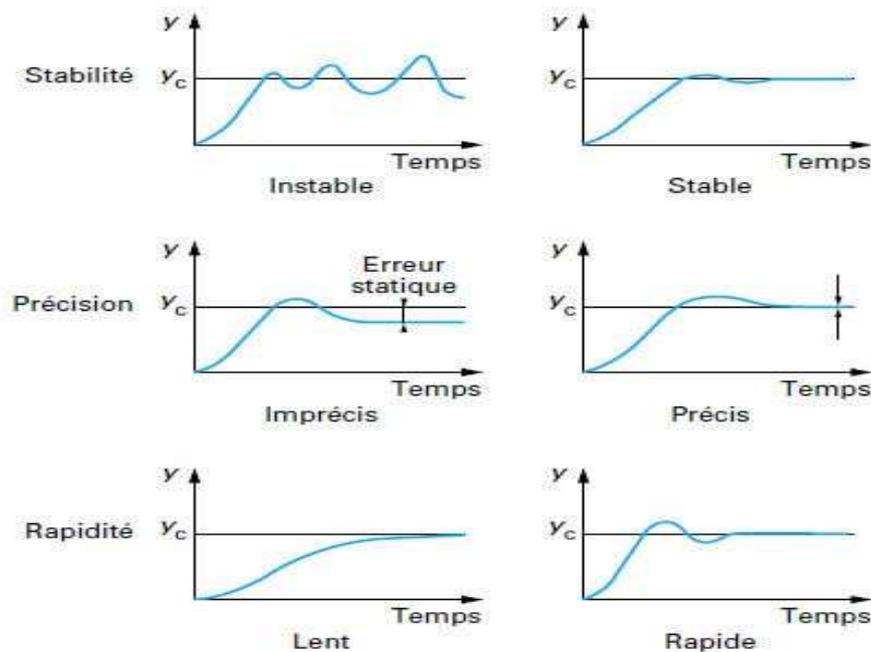


Figure 1.5 – Qualités d’une bonne régulation

3.3 Transmetteurs, capteurs et actionneurs

Une chaîne de régulation est formée d’une cascade d’appareils qui doivent être compatibles entre eux, tant du point de vue électrique que du point de vue précision et échelle de mesure.

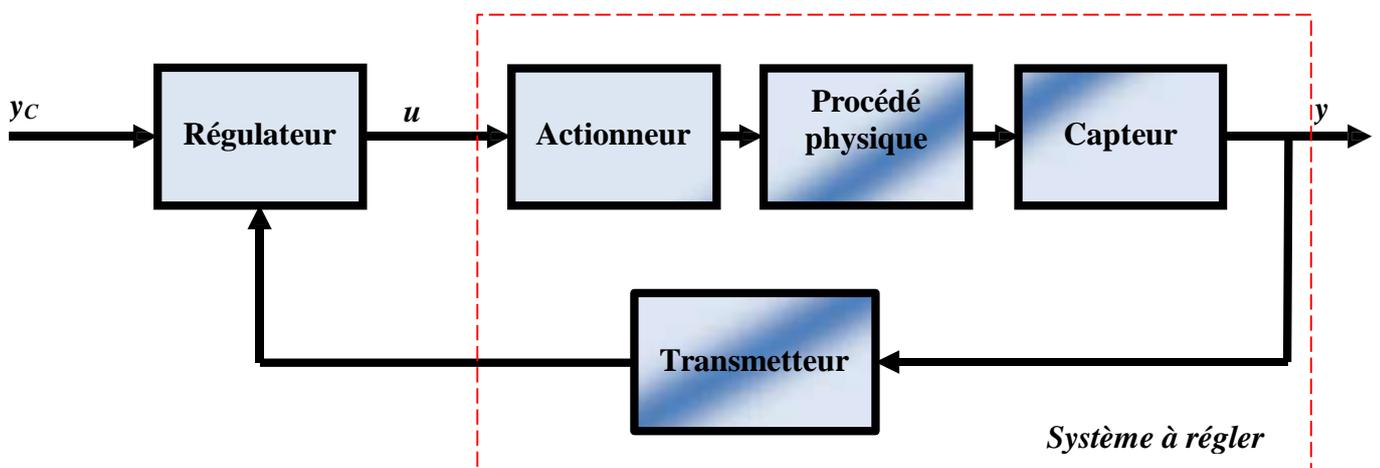


Figure 1.6 – Chaîne de régulation type

3.3.1 Transmetteur

Le transmetteur est utilisé lorsque la mesure est éloignée du régulateur (par exemple distance supérieure à 10 m). Son rôle est de transformer la mesure physique en un courant (ex : 4-20 mA) ou une tension (ex : 0-10 V) moins sensibles aux parasites. Le transmetteur peut faire partie intégrante du capteur.

3.3.2 Capteur

Dans les équipements thermiques, le capteur de température est le plus répandu.

Pour les basses températures (– 200 à + 800 °C environ, valeurs extrêmes à moduler en fonction de

la tenue en température du support), la **sonde platine** 100 W à 0 °C est la plus utilisée (ex : enceinte climatique, étuve, réchauffeur).

Pour les cas simples, le thermostat basé sur le principe du **bilame** est également très répandu (ex : chaudière domestique).

Dans les fours, on utilise en général soit :

- des **lunettes infrarouges** elles restent une solution chère et pas toujours utilisable; leur domaine d'utilisation est généralement supérieur à 600 °C ;
- des **thermocouples** ; il en existe plusieurs types selon la gamme de température balayée par le four. Les plus courants sont les types :
 - T : cuivre-constantan : -185 à +300 °C,
 - J : fer-constantan : +20 à +700 °C,
 - K : chromel-alumel : 0 à +1 100 °C,
 - S : platine-platine rhodié 10 % : 0 à +1 550 °C,
 - R : platine-platine rhodié 13 % : 0 à +1 600 °C,
 - B : platine rhodié 30 % - platine rhodié 6 % : +100 à +1 600 °C,
 - W : tungstène-tungstène rhénium 26 % : +20 à +2 300 °C.

Les thermocouples nécessitent une jonction de référence ou soudure froide qui permet à la f.é.m. mesurée d'être uniquement fonction de la température de la soudure chaude du capteur. De plus la mesure délivrée par le thermocouple doit être linéarisée, dans le transmetteur, ou dans le régulateur.

Comme autres capteurs, on peut citer les capteurs de débit, de pression, de déplacement, de masse, d'humidité, etc. Ces capteurs fournissent en général un signal analogique, image de la grandeur physique mesurée.

3.3.3 Actionneurs: Pour moduler la **puissance électrique d'un four**, on utilise soit :

- des contacteurs (solution bon marché) : ne donnent pas une très bonne qualité de régulation : la température oscille, mais c'est suffisant pour certaines applications.
- des modulateurs à thyristors (de plus en plus utilisés) : Pour **les modulateurs à thyristors** (ou gradateurs de puissance), on distingue deux modes de fonctionnement :
 - l'angle de phase : Les thyristors ne sont passants que pendant une portion de l'alternance (figure 1.7). La commande d'un régulateur appliquée au bloc à thyristors fait varier l'angle α d'amorçage et donc la puissance.

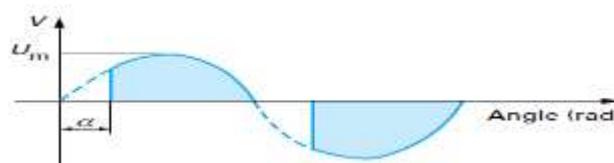


Figure 1.7 – Commande en angle de phase

V : tension aux bornes des résistances

U_m : tension de crête

α : angle d'amorçage

- Le train d'ondes : Les thyristors sont passants pendant un temps t_1 , puis bloqués pendant un temps t_2 (figure 1.8).
- Le rapport cyclique permet de faire varier la puissance. Ce rapport est proportionnel à la commande issue du régulateur.

Si l'emploi des gradateurs semble très attrayant, il faut toutefois prendre garde aux inconvénients qu'ils peuvent induire et notamment sur :

- ✓ le facteur de puissance de l'installation ;
- ✓ l'énergie réactive de l'installation ;
- ✓ les parasites ;
- ✓ les harmoniques ;

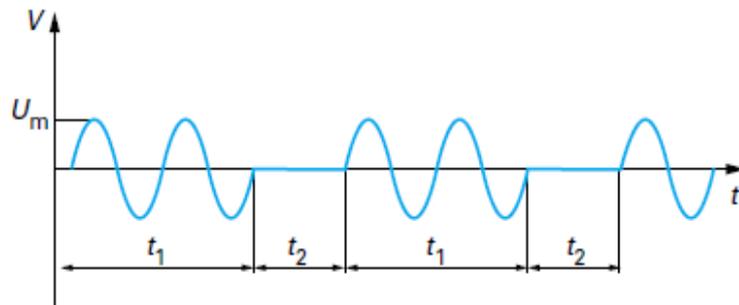


Figure 1.8 – *Commande en train d'ondes*

- des transformateurs variables (solution chère) : Ils permettent d'ajuster la tension d'alimentation des résistances en fonction de la température.
- des selfs à saturation variable (solution chère qui n'est plus préconisée).

Quelques **autres actionneurs** peuvent être cités :

- la vanne d'admission de gaz ou de liquide ;
- le variateur de vitesse (ex : commande de débit d'une pompe), etc.

Ces actionneurs sont commandables en général par un signal analogique ou logique (par ex : 0-10 V, 4-20 mA).

4.1. Régulation ou Asservissement: toute chaîne de regulation ou asservissement comprend 03 maillons indispensables:

- 1) L'organe de mesure
 - 2) L'organe de régulation
 - 3) L'organe de contrôle
- Il faut mesurer les principaux grandeurs servant à contrôler le processus

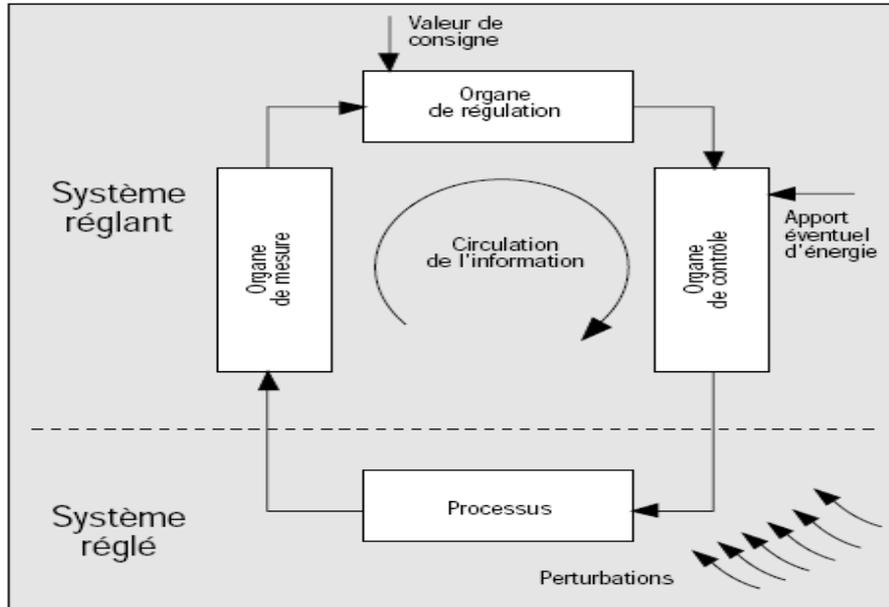


Fig 1.9: Schéma de principe d'une régulation en boucle fermée

Dans la chaîne de régulation, l'organe de mesure, l'organe de régulation et l'organe de contrôle constituent le système réglant, tandis que le processus constitue le système réglé. Après action du régulateur, deux comportements peuvent être obtenus en automatique :

Comportement en régulation : La consigne est maintenue constante et il se produit sur le procédé une modification (ou une variation) d'une des entrées perturbatrices. L'aspect régulation est considéré comme le plus important dans le milieu industriel, car les valeurs des consignes sont souvent fixes. Néanmoins, pour tester les performances et la qualité d'une boucle de régulation, l'automaticien (ou le régleur) s'intéresse à l'aspect asservissement.

Comportement en asservissement : L'opérateur effectue un changement de la valeur de la consigne, ce qui correspond à une modification du point de fonctionnement du processus. Si le comportement en asservissement est correct, on démontre que la boucle de régulation réagit bien, même lorsqu'une perturbation se produit.

- Dans une **régulation**, on s'attachera à maintenir constante la grandeur réglée d'un système soumis à des perturbations.
- Dans un **asservissement**, la grandeur réglée devra suivre rapidement les variations de la consigne.

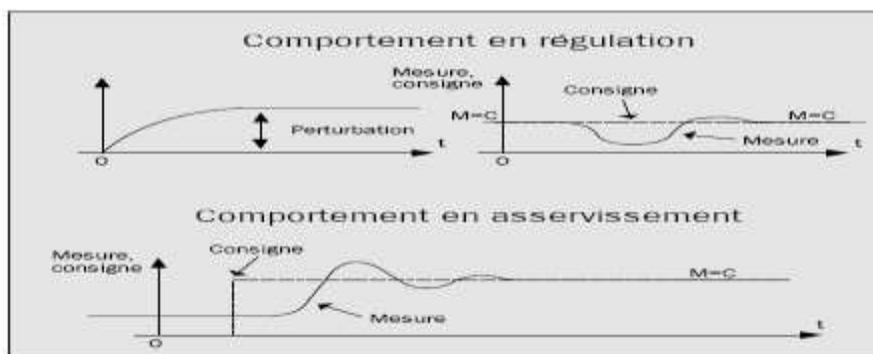


Fig1.10 : comportement en régulation et asservissement

4.2. Les servomécanismes

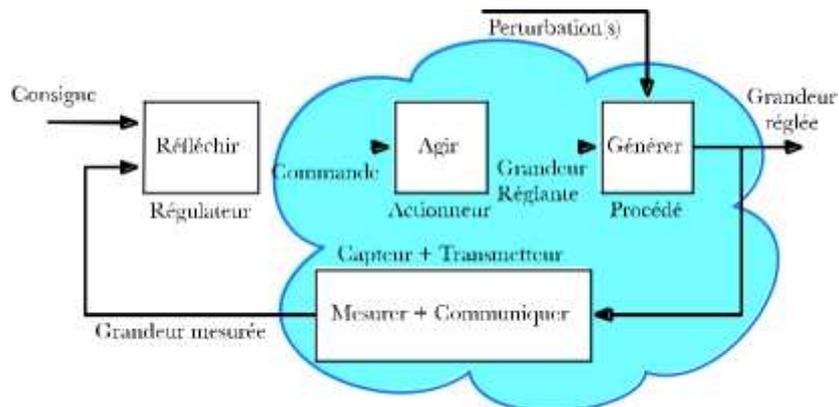
On appelle **servomécanisme**, un système asservi dont le rôle consiste à amplifier la puissance et dont la grandeur réglée est une grandeur mécanique tel qu'un effort, un couple, la position ou l'une de ses dérivées par rapport au temps, comme la vitesse et l'accélération.

4.2.1 Principe de fonctionnement

Pour réguler un système physique, il faut :

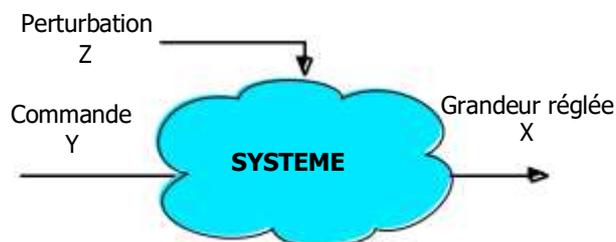
- **Mesurer** la grandeur réglée avec un capteur.
- **Réfléchir** sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- **Agir** sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage.

On peut représenter une régulation de la manière suivante :



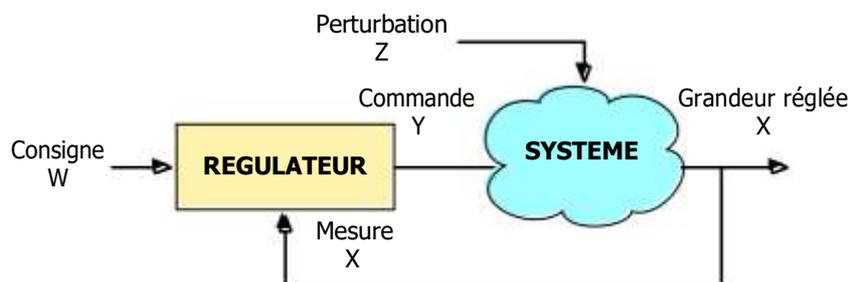
4.2.2 Fonctionnement en boucle ouverte (Manuel)

On parle de fonctionnement en boucle ouverte quand c'est l'opérateur qui contrôle l'organe de réglage. Ce n'est pas une régulation.



4.2.3 Fonctionnement en boucle fermée (Automatique)

C'est le fonctionnement normal d'une régulation. Le régulateur compare la mesure de la grandeur réglée et la consigne et agit en conséquence pour s'en rapprocher.



5. Schémas de représentation

5.1. Schéma TI

5.1.1. 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.

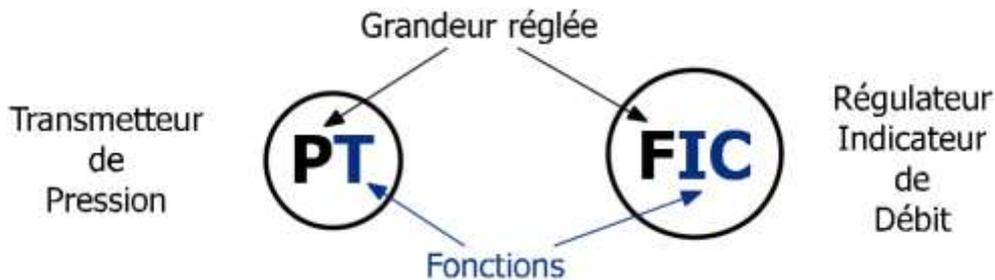


Fig 5.1.1.A: Représentation symbolique des régulations

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

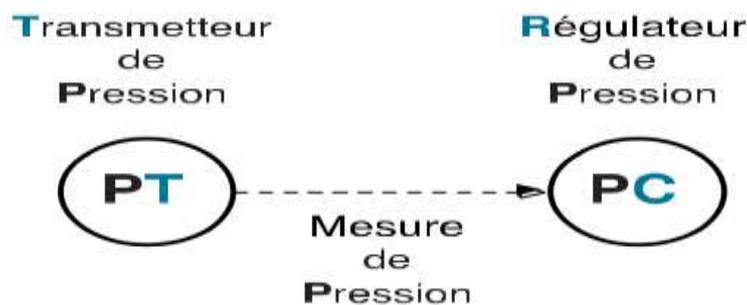


Fig 5.1.1.B: Représentation symbolique des régulations dépend du support de l'information

5.1.2. Exemple

Schéma TI d'une régulation de niveau dans le ballon avec correction de tendance :

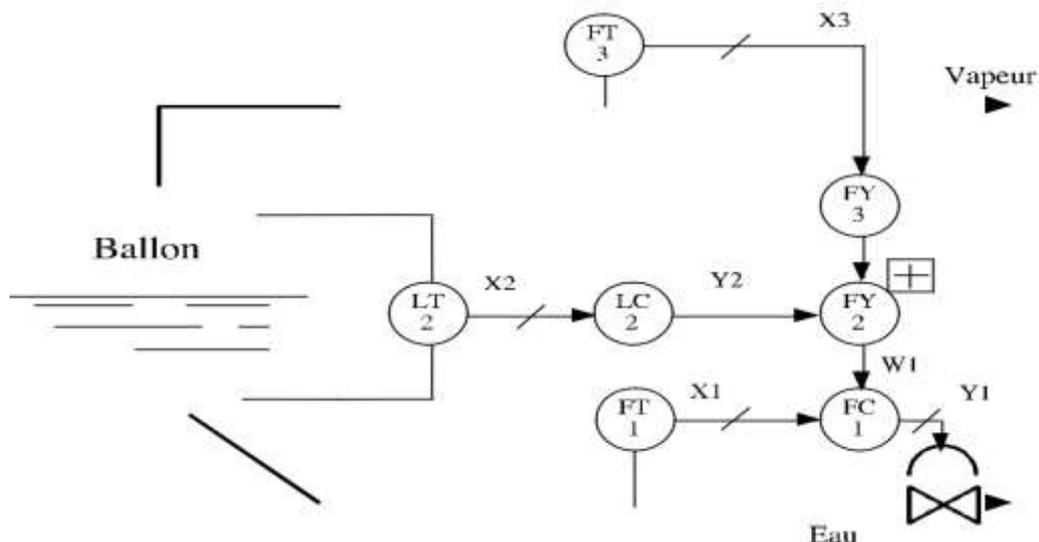


Fig 5.1.2: Schéma TI d'une régulation de niveau.

5.1.3. Signification des lettres

	Grandeur physique	Affichage	Fonction	Complément
A	Analyse	Alarme		
B	Combustion (Flamme)			
C	Conductivité (ou autre)		Régulateur	
D	Masse Volumique (ou autre)			Différence
E	Tension	Élément primaire		
F	Débit			Proportion
G	(libre)	à glace		
H	Commande manuelle			Haut - HH = Très haut
I	Courant électrique	Indicateur		
J	Puissance			
K	Temps			
L	Niveau	Voyant lumineux		Bas - LL = Très bas
M	Humidité (ou autre)			
N	Viscosité (ou autre)			
O	(libre)			
P	Pression			
Q	Quantité	Totaliseur		
R	Rayonnement	Enregistreur		
S	Vitesse		Commutateur	
T	Température		Transmetteur	
U	Variables multiples			
V	Vibrations		Vannes	
W	Masse ou Force	Puits thermométrique		
X	(libre)			
Y	Événement		Relai de calcul	
Z	Position			

Tableau 5.1.3: Signification des lettres.

5.1.4. Les symboles

PRINCIPAUX SYMBOLES des SCHEMAS 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	
	Croisement 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	

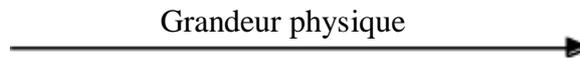
D'autres symboles peuvent être utilisés en fonction des besoins mais dans ce cas leur signification est explicitée.

Tableau 5.1.4: Signification des symboles.

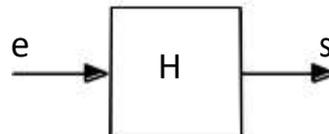
5.2. Schéma fonctionnel

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

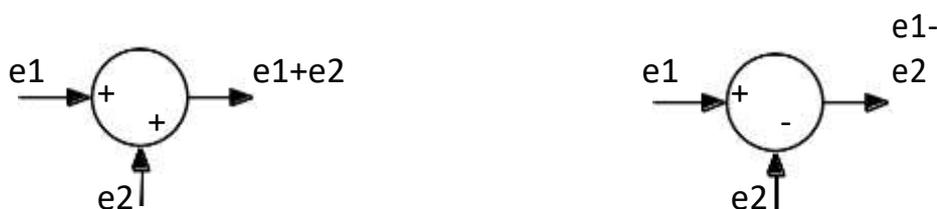
- Des lignes de parcours d'une grandeur physique. Ces ligne représente le parcours d'une grandeur physique de la boucle de régulation :



- 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 :



5.3. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation

D'une manière générale, une boucle de régulation peut être représentée de la manière suivante :

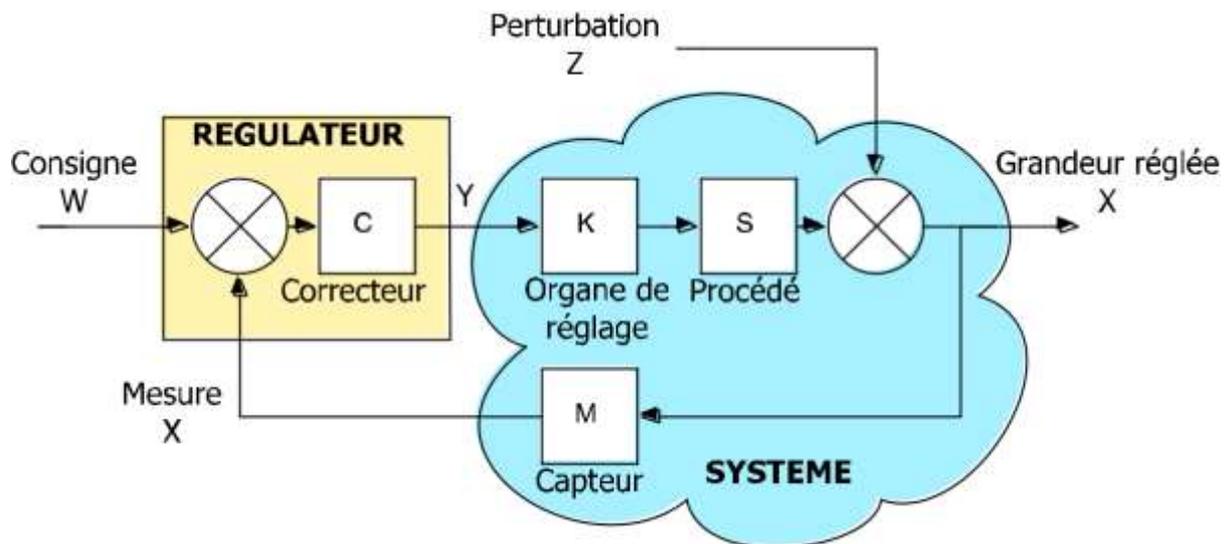


Fig 5.3.1 : Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation

À partir d'un schéma TI, on peut construire le schéma fonctionnel correspondant.

Exemple : une régulation de pression :

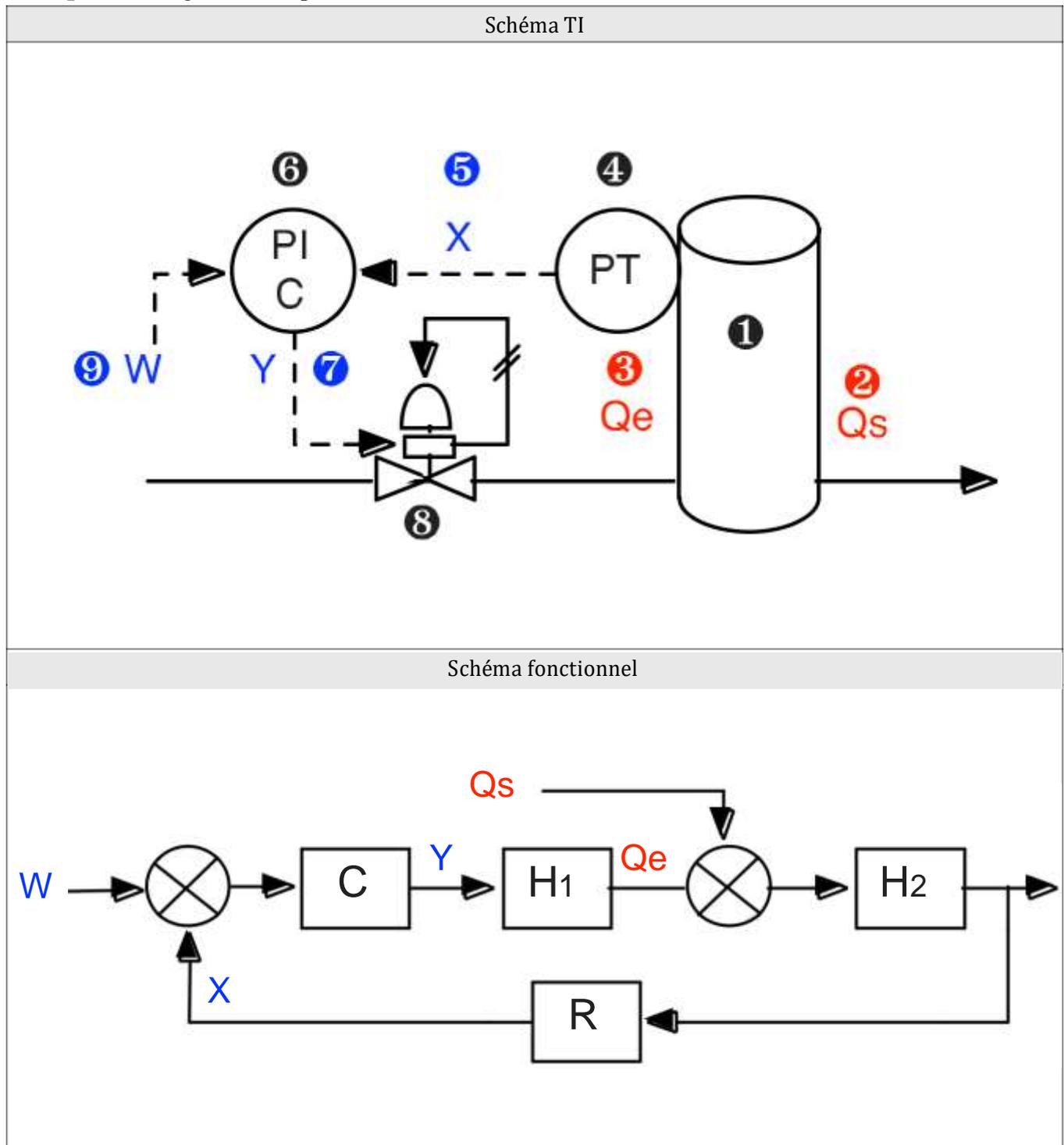


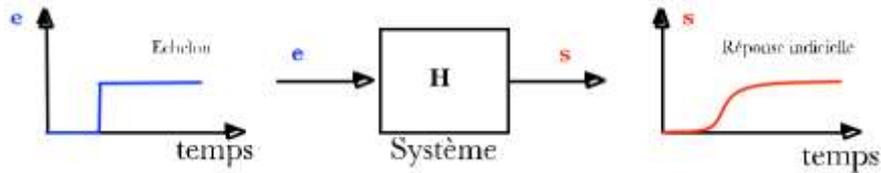
Fig 5.3.2 : Le schéma fonctionnel correspondant une régulation de pression.

6. Caractéristiques statiques et dynamiques d'un procédé

6.1. Stabilité

6.1.1. Procédés stables

Un procédé est dit naturellement stable si à une variation finie de la grandeur réglante E correspond une variation finie de la grandeur réglée S .

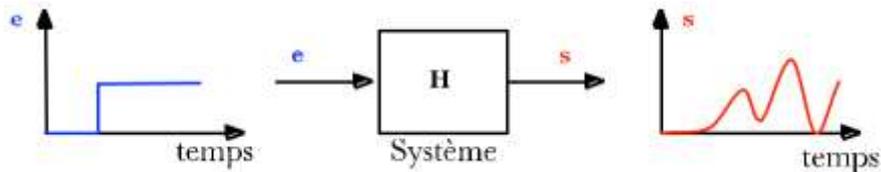


Exemple :

- Grandeur réglée : température d'une pièce ;
- Grandeur réglante : puissance du radiateur.

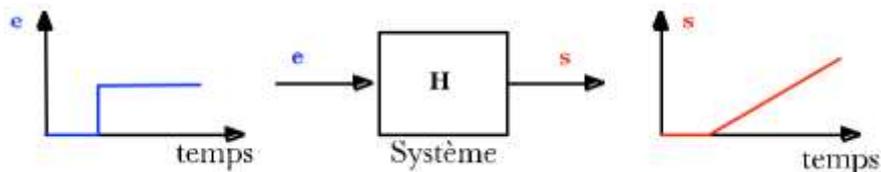
6.1.2. Procédé instable

Un système est dit instable si à une variation finie de la grandeur réglante e correspond une variation continue de la grandeur réglée s .



6.1.3. Procédé intégrateur

On dit qu'un procédé est intégrateur, si pour une entrée e constante, la sortie s est une droite croissante. Un procédé est intégrateur est instable.



Exemple :

- Grandeur réglée : niveau ;
- Grandeur réglante : débit d'alimentation.

6.2. Régime transitoire - Régime permanent

On dit que le système fonctionne en régime permanent, si l'on peut décrire son fonctionnement de manière « simple ». Dans le cas contraire, on parle de régime transitoire.

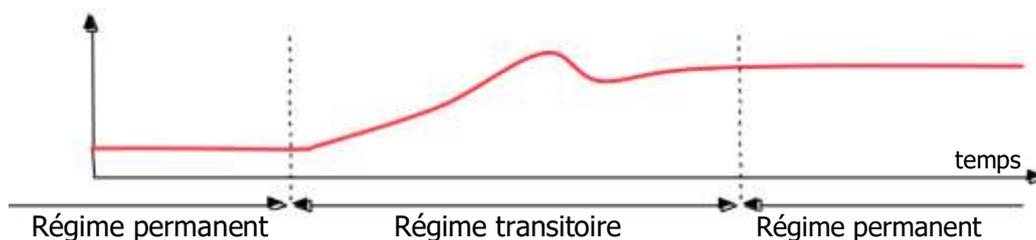


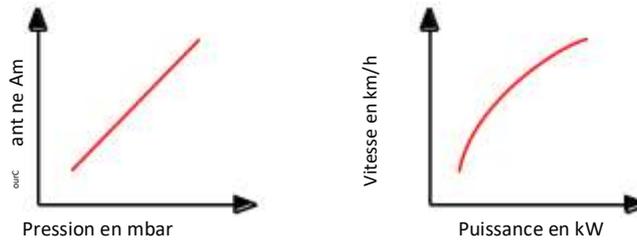
Fig 6.2 : Fonctionnement d'un système en régime transitoire et permanent.

Pour passer d'un régime permanent à un autre, le système passe par un régime transitoire.

6.3. Caractéristiques statiques d'un procédé

6.3.1. Courbe caractéristique

La caractéristique statique est la courbe représentative de la grandeur de sortie s en fonction de la grandeur d'entrée e : $s = f(e)$.



Remarque : On ne peut tracer la caractéristique statique que d'un système stable.

6.3.2. Gain statique

Si le système est naturellement stable, le gain statique K est le rapport entre la variation de la grandeur de sortie Δs et la variation de la grandeur d'entrée Δe .

$$K = \frac{\Delta s}{\Delta e}$$

6.3.3. Erreur statique

Si le système est stable, l'erreur statique ϵ_s est la différence entre la consigne w et la mesure x en régime permanent.

$$\epsilon_s = w - x$$

6.3.4. Linéarité

Un système linéaire obéit au principe de superposition. L'effet de la somme d'excitations est égal à la somme des effets de chaque excitation.

6.4. Caractéristiques dynamiques

6.4.1. Temps de réponse

C'est l'aptitude du système à suivre les variations de la consigne. Dans le cas d'un échelon de la consigne, la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse. Dans l'exemple ci-dessous, on mesure le temps de réponse à $\pm 5\%$ qui est égal à $t_1 - t_0$.

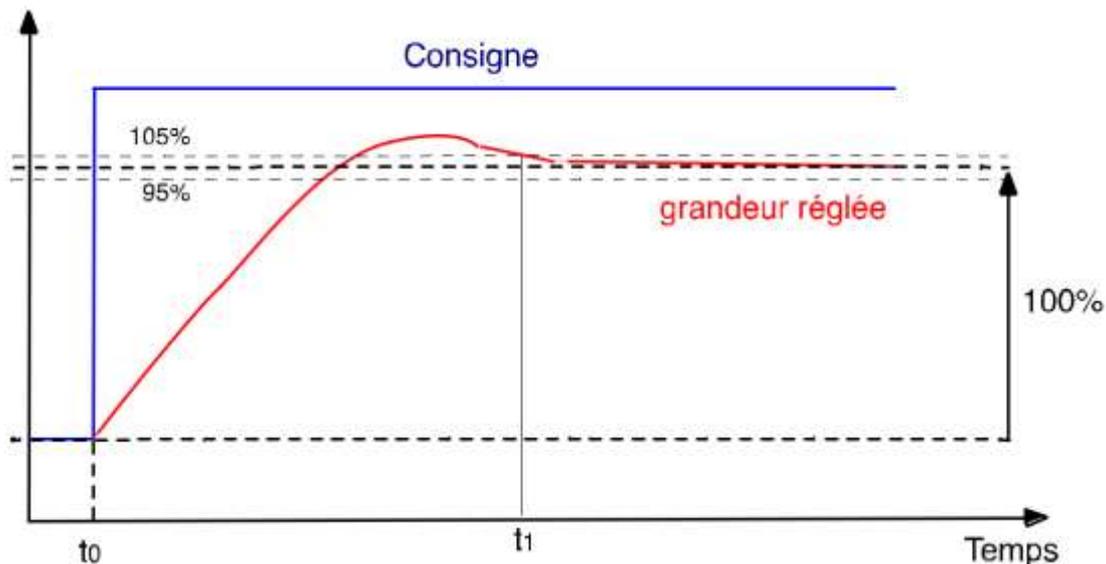


Fig 6.4.1: La croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse.

6.4.2. Dépassement

Le premier dépassement permet de qualifier la stabilité d'un système. Plus celui-ci sera important, plus le système sera proche de l'instabilité. Dans certaines régulations, aucun dépassement n'est toléré. Dans d'autres régulation, un dépassement inférieur à 15 % est considéré comme acceptable.

Dans la réponse indicielle ci-dessous, le premier dépassement est de 14%.

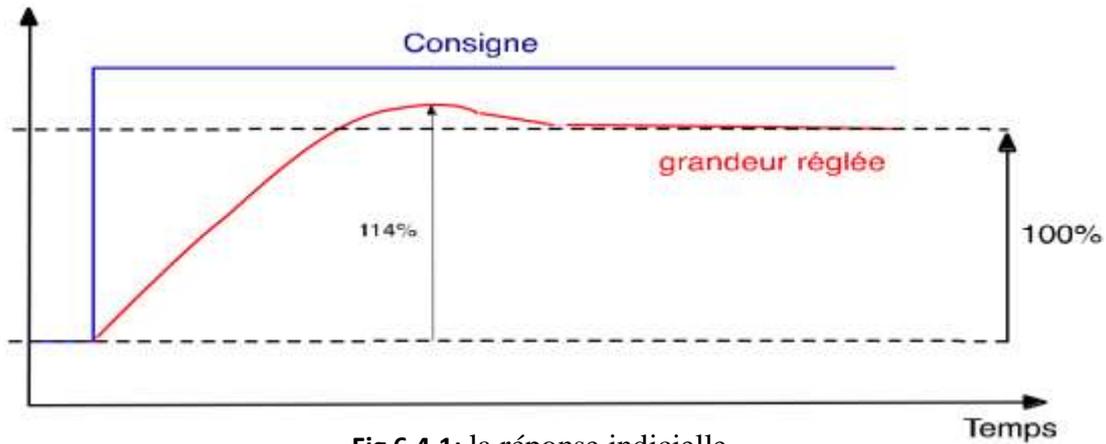


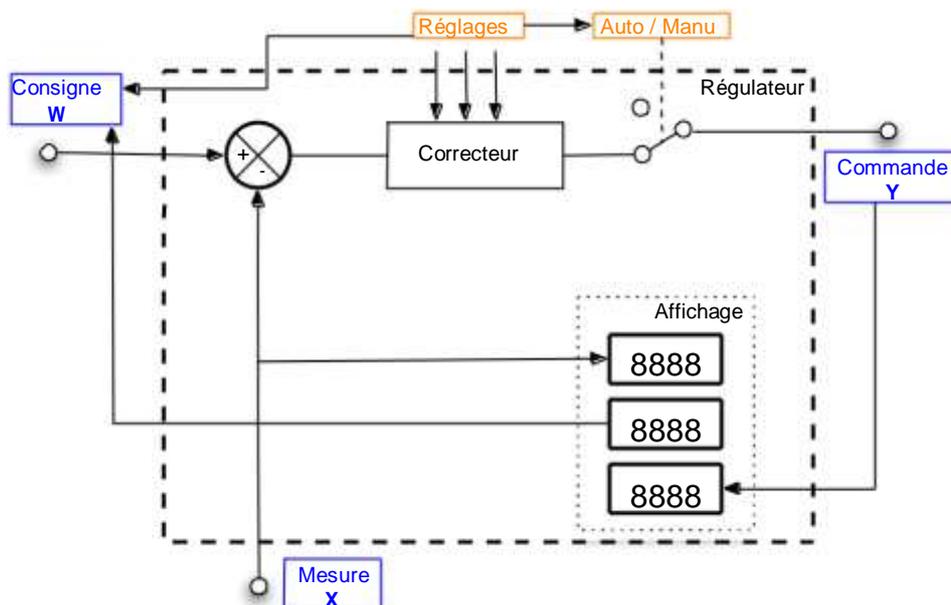
Fig 6.4.1: la réponse indicielle.

7. Les régulateurs: Les différents types de régulateurs sont :

- Régulateurs monoblocs analogiques et numériques.
- Systèmes numériques de contrôle commande de procédés (S.N.C.C.)
- Automates programmables industriels (A.P.I.)
- Carte de régulation sur PC

7.1. Structure de principe d'un régulateur

- Le régulateur compare la mesure et la consigne pour générer le signal de commande.
- Le signal de mesure X est l'image de la grandeur réglée provenant d'un capteur et transmetteur, est transmise sous forme d'un signal électrique ou pneumatique ;
- La consigne W peut-être interne (fournie en local par l'opérateur) ou externe ;
- L'affichage de la commande Y se fait en % et généralement en unités physiques pour la consigne et la mesure.
- Si un régulateur est en automatique, sa sortie dépend de la mesure et de la consigne. Ce n'est pas le cas s'il est en manuel.

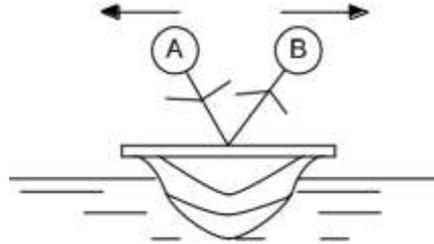


7.2. Choix du sens d'action d'un régulateur

7.2.1. Définition

Un procédé est direct, quand sa sortie varie dans le même sens que son entrée. Dans le cas contraire, le procédé est dit inverse. Dans un régulateur, la mesure est considérée comme une entrée.

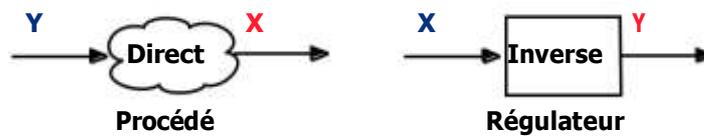
7.2.2. Règle de stabilité



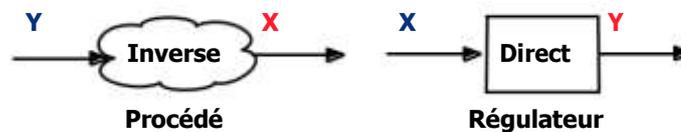
Dans la barque représentée ci-dessus, si A se penche trop vers la gauche, B est obligé de se pencher sur la droite pour maintenir la barque en équilibre et ne pas finir dans l'eau. Dans une boucle de régulation c'est la même chose, le régulateur doit agir pour limiter les variations du procédé.

Règle : Pour avoir un système stable dans une boucle de régulation, le régulateur doit agir de manière à s'opposer à une variation de la mesure X non désirée. Si X augmente, le couple régulateur + procédé doit tendre à le faire diminuer.

Si le procédé est direct : Il faut mettre le sens d'action du régulateur sur inverse.



Si le procédé est inverse : Il faut mettre le sens d'action du régulateur sur direct.



Important : Dans le cours sur les correcteurs, on ne considérera que les correcteurs inverses.

7.2.3. Mise en œuvre pratique

- Mettre le régulateur en manuel ;
- Augmenter la sortie commande du régulateur ;
- Si la mesure augmente, mettre le régulateur en sens inverse ;
- Si la mesure diminue, mettre le régulateur en sens direct.

7.3. Raccordements électriques

7.3.1. Le transmetteur

On peut séparer trois types de transmetteur :

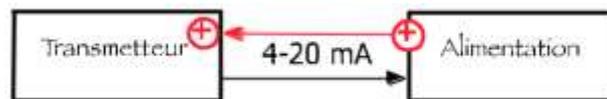
- Les transmetteurs 4 fils (actifs) qui disposent d'une alimentation et qui fournissent le courant I. Leur schéma de câblage est identique à celui des régulateurs.



- Les transmetteurs 3 fils (actifs) sont des transmetteur 4 fils, avec les entrées moins reliées.



- Les transmetteurs 2 fils (passif) qui ne disposent pas d'une alimentation et qui contrôle le courant I fournie par une alimentation externe.



7.3.2. Schéma de principe d'une boucle de courant

Une boucle 4-20 mA est composée :

- D'un générateur, qui fournit le courant électrique ;
- D'un ou plusieurs récepteurs, qui mesure le courant électrique qui les traverse.

Remarque :

- Le courant sort par la borne + du générateur ;
- Le courant entre par la borne + des récepteurs.

7.3.3. Générateur ou récepteur

Récepteur	Générateur
Transmetteur 2 fils	Transmetteur 4 fils
Mesure du régulateur	Transmetteur 3 fils
Organe de réglage	Alimentation
Enregistreur	Commande régulateur

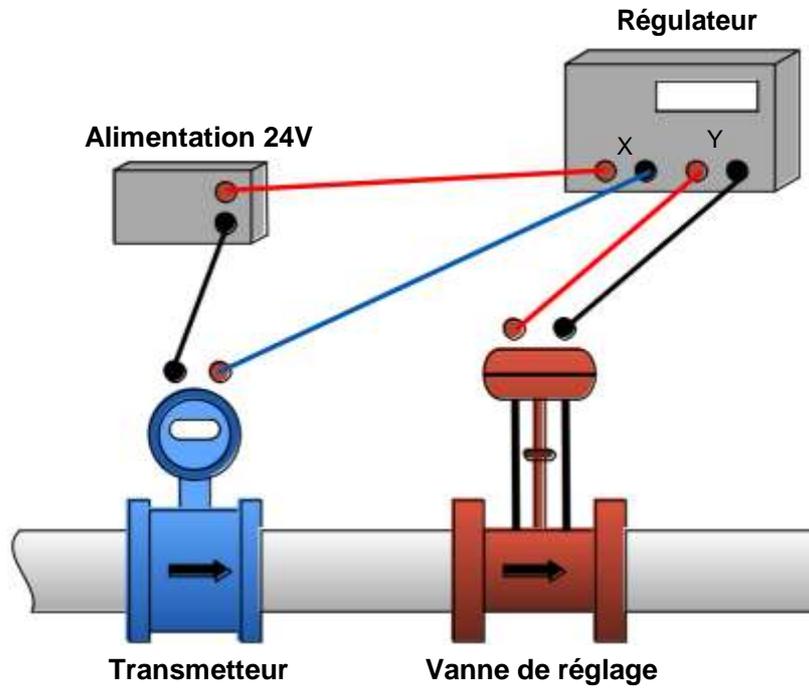
7.3.4. Mise en œuvre pratique

Chercher le nombre de boucle de courant. Il y a deux fois plus de boucles de courant que de boucles de régulation.

- Pour chaque boucle, faire la liste de l'instrumentation mise en œuvre.
- Dans chaque liste, déterminer l'unique élément générateur.
- Relier le (+) du générateur au (+) d'un récepteur avec un fil rouge.
- Relier le (-) du générateur au (-) d'un récepteur avec un fil noir.
- Si possible, relier les (+) disponibles des récepteurs, aux (-) disponibles d'autres récepteurs avec un fil bleu.

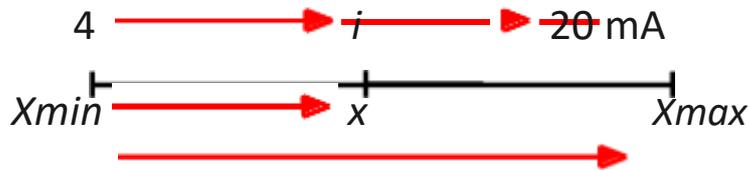
Remarque : Dans chaque boucle de courant, il y a autant de fils de liaison que d'éléments.

7.3.5. Schéma de câblage d'une boucle de régulation de débit



7.3.6. Astuce de calcul

Dans une boucle de courant, le courant est l'image d'une grandeur physique. Grandeur physique qui peut être une mesure ou une commande. On pourra représenter cette relation linéaire à l'aide du graphique suivant :



Ce graphique nous permet alors d'écrire la relation suivante :

$$\frac{i - 4}{x - X_{min}} = \frac{20 - 4}{X_{max} - X_{min}}$$

Régulateur tout-ou-rien

Objectifs

- Identifier les paramètres du modèle à étudier.

Pré-requis

- Régulateur tout-ou-rien avec hystérésis
- Systèmes de premier ordre.
- Régulateur tout-ou-rien avec seuil

Elément de contenu

Chapitre 2. Régulateur tout-ou-rien

(2 Semaines)

Régulateur tout-ou-rien, Régulateur tout-ou-rien avec seuil, Régulateur tout-ou-rien avec hystérésis, Régulateur tout-ou-rien avec seuil et hystérésis.

Moyens Pédagogiques

- Vidéo projecteur.
- Tableau

Durée

01 séances de cours.

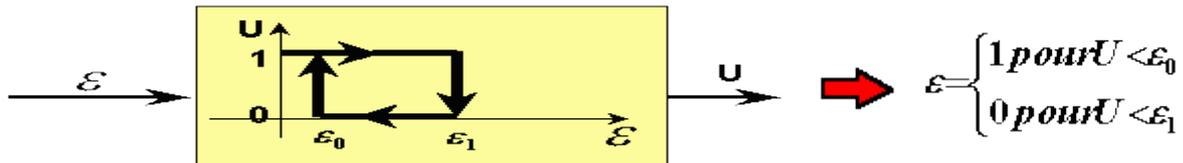
01 séances de TD.

Régulateurs "tout ou rien"

1.1. Définition

Un régulateur «tout ou rien» est un régulateur qui élabore une action de commande discontinue qui prend deux positions ou deux états 0 et 1 (ou 0 et 100%).

On les appelle on-off control ou two steps controller



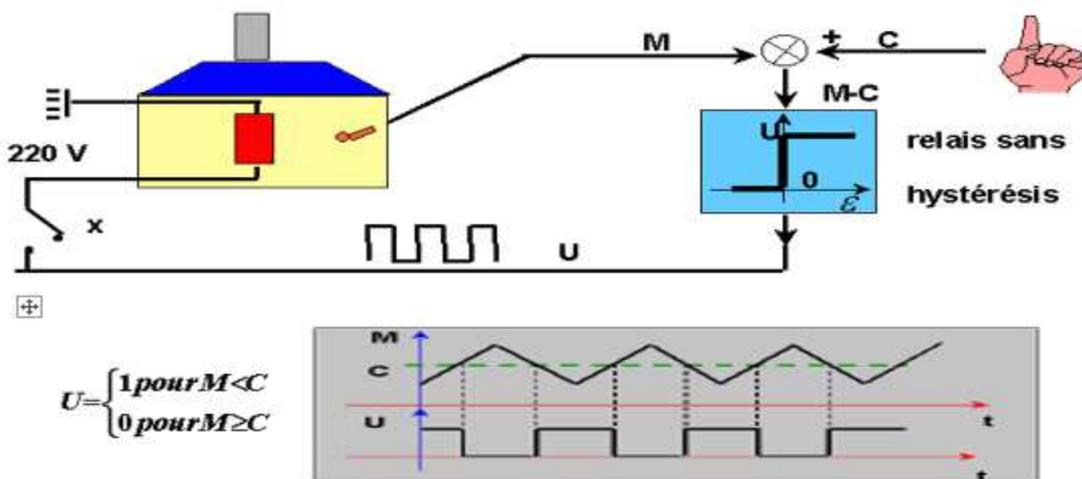
1.2. Domaine d'utilisation

Les régulateurs tout ou rien sont utilisés pour la commande des systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas importante. A titre d'exemple la régulation d'un four à l'aide d'une résistance chauffante.

1.3. Fonctionnement d'un régulateur «tout ou rien»

Dans ce type de régulateur, la commande U du correcteur agit sur un relais électromécanique à contact. Dans le cas simple, lorsque U=1, une bobine est excitée et ferme le contact du relais pour alimenter la résistance de chauffe et est désexcitée lorsque U=0 (le contact s'ouvre alors). Les régulateurs tout ou rien classiques sont par exemple les thermostats et les soupapes de sécurité (pressostats) qu'on utilise dans les systèmes de sécurité.

Réglage de la température d'un four



Le rôle de l'hystérésis dans un relais est de : augmenter la stabilité et d'éviter le pompage, cependant l'erreur statique augmente.

2.1. Action continue - Action discontinue

On sépare le fonctionnement d'un régulateur en deux types d'actions distincts :

- Une action continue avec une sortie du régulateur peut prendre toutes les valeurs comprises entre 0 et 100%.
- Une action discontinue, dans laquelle la sortie Y du régulateur ne prend que deux valeurs. On appelle aussi le fonctionnement discontinue fonctionnement Tout Ou Rien.

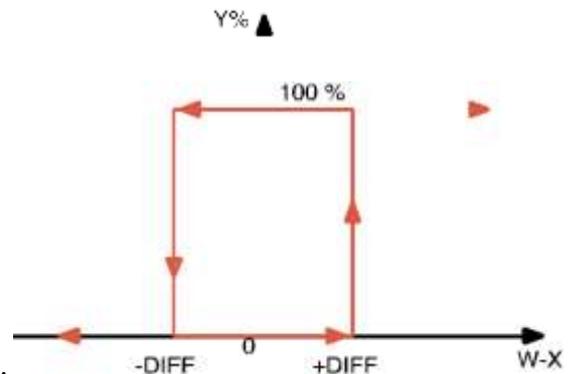


2.2. Présentation

Le fonctionnement TOR se caractérise par deux états possibles pour la commande. Celui qui correspond à la commande maximale (100 %) et celui qui correspond à la commande minimale (0 %). Un seuil limite la fréquence de commutation du système pour éviter une fatigue prématurée des organes de réglages.

Le réglage du régulateur se fait à l'aide de deux paramètres :

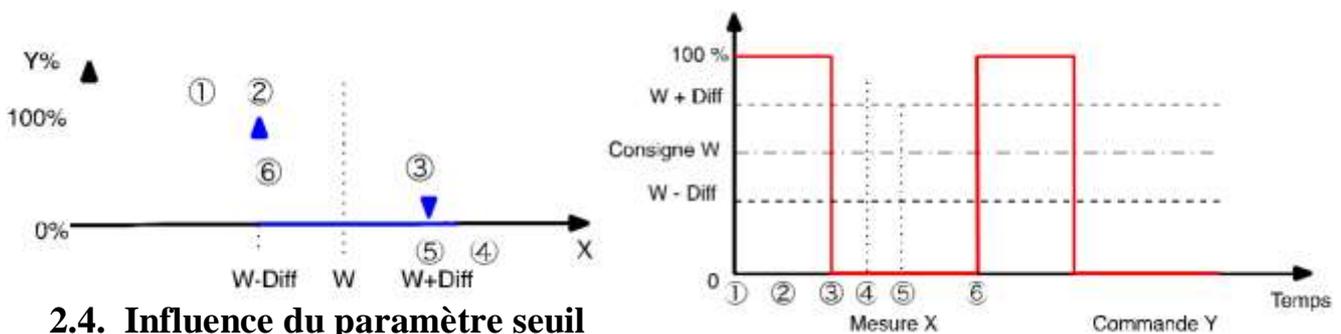
- La consigne W, fournie en unité de mesure ;
- Le seuil DIFF, donné généralement en % de la consigne.



2.3. Fonctionnement

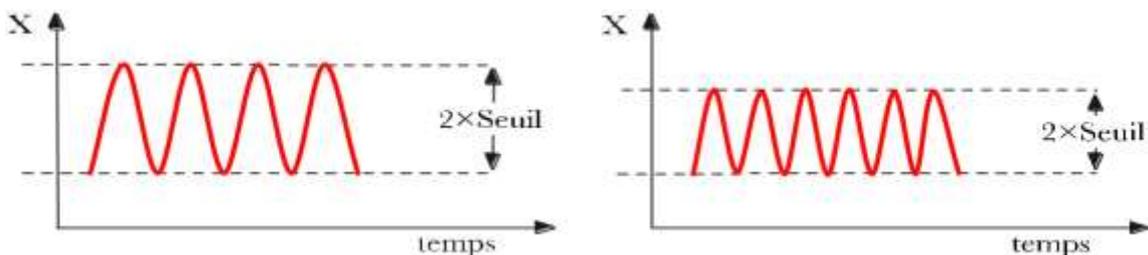
La grandeur réglée oscille autour du point de fonctionnement. À chaque dépassement des seuils de commutation, la sortie du régulateur change d'état. Compte tenu de l'inertie du système, la valeur absolue de l'erreur ϵ peut dépasser le seuil DIFF.

Remarque : La mesure ne peut pas être constante dans ce type de régulation, le système est en régime d'instabilité entretenue.



2.4. Influence du paramètre seuil

La valeur du seuil influe sur la fréquence des permutations et l'amplitude de la variation de la grandeur mesurée. Plus le seuil est faible, plus la fréquence est élevée, moins l'amplitude est grande. Une augmentation de la fréquence réduit d'autant la durée de vie de l'organe de réglage.



Identification des systèmes en boucle ouverte et fermée

Objectifs

- Analyse les comportements statique et dynamique
- Connaître la fonction de transfert réglante

Pré-requis

- Identification des systèmes en boucle ouverte et fermée.

Elément de contenu

But de l'identification, choix du modèle, identification en chaînes ouvertes (courbes en S, courbe intégratrice, courbe oscillatoire), identification en chaînes fermées (méthodes des oscillations).

Moyens Pédagogiques

- Vidéo projecteur.
- Tableau

Durée

01 séances de cours.

01 séances de TD.

Introduction

La fonction de transfert exacte et proche de la réalité d'un procédé industriel est pratiquement impossible à déterminer. On utilise des méthodes d'identification qui permettent de trouver un modèle de comportement traduisant le plus fidèlement possible le procédé autour d'un point de fonctionnement.

1. IDENTIFICATION

1.1 Le but de l'identification

Pour arriver aux objectifs décrits dans le cahier des charges de la régulation d'un procédé, il faut analyser les comportements statique et dynamique de ce procédé seul, ou instrumenté, c'est-à-dire connaître sa fonction de transfert réglante. En effet, le réglage du correcteur à mettre en œuvre dépend essentiellement de la nature de cette fonction de transfert. Si ce système est soumis à des perturbations, il est important de déterminer également les fonctions de transfert perturbatrices. Selon leurs influences sur la grandeur à maîtriser, elles pourront être prises en compte lors de l'étude du correcteur principal ou servir à la mise en place de correcteur spécifiques.

1.2 Les méthodes générales

L'identification qui consiste à déterminer la fonction de transfert d'un système peut être effectuée par une mise en équation du système. Pour des systèmes simples, ou qui peuvent être décomposés en éléments simples, cela conduit à un modèle de connaissance.

Lorsque le procédé est complexe et que sa mise en équation est délicate, voire impossible par manque de connaissance des coefficients mis en jeu, une identification expérimentale est préférable. Une telle identification repose sur l'analyse de réponse temporelles, ou fréquentielles, observées directement sur le système soumis à un signal d'entrée déterminé.

1.3 Les méthodes proposées

Parmi les nombreuses méthodes d'identification expérimentales existantes, celles présentées dans ce chapitre sont des méthodes simples basées sur l'analyse temporelle du système soumis à une entrée déterminée (échelon ou rampe).

Deux méthodes d'identification sont à considérer : essai en chaîne ouverte (le système étudié est non commandé) et essai en chaîne fermée (un régulateur commande le système).

L'identification d'un procédé industriel est une opération délicate car les exigences de production ne permettent généralement pas de faire de nombreux essais. Il faut par exemple profiter d'une première mise en route du procédé pour effectuer l'identification (chaîne ouverte) ou d'un changement de consigne lors d'un changement de fabrication (chaîne fermée).

1.4 Le choix du modèle

La recherche d'un modèle mathématique pour un procédé est nécessaire et doit aboutir à un modèle représentant au mieux le comportement du procédé. Cependant le modèle ne doit ni être trop sophistiqué au risque incompatible avec le correcteur disponible, ni être trop simple pour ne pas masquer certains aspect néfaste au bon fonctionnement. Simplifier une constante de temps ou un retard dans un modèle ou ne pas prendre en compte la variation du gain statique est effectivement source d'instabilité du procédé. Le choix du modèle, comme sa détermination, doit donc être judicieux.

2 IDENTIFICATION EN CHAÎNE OUVERTE

Lors d'un tel essai, le procédé à identifier n'est plus contrôlé automatiquement. Le régulateur est mis en mode manuel pour pouvoir agir sur le signal de commande. On peut alors produire l'un des signaux présentés figures 2.2 . L'automaticien ne doit provoquer que des petites variations (quelques %) autour d'un point de fonctionnement choisi afin de ne pas déranger la production en cours et pour considérer le système comme linéaire. Il faut surveiller avec attention le procédé, livré à lui-même lors de cet essai, et vérifier également qu'une perturbation ne viendra pas influencer cette identification.

2.1 Méthodologie

2.1.1 Les signaux d'entrées

On envoie un signal d'entrée $X(t)$ connu (impulsion, échelon ou rampe) et on enregistre le signal de sortie $Y(t)$ qui est analysé ensuite.



Figure 2.1 : Système en chaîne ouverte.

Aux transformées de Laplace $X(p)$ et $Y(p)$ des fonctions $x(t)$ et $y(t)$, petites variations de $X(t)$ et $Y(t)$, on associe la fonction de transfert $H(p)$ du système en chaîne ouverte :

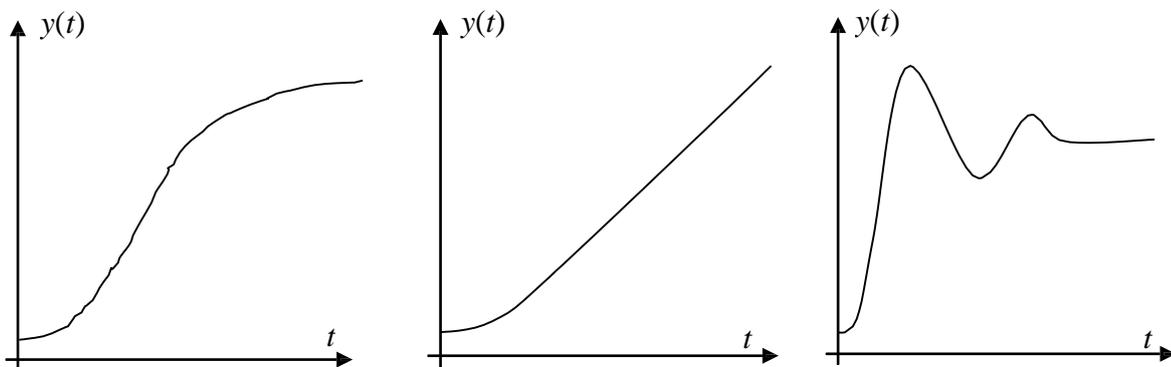
$$H(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} \quad (2.1)$$

Les deux signaux les plus employés sont l'échelon et la rampe. L'échelon est le plus facile et rapide à réaliser mais peut provoquer des variations assez brusques sur les procédés très sensibles. On utilise la rampe pour que le procédé subisse une variation plus douce et donc plus acceptable au niveau sécurité du produit et de l'installation.

2.1.2 Les signaux d'entrées

On enregistre la courbe $y(t)$ petite variation de $Y(t)$. Lorsque le signal d'entrée est une impulsion, la courbe obtenue est appelée réponse impulsionnelle. Pour un signal d'entrée en échelon, la courbe obtenue est appelée réponse indicielle. On la nomme également réponse à un échelon de position. La courbe obtenue à une rampe est dite réponse à un échelon de vitesse.

Les trois grandes familles de courbes les plus rencontrées sont les suivantes :



a) Courbe « en S »

b) Courbe « intégratrice »

c) Courbe « avec oscillations »

Figure 2.2 : Signal de sortie d'un système, courbes usuelles

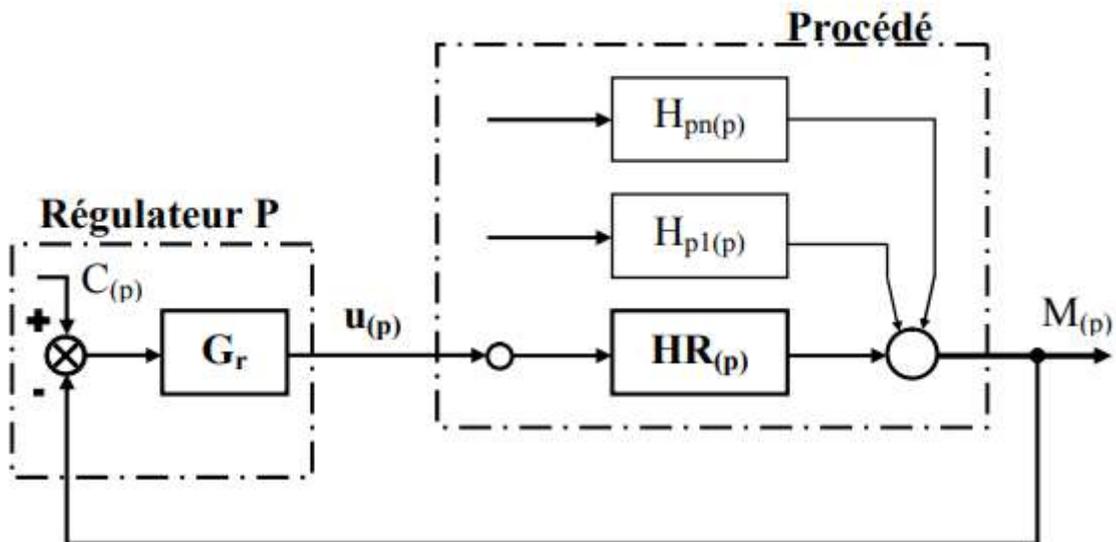
3.1.1 IDENTIFICATION DES PROCÉDES INDUSTRIELS : Les paramètres du modèle servent

- Au réglage des actions P.I.D dans une boucle de régulation.
- Au choix des modes de régulation
- A la régulation par correcteur à modèle interne

3.1.2 Méthodes d'identification en Boucle Fermée

➤ Procédés naturellement stables

On met le régulateur en mode automatique et on injecte une action **PROPORTIONNELLE** seulement :



3.1.3 Le modèle recherché :

On approximera le procédé à une fonction de transfert du premier ordre avec retard. C'est une identification paramétrique car on choisit à priori un modèle et on cherche par cette méthode, les paramètres de la fonction de transfert du modèle.

$$HR_{(p)} = \frac{Gs \cdot e^{-\tau_r \cdot p}}{\underbrace{(1 + \theta_1 \cdot p) (1 + \theta_2 \cdot p) \dots (1 + \theta_n \cdot p)}_{\text{Procédé}}} \# \frac{Gs \cdot e^{-\tau_r \cdot p}}{\underbrace{1 + \theta \cdot p}_{\text{Modèle}}}$$

La méthode d'identification en boucle fermée est plus précise que l'identification en boucle ouverte nécessite deux essais distincts :

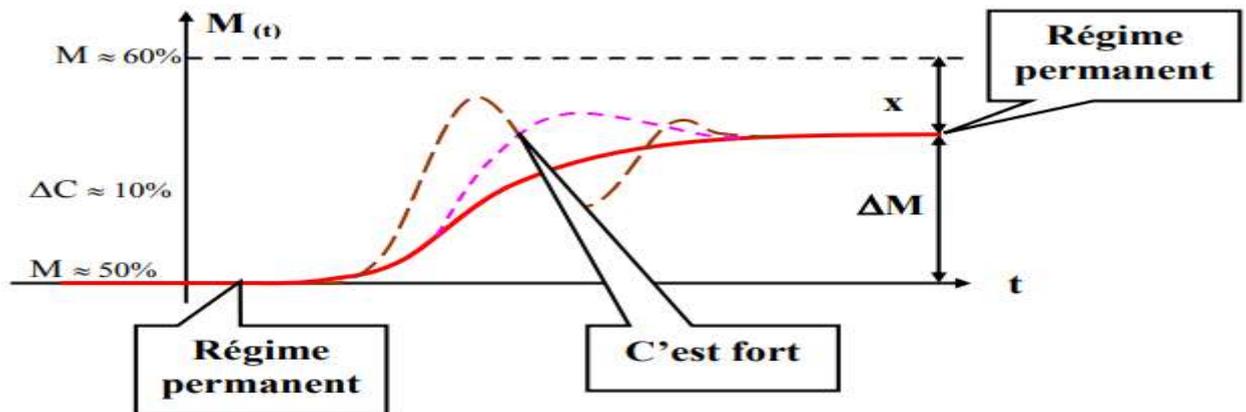
- 1^{er} essai : Recherche du gain statique G_s
- 2^{ème} essai : Recherche des paramètres dynamiques τ et θ .

3.1.4 Premier essai : Recherche du gain statique G_s :

- Se placer au point de fonctionnement et stabiliser la mesure
- Egaler la consigne à la mesure ($C=M$ le plus possible)
- Mettre le régulateur en Proportionnel seul ($T_i = \text{maxi}$ et $T_d = 0$)
- Passer en mode automatique et faire un échelon de $\Delta C \approx 10\%$
- Relever la variation de mesure ΔM et l'écart $x = C - M$
- Calculer le gain statique G_s comme suit :

$$G_s = \frac{\Delta M}{x \cdot G_r}$$

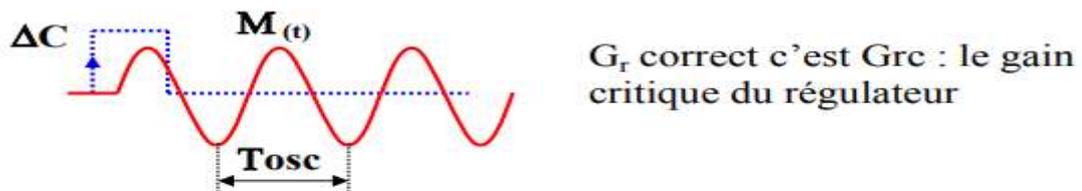
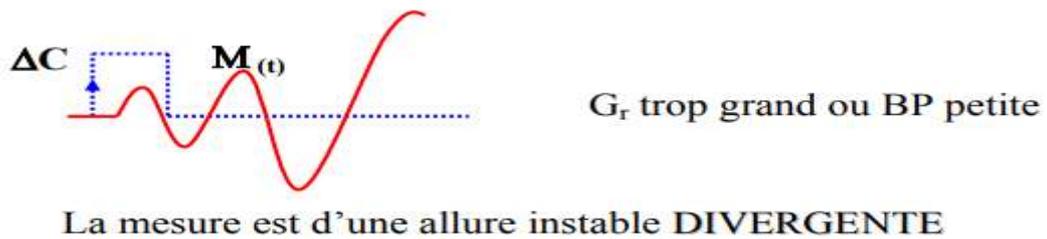
Avec G_r est celui de l'essai, on le choisi entre 0,5 et 1 sans **osciller** le système.



3.1.5 Deuxième essai : Recherche des paramètres T et θ :

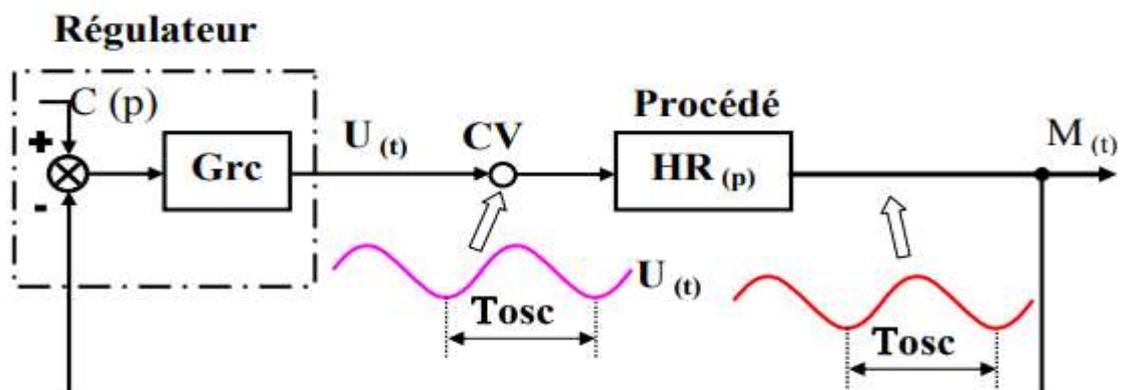
- Se placer au point de fonctionnement et stabiliser la mesure
- Egaler la consigne à la mesure ($C=M$ le plus possible)
- Mettre le régulateur en Proportionnel seul ($T_i = \text{maxi}$ et $T_d = 0$)

- ✓ Augmenter progressivement le gain du régulateur G_r en faisant de petits échelons sur la consigne jusqu'à l'obtention du POMPAGE régulier de la mesure, soit ainsi :



La mesure est d'une allure stable EN POMPAGE REGULIER

- Relever la valeur du gain critique du régulateur **G_{rc}** qui occasionne le pompage et la période des oscillations **T_{osc}** de la mesure [ou du signal de commande de la vanne $U(t)$]



4.1. Méthode de ZIEGLER & NICHOLS

- Gain de boucle critique G_{Bc}

$$G_{Bc} = G_{rc} \cdot G_s$$

G_s : Gain statique déterminé lors du premier essai

G_{rc} : Gain critique du régulateur qui occasionne le pompage

- Constante de temps du modèle θ

$$\theta = \frac{T_{osc}}{2\pi} (G_{Bc}^2 - 1)^{1/2}$$

- Temps mort ou retard du modèle τ

$$\tau = \frac{T_{osc}}{2} \left[1 - \frac{\text{Arctg} (G_{Bc}^2 - 1)^{1/2}}{\pi} \right]$$

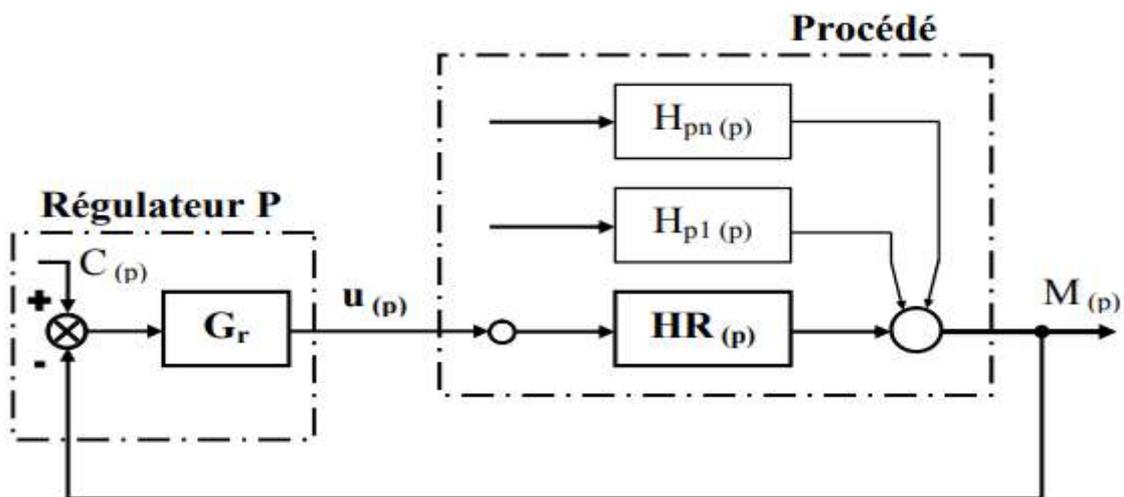
Si Arctg est exprimé en degrés (selon la calculatrice) alors

$$\tau = \frac{T_{osc}}{2} \left[1 - \frac{\text{Arctg} (G_{Bc}^2 - 1)^{1/2}}{180^\circ} \right]$$

4.1.2 Procédés naturellement instables

La manipulation des procédés naturellement instables est souvent dangereuse et on recommande lors de l'identification de ne pas s'éloigner beaucoup du point de fonctionnement.

Comme pour les procédés stables on doit mettre le régulateur en mode automatique et on injecte une action PROPORTIONNELLE seulement:



4.1.3. Le modèle recherché :

On approximera le procédé à une fonction de transfert intégrateur pur avec un retard:

$$HR_{(p)} = \frac{k \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p \cdot (1 + \theta_1 \cdot p) (1 + \theta_2 \cdot p) \dots (1 + \theta_n \cdot p)}$$

}
Procédé

$$\# \frac{k \cdot e^{-\tau \cdot p}}{p}$$

}
Modèle

4.2. Mode opératoire :

- Se placer au point de fonctionnement et stabiliser la mesure
- Le régulateur en automatique et en action proportionnelle seule
- Augmenter progressivement **Gr** en faisant de petits échelons sur la consigne jusqu'à l'obtention du **POMPAGE** régulier de la mesure
- Relever la valeur du gain critique du régulateur **Gr_c** qui occasionne le pompage et la période des oscillations **Tosc** de la mesure [ou du signal de commande de la vanne **U(t)**], cette mesure peut être prise sur le trace de l'enregistreur ou plus simplement par un chronometre, c'est pourquoi il est facile de mesurer la grandeur Réglante.
- Calculer les paramètres dynamiques **K** et **τ**

□ Coefficient d'intégration **k**

$$k = \frac{2 \pi}{Tosc \ Gr_c}$$

□ Temps mort ou retard du modèle **τ**

$$\tau = \frac{Tosc}{4}$$

Remarques:

Les caractéristiques dynamiques : **K,τ,θ, Tosc** et **Gr_c** pour les procédés stables ou instables en boucle ouverte ou en boucle fermée vont servir pour la détermination :

- Du mode de régulation
- Des paramètres **Gr, Ti** et **Td**.

Parfois on note respectivement **τ** et **θ** par **Tu** et **Tg** et cette notation se trouve dans les tableaux empiriques pour la détermination des paramètres de régulation dressés par **ZIGLER NICHOLS** ou encore **CHIEN HORNES**.

Le choix du mode de régulation se repose sur la qualité des systèmes, donc de l'ensemble physique qui le constitue.

Structures des régulateurs PID (parallèle, série, mixte)

Objectifs

- Structures des régulateurs PID (parallèle, série, mixte)
- Connaître les techniques de mise en œuvre de la régulation.
- Fonction de transfert.

Pré-requis

- Les correcteurs : Proportionnel P, Dérivé D et Intégral I.
- Fonction de transfert.

Elément de contenu

Caractéristiques, Structures des régulateurs PID (parallèle, série, mixte), Réalisations électroniques et pneumatiques.

Moyens Pédagogiques

- Vidéo projecteur.
- Tableau

Durée

01 séances de cours.

01 séances de TD.

1.1 Principe

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

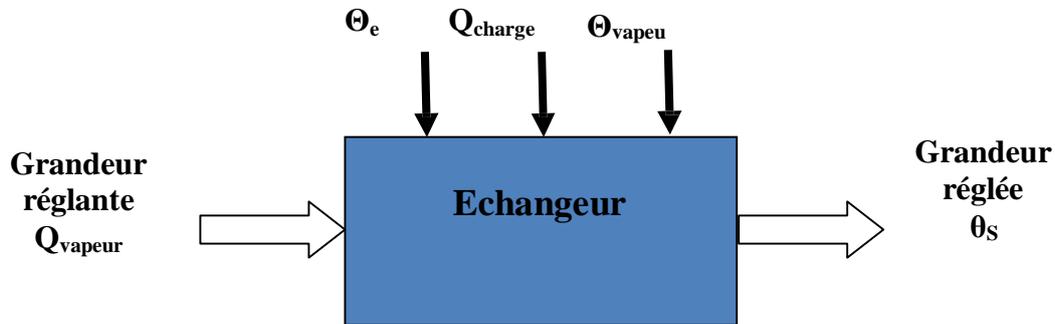


Figure 3.1 . modélisation d'un échangeur thermique

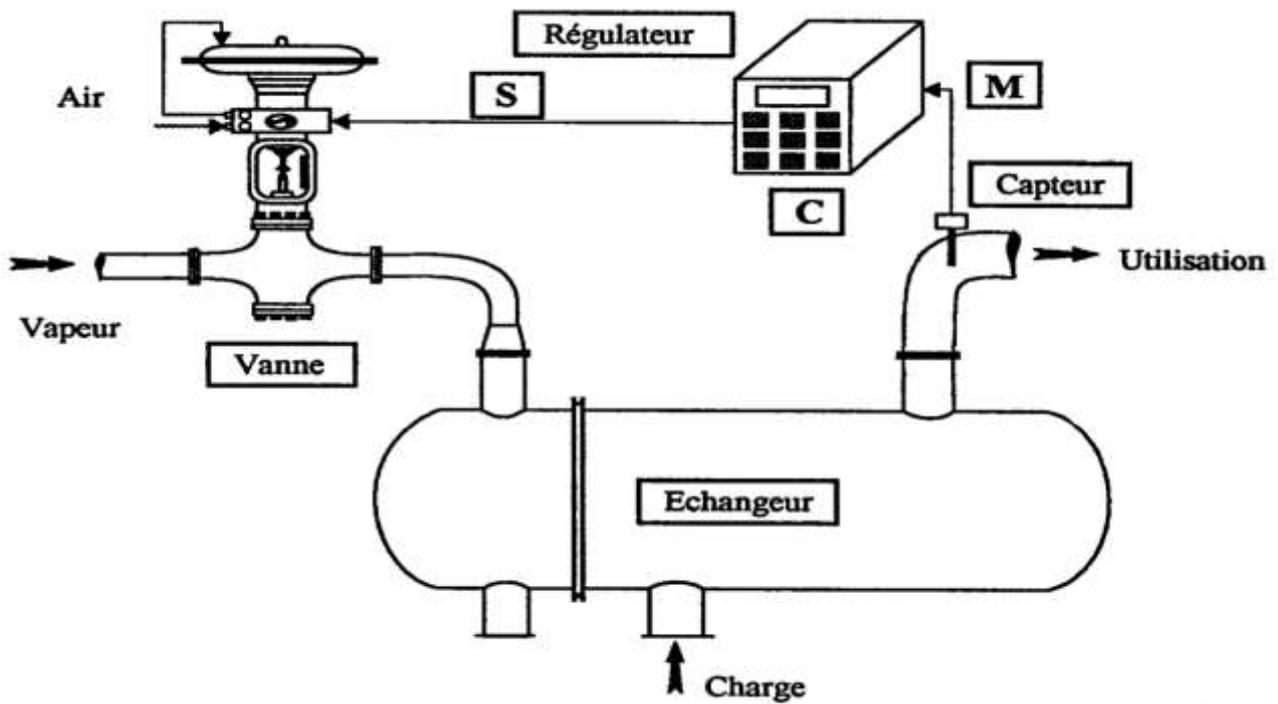


Figure 3.2. Schéma synoptique d'un échangeur thermique

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

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

- Parmi les matériels :
 - ✓ Régulateurs monoblocs analogiques et numériques,
 - ✓ Systèmes numériques de contrôle commande de procédé SNCC,
 - ✓ Opérateurs de calcul arithmétiques et dynamiques
- Parmi les techniques :
 - ✓ Régulation en boucle fermée,
 - ✓ Régulation discontinu,
 - ✓ Régulation cascade,
 - ✓ Régulation mixte ou feedforward,
 - ✓ Régulation Split range
 - ✓ Régulation de rapport,
 - ✓ Régulation par modèle de référence,
 - ✓ Régulation multivariable,
 - ✓ Régulation adaptative,

1.2. Instruments Périphériques

Les instruments périphériques réalisent les fonctions suivantes :

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

1.3. Schémas de représentation

1.3.1 Schéma TI ou PCF :

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

TI : (tuyauterie et instrumentation)

PCF: (Plan de circulation des fluides)

Il se distingue du schéma de procédé par l'ajout des éléments de contrôle, les armatures, les détails sur l'isolation et la protection des installations et la position coordonnées des installations les unes par rapport aux autres.

Les installations ainsi que les vannes et les éléments de contrôle sont décrits par des symboles.

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.

Exemple

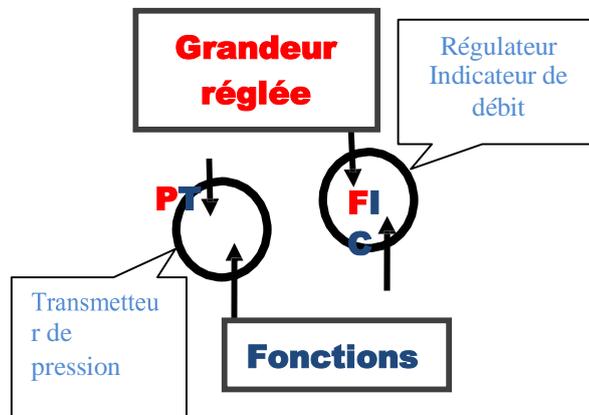


Figure 3.3 : Exemple d'un schéma TI

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

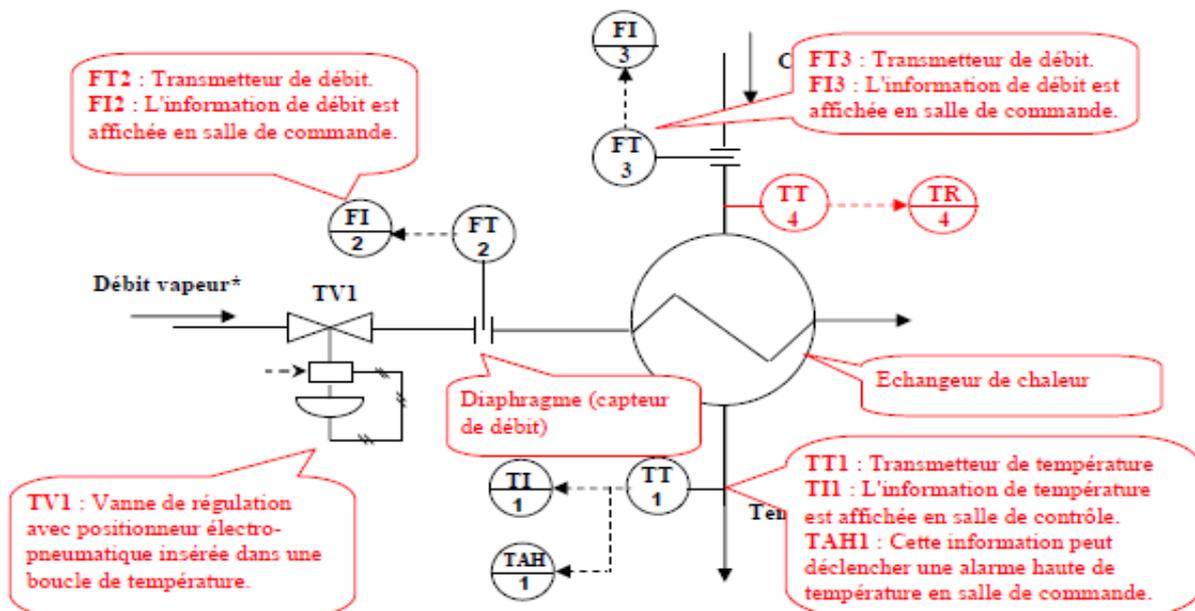


Figure 3.4 : Schéma PCF d'un échangeur Thermique

2.1. Principaux schémas

Les principaux schémas utilisés dans le domaine de climatisation sont :

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

2.1.2. Schéma TI d'une régulation de pression :

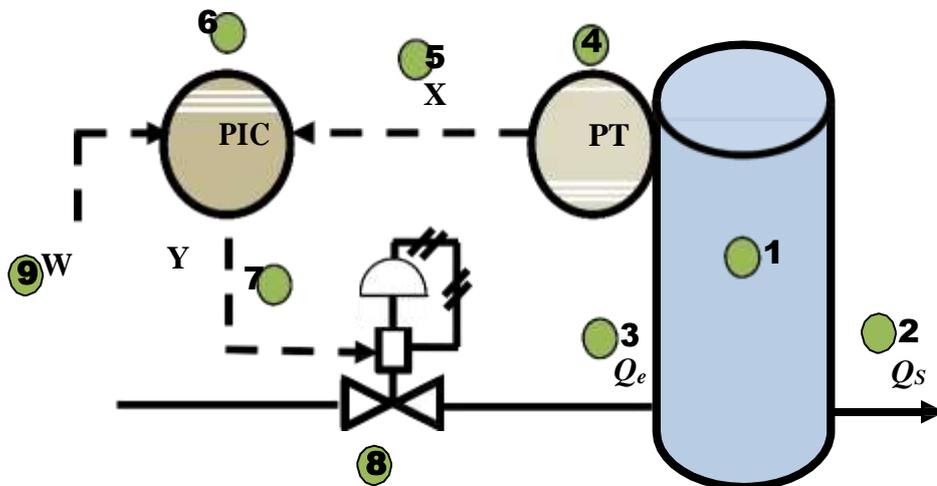


Figure 3.5 schéma TI d'une régulation de pression

2.1.3. Schéma fonctionnel :

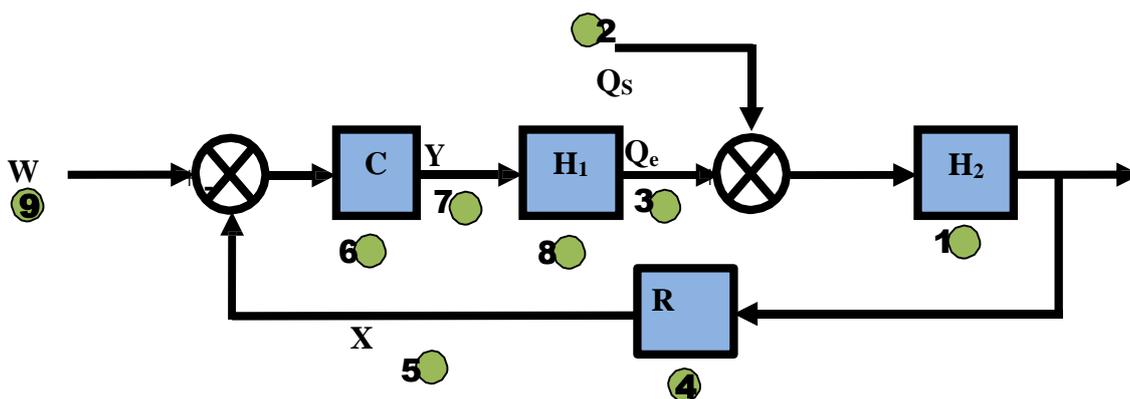


Figure 3.6 schéma fonctionnel d'une régulation de pression

3.1. Régulation en boucle fermée

3.1.1. Principe

Dans ce type de régulation, l'action correctrice s'effectue après que les effets des grandeurs perturbatrices aient produit un écart entre la mesure et la consigne. Cet écart peut être également provoqué par un changement de consigne. Dans les deux cas, le rôle de la boucle fermée est d'annuler l'écart.

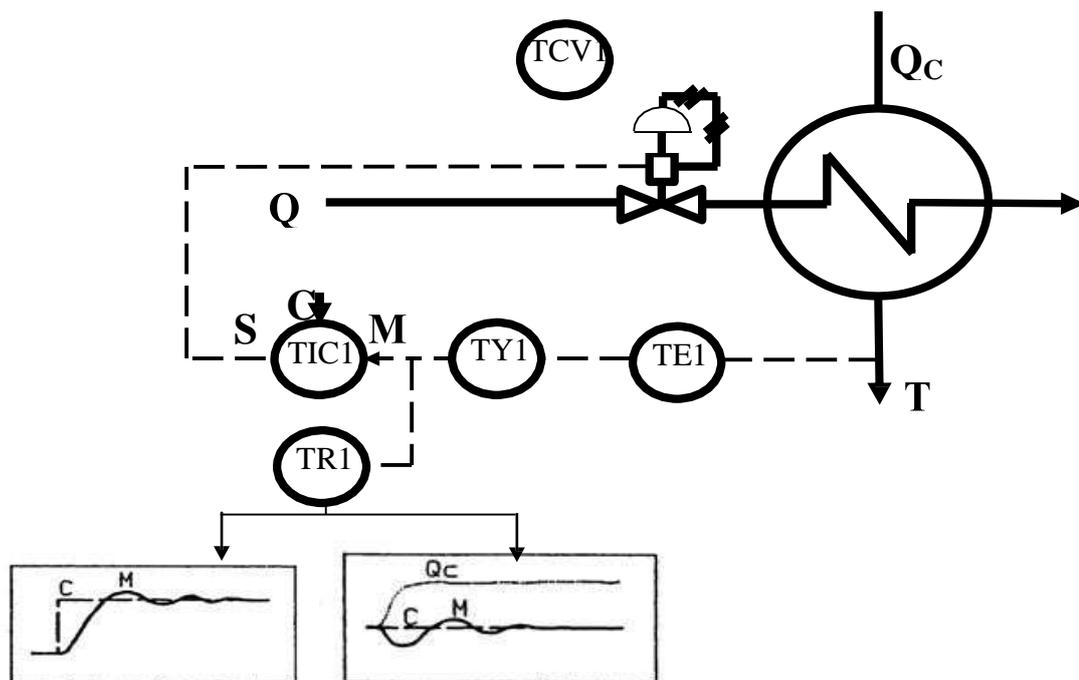


Figure 3.7: La regulation et l'action correctrice

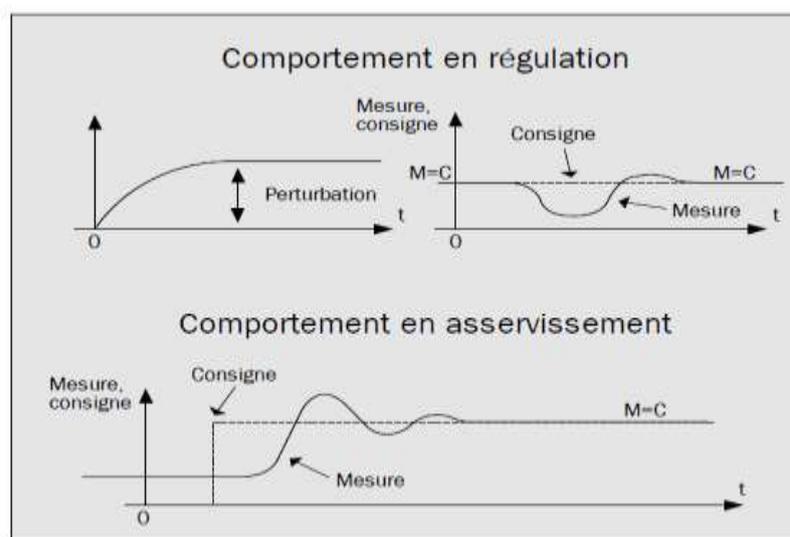


Figure 3.8: Comportement en regulation et asservissement.

Aspect asservissement	Aspect Régulation
Réponse de la température à un changement de consigne	Réponse de la température à une Variation de débit de charge.

Q_c : Débit de charge (fluide à réchauffer)

Q_r : Débit réglant (fluide caloporteur)

T_s : Température à régler

M : Mesure

C : Consigne

S : Sortie du régulateur

3.1.2. Choix du sens d'action du régulateur

Le choix du sens d'action du régulateur est fonction du sens de la variation de la grandeur réglée par rapport à la grandeur réglante.

Le sens d'action d'un ensemble vanne positionneur est direct si la vanne s'ouvre lorsque le signal de commande augmente et inverse dans le sens contraire.

Dans le cas de la figure précédente, lorsque la température T_s augmente (suite à une diminution de charge par exemple) et s'écarte du point de consigne, l'ensemble vanne positionneur étant direct, la sortie du régulateur **TIC** doit diminuer pour baisser le débit de vapeur. Le régulateur est de sens inverse.

3.2. Synthèse du régulateur PID

3.2.1 Rôle de l'action proportionnelle (P)

Le rôle de l'action proportionnelle est d'accélérer la réponse de la mesure, ce qui a pour conséquence de réduire l'écart entre la mesure et la consigne.

L'étude de l'action proportionnelle sur un système **naturellement stable** en boucle fermée, montre que lors d'un changement de consigne, le régime permanent atteint un écart résiduel :

$$\varepsilon = \frac{\Delta C}{1 + G_s G_r} \quad (3.6)$$

Avec :

G_r : gain du régulateur.

G_s : gain du procédé.

ΔC : variation de consigne.

Exemple : Pour : $\Delta C = 10\%$, $G_r = 2$, $G_s = 1.5$ on obtient $\varepsilon = 2.5\%$

Une augmentation de G_r , accélère la réponse du procédé, provoque une diminution de l'écart résiduel ε , mais rend la mesure de plus en plus oscillatoire. La valeur optimale de G_r est celle qui donne la réponse la plus rapide, avec un bon amortissement (ne dépassant pas **15%**).

L'étude de l'action proportionnelle sur un **procédé instable** (aussi appelé intégrateur), montre que lors d'une variation de consigne, la mesure rejoint la consigne, la mesure rejoint la consigne dans tous les cas.

Lors d'une perturbation, la mesure s'écarte de la consigne, la régulation proportionnelle tend à la ramener tout en laissant subsister un écart résiduel ε , lorsque le régime permanent est atteint.

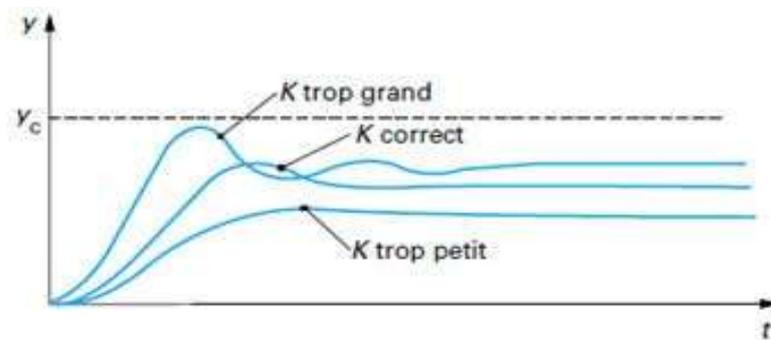
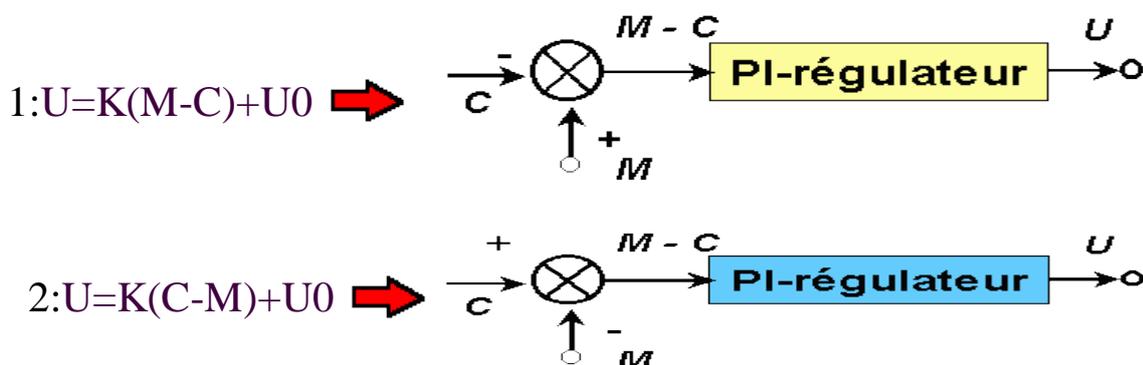


Figure 3.9 : Test en asservissement sur un procédé instable

3.2.2. Régulateur proportionnel P-Régulateur

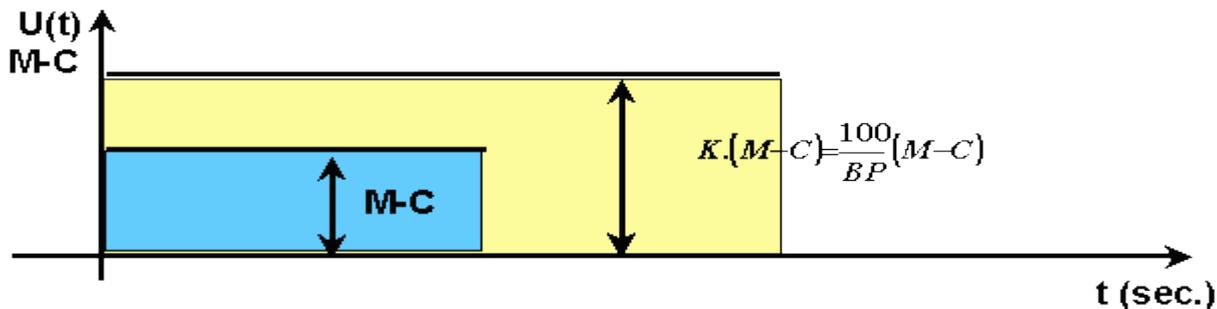


U_0 règle en général à 50% de la plage de variation de sortie, appelé centrage de la bande proportionnelle.

3.2.3. BANDE PROPORTIONNELLE : BP

C'est la variation en % de l'entrée du régulateur nécessaire pour que la sortie varie de 100%. Elle est d'autant plus faible que le gain est élevé donc que le régulateur est sensible : $BP\% = 100/K$. BP est de l'ordre de 3 à 400% dans les régulateurs électroniques

3.2.4. Réponse indicielle de P-régulateur



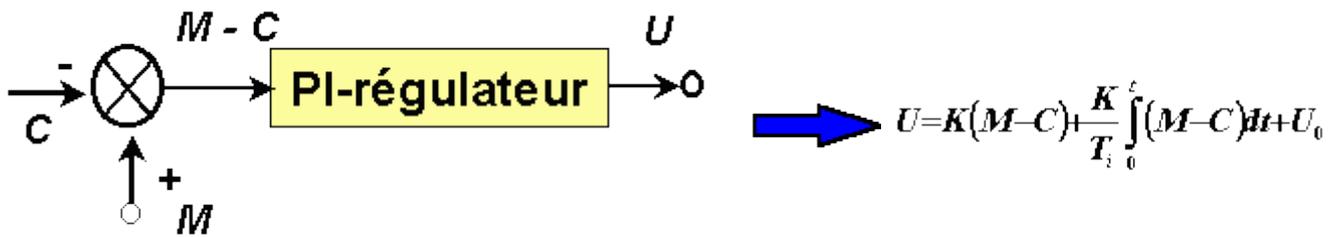
3.2.5. Rôle et domaine d'utilisation de l'action proportionnelle

Le rôle de l'action P dans un SRA est de réduire l'erreur de réglage qui est inversement proportionnelle au gain, mais rend la réponse plus au moins oscillatoire. On choisit un gain qui permet d'avoir un bon taux d'amortissement (égal à 0,75). On utilise un P régulateur lorsque la précision n'est pas importante. Le réglage par exemple du niveau d'eau dans un réservoir de stockage. L'action P est souvent suffisante pour régler plusieurs systèmes dans l'industrie. Elle est simple à réaliser (simple amplificateur) d'où son grand avantage. Dans l'industrie tous les process annexes (utilités, stockage etc..) sont conduits par des P régulateurs (pneumatiques en général)

4.1. Régulateur proportionnel et Intégral PI-Régulateur

4.1.1. Rôle et domaine d'utilisation de l'action intégrale

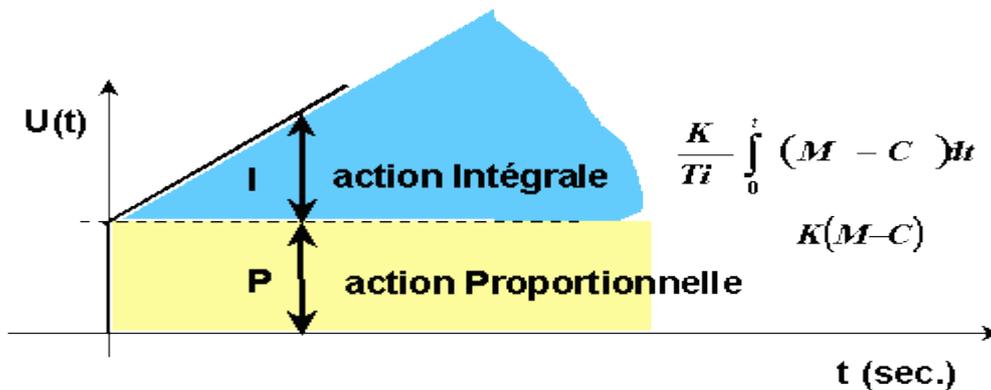
Dans les régulateurs industriels on affiche $1/T_i$, alors T_i est d'autant plus grand que l'action intégrale est faible. Le rôle principal de l'action intégrale est d'éliminer l'erreur statique. Toutefois l'action intégrale (voir chapitre 3) est un élément à retard de phase, donc l'augmentation de l'action intégrale (c.à.d. diminuer T_i) produit une instabilité car elle déplace le lieu de Nyquist vers la gauche. La valeur optimale est choisie pour satisfaire un compromis stabilité- rapidité. Si le système possède lui même un intégrateur (exemple niveau), l'action I est quand même nécessaire pour annuler l'écart de perturbation car, suite aux variations de la consigne l'intérêt de I est moindre car l'écart s'annule naturellement.



4.1.2. Fonction de transfert:

$$W(p) = K \left(\frac{T_i p + 1}{T_i p} \right)$$

4.1.3. Réponse indicielle



4.1.4. La Bande Proportionnelle BP

$BP\% = 100/K$

Le temps d'intégration T_i [sec.] ou en nombre de répétition par minute

Sens physique de T_i , intégrons $U(t)$ de 0 à T_i :

$$U = K(M-C) + \frac{K}{T_i} \int_0^{T_i} (M-C) dt + U_0$$

$U = 2K(M-C) + U_0 = 2 \text{ fois l'action de } P$

Dans l'industrie, on utilisera l'action I chaque fois que nous avons besoin, pour des raisons technologiques, d'avoir une précision parfaite - exemple: la régulation de la pression ou température dans un réacteur nucléaire. De plus, il faut souligner que l'action I est un filtre donc il est intéressant de l'utiliser pour le réglage des paramètres très dynamiques telle que la pression.

4.1.5. Rôle de l'action Intégrale :

Le rôle de l'action intégrale est **d'annuler l'écart** entre la mesure et la consigne.

Le signal de sortie du régulateur en intégrateur seul est **proportionnel à l'intégrale** de l'écart mesure-consigne.

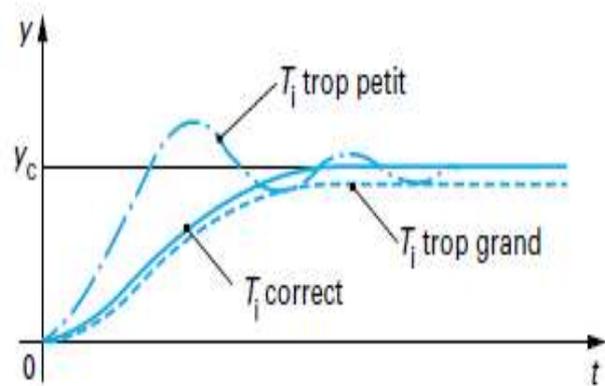
L'action intégrale est généralement associée à l'action proportionnelle.

Comme dans le cas de l'action proportionnelle, une augmentation excessive de l'action intégrale (diminution de T_i) peut être source d'instabilité.

L'étude de l'action intégrale sur un système stable est donnée par les figures suivantes pour un test en asservissement et un autre en régulation.

Le comportement de l'action intégrale sur un procédé instable, est sensiblement le même que sur un procédé stable. Il faut noter que **l'action intégrale est nécessaire pour annuler l'écart, suite à des perturbations.**

Lors de changement de consigne, son intérêt est moindre car l'écart s'annule naturellement du fait que le procédé est lui même intégrateur.



Dans ce cas l'action intégrale donne une réponse plus rapide qu'en régulation à action proportionnelle seule.

5.1.1. Rôle de l'action dérivée

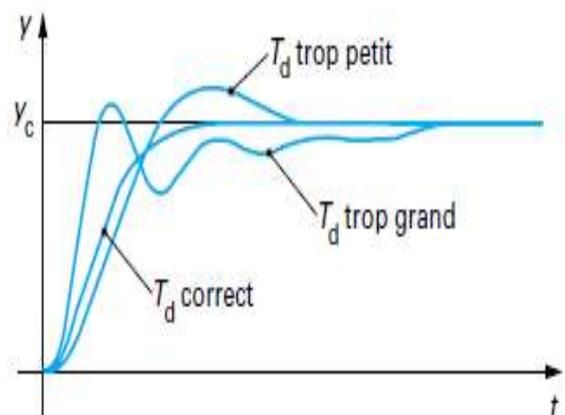
Le rôle de l'action dérivée est **de compenser les effets du temps mort (retard)** du procédé. Elle a un **effet stabilisateur** mais une valeur excessive peut entraîner l'instabilité. Sur le plan de Nyquist l'action D permet de déplacer le lieu de transfert vers la droite car elle possède une avance de phase (de +90 degré). La présence de l'action dérivée permet donc d'augmenter la rapidité du système en augmentant le gain sans être inquiet par la stabilité. Dans l'industrie, l'action D n'est jamais utilisée seule mais en général avec l'action intégrale.

Son rôle est identique quelle que soit la nature du procédé. La sortie du dérivateur est proportionnelle à la vitesse de variation de l'écart. On recommande de l'utiliser pour le réglage des paramètres lents tels que la température. Par contre en présence des paramètres bruités, l'action dérivée est déconseillée. En effet un signal bruité ayant par exemple la fréquence du réseau (50 hz) sera amplifiée en le dérivant.

L'étude de l'action dérivée sur un système stable est donnée par les figures suivantes pour un test en asservissement et un autre en régulation.

Dans le cas d'un signal de mesure bruité, la dérivée amplifie le bruit, ce qui rend son utilisation délicate ou impossible.

La solution à ce problème consiste, soit à filtrer le signal de mesure, soit à utiliser un module de dérivée filtrée avec un gain transitoire réglable.



Dans tous les algorithmes PID, la dérivée est filtrée, mais la valeur du filtre (gain transitoire), est rarement réglable sur les régulateurs monoblocs ; elle l'est parfois, sur les modules PID des systèmes numériques.

$$x(t)=0,1 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50t) \Rightarrow x'(t)=10 \cdot \pi \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 50t)$$

5.1.2. Actions des Régulateurs

Régulateur proportionnel, intégral et dérivé PID-Régulateur (I)

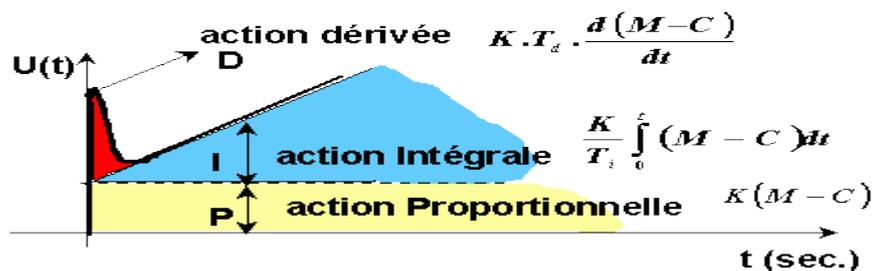


$$\Rightarrow U = K(M - C) + \frac{K}{T_i} \int_0^t (M - C) dt + K T_d \frac{d(M - C)}{dt} + U_0$$

5.1.3. Fonction de transfert

$$W(p) = K \left(\frac{1 + T_i \cdot p + T_i \cdot T_d \cdot p^2}{T_i p} \right)$$

5.1.4. Réponse indicielle



5.1.5. La Bande Proportionnelle BP

$$BP\% = 100/K$$

Le temps d'intégration T_i [sec.] ou en nombre de répétition par minute **Ti(min)**

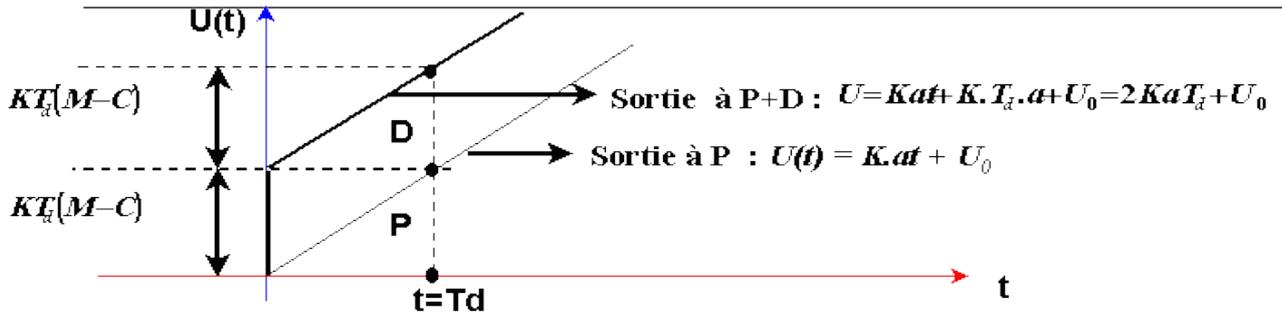
Le temps dérivé T_d [sec.] **Td(min)** Sens physique de T_d ,

Soit un régulateur PD dont la réponse est:

$$U = K(M - C) + K T_d \frac{d(M - C)}{dt} + U_0$$

Si $(M - C) = a t$: entrée sous forme de rampe, on a pour $t = T_d$:

$$U = K a t + K T_d \cdot a + U_0 = 2 K a T_d + U_0$$

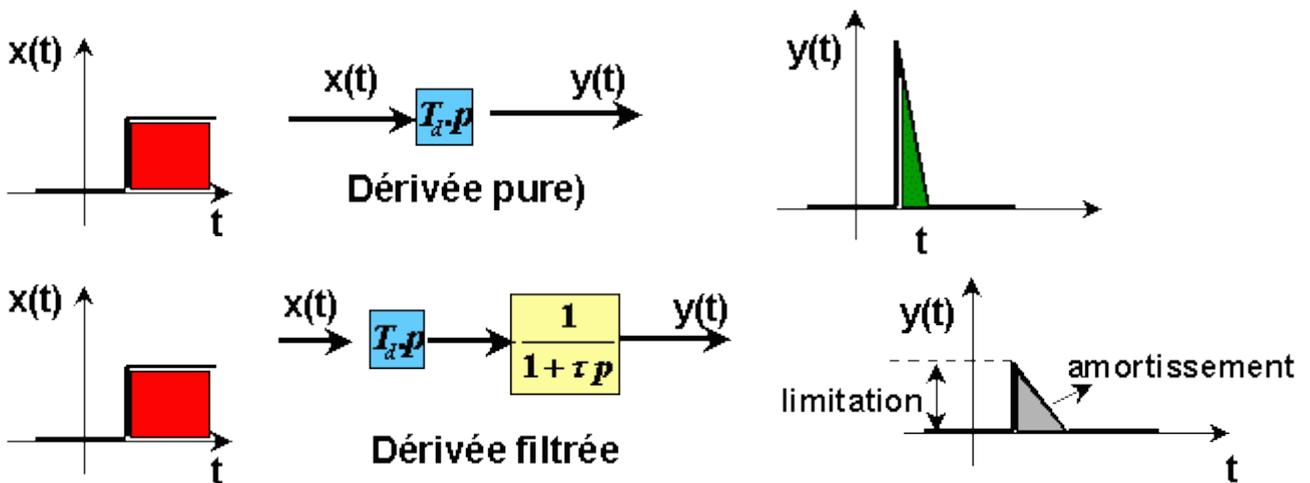


T_d représente l'écart, en temps entre les réponses proportionnelles seules (P), et proportionnelles dérivées(PD).

T_d est donc le temps d'avance d'une réponse Pd par rapport à une réponse en P seule.

Afin de limiter la sortie d'un régulateur ayant une action dérivée, en pratique l'action dérivée est filtrée en ajoutant un élément de premier ordre. L'action dérivée pure $T_d p$ devient alors:

$$W(p) = (T_d \cdot p) / (1 + \tau p)$$



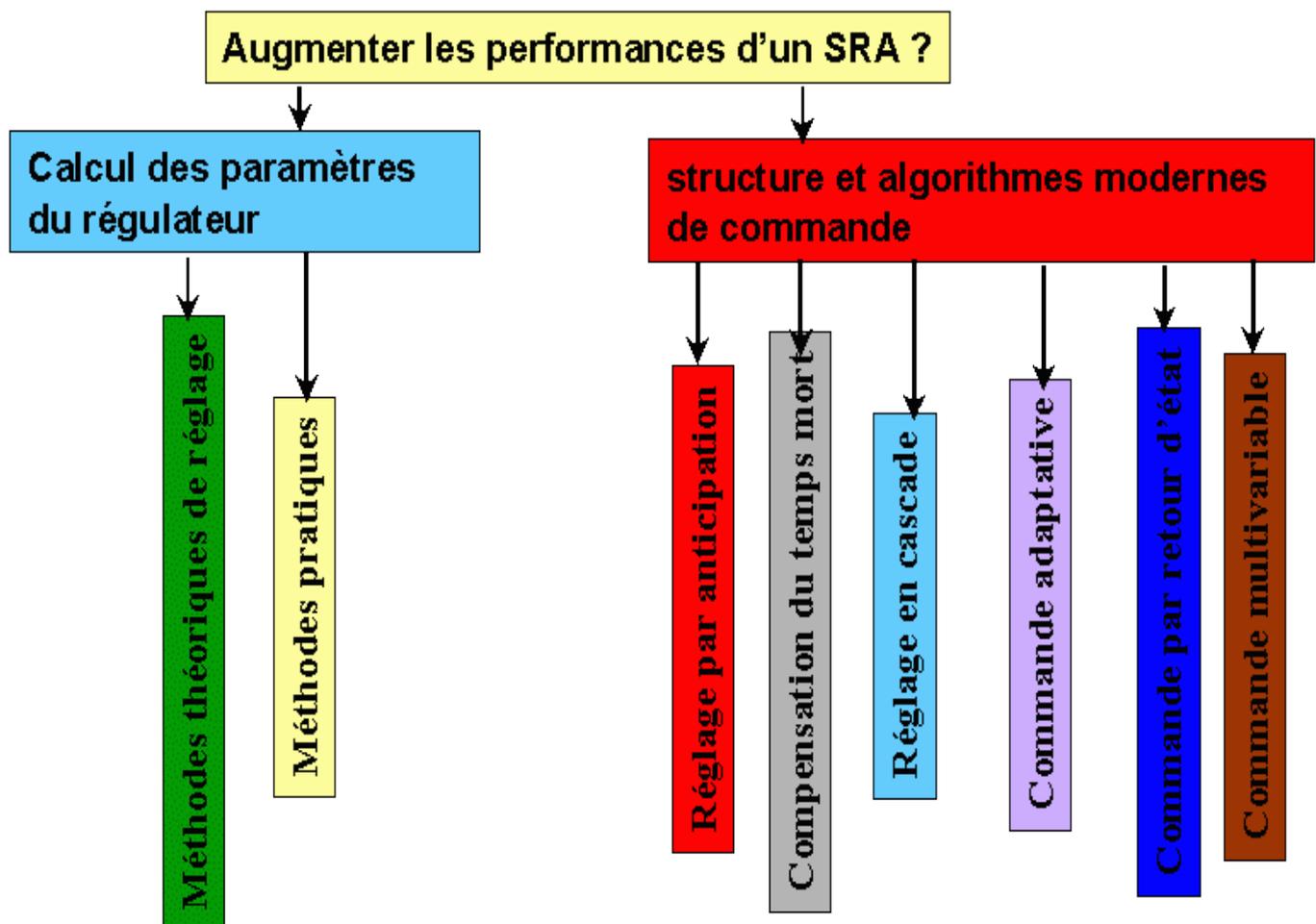
Résumé des actions P,I,D

Action	Rôle et domaine d'utilisation
P	<p>L'action Proportionnelle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler, elle permet de vaincre les grandes inerties du système. Afin de diminuer l'écart de réglage et rendre le système plus rapide, on augmente le gain (on diminue la bande proportionnelle) mais, on est limité par la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsque on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante, exemple : régler le niveau dans un bac de stockage.</p>
I	<p>L'action intégrale complète l'action proportionnelle. Elle permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage ce qui provoque l'instabilité en état fermé.</p> <p>L'action intégrale est utilisée lorsque on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées telles que la pression.</p>
D	<p>L'action Dérivée, en compensant les inerties dues au temps mort, accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne.</p> <p>Dans la pratique, l'action dérivée est appliquée aux variations de la grandeur à régler seule et non de l'écart mesure-consigne afin d'éviter les à-coups dus à une variation subite de la consigne.</p> <p>L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes telles que la température, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique (la pression). En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile.</p>

6.1. Réglage des paramètres des régulateurs

6.1.1. Problématique

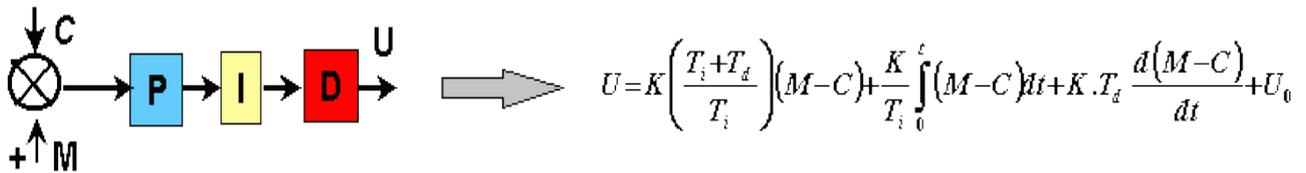
Afin d'augmenter les performances d'un SRA, on peut agir sur les paramètres du régulateur afin de les régler à leur valeurs optimums selon un critère choisi. Mais, quelquefois l'algorithme de régulation utilisé (exemple PID) ne peut plus assurer la stabilité ou de bonnes performances car le système à commander présente par exemple un temps de retard important , alors on est contraint d'agir sur la structure de la boucle de régulation (cascade, compensation etc...) ou utiliser des algorithmes plus performants (retour d'état, optimal, découplage etc...)



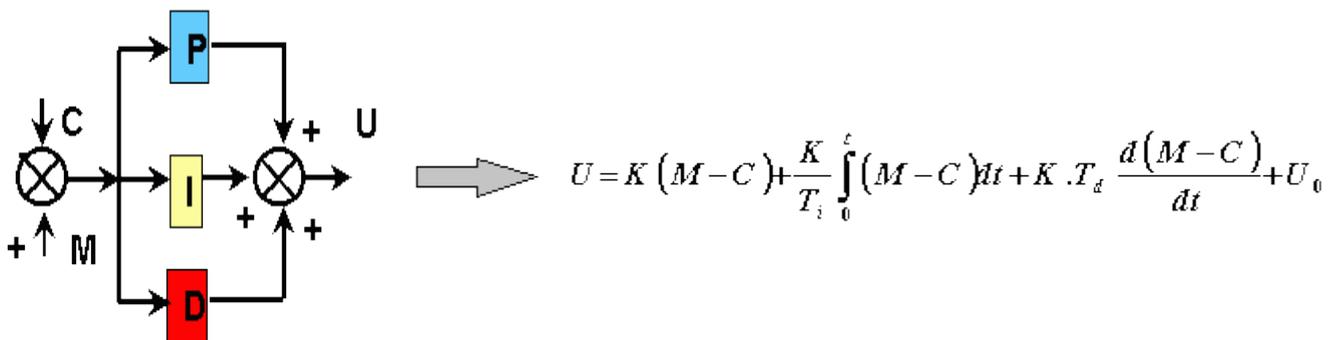
6.1.2. Réalisation des actions PID

En serie, en parallèle, mixte

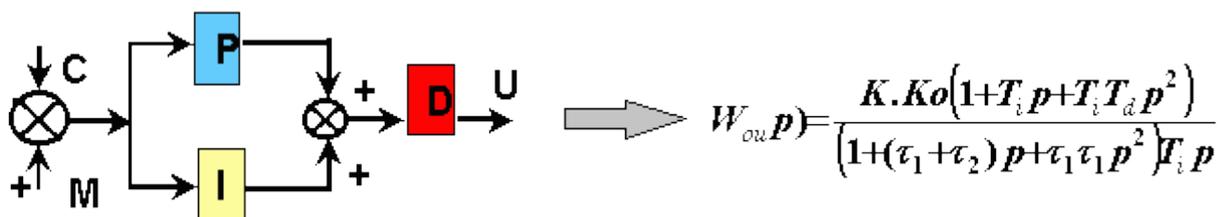
6.1.2.1 Serie



6.1.2.2. Parallèle



6.1.2.3. Mixte



Objectifs

- **Choix et dimensionnement des régulateurs**

Pré-requis

- **Réponse indicielle**
- **Réponse fréquentielle**
- **Critères de choix**
- **Méthodes de dimensionnement**

Elément de contenu

(4 semaines) Critères de choix, Méthodes de dimensionnement (critère méplat, critère symétrique, méthode de Ziegler Nichols,), Réglage des Régulateurs par imposition d'un modèle de poursuite.

Moyens Pédagogiques

- Vidéo projecteur.
- Tableau

Durée

01 séances de cours.

01 séances de TD

1.1. Choix et dimensionnement des régulateurs

Avant d'aborder aux grands titres du chapitre, en présente les **Réponses d'un processus apériodique**

a) Réponse indicielle

La réponse indicielle d'un processus apériodique est illustrée par la Figure 1. On a mis en évidence les instants t_1, t_2, t_3 . Ces instants nous permettent de définir les grandeurs suivantes :

- Le retard apparent ; $L = t_1$
- La constante du temps apparente ; $T = t_2 - t_1$
- La pente de la tangente au point d'inflexion ; $p = \frac{y(\infty)}{t_3 - t_1} = \frac{a}{L}$
- Le temps mort relatif ; $\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{t_1}{t_2}$

Le rapport entre la valeur asymptotique $y(\infty)$ et l'amplitude E du saut appliqué en entrée détermine le gain statique K_0 du processus : $K_0 = \frac{y(\infty)}{E}$

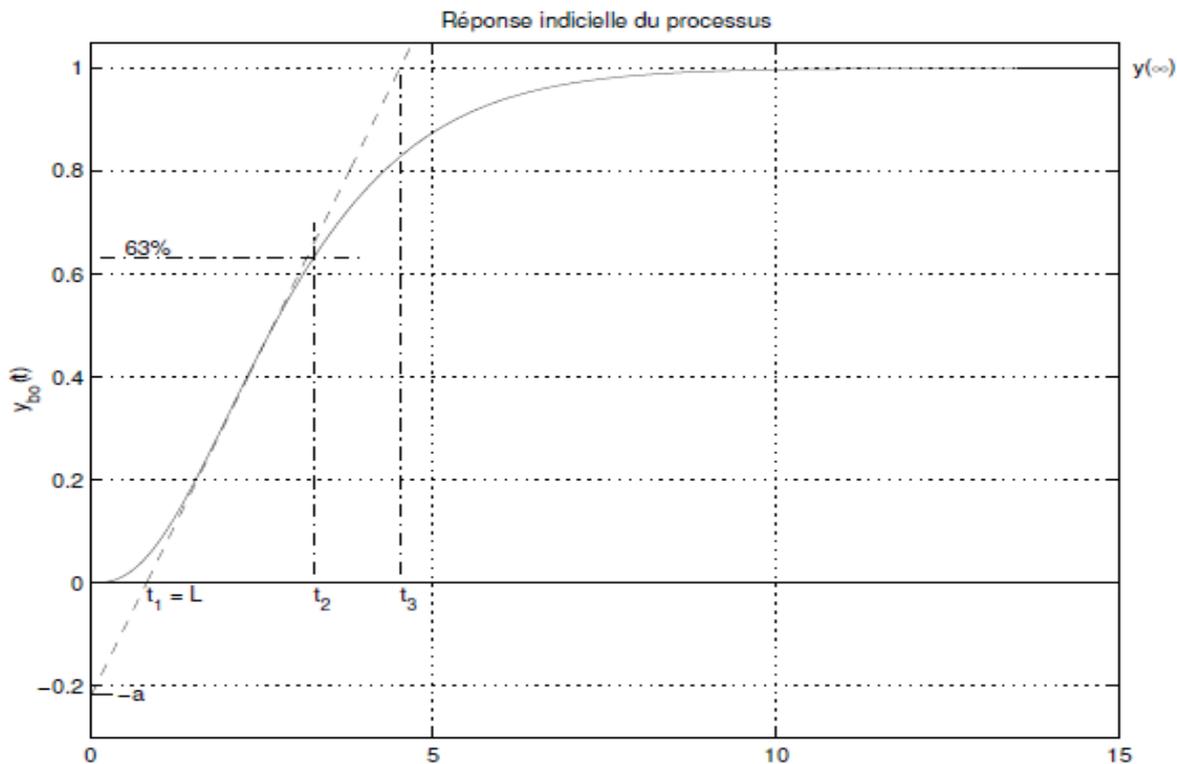


Figure 1: Réponse indicielle d'un processus d'ordre 3

b) Réponse fréquentielle

La réponse fréquentielle d'un processus apériodique est illustrée par la Figure 2. Sur cette réponse, on définit les grandeurs suivantes :

- La pulsation ω_π pour laquelle la phase vaut -180 ;
- Le gain G_π correspondant à cette pulsation ;
- Le gain critique K_{cr} qu'il faut introduire dans le système bouclé pour le rendre instable ; $K_{cr} = \frac{1}{G_\pi}$
- Le gain relatif ; $k = \frac{G_\pi}{G(0)} = \frac{1}{K_{cr}K_0}$

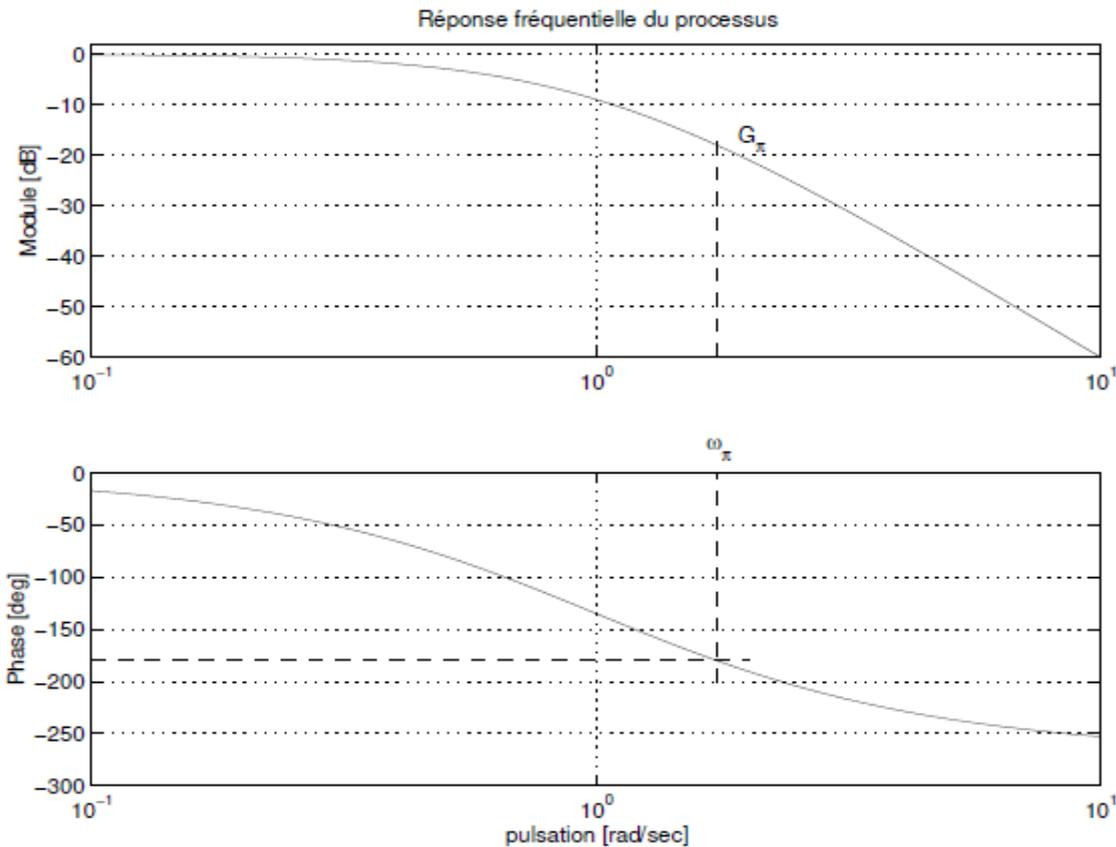


Figure 2: Réponse fréquentielle d'un processus d'ordre 3

1.2. Critères de choix

Les critères de choix des régulateurs spécifient les conditions de fonctionnement d'un système à régulation automatique, en régime transitoire et en régime permanent. Il s'agit, en général, du degré de stabilité, de la rapidité, de la précision et de la qualité. C'est ainsi que les contraintes suivantes sont généralement imposées :

- Signaux d'erreurs : annulation de E_∞ et imposition de E_v (K_∞ et α_∞) ;
- Forme de la réponse indicielle : aperiodique ou oscillatoire (ζ et ω_0 des pôles dominants) ;
- Degré de stabilité : nombre d'oscillations (Q ; φ_m et A_m de G_{0c}) ;
- Rapidité : durée de réglage T_r (D ; ω_c de G_f ou ω_∞ de G_{0c}) ;
- Qualité de la régulation : critère de qualité (J : par IAE, ISE, ITAE et ITSE) ;

D'autres critères et contraintes peuvent être imposés, mais la synthèse devient alors de plus en plus difficile. On souligne que la synthèse étant une opération non systématique, elle nécessite un esprit créatif et du savoir-faire. Le nombre de combinaisons possibles de contraintes est élevé. Pour une combinaison donnée, il existe plusieurs solutions de correction. On se limite ici à présenter les cas les plus fréquents en pratique et les plus illustratifs pour l'apprentissage de la synthèse.

2.1.1. Méthodes de dimensionnement

Il y'a plusieurs méthodes de dimensionnement des régulateurs P, PI, PID tel que : Critère méplat, critère symétrique, méthode de Ziegler Nichols, ...), dans ce chapitre on présente la méthode de Ziegler Nichols

2.1.2 Méthodes de Ziegler et Nichols (ZN)

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé 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 bouclé à sa limite de stabilité.

a- Méthode de la réponse indicielle

Pour obtenir les paramètres du régulateur PID, il suffit d'enregistrer la réponse indicielle du processus seul (c'est-à-dire sans le régulateur), puis de tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe. On mesure ensuite sa pente p et le retard apparent L correspondant au point d'intersection de la tangente avec l'abscisse (figure 1). On peut alors calculer les coefficients du régulateur choisi à l'aide du tableau 1.

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

Type	K_p	T_i	T_d
P	$1 / (pLK_0) = 1 / (aK_0)$		
PI	$0.9 / (pLK_0) = 0.9 / (aK_0)$	$3L$	
PID	$1.2 / (pLK_0) = 1.2 / (aK_0)$	$2L$	$0.5L$

Tableau 1 : Paramètres PID obtenus à partir d'une réponse indicielle (ZNt)

b- Méthode du point critique

Cette méthode est basée sur la connaissance du point critique du processus. Expérimentalement, on boucle le processus sur un simple régulateur proportionnel dont on augmente le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente ; on se trouve ainsi à la limite de stabilité. Après avoir relevé le gain critique K_{cr} du régulateur et la période d'oscillation T_{cr} de la réponse, on peut calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide du tableau 2.

Ici également, les valeurs proposées conduisent à un temps de montée relativement court malheureusement assorti d'un dépassement élevé. Cette situation n'étant pas toujours satisfaisante, on peut être amené à corriger les coefficients proposés et, en particulier, à diminuer le gain K_p .

On notera que les paramètres T_i et T_d proposés par les deux méthodes de Ziegler-Nichols sont dans un rapport constant égal à 4. Le régulateur possède donc deux zéros confondus valant :

$$-1/(2T_d) = -2/T_i.$$

Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$		
PI	$0.4K_{cr}$	$0.8T_{cr}$	
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5T_{cr}$	$0.125T_{cr}$

Tab. 2: Paramètres PID obtenus à partir du point critique (ZNf)

3.1.1. Réglage des Régulateurs par imposition d'un modèle de poursuite :

Pour illustrer l'application de la méthode Ziegler-Nichols pour le dimensionnement des régulateurs, on utilisera un processus d'ordre 3 dont les constantes de temps sont toutes trois égales à 1 seconde :

$$G_p(s) = \frac{2}{(1+s)^3}$$

Sur les réponses indicielles et fréquentielles, on mesure :

- Le retard apparent ; $L = t_1 = 0.81$ sec
- La constante de temps apparente ; $T = t_2 - t_1 = 2.44$ sec
- La pente de la tangente au point d'inflexion ; $p = \frac{y(\infty)}{t_3 - t_1} = 0.27$ V/s
- L'ordonnée de la tangente en $t=0$: $a = 0.22$ V
- Le temps mort relatif ; $\tau = \frac{L}{L+T} = \frac{t_1}{t_2} = 0.249$
- Le gain statique du processus ; $K_0 = \frac{y(\infty)}{E} = 2$
- La pulsation critique ; $\omega_{cr} = \omega_\pi = 1.73$ rad/sec
- Le gain critique ; $K_{cr} = \frac{1}{G_\pi} = 18.1$ dB = 8.03
- Le gain relatif ; $k = \frac{G_\pi}{G(0)} = \frac{1}{K_{cr}K_0} = 0.0625$

On notera que le produit pL est égal à l'ordonnée a de la tangente en $t=0$

3.1.2. Méthode de la réponse indicielle

Sur la réponse indicielle du processus $G_p(s)$ (figure 1), on a mesuré :

- la pente au point d'inflexion :

$$p = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{t_3 - t_1} = 0.27 \text{ [1/sec]}$$

- le retard apparent : $L = t_1 = 0.81 \text{ [sec]}$
- le gain du processus : $K_0 = \frac{y^\infty}{E} = 2$

Du premier tableau de Ziegler-Nichols, on tire les 3 paramètres du régulateur PID :

$$K_p = \frac{1.2}{p \cdot L \cdot K_0} = 2.75$$

$$T_i = 2 \cdot L = 1.61 \text{ sec}$$

$$T_d = 0.5 \cdot L = 0.40 \text{ sec}$$

La réponse indicielle du système asservi avec un régulateur modifié dans lequel $b=1$, $c=0$ et $N=10$ est illustrée à la figure 2 par la courbe continue.

3.1.3. Méthode du point critique

Sur la réponse fréquentielle du processus $G_p(s)$ (figure 4), on a mesuré :

- Le gain critique :

$$K_{cr} = \frac{1}{G_\pi} = 4.015$$

- La période critique :

$$T_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_\pi} = 3.62 \text{ sec}$$

Du deuxième tableau de Ziegler-Nichols, on tire les 3 paramètres du régulateur PID :

$$K_p = 0.6 \cdot K_{cr} = 2.41$$

$$T_i = 0.5 \cdot T_{cr} = 1.81 \text{ sec}$$

$$T_d = 0.125 \cdot T_{cr} = 0.45 \text{ sec}$$

La réponse indicielle du système asservi avec ce régulateur dans lequel $b=1$, $c=0$ et $N=10$ est illustrée à la figure 3 :

Dans les deux approches, la réponse indicielle est caractérisée par un dépassement important; par contre, la perturbation est corrigée rapidement.

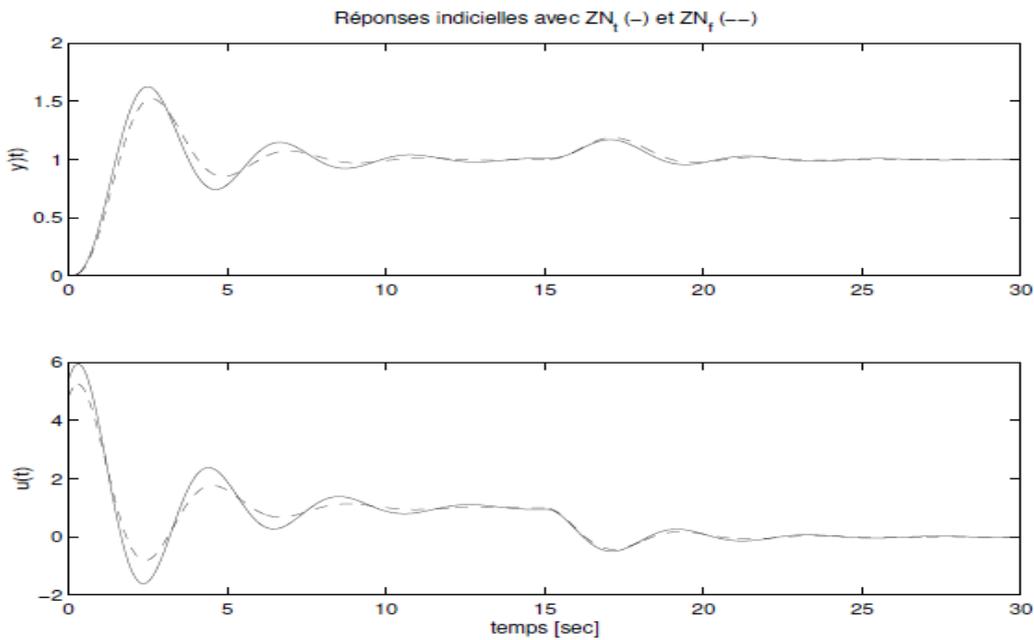


Figure 3: Réponses indicielles d'un système d'ordre 3 asservi (ZN_t , ZN_f)

4.1.1. Méthodes de réglage des actions

Avant de commencer les réglages d'une boucle de régulation, il faut s'assurer que le sens d'action du régulateur est correct.

Nous rappelons que quelle que soit la méthode de réglage utilisée, les réglages ne sont adaptés qu'au point de fonctionnement.

Il existe différentes méthodes de réglage des actions d'un régulateur P.I.D. suivant le type de procédé et les contraintes de fabrication on choisira l'une des méthodes.

4.1.2. Méthode par approches successives

Elle consiste à **modifier** les actions du régulateur et à **observer** les effets sur la mesure enregistrée, jusqu'à obtenir la réponse **optimale**.

On règle l'action proportionnelle, puis l'action dérivée et l'intégrale.

Cette technique présente l'intérêt d'être simple et utilisable sur n'importe quel type de système. Néanmoins du fait de son caractère itératif, son application devient longue sur des procédés à grande inertie.

4.1.3. Méthode nécessitant l'identification du procédé

Si l'on connaît les **paramètres du procédé**, suite à une modélisation de sa fonction de transfert réglante, et si l'on est en possession de la **structure du régulateur**. Il est alors possible de **calculer** rapidement les paramètres de réglage qu'on pourra **affiner** suite à des essais, afin d'obtenir la réponse souhaitée. Cette méthode nécessite un **enregistreur à déroulement rapide**. Elle est de préférence utilisée sur des procédés à grande inertie.

4.1.4. Méthode de Ziegler et Nichols

Elle nécessite l'observation de la réponse du procédé et la connaissance de la structure du régulateur. C'est une méthode qui permet le calcul des actions, sans la détermination des paramètres du procédé.

4.1.5. Réglage par approches successives

Le procédé est d'abord conduit en manuel pour stabiliser la mesure au point de consigne. De petites variations sur la vanne permettent d'observer les réactions naturelles du procédé, afin de dégrossir les actions à mettre sur le régulateur au début de chaque réglage.

Les actions seront réglées dans l'ordre P, D, I.

Les critères de performance retenus pour la régulation sont une réponse bien **amortie** (dépassement **de 10 à 15 %**) avec une **rapidité maximum** (temps d'établissement minimal). La majorité des boucles de régulation correspondent à des boucles fermées où l'on utilise un seul régulateur.

Le mode de régulation souvent utilisé dans ces régulateurs, est le mode PID.

En pratique le réglage par étape des actions proportionnelle, intégrale, dérivée, tout en observant l'évolution de la mesure, suite à des changements de consigne (tests en asservissement), ou suite à des variations de grandeurs perturbatrices (tests en régulation).

4.1.6. Réglage de l'action proportionnelle

- Stabiliser la mesure au point de fonctionnement.
- Mettre le régulateur en P seul, ($T_i = \max.$ ou $n = 0$ et $T_d = 0$).
- Afficher un gain Gr faible ($Gr < 1$).
- Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
- Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
- Observer l'enregistrement de l'évolution du signal de mesure.
 - ✓ Si elle est sur amortie (apériodique), augmenter le gain Gr (ou diminuer BP %).
 - ✓ Si elle présente plus de deux oscillations, diminuer le gain Gr (ou augmenter BP %).

Au cours des réglages, les observations suivantes peuvent être faites

- **La mesure ne rejoint pas la consigne**
- **L'écart diminue avec le gain mais la stabilité se dégrade**

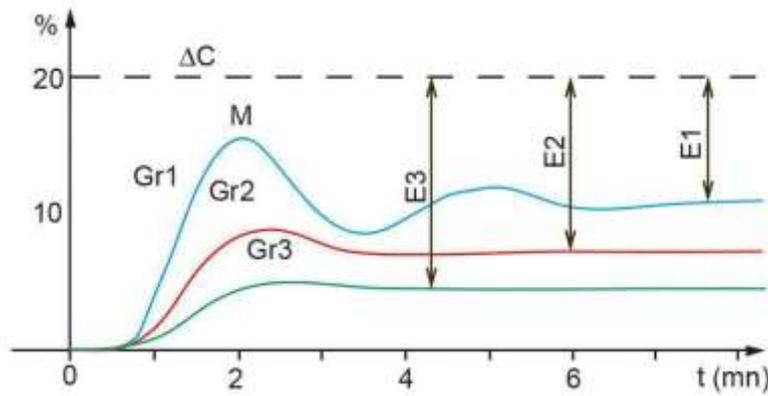


Figure 3.12 Effet de l'action proportionnelle

4.1.7. Réglage de l'action dérivée

- L'action dérivée ne se justifie que si la mesure a un certain retard.
 - Conserver la valeur de l'action proportionnelle déterminée précédemment et l'intégrale minimale.
 - Afficher une action dérivée faible (T_d égal à quelques secondes ($tr/3$)).
 - Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
 - Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
 - Si la réponse ne s'amortie pas, augmenter T_d .
 - Si la réponse est oscillante ou si elle est plus lente, diminuer T_d .
- L'action dérivée a un effet anticipatif
 - L'action dérivée stabilise la réponse du procédé
 - La réponse s'accélère en augmentant l'action dérivée
 - Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité.

La présence de l'action dérivée, permet d'augmenter l'action proportionnelle (Environ 10 % de plus, soit 1,1. Gr ou 0,9. BP%)

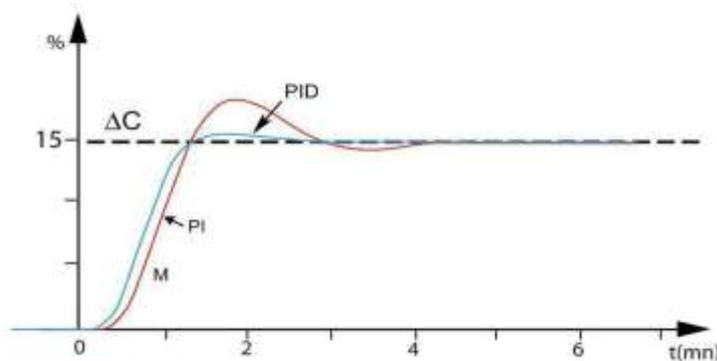


Figure 3.13 : Effet de l'action dérivée

5.1.1. Réglage de l'action intégrale

- Conserver les valeurs des actions proportionnelle et dérivée déterminées précédemment.
 - Afficher une action intégrale faible.
 - Pour un premier essai afficher $T_i =$ quelques minutes
 - Egaler la consigne à la mesure, passer le régulateur en automatique.
 - Effectuer un échelon de consigne de 5 à 10 %.
 - Si la réponse est sur amortie ou trop lente, diminuer T_i .
 - Si la réponse présente un dépassement trop important, on augmente T_i .
- **L'action intégrale donne la précision statique**
 - **La mesure rejoint la consigne**
 - **La réponse s'accélère en augmentant l'action intégrale**
 - **Il faut trouver un compromis entre rapidité et stabilité**

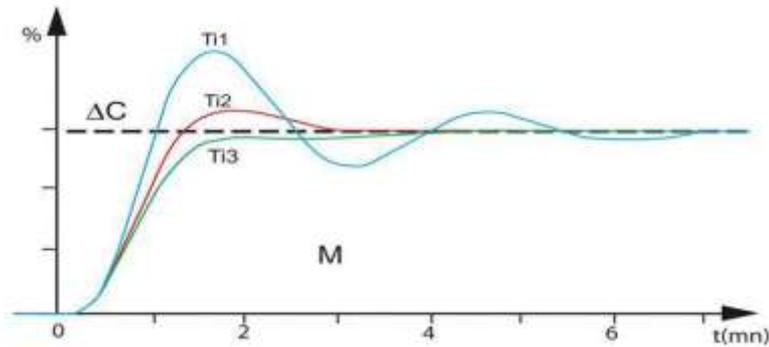


Figure 3.14 : Effet de l'action intégrale

Après calcul et affichage des actions, il est nécessaire d'effectuer un test sur une variation de consigne, pour vérifier l'allure de la réponse. Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, refaire l'identification, s'assurer de la structure du régulateur ou retoucher les actions.

5.1.2. Cas d'un procédé instable

Après avoir identifié le procédé suivant le modèle d'un intégrateur pur retardé, on utilise le tableau suivant pour calculer les actions à afficher sur un régulateur compte tenu de sa structure.

$$H_r(p) = \frac{K \cdot e^{-\theta p}}{p(1 + \tau_1 \cdot p)(1 + \tau_2 \cdot p) \dots (1 + \tau_n \cdot p)} = \frac{K \cdot e^{-\theta p}}{p} \tag{3.8}$$

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système déterminé par le rapport $\frac{\tau}{\theta}$

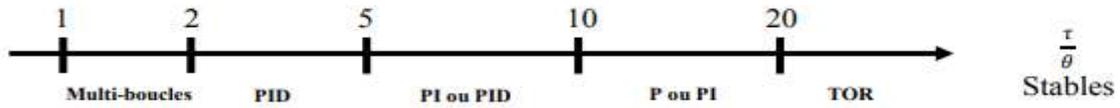
Si $\frac{\tau}{\theta}$ est compris entre 10 et 20 : régulation P

Si $\frac{\tau}{\theta}$ est compris entre 5 et 10 : régulation PI

Si $\frac{\tau}{\theta}$ est compris entre 2 et 5 : régulation PID

Si $\frac{\tau}{\theta}$ est supérieur 20 : régulation Tout Ou Rien (TOR)

Si $\frac{\tau}{\theta}$ est inférieur à 2 : régulation multi boucles, régulation numérique



Régulations	P	P.I Série	P.I Parallèle	P.I.D Série	P.I.D Parallèle	P.I.D Mixte1	P.I.D Mixte 2
Gr	$\frac{0.8\tau}{Gs \cdot \theta}$	$\frac{0.8\tau}{Gs \cdot \theta}$	$\frac{0.8\tau}{Gs \cdot \theta}$	$\frac{0.85\tau}{Gs \cdot \theta}$	$\frac{\theta}{\tau} + 0.4$ $\frac{\theta}{1.2Gs}$	$\frac{\theta}{\tau} + 0.4$ $\frac{\theta}{1.2Gs}$	$\frac{\theta}{\tau} + 0.4$ $\frac{\theta}{1.2Gs}$
Ti	Maxi	0	$\frac{Gs \cdot \theta}{0.8}$	τ	$\frac{Gs \cdot \theta}{0.75}$	$\tau + 0.4\theta$	$\tau + 0.4\theta$
Td	0	0	0	0.4τ	$\frac{0.35 \cdot \tau}{Gs}$	$\frac{\theta \cdot \tau}{\theta + 2.5\tau}$	$\frac{0.35 \cdot \tau}{Gs}$

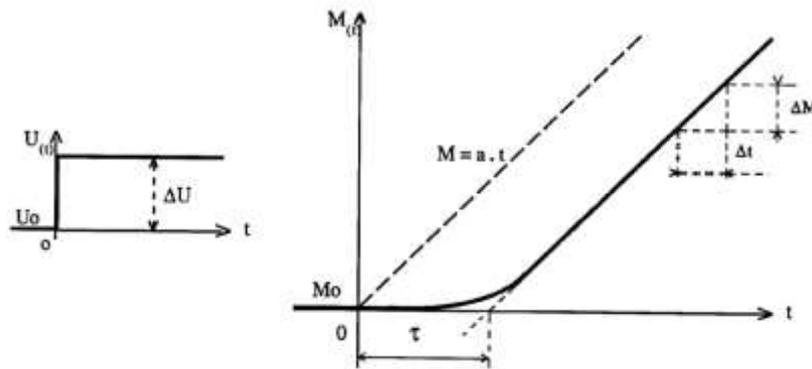


Figure 3.15 : Détermination du temps mort

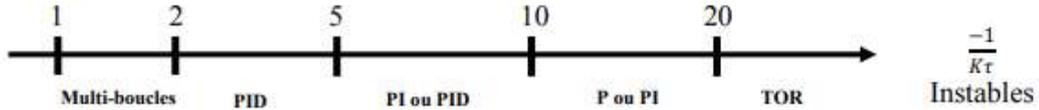
Le temps mort du modèle est déterminé graphiquement

Coefficient d'intégration du procédé :

$$K = \frac{\Delta M\%}{\Delta U\% \cdot \Delta t} \tag{3.9}$$

Le choix du mode de régulation est lié à la réglabilité du système déterminé par le rapport $k.\tau$.

- ✓ Si $k.\tau$ est compris entre 0.05 et 0.1 : régulation P
- ✓ Si $k.\tau$ est compris entre 0.1 et 0.2 : régulation PI
- ✓ Si $k.\tau$ est compris entre 0.2 et 0.5 : régulation PID
- ✓ Si $k.\tau$ est inférieur à 0.05 : régulation tout ou rien
- ✓ Si $k.\tau$ est supérieur à 0.5 : régulation multi boucles, régulation numérique



Régulations	P	P.I Série	P.I Parallèle	P.I.D Série	P.I.D Parallèle	P.I.D Mixte1	P.I.D Mixte 2
Gr	$\frac{0.8}{k.\theta}$	$\frac{0.8}{k.\theta}$	$\frac{0.8}{k.\theta}$	$\frac{0.85}{k.\theta}$	$\frac{0.9}{k.\theta}$	$\frac{0.9}{k.\theta}$	$\frac{0.9}{k.\theta}$
Ti	Maxi	5θ	$\frac{k.\theta^2}{0.15}$	4.8θ	$\frac{k.\theta^2}{0.15}$	5.2θ	5.2θ
Td	0	0	0	0.4θ	$\frac{0.35}{k}$	0.4θ	$\frac{0.35}{k}$

De même, après calcul et affichage des actions, il est nécessaire d'effectuer un test sur une variation de consigne, pour vérifier l'allure de la réponse. Si les résultats obtenus ne sont pas satisfaisants, refaire l'identification, s'assurer de la structure du régulateur ou retoucher les actions.

5.1.3. Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols

Cette méthode est identique pour procédés stables et instables, mais n'est pas adaptée pour des boucles de régulation rapides (débit par exemple) et les procédés à retard important.

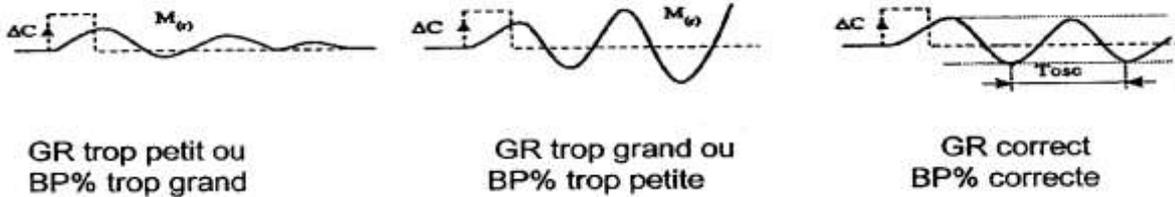
La méthode consiste à mettre la boucle de régulation en oscillations entretenues. La période des oscillations T_{osc} et le gain du régulateur critique G_{rc} qui occasionne ces oscillations, permettent de calculer les actions à afficher sur le régulateur. Ce calcul dépend de la structure du régulateur utilisé et du mode de régulation choisi (P, PI, PID)

Le critère de performance choisi par Ziegler et Nichols donne une réponse avec un amortissement par période de l'ordre de 0,25.

5.1.4. Mode opératoire

C'est une méthode expérimentale qui permet de régler les actions d'un régulateur à partir de la mise en « pompage régulier » de la mesure.

- Mettre le régulateur en action proportionnelle ($T_i = \text{maxi}$ ou $n = 0$ et $T_d = 0$)
- Passer le régulateur en automatique
- Augmenter l'action proportionnelle en faisant de petits échelons de consigne jusqu'à l'obtention du pompage régulier de la mesure



- Relever la période des oscillations T et le gain critique du régulateur G_{rc} .
- Calculer les actions du régulateur à l'aide du tableau suivant.

5.1.5. Calcul des actions

Régulations	P	P.I Série	P.I Parallèle	P.I.D Série	P.I.D Parallèle	P.I.D Mixte1	P.I.D Mixte 2
Gr	G_{rc} 2	G_{rc} 2.2	G_{rc} 2.2	G_{rc} 3.3	G_{rc} 1.7	G_{rc} 1.7	G_{rc} 1.7
Ti	Maxi	T 1.2	$2T$ G_{rc}	T 4	$0.85T$ G_{rc}	T 2	T 2
Td	0	0	0	T 4	$G_{rc} \cdot T$ 13.3	T 8	$G_{rc} \cdot T$ 13.3

6.1. Régulation cascade

6.1.1 Présentation

Une régulation cascade est composée de deux boucles imbriquées. Une mesure intermédiaire est contrôlée par la boucle esclave. La boucle maîtresse contrôle la grandeur réglée de la régulation, sa commande est la consigne de la régulation esclave.

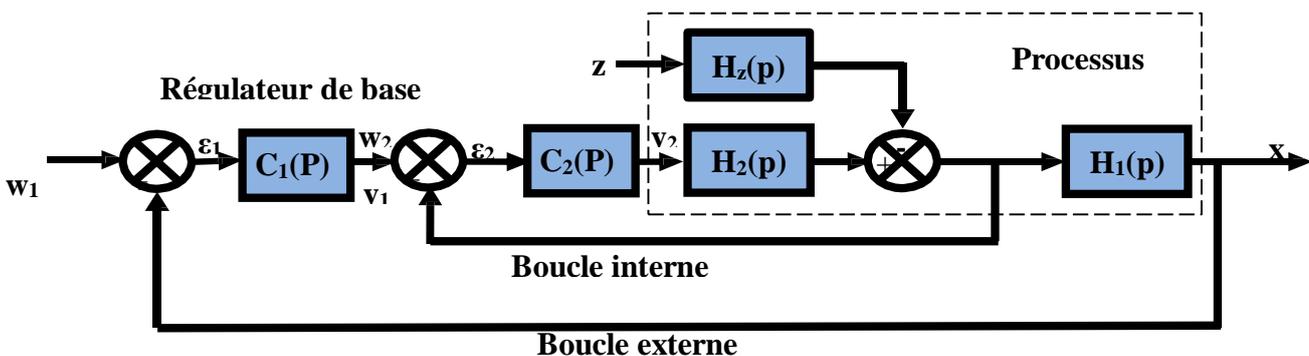


Figure 3.16 : Schéma bloc d'une régulation cascade

Si la grandeur intermédiaire est la grandeur réglante de $H_1(p)$, on parle de «cascade sur la grandeur réglante». Sinon, on parle de «cascade sur une grandeur intermédiaire».

Ce type de régulation se justifie quand on a une grande inertie du système vis-à-vis d'une perturbation sur la grandeur réglante, ou sur une grandeur intermédiaire.

Il faut d'abord régler la boucle interne, puis la boucle externe avec le régulateur esclave fermée

Lors d'une perturbation de pression P_e , agissant sur le débit Q_c , la régulation corrige, par une action sur la vanne **TCV1**, seulement lorsque la température T_s commence à varier. (voir boucle simple suivante).

La régulation cascade sert à améliorer la boucle fermée simple sur les procédés à grande inertie, en diminuant les effets d'une ou plusieurs grandeurs perturbatrices qui agissent :

- soit sur la **grandeur réglante**,
- soit sur une **autre grandeur** appelée grandeur intermédiaire

Ceci est obtenu en rajoutant une boucle rapide, ce qui conduit généralement à deux boucles fermées imbriquées, l'une interne, l'autre externe.

Pour que la cascade soit justifiée, il faut que la boucle interne soit beaucoup plus rapide que la boucle externe.

Sur ce type de régulation, on trouve en général deux points de mesure, deux régulateurs et un organe de réglage.

6.1.2. Cascade sur grandeur réglante

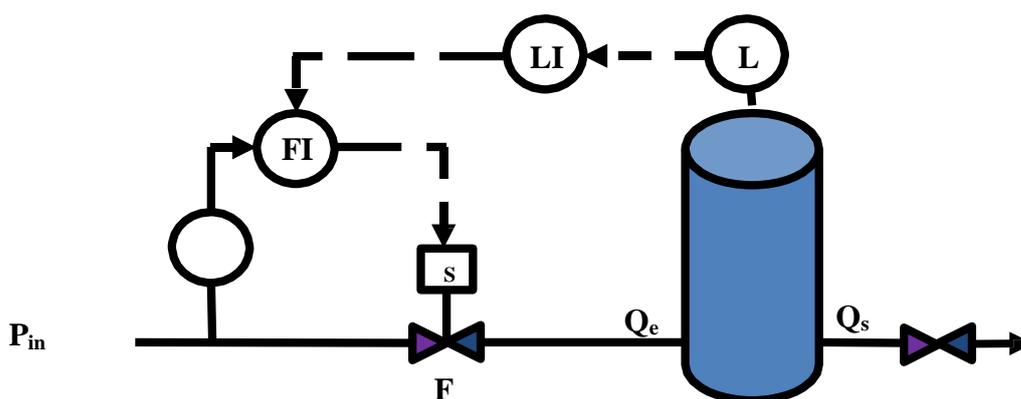


Figure 3.17 : Régulation de niveau ; régulation cascade

On peut utiliser une régulation cascade dans une régulation de niveau. Le niveau dans le réservoir est la grandeur réglée par la boucle maître. Le débit d'alimentation est la grandeur réglante de la boucle maître et la grandeur réglée de la boucle esclave. La pression P_{in} est la principale perturbation de la boucle esclave. Q_{out} est la principale perturbation de la boucle maître.

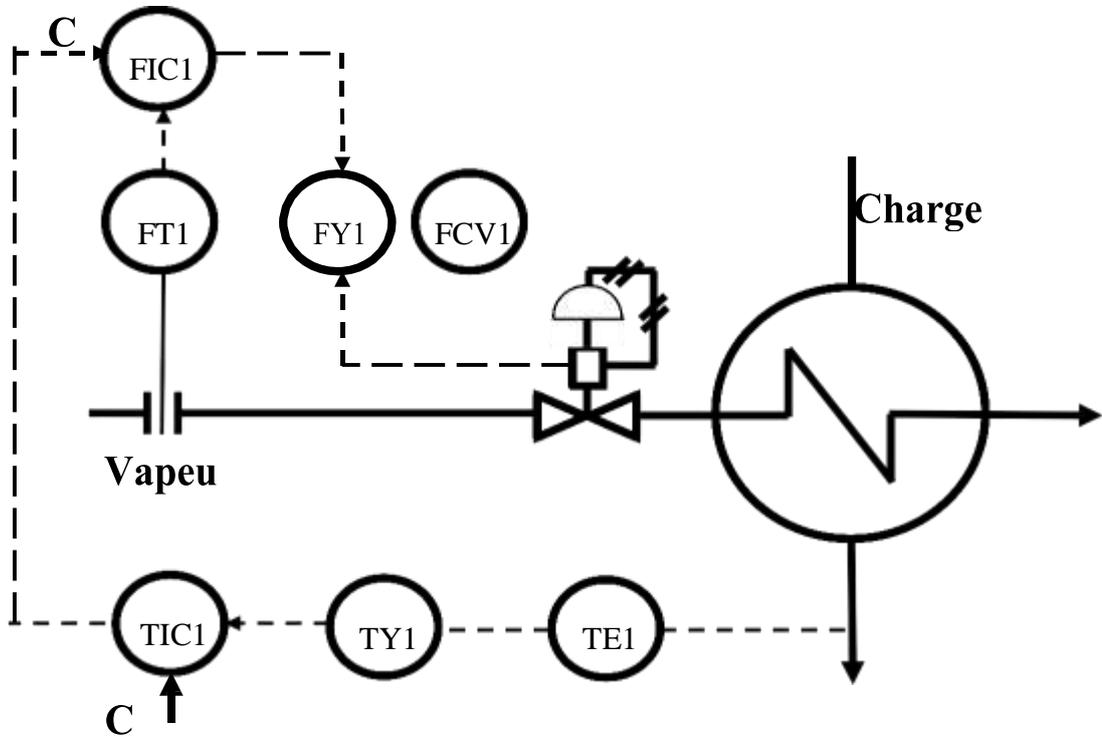


Figure 3.18 : Efficacité de la régulation cascade sur les perturbations affectant la grandeur réglante

Le régulateur **pilote TIC 1** reçoit la mesure de la grandeur réglée T_s et sa sortie commande la consigne externe CE du régulateur asservi FIC 1. Le régulateur pilote à **deux modes de fonctionnement** :

- Manuel
- automatique avec consigne interne

Le régulateur **asservi FIC 1** reçoit la mesure de la grandeur réglante Q_c , sa sortie commande la vanne FCV 1. Il a **trois modes de fonctionnement** :

- manuel
- automatique avec consigne interne □
- automatique avec consigne externe

Il faut noter que ce type de régulation cascade est efficace uniquement sur les perturbations affectant la grandeur réglante.

Références bibliographiques

[1] Régulation industrielle Auteurs: M.KSOURI et P.BORNE Editions Technip, Paris.

[2] Régulateur PID en génie électrique Auteur: Dominique Jacob Ellipses, édition marketing S.A, 1999

[3] Régulation classique en industrie, support de cours pour BTS-GM : conception et réalisation Mohamed BOUASSIDA, version Mai 2010

[4] Asservissement et Régulation, Note de cours Moez ALLOUCHE et Ahmed BENAYED : ISET MAHDIA

[5] Régulation industrielle Note de cours Hechmi KHATERCHI publié au site <http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-6-regulation-industrielle>