

République Algérienne Démocratique Populaire
Université Badji Mokhtar Annaba

Régulation Industrielle Cours

Messaoud BOUAKKAZ



Département Electromécanique

République Algérienne Démocratique Populaire
Université Badji Mokhtar Annaba
Faculté des sciences de l'ingénierie

Support de cours: Régulation Industrielle

Proposé par: Messaoud BOUAKKAZ
Département Electromécanique

2019-2020

La régulation est une discipline technique destinée à analyser et concevoir des systèmes de commande pratiques et autres dispositifs technologiques, donc elle permet de maintenir une grandeur physique à une valeur constante quel que soient les perturbations extérieures.

Le présent polycopie présente de façon particulièrement claire les outils nécessaires à la régulation industrielle, dont l'objectif est de maîtriser le principe et la structure des boucles de régulation, et de choisir le régulateur approprié pour un système industriel afin d'avoir des performances requises (stabilité, précision et rapidité).

Ce polycopié de cours du module " Régulation Industrielle" s'adresse aux étudiants de troisième année Licence Électromécanique, du Département d'Electromécanique de la Faculté des Sciences de l'ingénierie Université **Badji Mokhtar** Annaba. Pour comprendre cet exposé, des connaissances de base en théorie des systèmes et signaux et en calcul différentiel sont nécessaires.

Ce polycopie est structuré en quatre parties:

Dans le premier, nous présenterons le principe et les notions fondamentales de la régulation industrielle avec des exemples de systèmes de régulation. La symbolisation normalisée des boucles de régulation dans l'industrie sera aussi présentée afin de permettre à l'étudiant de lire les schémas de régulation présentés dans l'industrie et en particulier le schéma TI.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude des régulateurs industriels. La constitution des régulateurs, le rôle et le domaine d'utilisation des différentes actions (P I et D) ainsi que «tout ou rien» seront présentés.

Le troisième chapitre aborde les méthodes de détermination d'un régulateur PID, d'une manière générale, ce problème est connu par la synthèse des systèmes bouclés. Les méthodes de synthèse sont très nombreuses, on présente dans le cadre de ce chapitre quelques méthodes de deux classes importantes:

- Les méthodes de la première classe dites empiriques ne nécessitant pas une connaissance parfaite du modèle du procédé à commander. Les paramètres du régulateur seront calculés à partir des observations expérimentales. Elles sont largement utilisées dans le domaine industriel.
- Les méthodes de la deuxième classe sont basées sur la connaissance du modèle du système. Les actions du régulateur seront calculées de façon à obtenir la fonction de transfert souhaitée en boucle ouverte ou en boucle fermée.

Une Application d'analyse et de synthèse de la régulation de température sera traitée au quatrième chapitre. Pour la synthèse, on mettra en évidence l'influence des actions P, I et D et sur les performances du système, ainsi que celle du retard sur la stabilité.

Nous souhaitons que le contenu de ce polycopie soit profitable et servira comme référence, aux étudiants intéressés par l'étude de la régulation industrielle.

SOMMAIRE

Introduction générale

Chapitre 01

«Introduction à la régulation»

Introduction	1
1. Exemple de Régulation manuelle du niveau	1
2. Organes constitutifs d'une boucle de régulation	
2.1. Système physique	4
2.1.2. Exemple de Système : Mélangeur de lait et de chocolat	4
2.1.2. Exemple 2 : Four	5
2.1.3. Notion Fonction de transfert	7
2.2. Régulateurs	8
2.2.1. Classification Des Régulateurs	8
2.3. Actionneur	8
2.4. Indicateurs	10
2.5. Les capteurs	11
2.5.1. Choix du capteur-transmetteur	11
3. Les signaux de communication- câblage entre différents organes	14
3.1. Nature des signaux transmis	14
4. Exemples de systèmes de régulation	15
5. Distinction asservissement/ régulation	17
5.1. Asservissement	17
5.2. Régulation	17
6. Notion de Boucle ouverte, Boucle fermée	19
7. Qualités d'une bonne régulation	20
7.1. Stabilité	20
7.2. Paramètres caractéristiques de la réponse d'un procédé	21
7.2.1. Caractéristiques statiques d'un procédé	21
7.2.1.1. Caractéristique statique	21
7.2.1.2. Gain statique	22
7.2.1.3. Erreur statique	22
7.3. Caractéristiques dynamiques d'un procédé	23

7.3.1. Temps de réponse (mesure de la rapidité)	23
7.3.2. Dépassement	24
7.3.3. L'amortissement	25
8. Schéma de présentation des systèmes de régulation Industrielle	26
8.1. Schéma fonctionnel	26
8.2. Schémas de représentation Schéma TI	27
8.3. Régulation de température d'un échangeur thermique	27
8.3.1. Lettres pour le schéma TI	29
8.4. Présentation des signaux	30
8.5. Représentation des appareils de mesure	30
8.6. Représentation des appareils de calcul	31
8.7. Présentation des régulateurs	32
8.8. Numérotation des instruments	32
8.9. Représentation des actionneurs et organes de réglage	33
9. Modélisation	35
10. Identification	38
10.1. Le choix du modèle	38
10.2. Identification en boucle ouverte (BO)	38
10.2.1. Méthodologie	38
10.3. Réponse du système à un échelon unité (réponse indicielle)	39
10.3.1. Propriétés d'un système linéaire	40
10.3.2. Phénomène de saturation	40
10.4. Analyse de la réponse indicielle	40
10.5. Modèle du premier ordre	41
10.5.1. Détermination du gain statique	41
10.6. Identification d'un système de 2 ^{eme} ordre	42
10.7. Méthode de Broïda pour un système naturellement stable	43
10.7.1. Modèle de Broïda	43
10.8. Méthode de Strejc	44
10.9. Tableau : Paramètres du modèle de Strejc.	45

1. Introduction	46
2. Eléments d'un régulateur Industriel	47
2.1. L'aspect matériel d'un régulateur	47
2.1.1. Fonctions de service	47
2.1.2. Limiteur de variation de vitesse de commande	48
2.2. Structure du Régulateur	48
2.2. Choix du sens d'action du régulateur	49
3. Régulation Tout Ou Rien (ON-OFF)	49
3.1. Action continue - Action discontinue	49
3.2. Régulateur TOR à deux seuils	51
3.3. Fonctionnement	51
3.4. Exemple	53
3.5. Réalisation comparateur à hystérésis	54
4. Régulateur PID	55
4.1. Action Proportionnelle	56
4.1.1. Bande Proportionnelle (Proportionnal band)	57
4.1.2. Réalisation Régulateur Proportionnel Analogique	59
4.2. Régulateur intégral	60
4.2.1. Réalisation Régulateur Intégral Analogique	61
4.3. Action dérivée	62
4.3.1. Réalisation action dérivée Analogique	63
5. Différentes structures d'un régulateur PID	64
5.1. Action Proportionnel intégrale (PI)	64
5.1.1. PI parallèle	65
5.1.2. PI Série	65
5.2. Action proportionnelle dérivée (PD)	66
5.3. Différentes structures d'un régulateur PID	67
5.3.1. PID série	67
5.3.2. PID Parallèle	68
5.3.3. PID structure mixte	69
6. Identification d'une structure de régulateur PI	71
7. Identification d'une structure de régulateur PID	72

Chapitre 03

«Synthèse des Régulateurs PID»

1. Introduction	76
2. Méthodes empiriques	76
2.1. Méthode Ziegler et Nichols en Boucle ouverte	76
2.1.1. Exemple	77
2.2. Méthode Ziegler et Nichols en Boucle fermée	79
2.2.1. Exemple	80
3. Méthode de réglage après Identification du procédé	81
3.1. Modèle non évolutif	81
3.1.1. Choix du régulateur	81
3.1.2. Paramètres des régulateurs	82
3.2. Modèle évolutif	82
3.2.1. Choix du régulateur	83
3.2.2. Paramètres des régulateurs	83
4. Réglage d'un régulateur PID basé sur les marges de gain et de phase	83
4.2. Rappel	83
4.2.1. Marge de gain	83
4.2.2. Marge de phase	84
4.2.3. Synthèse dans le cas d'un régulateur PI	85
4.3. Exemple	85
4.3.1. Calcul des paramètres du modèle	87
4.3.2. Calcul des paramètres du régulateur PI	87
5. Méthode théorique de réglage d'un régulateur PID	88
5.1. Principe de la méthode	89
5.2. Exemple	89

Chapitre 04

«Applications»

1. Régulation de température	93
2. Régulation de niveau	103

Introduction :

La régulation industrielle occupe une place importante dans le monde moderne, en raison des performances de plus en plus élevées que l'on réclame des commandes automatiques.

La régulation permet de maintenir une grandeur physique à une valeur constante quelques soient les perturbations extérieures. L'objectif global de la régulation peut se résumer par ces trois mots clefs : **Mesurer**, **Comparer** et **Corriger**.

Nous sommes donc amenés à effectuer des mesures pour obtenir certaines connaissances avant d'entreprendre une action. Ces mesures seront obtenues par l'intermédiaire d'appareillages spécifiques.

Le projet de la régulation est une opération très compliquée en raison des nombreux paramètres qui entrent en jeu. Dans ce chapitre on va introduire brièvement les généralités qui traitent l'étude d'une régulation industrielle.

1. Exemple de Régulation manuelle du niveau

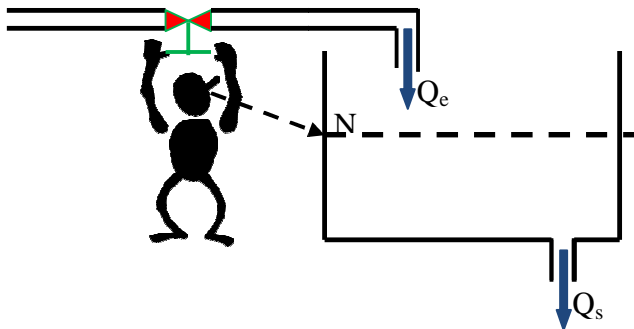


Figure 1.1 : Régulation manuelle du niveau.

Un exemple très simple pour comprendre le principe de la régulation est celui d'un homme qui veut contrôler le niveau d'un réservoir à partir d'une vanne manuelle, dont à chaque instant, ses yeux "mesurent" l'écart qui existe entre le niveau actuel et le niveau désiré (N). Son cerveau commande alors aux mains d'agir sur la vanne, en sorte que cet écart diminue, puis s'annule.

L'homme dans la figure ci-dessus (**Fig. 1.1**) réalise les fonctions suivantes: **mesure**, **transmission** de l'information, **réflexion** et réglage.

Afin d'obtenir le fonctionnement désiré, la régulation doit agir en continu sur le système. Pour cela il faut **observer** la grandeur à **contrôler** (observation), **comparer** cette grandeur à celle **désirée** et **déterminer** l'action à entreprendre (réflexion) puis **agir** sur une ou plusieurs grandeurs entrées du système (actions). On obtient alors une chaîne de régulation (ou bien une boucle de régulation).

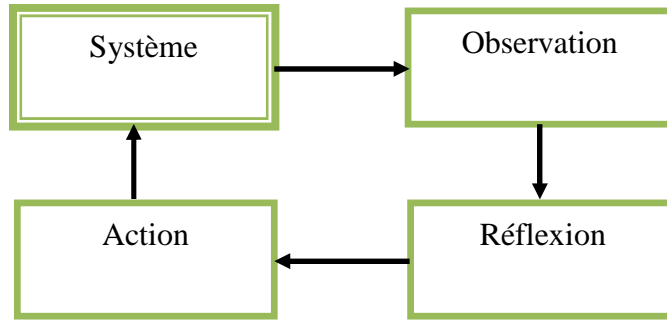


Figure 1.2 : Schéma d'une boucle (chaîne) de régulation.

Pour automatiser cette boucle, il faut remplacer chaque maillon humain par un appareil. Il faut également faire communiquer ces appareils les uns avec les autres.

Les yeux jouent alors le rôle d'organes de mesure (ou de capteurs), le cerveau celui de comparateur et les mains celui d'organe de puissance.

Régulation :

La régulation regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique soumise à des perturbations. Cette grandeur physique est alors appelée "grandeur réglée". Exemples de grandeur physique : pression, température, débit, niveau etc.... Cette grandeur donne son nom à la régulation. Exemples: Régulation de pression, Régulation de température. Régulation de débit. Régulation de niveau etc....

Toute une régulation comportera trois grandes fonctions nécessaires à sa bonne marche (Fig. 1.3) :

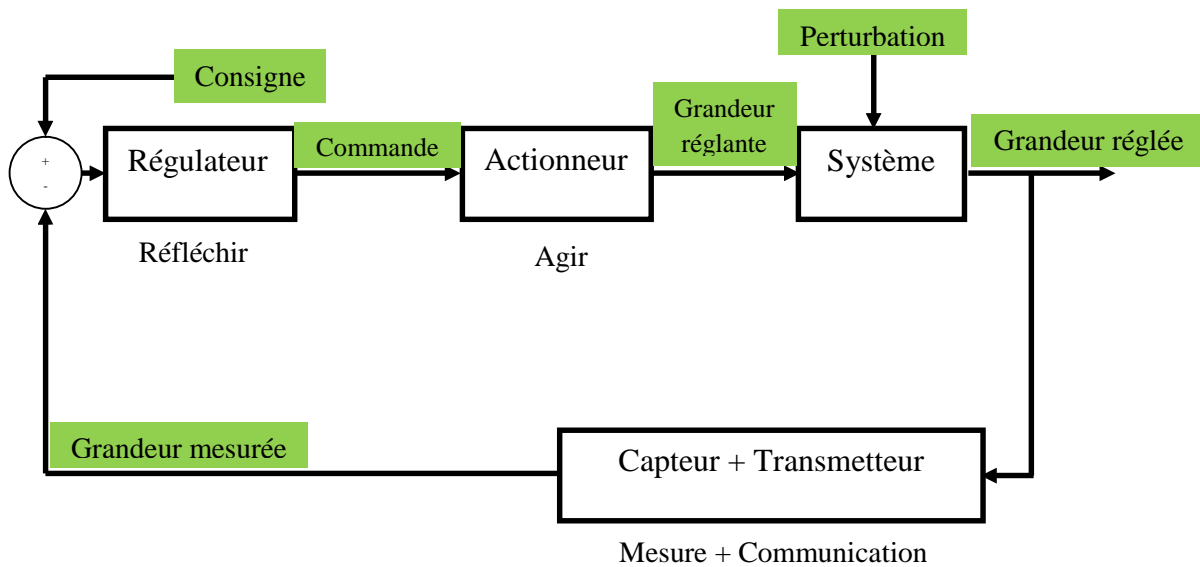


Figure 1.3 : Organisation fonctionnelle d'une régulation (schéma fonctionnel).

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**.

2. Organes constitutifs d'une boucle de régulation:

La régulation d'une grandeur physique $y(t)$ élaborée par un processus technologique (t représente bien l'entendu de temps) consiste à essayer d'obtenir:

$$y(t) = w(t)$$

où $W(t)$ représente la loi de **consigne**

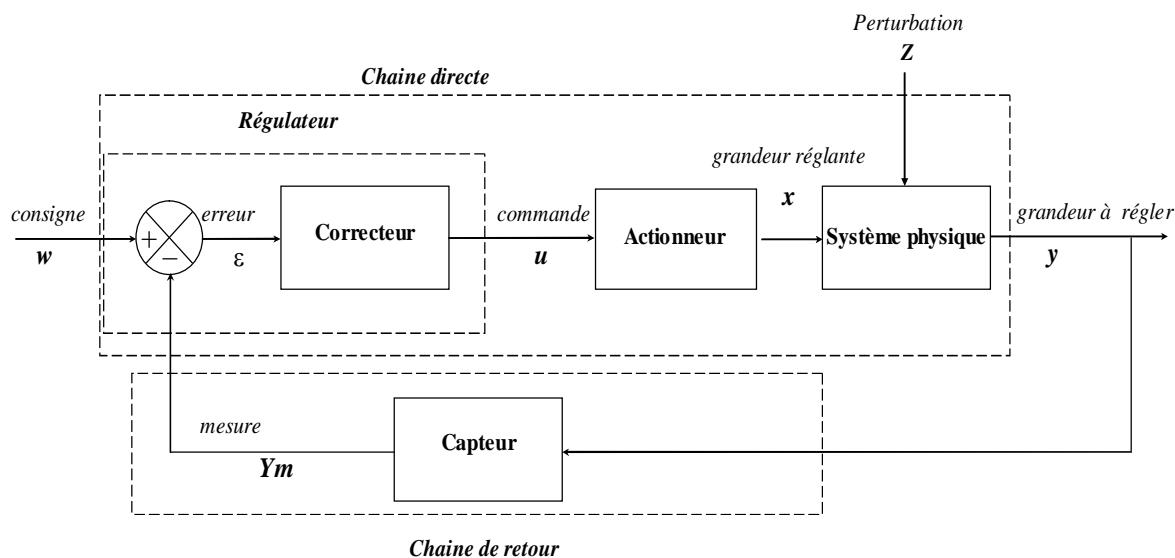


Figure 1.4 : Chaîne d'une régulation automatique.

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

- le système **physique** à commander et soumis à des **perturbations**, c'est un dispositif isolé soumis à des lois bien définies. Chaque système a plusieurs entrées et sorties par lesquelles on peut exercer une influence sur ce système.
- un **capteur** ;
- un Transmetteur
- une **consigne** (fixe ou variable dans le temps) ;
- un **comparateur** délivrant un signal d'écart (erreur) ; compare en permanence la consigne et la grandeur réglée et donne le résultat de cette comparaison au régulateur.
- un régulateur

- un organe de réglage et actionneur
- un Indicateur
- un Enregistreur

Dans toutes les boucles de régulation, on retrouvera les signaux (grandeurs physiques) suivants:

- **La grandeur réglée (y):**

C'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation, par exemple : régulation de température, niveau, débit,... etc.

- **La consigne (W) :**

C'est la valeur désirée que doit avoir la grandeur réglée,

- **Les grandeurs perturbatrices (Z):**

Sont les grandeurs physiques susceptibles non mesurables (non contrôlables) d'évoluer au cours du processus et d'influencer la grandeur réglée.

La grandeur réglante (x) : c'est la grandeur qui va agir sur le processus et influencer la grandeur à régler (ex : radiateur) pour permettre de modifier la température dans une salle. Généralement c'est qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée.

L'erreur :(ϵ), c'est le signal généré par le comparateur.

Signal de Commande (u): c'est le signal généré par le régulateur.

La mesure du Capteur (y_m): c'est l'image de la grandeur à régler.

2.1. Système physique (Procédé Industriel)

Un système physique est un terme général qui désigne un ensemble d'appareils destiné à obtenir un produit bien déterminé. L'évolution d'un système dépend de plusieurs grandeurs incidentes (**entrées**). Le système est caractérisé à l'aide d'une ou plusieurs grandeurs physiques mesurables à maîtriser (contrôlables) qui vont permettre de contrôler l'objectif fixé (**sorties**) (**Fig 1.5**).

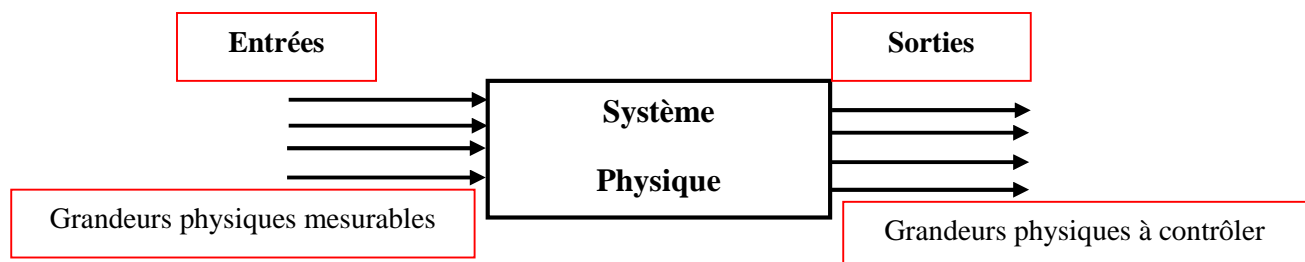


Figure 1.5 : Système physique

2.1.1. Exemple de Système : Mélangeur de lait et de chocolat :

Le système (mélangeur) est représenté par le schéma de la figure ci-dessus (**Fig 1.6**). Afin de fabriquer industriellement du lait chocolaté, on mélange du chocolat à du lait. On souhaite contrôler la

qualité du mélange obtenu à partir d'une analyse donnant la concentration en chocolat. Le niveau permet de connaître le volume dans le mélangeur.

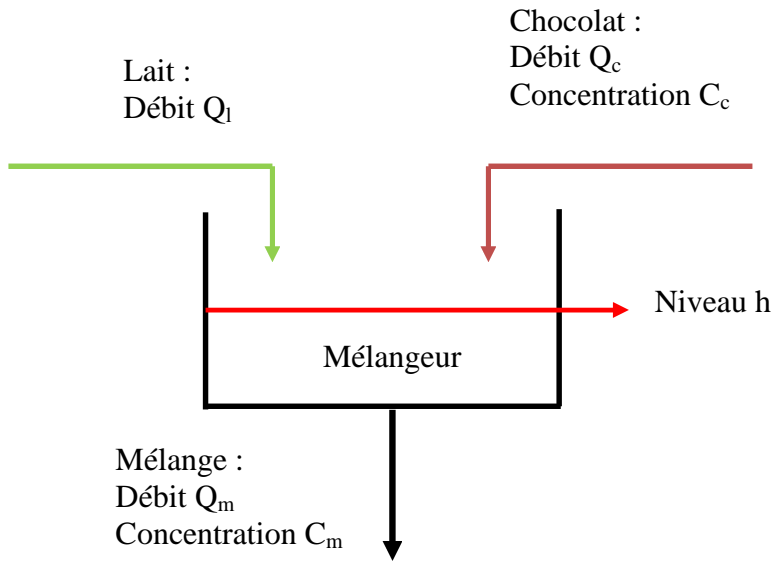


Figure 1.6 : Exemple de Système : Mélangeur de lait et de chocolat.

Les grandeurs à maîtriser (grandeurs à contrôler ou bien les sorties) sont : le niveau h et la concentration du mélange C_m . Dans ce système le débit de lait Q_l , le débit de chocolat Q_c et le débit du mélange Q_m vont agir sur le niveau h ; et les grandeurs d'influence sur la concentration du mélange C_m sont le débit de lait Q_l , le débit de chocolat Q_c et la concentration en chocolat C_c . La figure (Fig. 1.7) indique les grandeurs qui modifient l'état du système en entrées et les grandeurs qui caractérisent le système en sorties.

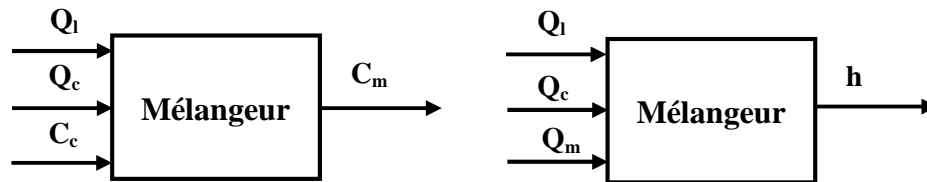


Figure 1.7 : Schéma de représentation d'un système mélangeur.

2.1.2. Exemple 2 : Four

La figure (Fig 1.8) représente un système de four pour chauffer le pétrole brut. Dans cet exemple, en supposant que c'est un four à gaz, on pourra agir sur la température en faisant varier le débit de gaz dans les injecteurs par l'intermédiaire d'une petite vanne.

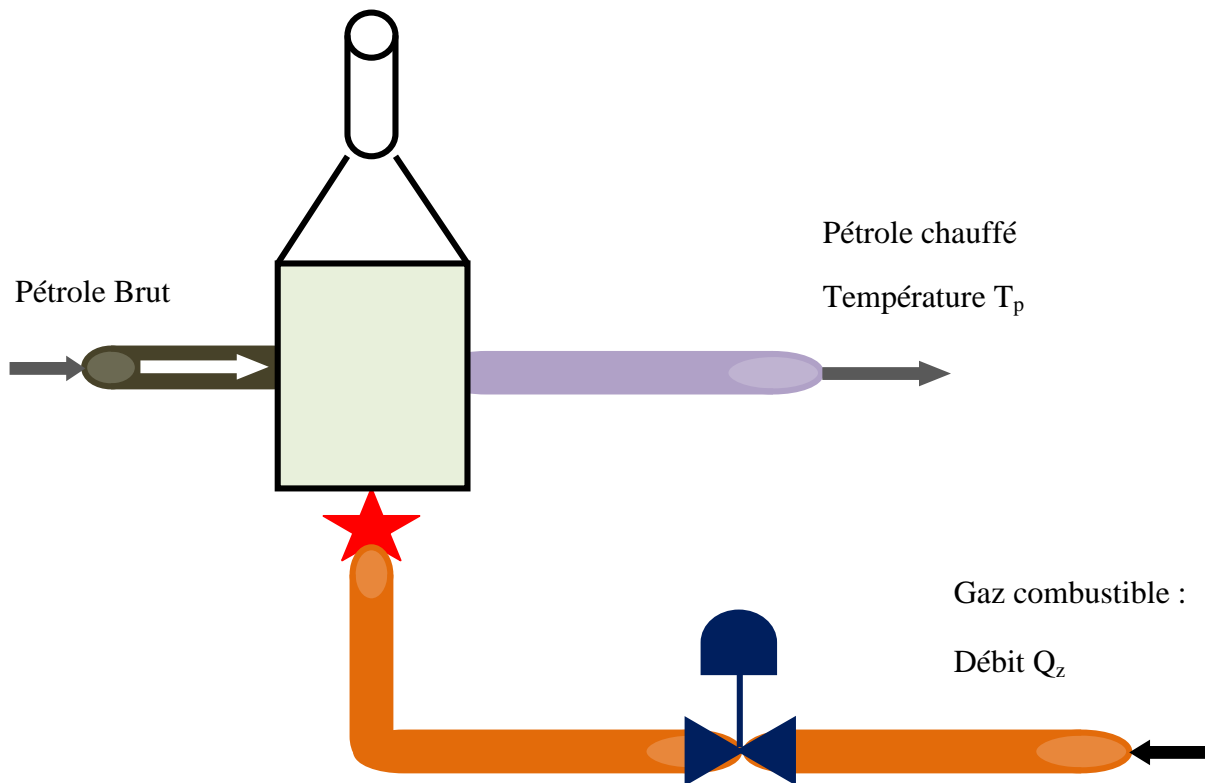


Figure 1.8 : Exemple de Système industriel (système four).

Le système (four) est représenté par le schéma suivant :



Figure 1.9 : Schéma de représentation d'un système four.

Remarque :

Généralement des sorties des systèmes ne dépendent pas seulement des grandeurs mesurables mais sont aussi sensibles à d'autres grandeurs qui varient de façon imprévisible et qu'on appelle **perturbations**. Comme exemple, la variation de la vitesse V_t d'une voiture électrique est effectuée par la variation de la tension d'induit U_a (grandeur mesurable) des moteurs. Mais la vitesse du véhicule est aussi sensible à la vitesse frontale du vent V_v (et à son sens), à la pente de la route P_r , à la charge C_r , etc... Qui sont des grandeurs non mesurables, ce système peut être représenté par le schéma suivant (Fig. 1.10):

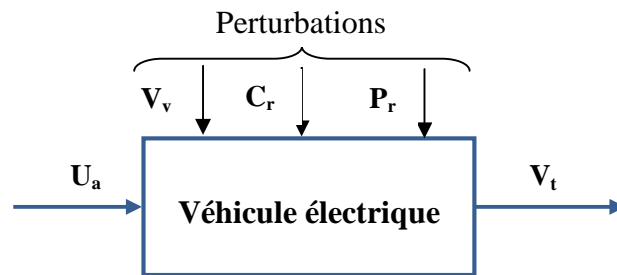


Figure1.10: Schéma de représentation d'un système véhicule électrique.

Un autre exemple de système de chauffage de la température au centre d'une salle par des radiateurs de chauffage central. Pour agir sur la température on fait varier le débit d'eau dans les radiateurs par l'intermédiaire d'une petite vanne. Mais la température dans le local est aussi sensible à la température de l'eau qui circule, à la température extérieure, à l'ouverture d'une porte ou d'une fenêtre, au nombre de personnes qui entrent, etc..

2.1.3. Notion Fonction de transfert (transmittance, Schémas blocs)

Chaque système peut être représenté par un schéma bloc liant une grandeur d'entrée et une grandeur de sortie.

La transmittance est le coefficient (ou fonction) par lequel on applique l'entrée pour connaître la sortie.

Exemples :

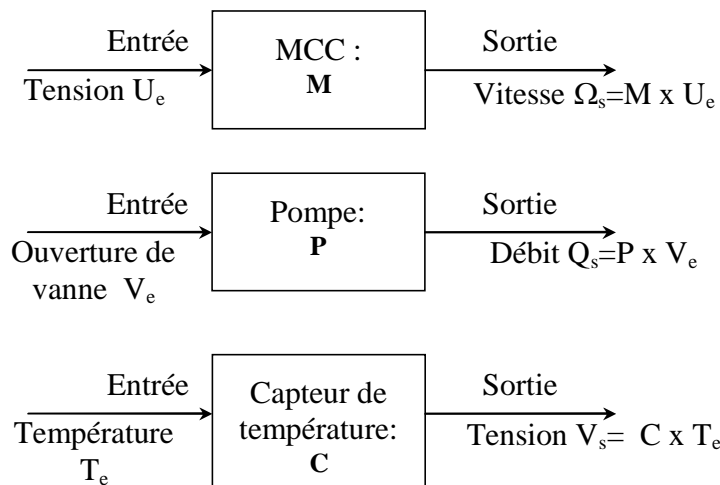


Figure 1.11: Exemples de transmittance.

2.2. Régulateurs

Les **régulateurs** (contrôleurs, correcteurs) sont le centre d'une régulation industrielle. Ils reçoivent la mesure des grandeurs à régler, les comparent au point de consigne enregistré dans le régulateur et envoient un retour en tant que sortie du régulateurs pour contrôler le dernier élément de régulation (**organe** de **réglage**). Il existe des systèmes pneumatiques et électroniques ou programmables numérique. Un régulateur numérique utilise un algorithme mathématique complexe pour effectuer l'action de contrôle.

Un régulateur : sert à générer une **loi** de **commande** qui calcule le signal à envoyer sur l'actionneur de l'organe de réglage.

2.2.1. Classification Des Régulateurs

- Un **régulateur** peut être **analogique** il est réalisé avec des composants analogiques (essentiellement des amplificateurs opérationnels) et son signal de sortie évolue de manière continue dans le temps.
- Le **régulateur** peut également être **numérique** : il est réalisé à l'aide d'un système programmable (microprocesseur par exemple) et son signal de sortie est alors le résultat d'un algorithme de calcul.

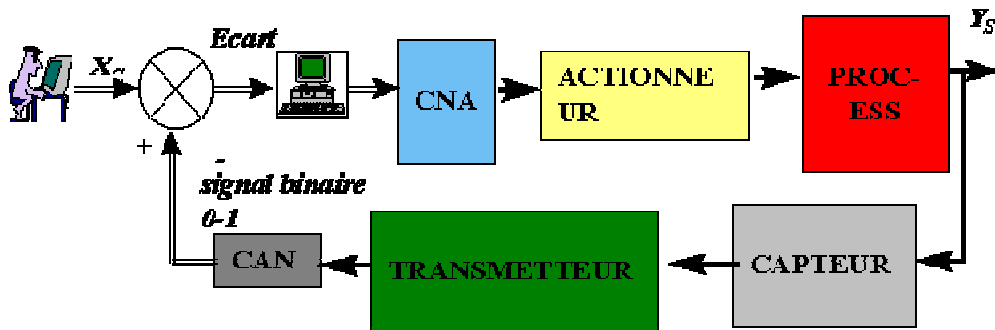


Figure 1.11: une boucle de régulation numérique.

- CNA : convertisseur Numérique Analogique
- CAN : convertisseur Analogique Numérique
- On trouve également les **régulateurs T.O.R.** (Tout ou Rien). La grandeur réglante ne peut prendre que **deux** valeurs et l'actionneur de puissance ne dispose alors que de deux états de fonctionnement il est « **ouvert** » ou « **fermé** ». Le suivi de consigne est dans ces conditions beaucoup moins fin qu'avec les deux systèmes précédents, mais il peut être suffisant si l'on ne désire pas une grande précision (par exemple le **thermostat** qui met en route ou **arrête** le chauffage dans un appartement).

2.3. Actionneur : c'est l'élément qui agit sur la grandeur réglante.

Un **actionneur** est la partie la plus importante de l'élément de régulation finale, un dispositif qui **provoque** un **changement** physique dans l'élément de contrôle final (organe de réglage). Comme un titre exemple, pour une vanne de contrôle, l'actionneur est la **tige** de la vanne et pour un dispositif de chauffage, il s'agit du **serpentin** de chauffage. Un actionneur peut être contrôlé en pneumatique, hydrauliquement, électriquement.

Les actionneurs **pneumatiques** utilisent la pression d'air de l'instrument pour appliquer une force sur la membrane afin de déplacer l'actionneur de la vanne, puis pour positionner la tige de la vanne.

La photo suivante montre un exemple d'une vanne de régulation, avec un actionneur pneumatique à membrane monté au-dessus du corps de la vanne.

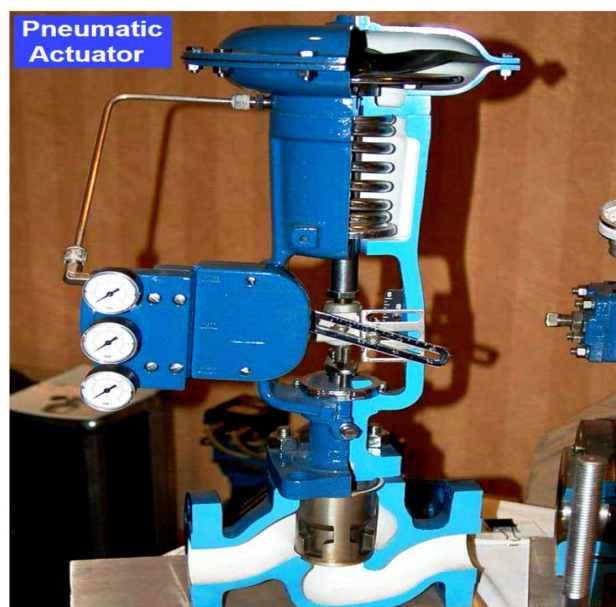


Figure 1.12 : vanne de régulation

Dans cet exemple (**Fig 1.12**), le grand ressort hélicoïdal fournissant un **positionnement** par **défaut** de la vanne (la pression d'air agissant contre le diaphragme, déplace la vanne contre le ressort. La pression d'air **appliquée** au bas de la membrane soulève la tige coulissante de la vanne vers le haut.

La pression atmosphérique nécessaire pour motiver un actionneur pneumatique peut provenir directement de la sortie d'un régulateur pneumatique ou d'un **transducteur** (ou convertisseur) de signal traduisant un signal électrique en un signal de pression atmosphérique.

De tels transducteurs sont généralement appelés **convertisseurs I / P** ou "courant à pression", car ils traduisent généralement un signal de courant **électrique** (I) de **4** à **20 mA CC** en un signal de pression d'air (P) de **0.2** à **1 bar**.

Certains actionneurs de vannes pneumatiques sont équipés de **volants** utilisés pour positionner manuellement la vanne en cas d'absence de la pression d'air. La photo (**Fig 1.13**) montre une vanne de régulation à tige coulissante avec actionneur pneumatique à membrane et volant manuel.

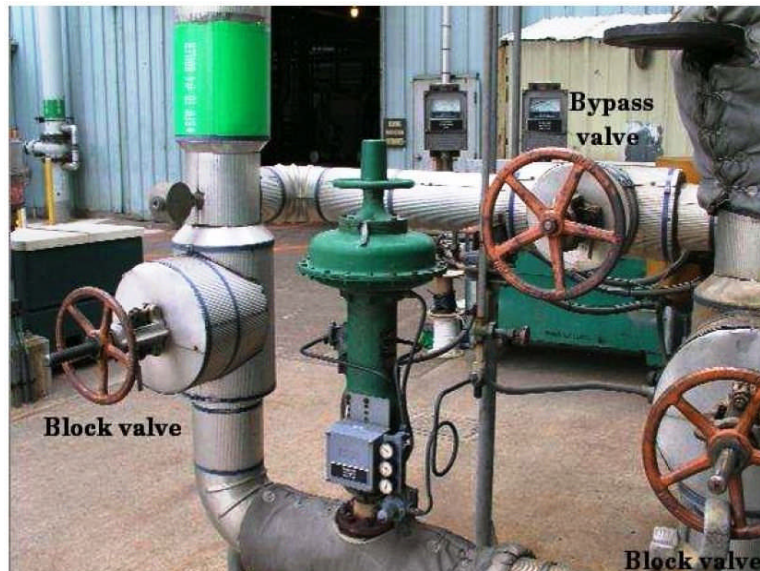


Figure 1.13 : vanne de régulation équipée de volant

2.4. Indicateurs

Un **indicateur** est un périphérique lisible par l'homme qui affiche les variables d'un processus industriel. Il existe des indicateurs analogiques tels que ceux utilisés dans le capteur de pression et de température et des indicateurs numériques qui affichent les grandeurs à régler sous forme de chiffres. Même si la grandeur à régler est connectée au régulateur, les indicateurs sont utilisés par les industries à des fins différentes.



Figure 1.14 : Exemple d'indicateur.

2.5. Les capteurs

Un capteur est un instrument qui fournit une sortie utilisable en réponse au mesurande d'entrée. Un capteur est également appelé élément de **détection**, capteur primaire ou détecteur primaire. Le mesurande est la grandeur **physique** à mesurer.

Un **transducteur** d'entrée produit une **sortie électrique** représentative du mesurande d'entrée. Sa sortie est conditionnée et prête à être utilisée par l'électronique de réception, telle que **PLC** ou **DCS**.

L'électronique de réception peut être un **indicateur**, un **régulateur**, un **ordinateur**, un **automate** programmable, un système de **contrôle-commande**, etc. Le terme «**transmetteur**», tel qu'il est couramment utilisé avec les instruments de régulation, a une définition plus étroite que celle d'un capteur ou d'un transducteur:

Le capteur-transmetteur : Le capteur-transmetteur est constitué de 2 parties principales :

- **Le corps d'épreuve** qui se trouve en contact avec la grandeur physique à mesurer.
- **Le transmetteur** est chargé de mettre en forme normalisée le signal **y_m** et transporte l'information. Ce transmetteur est aussi appelé **conditionneur**.

Le corps d'épreuve :

- **Exemples :**

La **sonde** qui se trouve plongée dans le milieu dont on mesure la température et dont la résistance varie quand la température varie.

La membrane qui détecte une variation de pression par rapport à une pression de référence (vide ou atmosphère).

- **Le transmetteur ou conditionneur :** C'est lui qui traite la mesure recueillie par le corps d'épreuve de façon à en tirer la valeur de la grandeur physique que l'on mesure.

Exemples :

Pour la mesure de température, le transmetteur mesure la résistance de la sonde et lui affecte la température correspondante puis transforme cette valeur en pourcentage et enfin génère le signal de transmission.

Pour la mesure de pression, le transmetteur relève la déformation de la membrane, lui associe la pression correspondante...

2.5.1. Choix du capteur-transmetteur :

Il existe 2 types de capteur-transmetteurs, les capteur-transmetteurs dits "**actifs**" et les capteur-transmetteurs dits "**passifs**".

Les capteur-transmetteurs actifs sont alimentés en 220 V et produisent le signal d'information (par exemple une intensité dans la gamme 4-20 mA).

Les capteur-transmetteurs passifs ne sont pas alimentés en 220 V. dans ce cas, il faut ajouter un générateur.

Le choix du corps d'preuve est effectué en fonction du procédé. Pour le choix du transmetteur, il est effectué en fonction de la nature du signal d'information transmis.

Chaque instrument a au moins une entrée et au moins une sortie. Pour les instruments à réponse linéaire, la correspondance entre entrée et sortie est proportionnelle :

$$\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}$$



Figure 1.15 : Entrées- sorties d'un transmetteur.

Exemple :

Un exemple pratique en est un transmetteur de pression, dans ce cas, avec une plage d'entrée de 0 à 70 bar et une sortie de 4-20 mA.

$$\frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} = \frac{y - y_{\min}}{y_{\max} - y_{\min}}$$

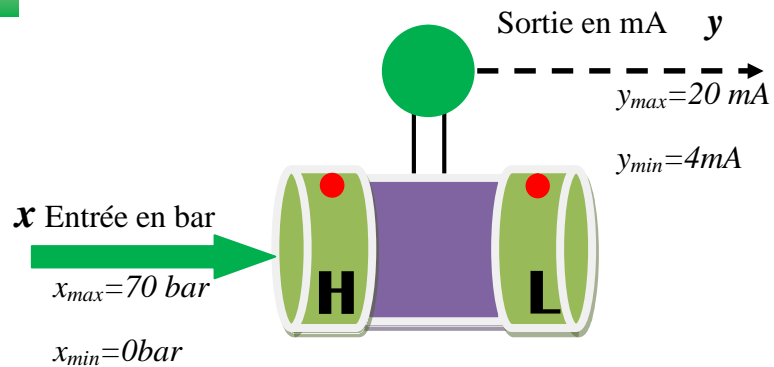


Figure 1.16 : Entrées- sorties d'un transmetteur de pression différentielle.

$$\frac{x - 0}{70 - 0} = \frac{y - 4}{20 - 4} \Rightarrow \frac{x}{70} = \frac{y - 4}{16}$$

- Si la mesure en courant de sortie est 15 mA à partir de ce transmetteur de pression

$$16 \times x = 70 \times (y - 4) \Rightarrow x = \frac{70}{16} \times (y - 4) = \frac{70}{16} \times (15 - 4) = 48.125 \text{ bar}$$

Ce serait une tâche simple pour calculer la pression d'entrée correspondante à 48.125 bar

- Pour une pression d'entrée de 22 bar, on peut calculer facilement le courant généré par le transmetteur en sortie

$$16 \times x = 70 \times (y - 4) \Rightarrow \frac{16}{70} \times x = (y - 4) \Rightarrow y = \frac{16}{70} \times x + 4 = \frac{16}{70} \times 22 + 4 = 9 \text{ mA}$$

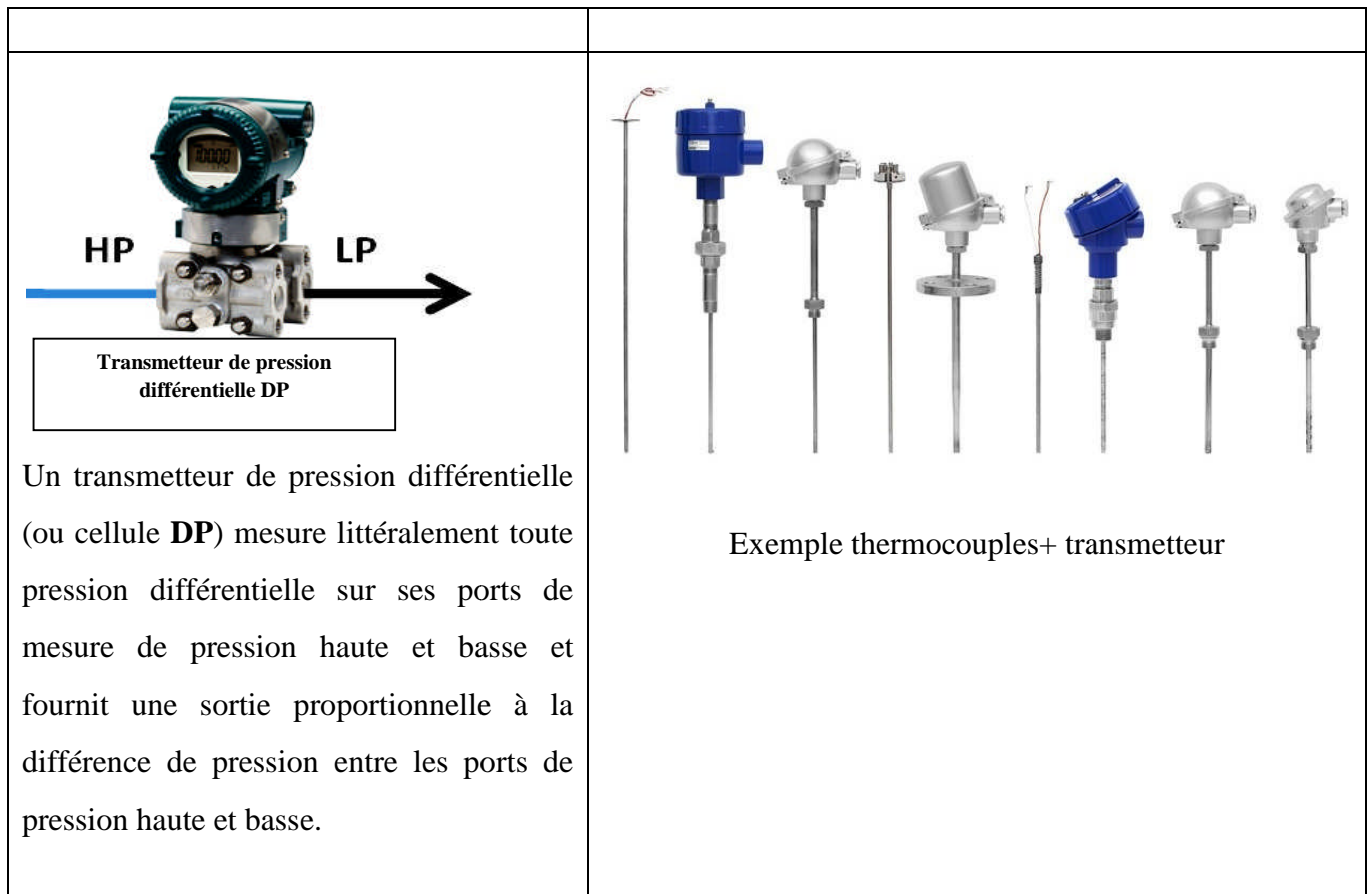


Figure 1.17 : Exemples d'un capteur-transmetteur.

Dans le cas de capteur- transmetteur DP, on prend comme exemple la mesure de pression d'un liquide dans une cuve, d'après les propriétés hydrauliques mécaniques d'un liquide à l'intérieur d'un récipient, le liquide exerce une pression spécifique sur le fond du récipient, en fonction de la hauteur du niveau de liquide (h = mètres), de la densité (g = 9,8 m / s) et la densité (rho kg / m³) du liquide.

La formule pour calculer cette pression est :

$$P = \rho \times g \times h$$

Une cellule DP peut ainsi être utilisée pour mesurer la pression du liquide au fond de la cuve et mise à l'échelle pour donner une valeur de niveau de pourcentage proportionnelle à la pression mesurée.

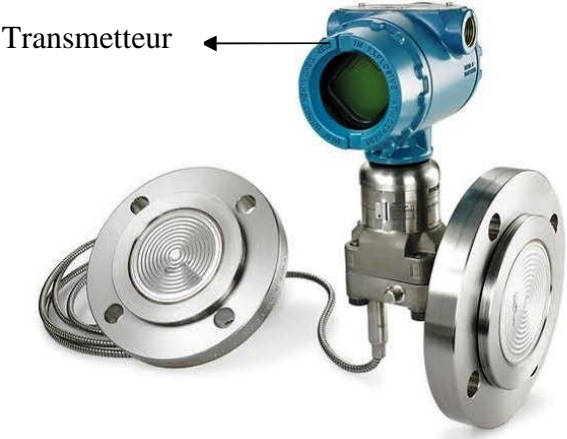

	
<p>Transmetteur de diaphragme à distance pour application sous vide.</p>	<p>Un débitmètre à orifice pour mesurer le débit de pétrole, de gaz et d'autres liquides acheminés par le pipeline.</p>

Figure 1.18 : Exemples d'un capteur-transmetteur.

3. Les signaux de communication- câblage entre différents organes :

3.1. Nature des signaux transmis :

Généralement l'information se transmet en utilisant un support physique facilement contrôlable. Il sera soit électrique soit pneumatique (pressions d'air dans des tubes).

- **Signal électrique - Intensité électrique** : Les signaux de communication sont en général un courant continu variant de 4 à 20 mA. Suivant le type de capteur utilisé, deux cas peuvent être trouvés : Un capteur passif nécessite d'utiliser un générateur externe et Un capteur actif c'est lui qui est un générateur.

Le signal électrique, contenant l'information sur y, est émis par le capteur-transmetteur sous forme d'une intensité électrique, le courant transite par le régulateur et retourne au capteur puisque la boucle

de courant est fermée. Le régulateur mesure ce courant lors de son passage et connaît ainsi l'information véhiculée.

➤ **Signal électrique - Tension électrique :**

L'information avec ce type de signal est transmise de la même façon que pour le 4-20 mA mais avec maintenant une tension normalisée qui varie de 0 à 10 V ou 0 à 5 V.

➤ **Signal pneumatique –Pression :**

L'information avec ce type de signal est transmise de la même façon que pour le 4-20 mA mais avec un signal transmis dans ce cas est une pression qui varie entre 0,2 et 1 bar.

Exemple:

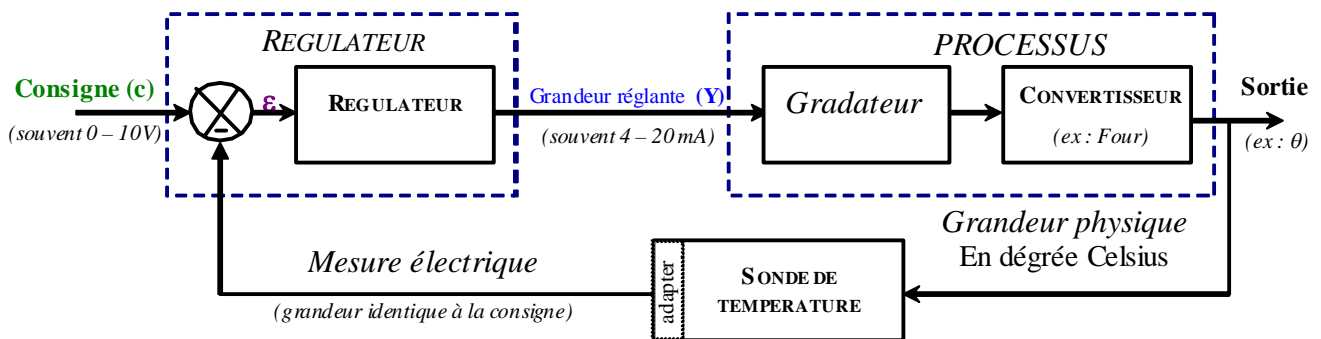


Figure 1.19 : chaîne de mesure.

4. Exemples de systèmes de régulation :

Exemple 01 :

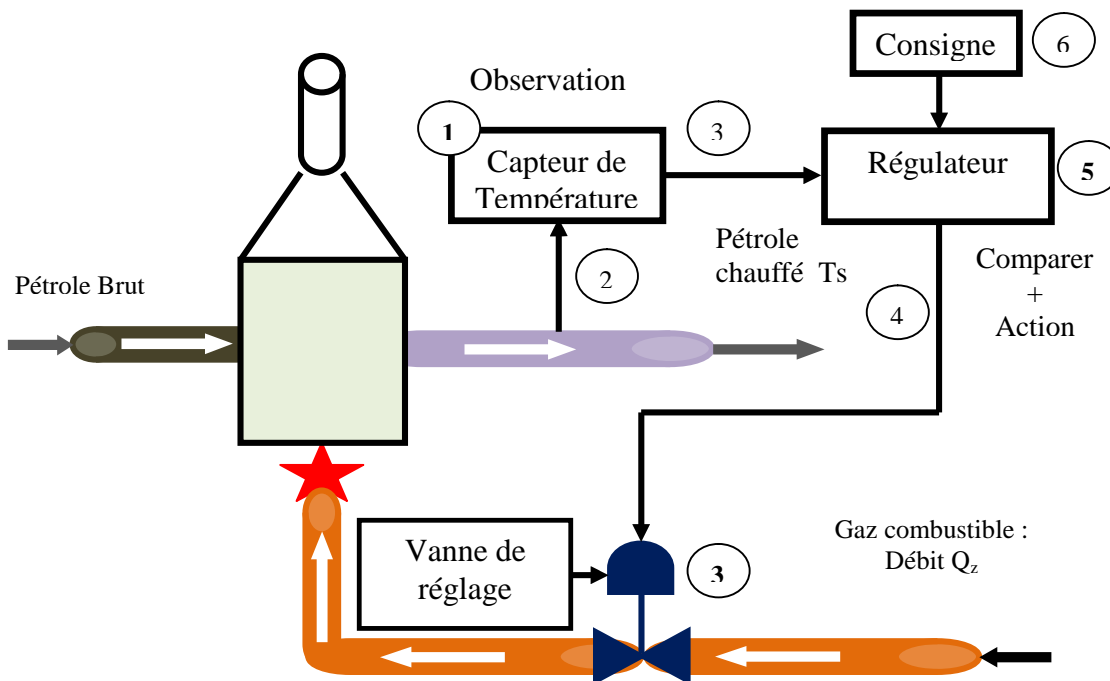


Figure 1.20 : Exemples d'une régulation de température.

- (1) **Capteur** : contrôle la grandeur réglée (2) et en rend compte au régulateur. Il doit en donner une image fidèle. Sa sensibilité impose les limites de la précision de la régulation.
- (3) **Actionneur (organe de réglage)**: il maîtrise la puissance à fournir au processus à partir du signal issu du régulateur (4).
- (5) **Régulateur** : il élabore un signal de commande à partir de l'écart (erreur) entre l'entrée (consigne) (6) et la mesure (3) et permet d'améliorer les performances du système.

➤ **Remarque :**

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

Exemple 02 :

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

Exemple 03 :

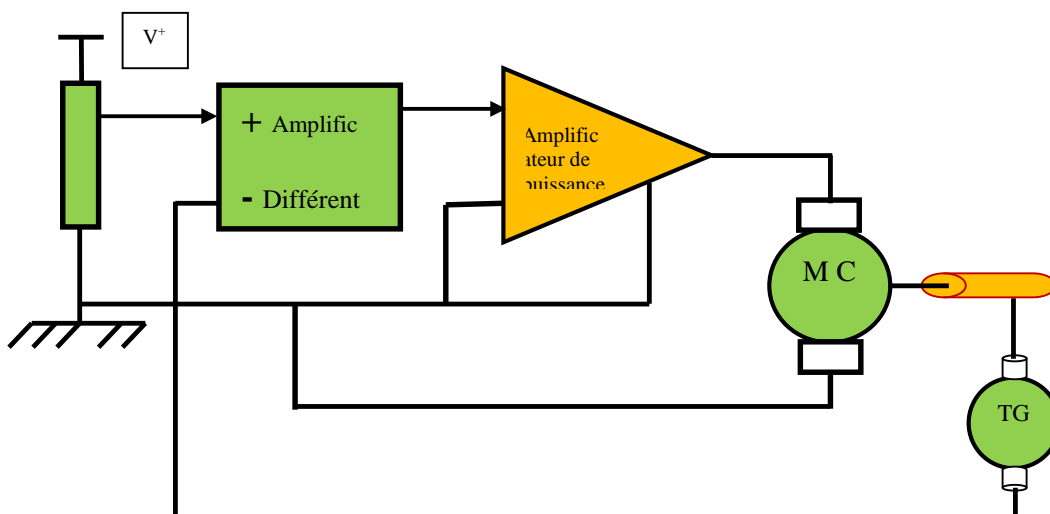


Figure 1.21 : Exemples d'une régulation de vitesse d'un moteur à courant continu.

5. Distinction asservissement/ régulation

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:

5.1. Un asservissement impose à la grandeur de sortie (grandeur à régler) du système de suivre rapidement les variations de la consigne avec une certaine précision (la grandeur de sortie est identique ou proportionnelle à une grandeur d'entrée) (ex : la position de l'antenne d'un radar de poursuite de satellites doit suivre la consigne imposée par la position du satellite chaque instant ; poursuite de **trajectoire** \Leftrightarrow consigne variable).

Un **système** asservi est un système dit suiveur, c'est la consigne qui varie.

Exemple : une machine outil qui doit usiner une pièce selon un profil donné, un missile qui poursuit une cible, pilotage automatique d'un avion.

- Radar de poursuite de satellites: Grandeur réglée est la position de l'antenne Consigne est la position du satellite.

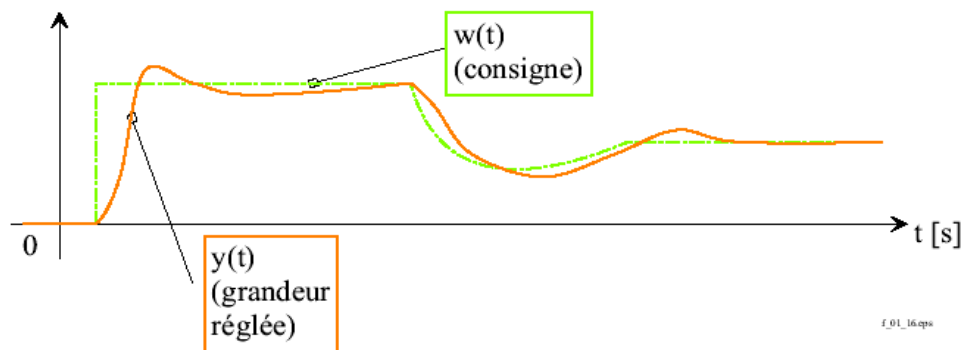


Figure 1.22: Principe d'asservissement vs régulation.

5.2. Une 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 \Leftrightarrow **consigne fixe** : la température dans un logement doit être constante quelles que soient les conditions extérieures).

Dans une **régulation**, la consigne est **fixée** et le système doit compenser l'effet des perturbations,

Exemple : le réglage de la température dans un four, de la pression dans un réacteur, le niveau d'eau dans un réservoir.

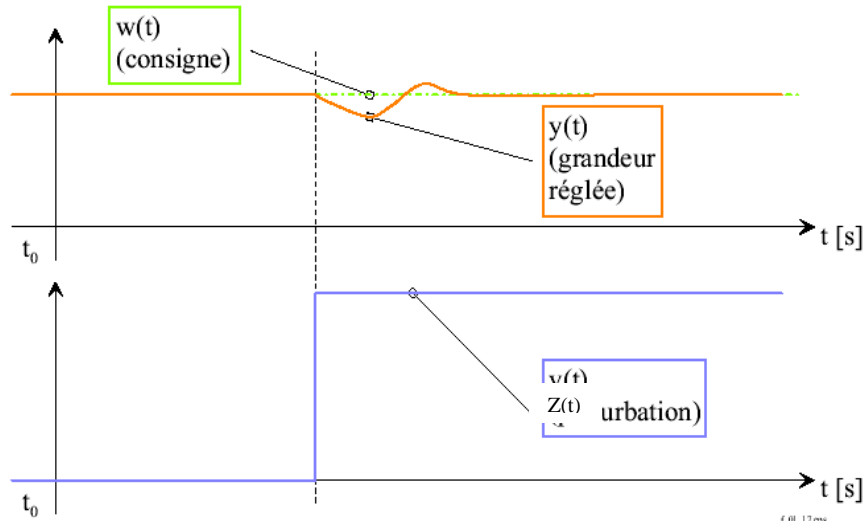


Figure 1.23: Principe de régulation (rejet de perturbation) vs asservissement.

5.3.Exemples :

5.3.1. Exemple 01:

On prend comme exemple un conducteur de voiture qui veut maintenir l'accélérateur réglé pour deux positions 60km/h et 100km/h.

Notion de perturbations extérieures (régulation) :

La voiture roule sur le plat à une vitesse constante 60km/h, une pente se présente et entraîne un ralentissement du véhicule qui reprend sa vitesse initiale dès que la voiture roule de nouveau sur le plat.



Figure 1.24 : exemple de régulation (rejet de perturbation).

Suivant le type de voiture (puissance), le ralentissement provoqué par la montée ne sera pas le même. Ceci introduit la notion de caractéristique du système.

Notion de changement de la consigne (asservissement) :

La voiture roule sur le plat à 60km/h, lorsque le conducteur veut rouler à 100km/h, donc il doit passer à la seconde position de l'accélérateur.



Figure 1.25 : Exemple d'asservissement.

5.3.2. Exemple 2 : Asservissement de température.

On souhaite que la température dans un four pour traitement thermique, à partir de la température ambiante, monte lentement de 10°C par minute jusque 200°C, puis reste constante pendant 10 minutes, puis monte rapidement de 20°C par minute jusque 540°C, reste alors constante pendant 15 minutes, avant de redescendre de 10°C par minute jusque 250°C...

Cette fonction du temps ainsi décrite est la loi de consigne $W(t)$. C'est l'utilisateur de l'asservissement qui choisit la loi de consigne un **signal en fonction** du temps. L'automaticien doit réaliser l'asservissement pour qu'il fonctionne pour toute loi de consigne dans des limites (en valeurs extrêmes et en vitesse maximale de variation) définies dans le cahier des charges.

5.3.3. Exemple 3 : Régulation de température.

Un cas particulier consiste à définir une loi de consigne **constante**. Dans ce cas le mot **asservir** devient **réguler**, et **l'asservissement** devient une **Régulation**.

La régulation est un cas particulier de l'asservissement. La de régulation consiste donc à maintenir une grandeur physique $y(t)$ **élaborée** par un processus technologique (t représente bien l'entendu de temps) à une valeur constante.

6. Notion de Boucle ouverte, Boucle fermée:

6.1. Boucle ouverte:

Un système est en **boucle ouverte**. La sortie y peut être réglée en agissant sur l'entrée u .

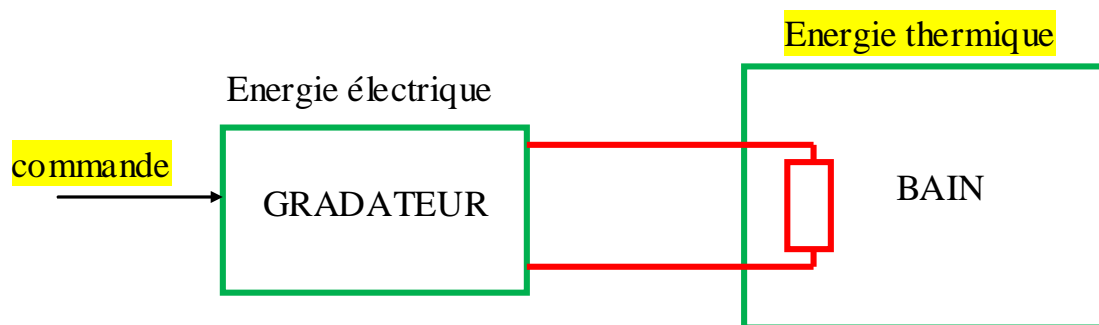


Figure 1.26 : Exemple de régulation en boucle ouverte

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).

7. Qualités d'une bonne régulation :

L'objectif d'un asservissement ou d'une régulation est **assuré** le bon fonctionnement d'un système (procédé) selon un critère **prédéfini** par un **cahier** des **charges**, ce cahier des charges définit des critères qualitatifs à imposer qui sont traduits le plus souvent en critères quantitatifs, comme par exemple **de stabilité, de précision et de rapidité**.

La boucle de régulation peut apporter les avantages suivants:

- **Améliorer** la rapidité de fonctionnement du système
- Augmenter la précision
- **Diminuer** l'influence des perturbations
- Rendre contrôlable un système qui ne l'est pas en boucle ouverte
- **Diminuer** les effets non linéaires des processus

Voici quelques exemples d'objectifs qualitatifs : Obtenir une combustion **correcte** Gaz- Air dans un **bruleur**, maintenir un **débit** de fluide **constant** dans une conduite en fonction des besoins, maintenir une qualité constante d'un mélange de produits dans un réacteur.

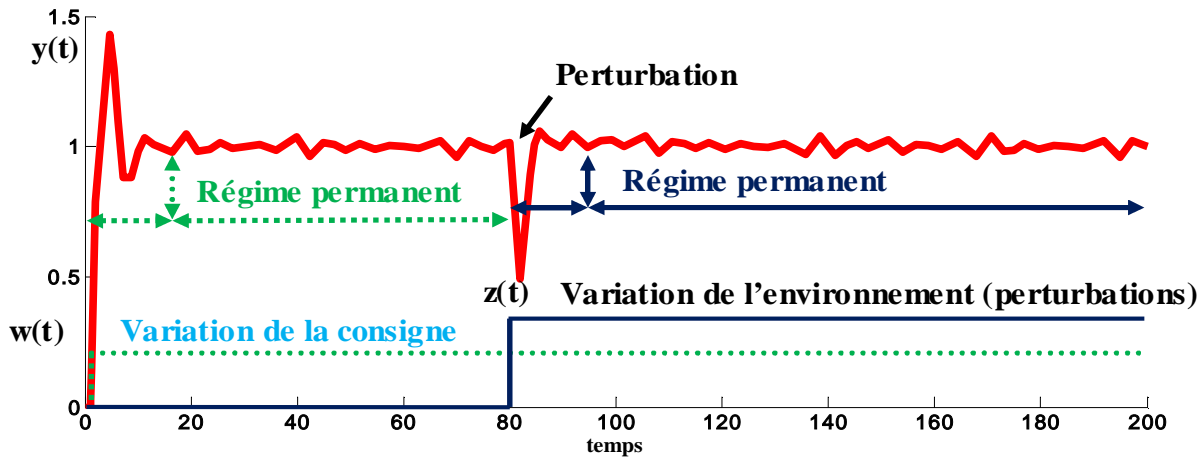


Figure 1.27: critère de performances d'une régulation.

7.1. Stabilité

Une qualité essentielle et surtout indispensable pour une de régulation est sa stabilité. Une définition simple de cette propriété est la suivante :

- **Définition 01:** Un système est stable si écarté de sa position d'équilibre après un régime transitoire il revient à sa position initiale.
- **Définition 02:** Un procédé (système) est dit naturellement stable si à une variation **finie** de la grandeur **réglante** x (entrées **bornées**) correspond une variation **finie** de la grandeur **réglée** (sortie **bornée**).

Dans la figure ci-dessous (**Fig 1.28**), trois évolutions possibles pour des systèmes **linéaires** sont tracées: stable et instable de type système oscillant, et oscillateur « parfait »: cas limite stable et instable (une moindre variation de paramètre système entraîne soit un état stable, soit un état instable).

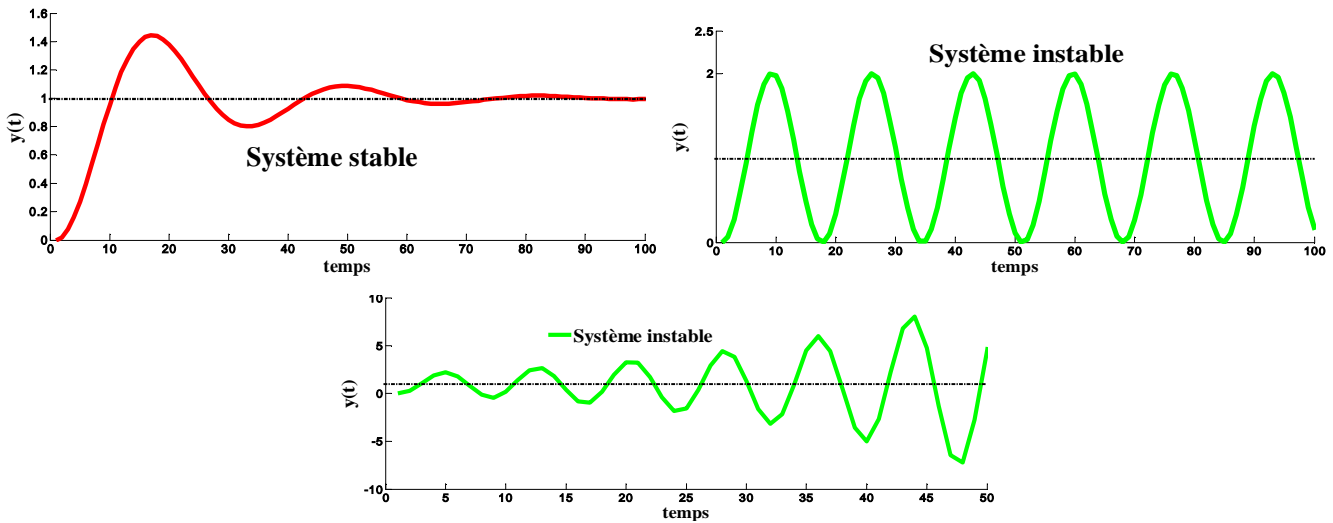


Figure 1.28: Critère de performances d’une régulation (stabilité).

Le système constitué du procédé et de la boucle de régulation est dit stable si, soumis à une perturbation ou à une variation de consigne, la grandeur réglée retrouve un état stable.

7.2. Paramètres caractéristiques de la réponse d’un procédé

La connaissance des paramètres caractéristiques d’un procédé aide à la mise au point de la boucle de régulation.

7.2.1. Caractéristiques statiques d’un procédé

➤ **7.2.1.1. Caractéristique statique:**

La caractéristique statique est la courbe représentative de la grandeur de sortie **y** en fonction de la grandeur d'entrée **x**, dont on ne peut tracer la caractéristique statique que d’un système stable

$$y = f(x)$$

Généralement, pour tracer cette courbe on prend en compte les valeurs de la sortie, en régime stable, en fonction du signal de commande. La figure suivante représente la caractéristique linéaire d’un transmetteur (niveau-courant)

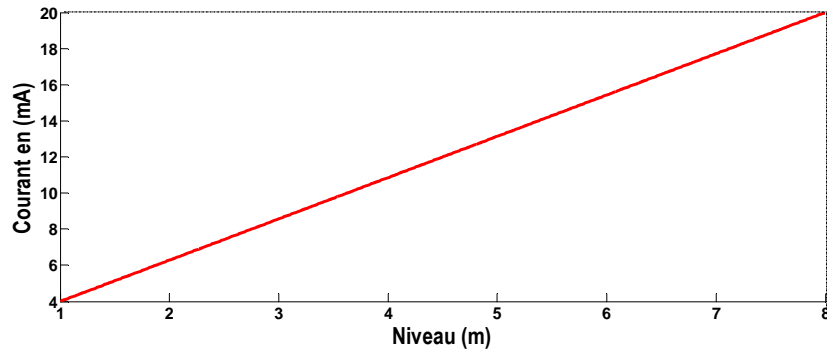


Figure 1.29: Caractéristiques statiques d'un système.

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

Pour tracer cette courbe on prend en compte les valeurs de la sortie, en régime Stable (régime statique), en fonction du signal de commande.

7.2.1.2. Gain statique :

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

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Le gain statique d'un système est constant.

7.2.1.3. Erreur statique :

Pour une boucle stable, il est naturel de vouloir contrôler en régime permanent l'écart existant entre la consigne et la grandeur de sortie réglée ou l'influence d'une perturbation sur la sortie. Cette qualité est la précision qui est différente suivant la nature de la variation de consigne ou de la perturbation.

Si le système est stable, l'erreur statique (ou de position) ε est l'écart entre la consigne W (une entrée échelon) et la mesure de la valeur réglée y_m en régime permanent (voir figure ci-dessous).

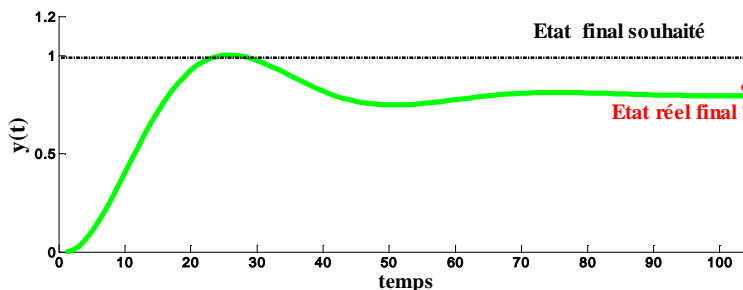


Figure 1.30: Erreur statique d'un système.

$$\epsilon = W - y_{m\infty}$$

- Il existe deux types d'erreur pour les processus non intégrateurs : l'erreur statique : pour une entrée de type échelon (ex : consigne W fixe) ; l'erreur dynamique (ou erreur de traînage) : pour une entrée de type rampe (ex : consigne W variable en fonction du temps).
- Pour éliminer ces erreurs, le régulateur doit comporter un ou plusieurs intégrateurs (action intégrale).
- 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.
- Le calcul de l'erreur statique n'est valide que si le système est stable. Il faut donc s'assurer de stabiliser le système étudié avant toute considération de l'erreur statique.

7.3. Caractéristiques dynamiques d'un procédé

7.3.1. Temps de réponse (mesure de la rapidité)

Une façon d'évaluer la rapidité est l'utilisation de la notion de temps de réponse à $x\%$ qui est le temps que mette la mesure pour entrer définitivement dans une zone encadrant à $\pm x\%$ la valeur finale.

Donc le temps de réponse, c'est l'aptitude du système à suivre les variations de la grandeur réglante. Dans le cas d'un échelon de la grandeur réglante, la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse. Dans l'exemple présenté par la figure (1.31), on mesure le temps de réponse à 20%, à 10% et à 5%.

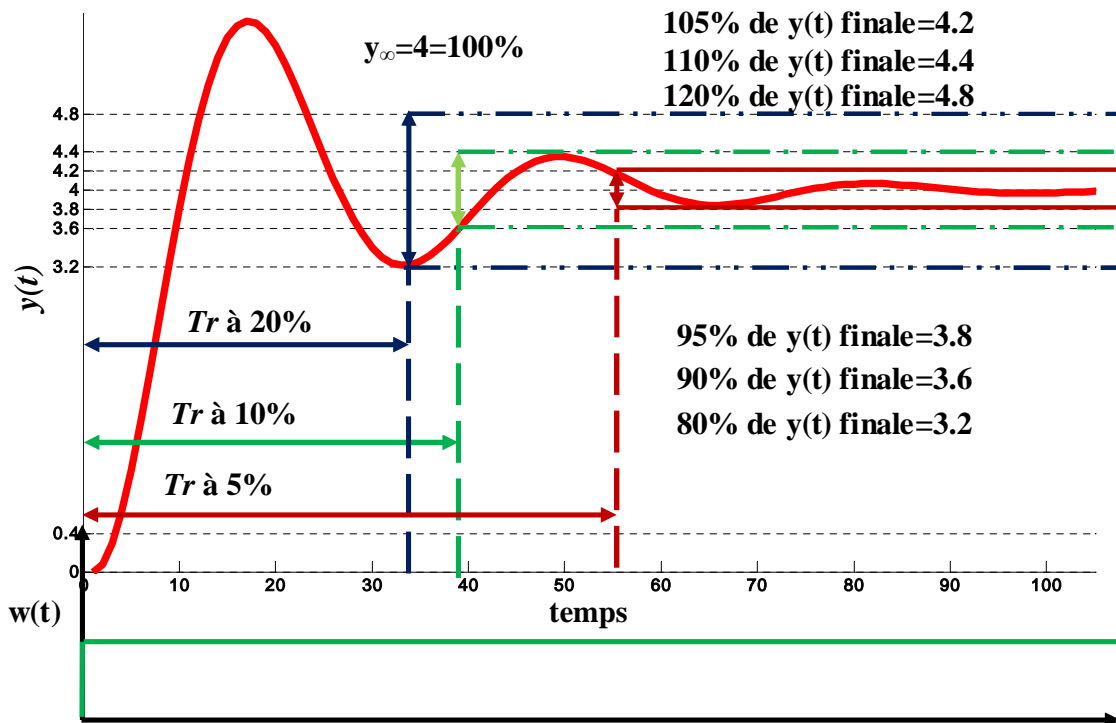


Figure 1.31: Exemple du temps de réponse

Il faut noter que : Au sens du cahier des charges, les valeurs 5% et 1% sont les plus courantes.
 Le temps de réponse à 5% est le temps mis par la grandeur réglée pour atteindre l'état final à $\pm 5\%$ tout en se maintenant dans cette plage $\pm 5\%$:

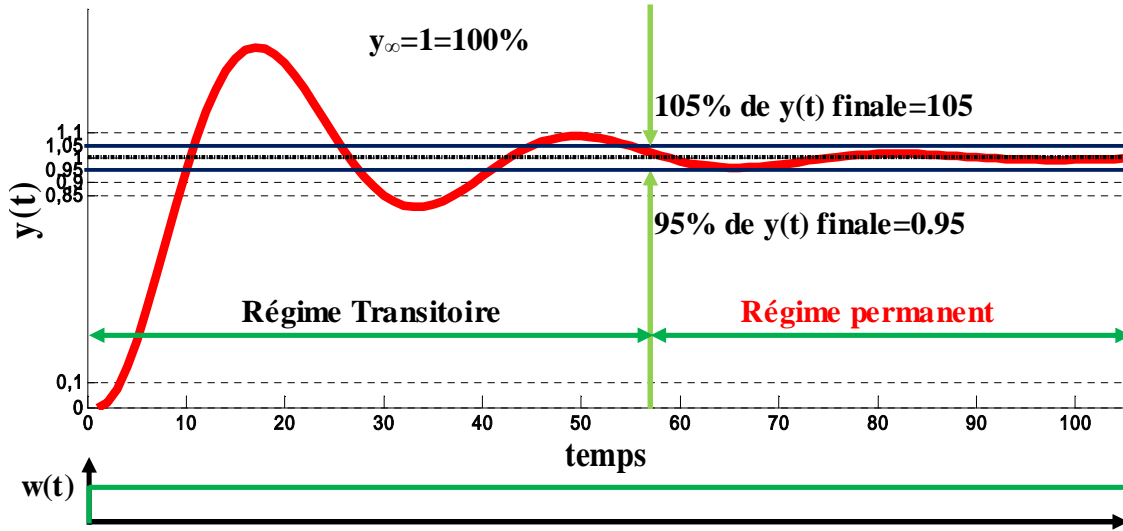


Figure 1.32: Notion du temps de réponse et régime transitoire.

7.3.2. 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 certaine régulation, aucun dépassement n'est toléré. Dans la réponse indicielle de la figure (1.33) le premier dépassement est de 20 %.

Dans la figure (1.33), certaines caractéristiques d'un système sont relevées à partir de la réponse indicielle. (Réponse à un échelon).

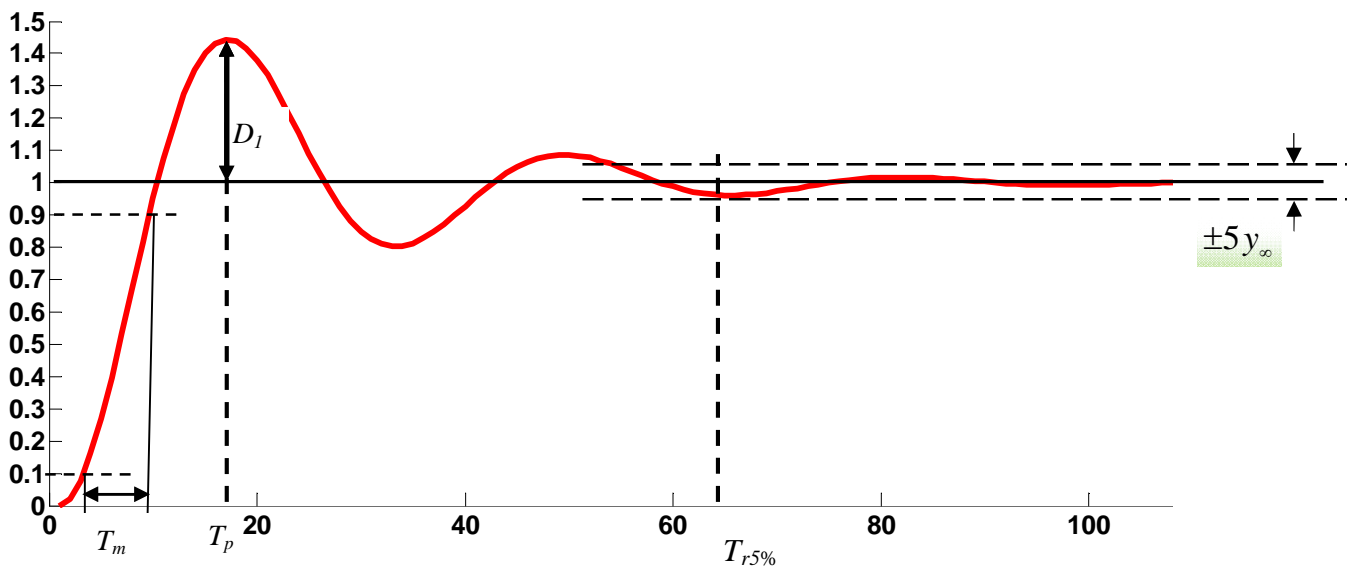


Figure 1.33: Caractéristiques dynamique et statique d'un système.

T_m Temps de montée :	Intervalle de temps correspondant à la croissance de s de 10 % à 90 % de sa variation totale
$Tr_{5\%}$ Temps de réponse :	Le temps nécessaire pour qu'elle demeure dans l'intervalle $\pm 5\%$ de la valeur finale.
T_p Temps de premier pic :	Le temps mis par le système pour atteindre le premier pic du dépassement
D_1 : premier Dépassement :	La différence entre sa valeur maximale et la valeur finale (parfois exprimée en valeur relative).

Figure 1.1: Caractéristiques dynamique et statique d'un système.

7.3.3. L'amortissement

Généralement on définit l'**amortissement** par l'allure de la réponse: système très amorti, amorti ou peu amorti. Il est caractérisé par l'amplitude maximum du dépassement de la valeur finale et le nombre d'oscillations.

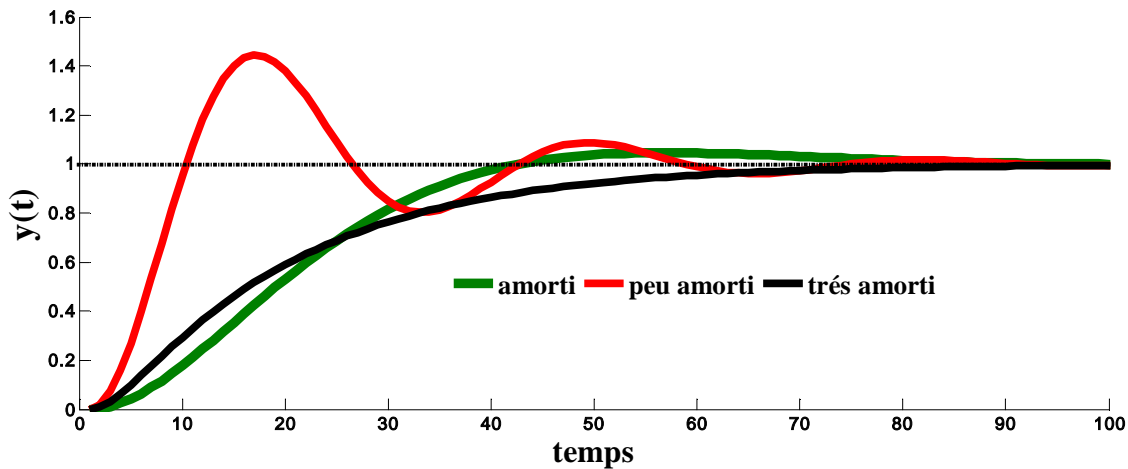


Figure 1.34: Amortissement d'un système.

Critères de performance d'une régulation

Obtenir un temps de réponse le plus court possible (rapidité, stabilité) avec une meilleure précision

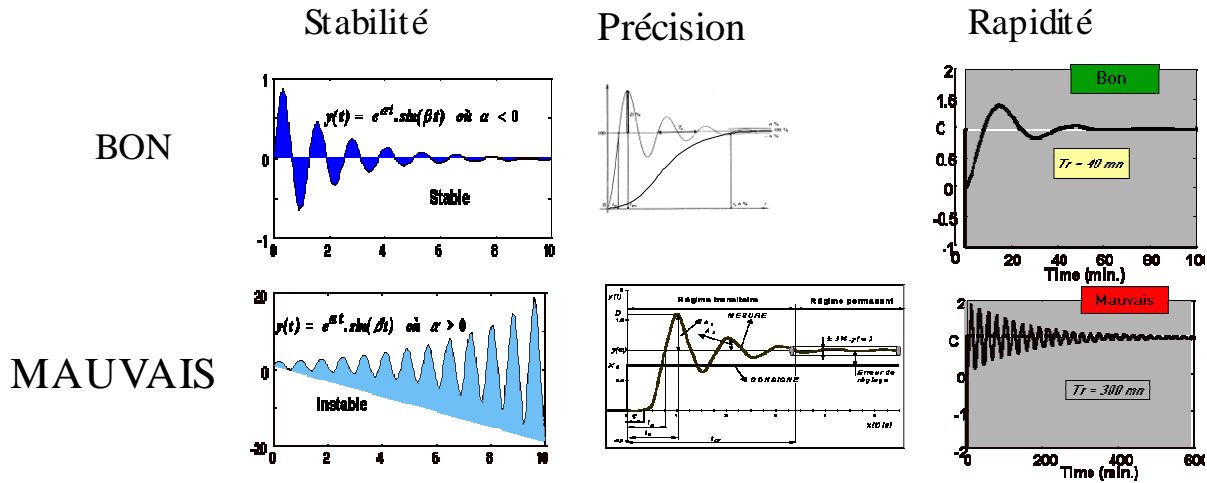


Figure 1.35: critère de performances d'une régulation.

8. Schéma de présentation des systèmes de régulation Industrielle

8.1. Schéma fonctionnel

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

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

Notion Fonction de transfert (transmittance, Schémas blocs)

Chaque système peut être représenté par un schéma bloc liant une grandeur d'entrée et une grandeur de sortie. La transmittance est le coefficient (ou fonction) par lequel on applique l'entrée pour connaître la sortie.

Exemples :

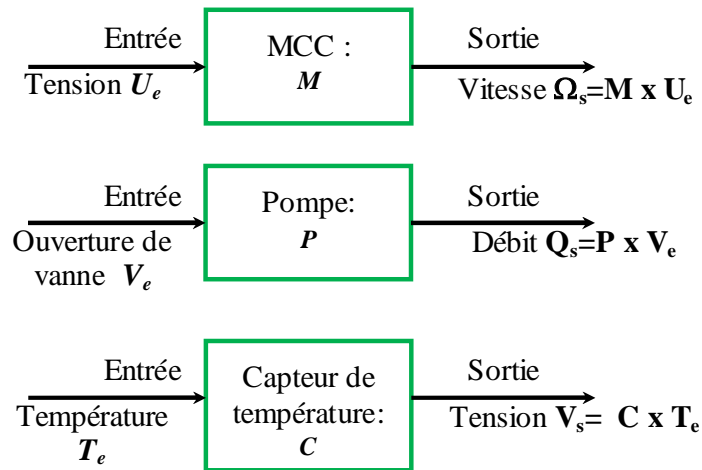


Figure 1.36: Exemples de transmittance

8.2. Schémas de représentation Schéma TI

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

8.3. Régulation de température d'un échangeur thermique

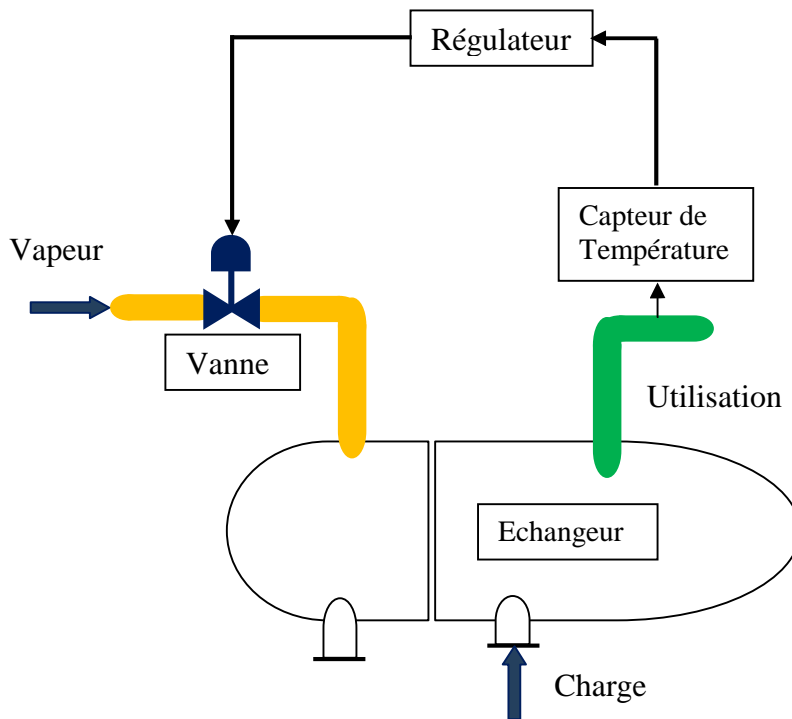


Figure 1.37: Représentation d'une régulation de température.

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,
- Opérateurs de calcul arithmétiques et dynamiques.

NOM DE L'INSTRUMENT	FONCTION
Capteur Transmetteur	Elément servant à l'acquisition d'une grandeur physique et à la convertir en un signal standard.
Régulateur Pneumatique ou électrique (CORRECTEUR) Numérique S.N.C.C. / A.P.I Calculateur	Comparaison entre la grandeur réglée et la consigne (calcul de l'écart ε). Traitement du signal ε par un algorithme de régulation.
Organe de réglage : Vanne automatique, unité à thyristor moteur...	Action de correction sur la grandeur réglante. Peuvent être commandés directement par des signaux standards d'instrumentation ou indirectement par l'intermédiaire d'un convertisseur.
Indicateur.	Fonction de tendance.
Enregistreur.	Fonction de mémorisation
Sommation, multiplication, division, racine carrée	Fonction de calcul
Pressostat, alarme, relais à seuil...	Fonction de sécurité

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.

8.3.1. Lettres pour le schéma TI

Première lettre		Les suivantes	
Grandeur réglée	Lettre	Fonction	Lettre
Pression	P	Indicateur	I
Température	T	Transmetteur	T
Niveau (Level)	L	Enregistreur (<i>Recorder</i>)	R
Débit (<i>Flow</i>)	F	Régulateur (<i>controller</i>)	C
Analyse	A	Capteur	E
Pression Différentielle	DP		
Densité	D		

Deux exemples de schéma complet sont fournis sur les deux figures suivantes :

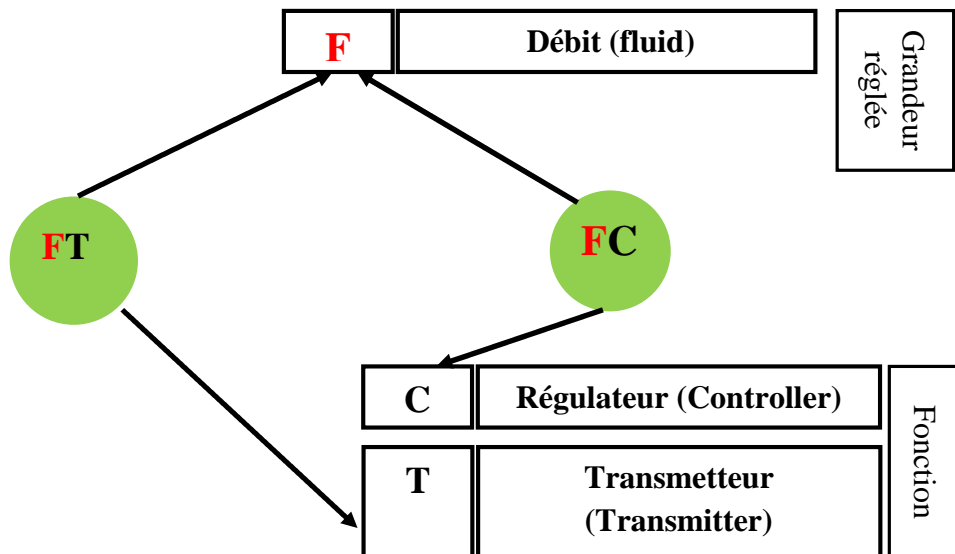


Figure.1.38: Schéma TI Régulateur et Transmetteur de débit.

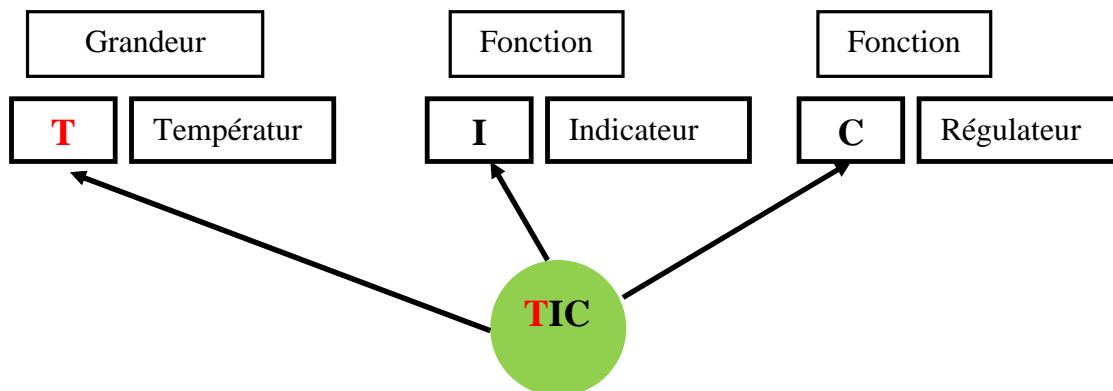


Figure.1.39: Schéma TI Régulateur Indicateur de Température

8.4. Présentation des signaux

Liaison	Type
	Liaison au procédé (système)
	Liaison par Signal pneumatique
	Liaison par signal électrique
	Liaison Numérique
	Liaison Hydraulique

8.5. Représentation des appareils de mesure

La représentation des appareils de mesure utilise un cercle, avec indication de la localisation de l'appareil, conforme à la règle suivante:

Symbole	Fonction ou type d'appareil
	Montage sur site
	Montage en salle de contrôle
	Montage en local technique
	Indicateur de pression



Exemple :

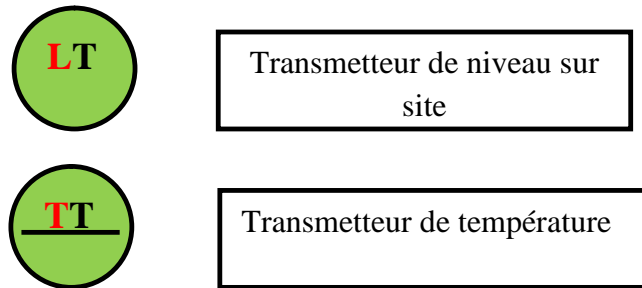


Figure.1.40: Schéma TI d'un Transmetteur

8.6. Représentation des appareils de calcul

La première lettre indique toujours la **grandeur réglée**. La fonction (2^{ème} lettre) est ici représentée par **Y**, dont **Y** (en 2^{ème} lettre) signifie "fonction mathématique" (calcul, conversion.)

Dans le cadre, indiquer la fonction mathématique ou le calcul réalisé Forme générale Remplacer le "point" par la grandeur réglée.

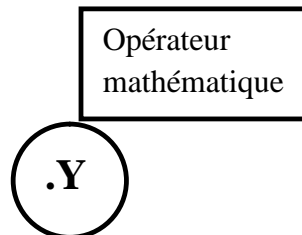


Figure.1.41: Schéma TI d'un opérateur mathématique

On peut trouver dans le cadre les symboles suivants :

Symbole	Fonction
√	Extracteur de racine carrée
Σ	Sommateur
I/P	Conversion Intensité - Pression
<	Sélecteur de Minimum
>	Sélecteur de Maximum
∫	Intégrateur
%	Proportion
x	Multiplication
P/I	Conversion Pression - Intensité

Exemple :

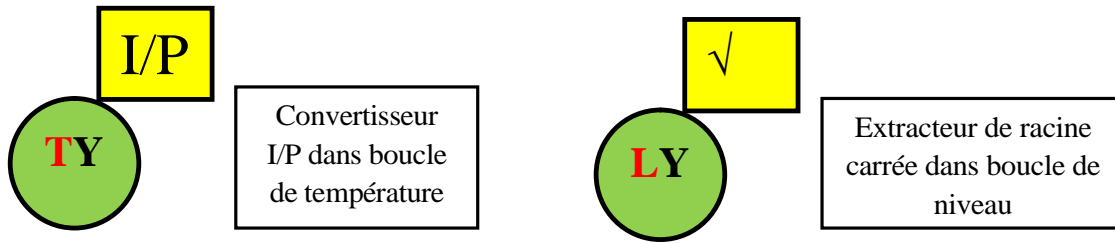


Figure.1.42: Schéma TI d'un convertisseur

8.7. Présentation des régulateurs :

1^{ère} lettre : **grandeur réglée**. En 2^{ème} ou 3^{ème} lettre : lettre **C** (*Control en anglais ; régulateur en français*).
 Eventuellement, **I** en 2^{ème} lettre : indicateur (c'est-à-dire présence d'une face avant, d'un "écran").

Exemple :

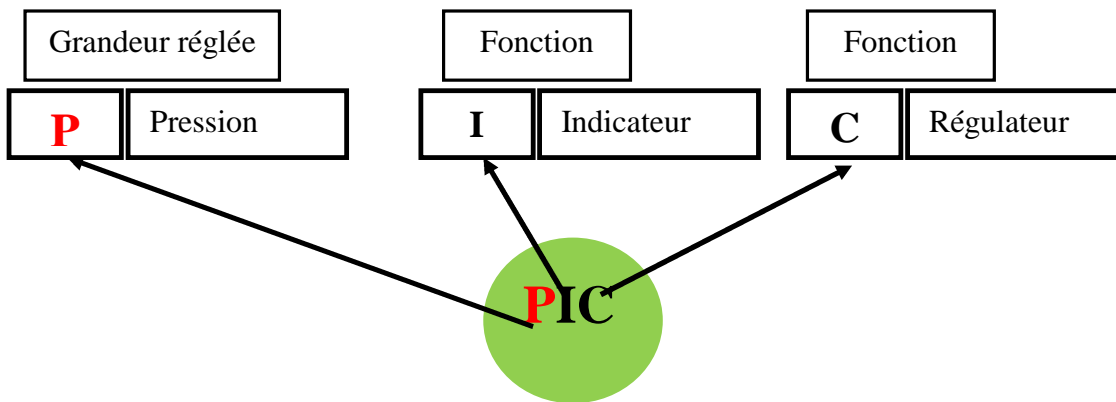


Figure.1.42: Schéma TI d'un régulateur.

8.8. Numérotation des instruments

Les instruments sont numérotés en fonction de la boucle dans laquelle ils sont insérés. Ce numéro est placé dans la partie inférieure du symbole.

Exemple:

La conversion (**FY**) ci-dessous appartient à la boucle de débit n°03. Tous les appareils gérant cette même grandeur physique porteront le même numéro.

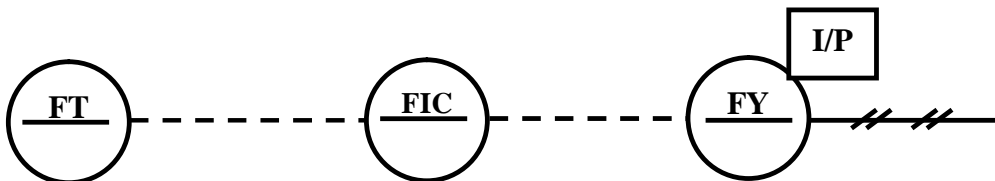


Figure.1.43: Schéma TI (Numérotation des instruments)

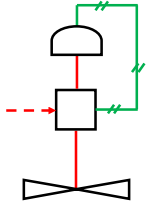
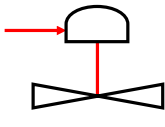
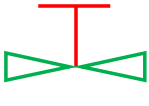
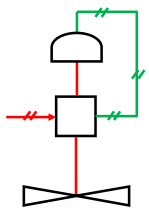
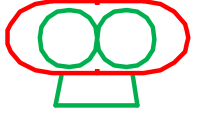
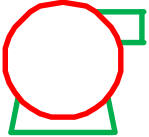
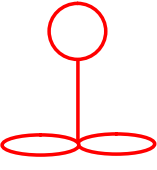
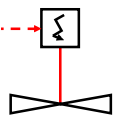
Chaque appareil doit être repéré de manière unique sur un site. Il ne doit exister qu'une seule conversion (**FY 03**) sur le site.

	Grandeur physique mesure première lettre	Fonction des instruments autres lettres
A	Analyse	Alarme
B	Combustion	Au choix de l'utilisateur
C	Conductivité électrique	Régulation
D	Masse volumique	Différence
E	Tension, force électromotrice	Elément primaire
F	Débit	Rapport (fraction), ferme
G	Laisse au choix de l'utilisateur	Glace (sans mesure)
H	Commande manuelle	H – haut. Hh – très haut
I	Intensité d'un courant électrique	Indication
J	Puissance	Scrutation
K	Temps ou programmation	Poste de contrôle
L	Niveau (<i>Level</i>)	L – bas. Ll – très bas, lampe témoin
M	Humidité	Moyen intermédiaire
N	Viscosité	Laisse au choix de l'utilisateur
O	Laisse au choix de l'utilisateur	Ouvert diaphragme (restriction)
P	Pression ou dépression (vide)	Point d'essai
Q	Qualité, comptage	Intègre ou totalise intégration ou totalisation
R	Rayonnement	Enregistrement ou imprimeur
S	Vitesse ou fréquence	Communication, sécurité
T	Température	Transmission
U	A variables multiples	Multifonction
V	Grandeurs mécaniques (vibrations)	Vanne
W	Masse ou force	Protection doigt de gant
X	Laisse au choix de l'utilisateur	Coordonnée
Y	Evénement	Relais
Z	Position, longueur	Elément de régulation final

Tableau. Code servant à identifier les fonctions des instruments

8.9. Représentation des actionneurs et organes de réglage:

Les actionneurs sont des vannes, des pompes, des agitateurs (motorisés), des gradateurs, etc.

Actionneur	Type
	<p>Vanne de régulation avec positionneur pneumatique</p>
	<p>Vanne automatique</p>
	<p>Vanne manuelle</p>
	<p>Vanne de régulation avec positionneur électropneumatique</p>
	<p>Pompe volumétrique</p>
	<p>Pompe centrifuge</p>
	<p>Agitateur</p>
<p></p>	<p>Vanne automatique ; servomoteur à membrane</p>
	<p>Vanne Solénoïde (Electrovanne)</p>

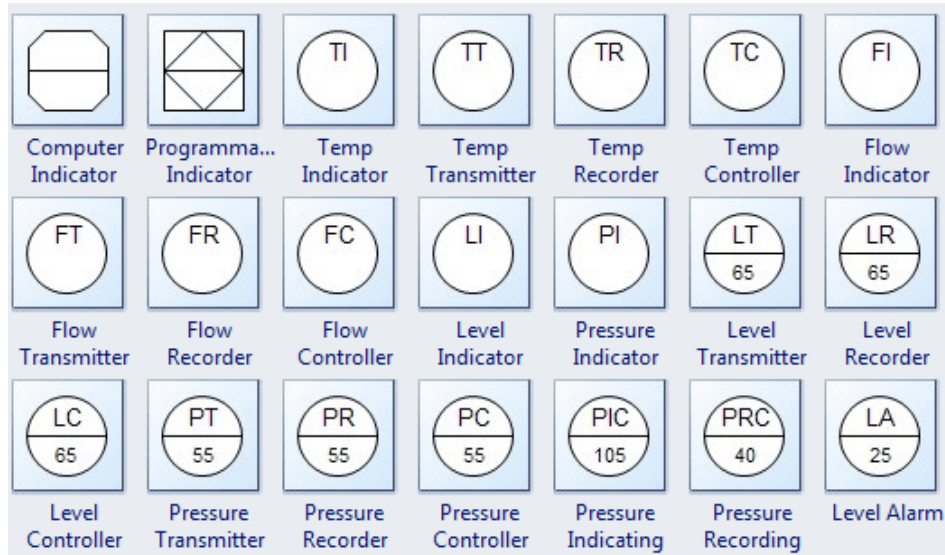


Figure.1.44: Schéma TI quelques exemples.

9. Modélisation

Dans toutes les disciplines, l'étude d'un processus physique/dispositif/mécanisme nécessite d'établir un modèle : pour comprendre et analyser le dispositif, pour pouvoir prédire son comportement, pour utiliser des outils de simulation.

La modélisation permet de décrire, sous forme d'équation, le comportement de chaque élément de la boucle de régulation.

Chaque élément de la boucle peut être modélisé:

- Le procédé ou chaîne directe (système + actionneur)
- Le capteur ou chaîne de retour
- Le correcteur

Chaque élément de la boucle est caractérisé par le **gain** direct:

Gain = écart grandeur de sortie / écart grandeur d'entrée

Gain du correcteur = $\frac{u(t)}{\varepsilon(t)}$

Gain du système = $\frac{y(t)}{x(t)}$

Gain du capteur = $\frac{y_m(t)}{y(t)}$

Gain de la boucle fermée = $\frac{y_m(t)}{W(t)}$

Exemple : le circuit RC Considérons un circuit électronique

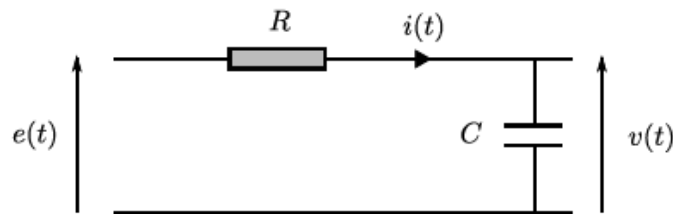
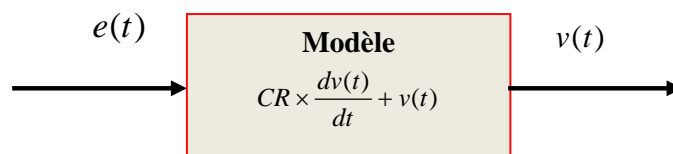


Figure 1.45: le circuit RC.

Appliquons la loi des mailles :

$$e(t) = R \times i(t) + v(t)$$

$$i(t) = C \times \frac{du_c(t)}{dt} = C \frac{dv(t)}{dt} \Rightarrow e(t) = CR \times \frac{dv(t)}{dt} + v(t)$$



Exemple : structure masse-ressort

Considérons une structure mécanique suivante :

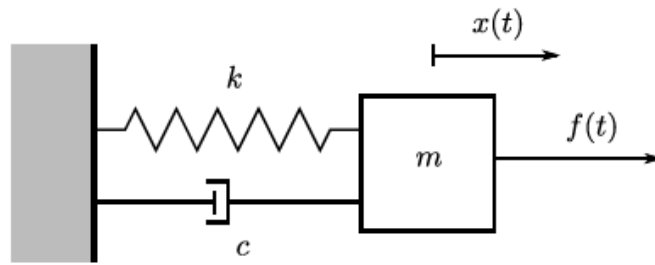


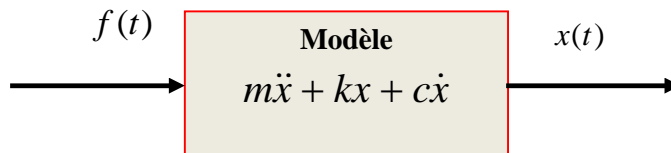
Figure 1.46: structure masse-ressort

Appliquons le principe fondamental de la dynamique

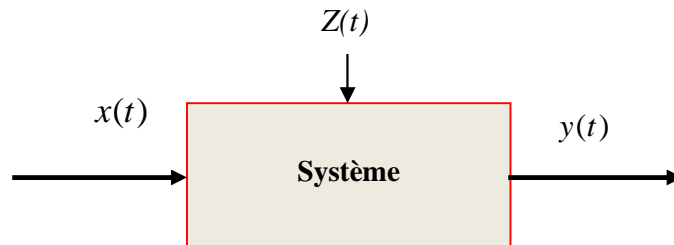
$$m\ddot{x} = \sum \text{forces} = f(t) - kx - c\dot{x}$$

Nous obtenons le modèle :

$$m\ddot{x} + kx + c\dot{x} = f(t)$$



Approche système L'automaticien adopte une approche générique



10. Identification :

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

Identifier un système, c'est rechercher à partir d'enregistrements (des réponses), les paramètres qui caractérisent son modèle. Dans cette partie, on présentera les méthodes d'identification les plus simples qui permettent de trouver un modèle de comportement du système sans matériel spécial et sans connaissances théoriques particulières.

10.1. Le choix du modèle

La recherche d'un modèle pour un procédé industriel est nécessaire et doit aboutir à un modèle représentant correctement le comportement du procédé. Cependant le modèle ne doit ni être trop sophistiqué au risque d'être incompatible avec le correcteur disponible, ni être trop simpliste pour ne pas masquer certains aspects néfastes au bon fonctionnement.

10.2. Identification en boucle ouverte (BO)

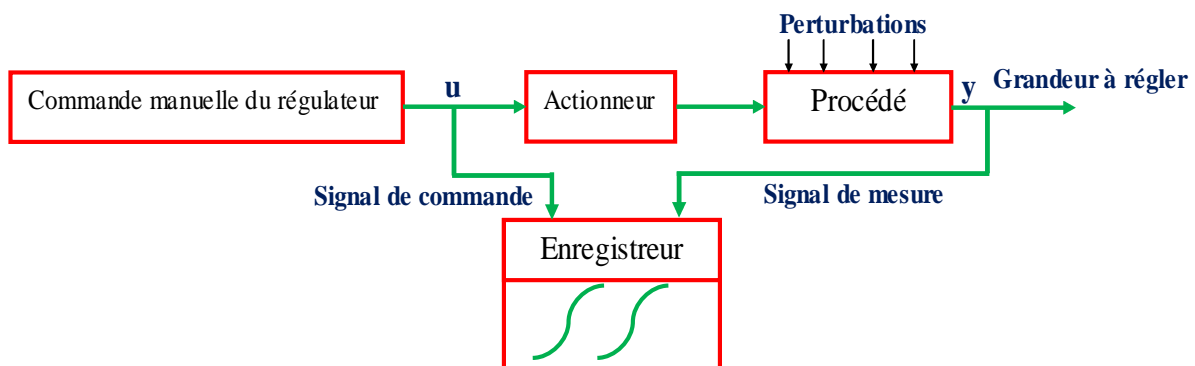


Figure. 1.47: Capture (enregistrement) des données en BO.

Lors d'un tel essai en boucle ouverte (BO) 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 un signal échelon (un saut) avec différentes valeurs afin d'exciter le système et enregistrer les signaux de commande et de mesure à l'aide de la fonction d'archivage de données qui servent à l'identification du système.

10.2.1. Méthodologie

- Régulateur en manuel \Rightarrow boucle ouverte.
- Régler le degré de réglage manuel U (signal de commande) au point de fonctionnement, attendre que l'état stationnaire soit atteint.
- Faire un échelon ΔU (commande manuelle) sur le signal de commande. Cet échelon doit être suffisamment grand afin d'obtenir une réponse sur l'enregistrement de la mesure exploitable et suffisamment faible afin de ne pas déranger la production et ne pas dépasser les limites de linéarité du procédé.
- Exploitation des données de l'enregistrement du signal de mesure $y(t)$.

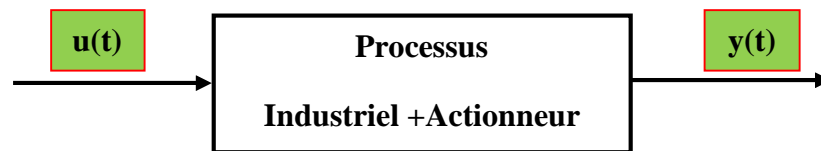


Figure. 1.48 : Système à identifier

10.3. Réponse du système à un échelon unité (réponse indicielle)

Pratiquement, l'essai est très rapide, il suffit de faire passer l'entrée de 0 à une valeur constante pendant un temps (donné) T_f , et d'enregistrer la sortie (réponse) en fonction du temps.

En principe, cette sortie doit être du même type que l'entrée si le système est linéaire, c'est-à-dire qu'au bout d'un certain temps correspondant à la durée du régime transitoire, la sortie doit rester constante. S'il en est autrement, le système n'est pas linéaire. Donc ce test permet de savoir si on est en présence d'un système linéaire ou non.

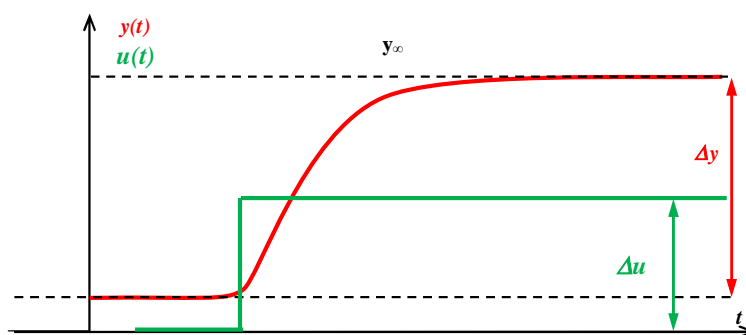


Figure. 1.49: Réponse indicielle en BO.

La figure (1.49), représente la réponse du système à un saut (en vert) et on observe la réponse du système (en rouge). Il se comporte comme un système de dominante du premier ordre, après le passage du régime transitoire la sortie devient constante en régime permanent.

10.3.1. Propriétés d'un système linéaire

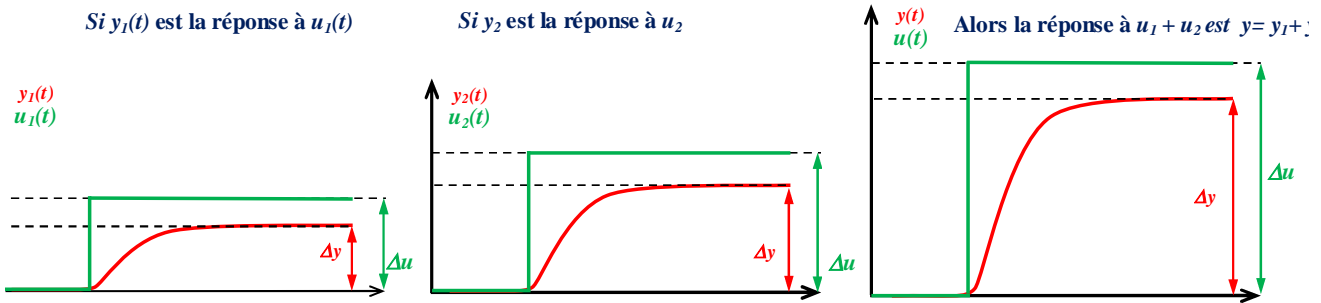


Figure. 1.50: Exemple du principe d'additivité.

10.3.2. Phénomène de saturation

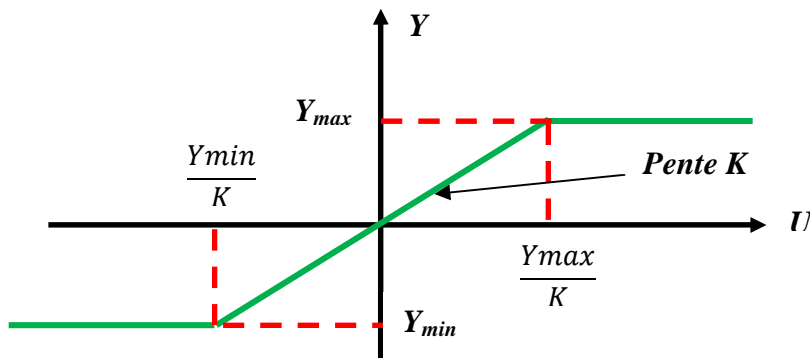


Figure. 1.51: Exemple d'un phénomène de saturation.

La notion de saturation est très familière à beaucoup de phénomènes physiques.

Son existence résulte de cette évidence :

Aucune grandeur physique ne peut tendre vers l'infini (pour des raisons énergétiques). Il existe donc, pour chaque élément d'une chaîne, des signaux d'entrées incompatibles avec le fonctionnement linéaire.

Ces signaux d'entrées donneraient à la sortie une valeur trop grande, impossible à atteindre : le signal réel que l'on recueille alors est plus faible, il y a saturation.

Exemple :

En prend comme exemple l'ouverture d'une vanne de réglage, lorsqu'on excite la vanne (organe de réglage) avec une commande manuelle de 100% le débit atteint à une valeur notée Y_{max} ; dont on peut la considérer comme la limite de linéarité (saturation), ($Y_{max}=100\%$; $Y_{min}=0\%$).

10.4. Analyse de la réponse indicielle :

Cette approche consiste à exploiter la réponse à un échelon du système étudié. Deux méthodes seront présentées : la méthode de **Broïda**, la méthode de **Strejc**. Ces deux méthodes s'appliquent au cas des systèmes présentant une réponse apériodique. Il existe d'autres méthodes qui concernent les cas des réponses oscillantes (méthode de deuxième ordre retardé).

10.5. Modèle du premier ordre

Suite à l'envoi d'un échelon sur l'entrée on observe le comportement de la sortie et l'on détermine les diverses modélisation possibles.

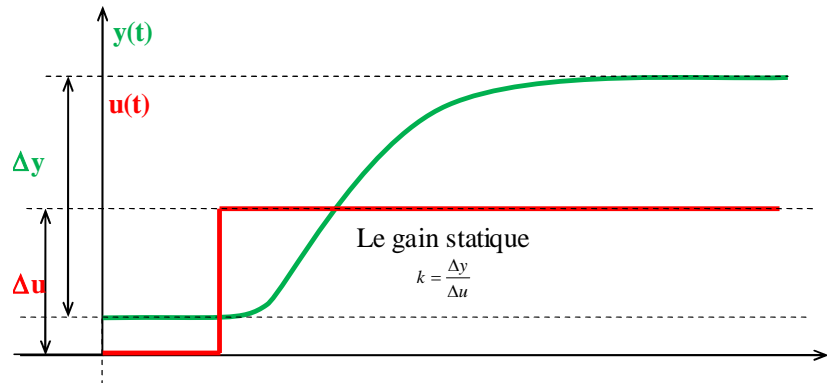


Figure. 1.52: Réponse indicielle système du 1^{er} ordre sorties = f (entrée).

Lorsque la réponse ne présente ni rebond ni retard, le modèle du premier ordre peut être utilisé.

Modèle simple mais très utilisé tant que le temps mort reste négligeable devant la constante de temps (sans retard pur).

Equation différentielle : $\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = ku(t)$

Fonction de transfert: $G(s) = \frac{k}{1 + \tau s}$

10.5.1. Détermination du gain statique

Le gain statique est le rapport de la variation de la sortie finale sur la variation d'entrée (échelon) une fois le système est stabilisé.

Détermination du gain statique la constante de temps (τ)

$$K = \Delta Y / \Delta U$$

La constante de temps (τ) est mesurée lorsque le système atteint 63% de la variation totale de la sortie.

$$\Delta Y = Y_{\infty} - Y_0$$

10.6. Identification d'un système de 2^{ème} ordre Soit la réponse indicielle d'un système de 2^{ème}

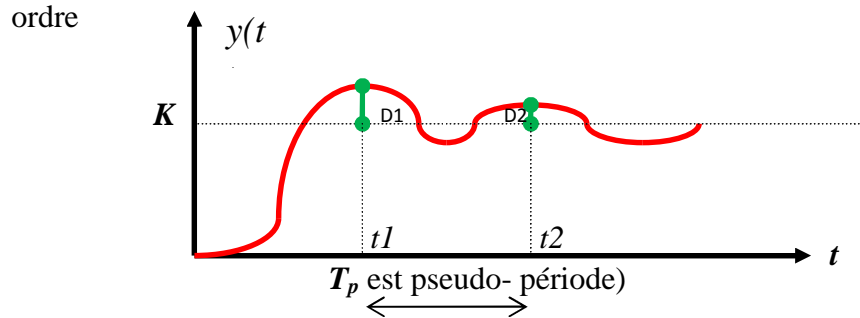


Figure. 1.53: Réponse indicielle système du 2^{er} ordre.

- Soit le système du deuxième ordre représenté par sa forme canonique comme suit :

Equation différentielle :
$$\frac{dy^2(t)}{d^2t} + 2\xi w_n \frac{dy(t)}{dt} + w_n^2 y(t) = k w_n^2 u(t)$$

Fonction de transfert:
$$G(s) = \frac{k w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} = \frac{k}{\frac{s^2}{w_n^2} + \frac{2\xi s}{w_n} + 1}$$

K est le gain statique.

w_n est la pulsation naturelle.

ξ est le coefficient d'amortissement.

L'identification d'un tel type de système, nécessite de déterminer: le coefficient d'amortissement ξ , le gain statique k et la pulsation naturelle w_n

- Tracer la réponse indicielle.

La réponse indicielle est donnée par :

$$y(t) = k \left[1 - e^{-\xi w_n t} \left(\cos wt + \frac{\xi w_n}{w} \sin wt \right) \right]$$

$$w = \frac{2\pi}{T_p}$$

La figure suivante représente la réponse indicielle d'un système avec différentes valeurs du coefficient d'amortissement.

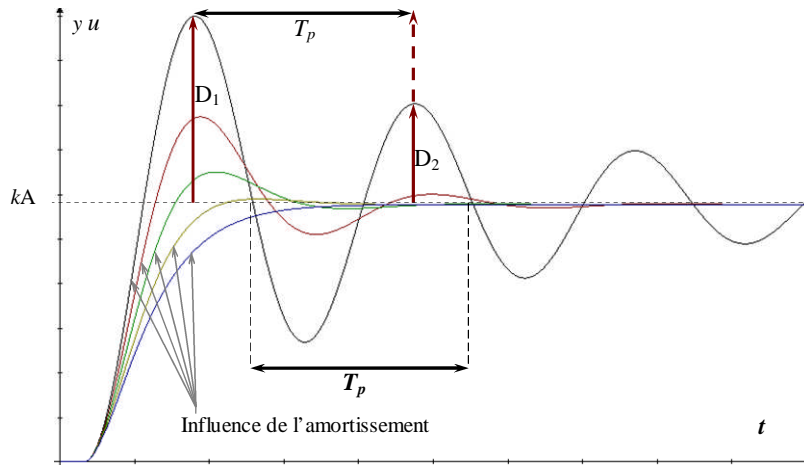


Figure. 1.54: Réponse indicielle système du 2^{er} ordre.

- Gain statique:

$$K = \Delta Y / \Delta U$$

- Déterminer le premier dépassement et déduire ξ

$$D_1 \% = \frac{y(t_{D_1}) - y(\infty)}{y(\infty) - y(0)}$$

$$D_1 \% = e^{\frac{-\pi \cdot \xi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

$$\frac{D_2}{D_1} = e^{\frac{-2\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

- Mesurer le pseudo période T_p et déduire w_n par la formule suivante :

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}}$$

$$w_n = \frac{2\pi}{T_p \sqrt{1-\xi^2}}$$

10.7. Méthode de Broïda pour un système naturellement stable :

10.7.1. Modèle de Broïda

Lorsque la réponse ne présente pas de rebond (une large classe de systèmes industriels à la particularité de présenter une réponse indicielle aperiodique (sans oscillation)) mais qu'il existe un retard entre l'échelon et la réponse du système. Ce type de système peut être modélisé à l'aide d'un modèle du premier ordre comportant un retard pur (modèle de Broïda) de la forme :

$$G(s) = \frac{K e^{-Ts}}{1 + \tau s}$$

Où K représente le gain statique du système, T le retard pur et τ la constante de temps.

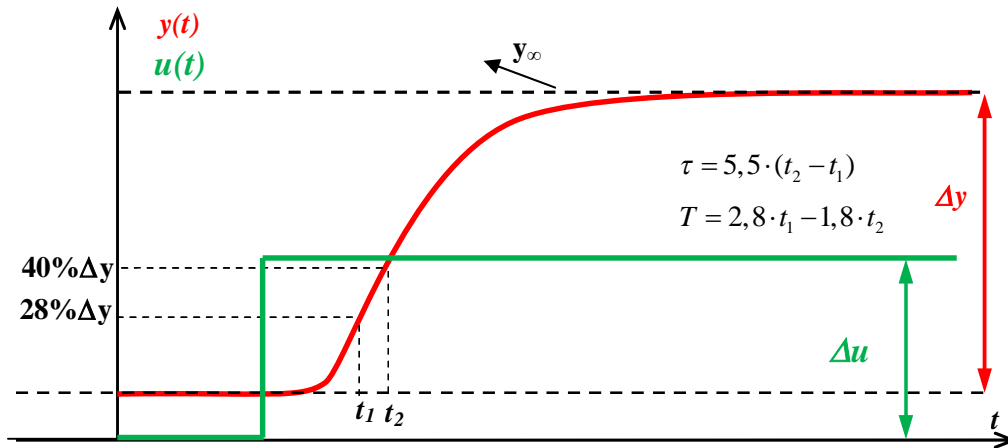


Figure. 1.55: Figure : Détermination des paramètres du modèle de Broïda.

Les paramètres du modèle de Broïda sont obtenus à partir des relations suivantes:

- Gain statique : $K = \Delta Y / \Delta U$
- Constante de temps : $\tau = 5.5 * (t_2 - t_1)$
- Retard ou temps mort : $T = 2.8 * t_1 -$

10.8. Méthode de Strejc:

Le système est modélisé à l'aide d'un modèle à constante de temps multiple comportant un retard pur de la forme :

$$H(s) = \frac{K e^{-Ts}}{(1 + \tau s)^n}$$

Où :

- K représente le gain statique du système.
- T est le retard pur.
- τ est la constante de temps.
- n le degré (ordre) du modèle. Ces différents paramètres sont obtenus à partir de la réponse à un échelon du système et à l'aide du tableau suivant de Strejc tous deux représentés à la figure suivante :

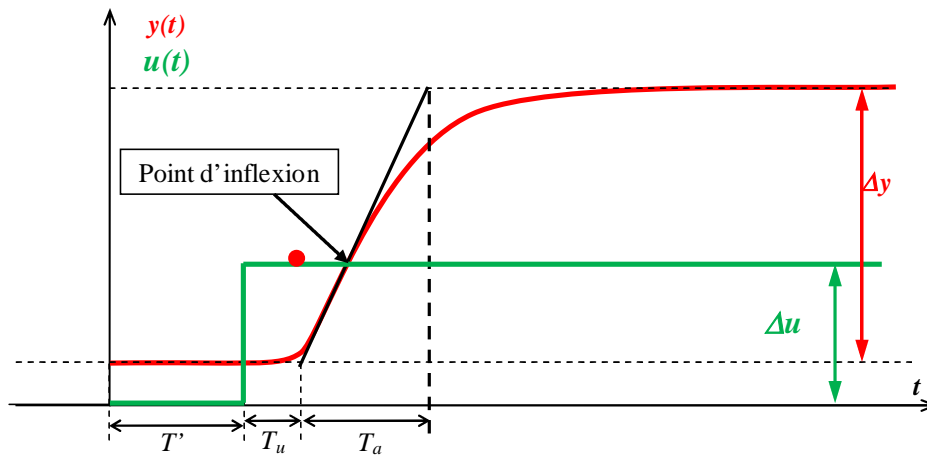


Figure. 1.56 : Détermination des paramètres du modèle de Strejc.

Le modèle de *Strjec* avec retard pure $T=0$

$$\frac{K}{(1 + \tau p)^n}$$

Le gain statique est toujours :

$$K = \Delta Y / \Delta U$$

- Le quotient T_u/T_a donne la valeur de l'ordre n entier à l'aide du tableau ci-dessous, si le rapport T_u/T_a correspond à une valeur exacte du tableau donc on élimine le coefficient du retard et on écrit la fonction de transfert d'ordre n .
- La détermination de τ se fait à partir de T_a .

Lorsque la valeur du quotient T_u/T_a ne correspond pas à une valeur exacte du tableau, ce qui signifie l'existence d'un temps mort (retard), il faut prendre l'ordre n immédiatement inférieur, on réduit une autre valeur de T_u , notée T'_u , pour obtenir un quotient T'_u/T_a qui coïncide dans le tableau a un ordre n entier, la valeur de T_a n'est pas changée, le retard T introduit est alors:

$$T = T_u - T'_u$$

10.9. Tableau : Paramètres du modèle de Strejc.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\frac{T_u}{T_a}$	0.104	0.218	0.319	0.410	0.493	0.570	0.642	0.709	0.773
$\frac{T_a}{\tau}$	2.718	3.695	4.463	5.119	5.699	6.226	6.711	7.164	7.590

1. Introduction :

Un **régulateur** est l'appareil dont la fonction est d'assurer une régulation. Par exemple : les régulateurs de tension dans les circuits électroniques ou les régulateurs de pression appelés aussi détendeurs. Ces régulateurs sont des composants destinés à des applications spécifiques et leurs fonctions de régulation sont définies par des relations entre l'entrée et la sortie dont les coefficients sont fixés définitivement par fabrication.

Par contre, un **régulateur Industriel** est un appareil dont leurs paramètres sont réglables et adaptables au système à contrôler.

Généralement, les systèmes de régulation peuvent présenter des insuffisances, tels que : une **précision** insuffisante, une mauvaise **stabilité**, un temps de **réponse** trop lent, un **dépassement** trop important. Il est donc souvent nécessaire d'intégrer dans le système à régler des régulateurs, dont l'objectif est **d'améliorer** un ou plusieurs de ces différentes **performances**.

Le régulateur (correcteur) permet alors **d'améliorer** les caractéristiques de précision, de stabilité et de rapidité du système et il est nécessaire de l'introduire dans la boucle de commande.

1.1. Système en boucle ouverte (open loop system) :

C'est un système de commande où le signal d'entrée est indépendant du signal de sortie. La grandeur d'entrée contrôle directement la grandeur de sortie. Ce système a l'avantage d'être simple, il est très stable. En revanche, ses performances sont médiocres, car il n'existe pas de circuit de retour permettant de comparer la grandeur de sortie à la grandeur de référence.

1.2. Système en boucle fermée (closed loop system) :

Une correction continue est déterminée par une mesure continue ; ceci est le résultat d'une structure en boucle fermée. Par conséquent, la grandeur de sortie est comparée à chaque instant à la grandeur d'entrée la différence joue le rôle d'un signal de correction ces systèmes possèdent l'avantage d'être plus précis et limitent l'influence des perturbations. En général, on considère qu'un système de commande en boucle fermée est un système où le signal de commande dépend d'une façon ou d'une autre du signal de sortie.

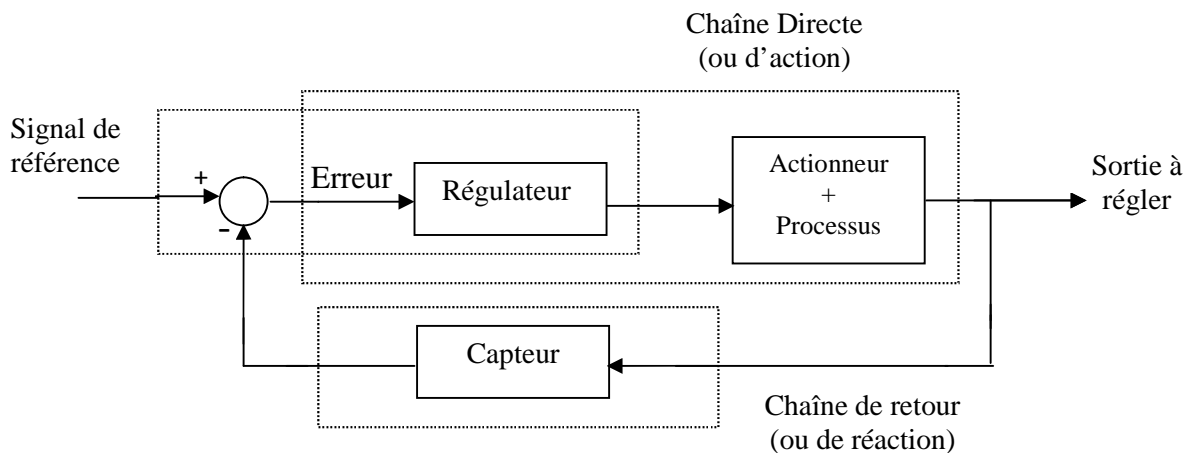


Figure 2.1: Boucle de régulation.

- Dans une **régulation**, on s'attachera à maintenir constante la grandeur réglée d'un système soumis à des perturbations.
- **Asservissement:**

Dans un **asservissement**, la grandeur réglée devra suivre au plus près les variations de la consigne (entrée de référence).

2. Eléments d'un régulateur Industriel:

Le régulateur Industriel a pour rôle essentiel de contrôler de système. C'est-à-dire de garantir les comportements dynamiques et statiques du système conformes au cahier des charges défini. Généralement un régulateur a deux aspects:

- sa fonction mathématique.
- leurs fonctions pratiques d'utilisation.

La fonction mathématique est définie par l'algorithme du régulateur. C'est l'aspect fondamental pour un automaticien. L'utilisation pratique d'un tel appareil nécessite des fonctions spécifiques mises au service des techniciens ou des opérateurs.

2.1. L'aspect matériel d'un régulateur.

Un régulateur industriel peut être mis dans un appareil individuel, généralement implanté localement sur le système, appelé régulateur local qui contrôle une ou plusieurs boucles de régulation. La fonction de régulation peut être effectuée par un logiciel implanté dans un Automate Programmable Industriel (API) ou dans un Système Numérique de Contrôle Commande (SNCC).

2.1.1. Fonctions de service

Pour contrôler un système, le technicien ou l'opérateur agissent sur le régulateur qui centralise les informations essentielles. C'est pourquoi le régulateur quelle que soit sa technologie, comporte au moins les fonctions suivantes :

- Un signal normalisé en entrée de mesure (Y) eu un signal normalisé en sortie de commande (U) observables.

- Une consigne (W) réglable et observable.
- Un réglage des paramètres de l'algorithme de calcul et du sens d'action.
- Des sélecteurs de commande automatique- manuelle. De consigne interne- externe.
- Des réglages d'alarme basse et d'alarme haute de la mesure ou de l'erreur (écart mesure- consigne).
- Des limiteurs des valeurs ou de vitesses de variation de la consigne et de la commande.

Exemple :

Les signaux de mesures issus des transmetteurs sont des signaux électriques normalisés comme par exemple un courant variable de 4 à 20 **mA** ou une tension de 0 à 10 V (ou de 0 à 5v). Ils représentent les pourcentages des variations des grandeurs physiques mesurées. Le réglage de l'échelle de mesure d'un régulateur consiste à définir le minimum et maximum désirés. L'étendue d'échelle de la consigne est identique à celle réglée pour la mesure. Par exemple, un transmetteur de niveau installé sur un réservoir, délivre 4 mA pour un niveau de 1.5 m et 20 mA pour un niveau de 3m. On définit donc pour la mesure du régulateur : 1.5 m pour 0% d'échelle de mesure et 3 m pour 100% d'échelle de mesure. La consigne doit être réglée de 1.5 m à 3 m directement en unité physique. Une consigne de 50% correspondant à 2.25 m.

2.1.2. Limiteur de variation de vitesse de commande

Exemple :

Afin de commander l'ouverture d'une vanne sans avoir d'un coup de pression dans la tuyauterie. On fixe la valeur maximale de la variation de vitesse de commande, par exemple à 1% par seconde. Ainsi, le régulateur demande une variation brusque de 40 % d'amplitude de commande. Alors l'ouverture sera progressive et dura 40 secondes.

2.2. Structure du Régulateur:

Le **régulateur** représenté sur la figure (**Fig 2.2**) est constitué d'un **comparateur** comparant la consigne et la grandeur mesurée, généralement, un régulateur élabore un signal de commande en fonction de l'erreur constatée par le comparateur afin de corriger l'évolution de la grandeur à contrôler du système. La fonction de transfert du régulateur est notée **K(s)**.

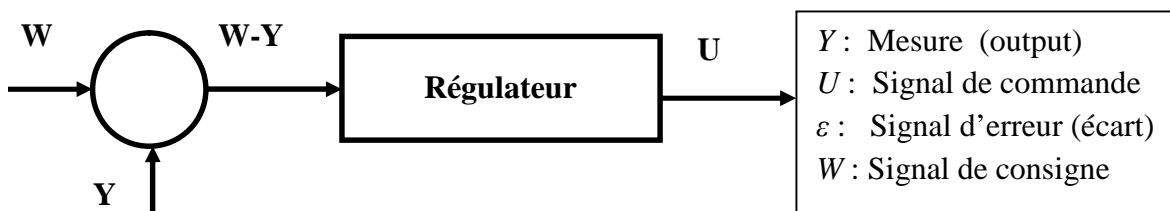


Figure 2.2 : Structure d'un régulateur.

Le régulateur délivre un signal de commande en fonction de l'erreur (mesure - consigne) selon une loi bien déterminée. Cette loi de commande dépend de la structure interne du régulateur. C'est-à-dire de sa fonction de transfert.

2.3.Choix du sens d'action du régulateur :

Les régulateur est à action directe si U augmente lorsque ε augmente

Le régulateur est à action inverse si U augmente lorsque ε diminue

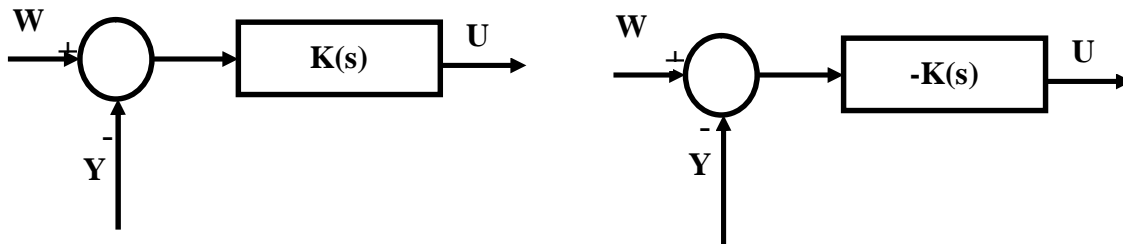


Figure 2.3 : Sens d'action d'un régulateur.

Le choix du sens d'action du régulateur est en fonction du sens d'action de l'ensemble vanne positionneur et du sens de variation de la grandeur réglée par rapport à la grandeur réglante.

Le sens d'action du régulateur doit être opposé au sens d'évolution du système

Pour déterminer le sens d'action du régulateur. Il suffit donc de savoir le sens d'évolution du système, donc on observe l'évolution du système sans régulateur sous l'influence d'une augmentation du signal de commande (grandeur réglante). Si le signal de mesure augmente, alors cela correspond un sens d'évolution direct du système, et si celui-ci diminue alors le système est en sens d'évolution inverse.

En générale, les convertisseurs et les transmetteurs sont en sens direct d'action

Exemple :

Dans une régulation de débit dans une conduite, commandé par une vanne automatique électrique (électrovanne) normalement fermée, l'augmentation du signal de commande U provoque l'augmentation de l'ouverture de la vanne et donc le débit, et comme le débitmètre est en sens direct d'action, il délivre ainsi une augmentation du signal du mesure Y . Donc le système est en sens d'évolution direct, et le régulateur doit être en sens inverse d'action.

3. Régulation Tout Ou Rien (ON-OFF)

3.1. 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 discontinu fonctionnement **Tout Ou Rien**.

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 %).

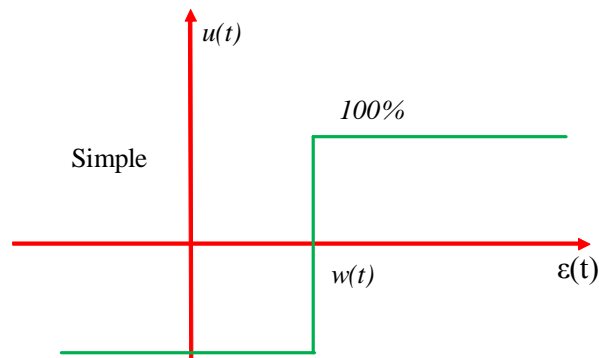


Figure 2.4 : sortie d'un régulateur TOR à un seul seuil.

Un seuil limite la fréquence de commutation du système pour éviter une fatigue prématurée des organes de réglages. La Sortie régulation ne prendra aucune valeur intermédiaire.

La réponse du système présentera, autour du point de consigne, des oscillations entretenues dues au temps mort du système (inertie).

La figure (**Fig 2.5**) représente la sortie d'un régulateur TOR à un seuil, tant que la valeur de la mesure Y est inférieure à la consigne W , la commande U est de 100 % (TOUT).

Dès que la mesure Y atteint et dépasse la consigne W , la commande U est de 0 % (RIEN).

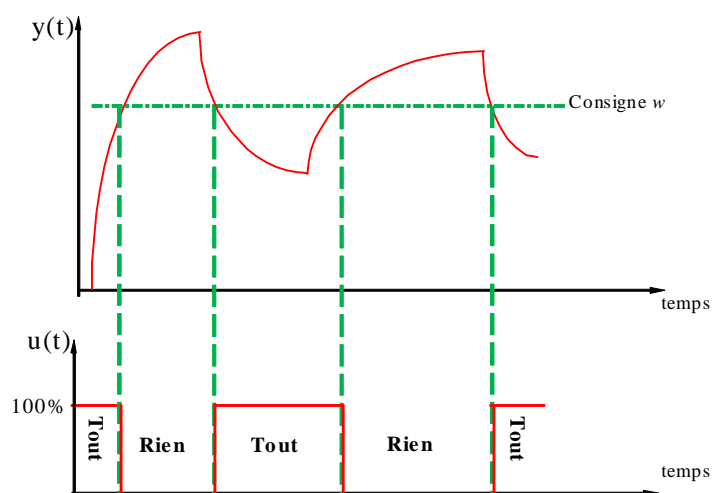


Figure 2.5 : Réponse d'un système avec un régulateur TOR à un seul seuil.

Remarque : La mesure ne peut pas être constante dans ce type de régulation, le système est en régime d'instabilité entretenue. Plus on augmente la sensibilité du régulateur aux variations de la grandeur réglée, plus les commutations seront fréquentes; l'usure sera plus importante et la durée de vie plus courte. Pour limiter les commutations, deux propriétés sont introduites: la **zone morte** et **l'hystérèse**.

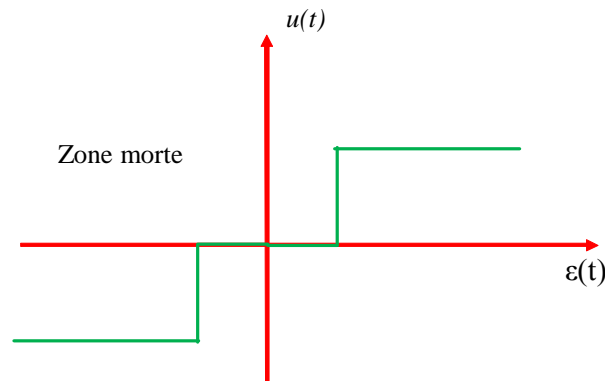


Figure 2.6: sortie d'un régulateur TOR à un seul seuil et zone morte.

3.2. Régulateur TOR à deux seuils:

3.3. Fonctionnement

Dans la réalité, afin de diminuer le phénomène de battement à l'approche de la valeur de consigne, on introduit un deuxième seuil.

Ce régulateur comme le régulateur TOR simple élabore une fonction de commande discontinue ne prenant que 2 valeurs possibles 0 ou 1. C'est-à-dire qu'il enclenche soit la puissance maximale de soit la puissance nulle. C'est d'ailleurs cette caractéristique qui donne son nom au régulateur « tout ou rien », puisque la grandeur réglée varie de façon non progressive d'une grandeur à l'autre.

La différence entre les 2 régulateurs réside dans la détermination des seuils de basculement d'un régime de fonctionnement à l'autre. Pour le régulateur TOR à hystérésis, on définit la consigne et l'écart entre ses deux seuils appelé **l'hystérésis**. Logiquement, plus l'hystérésis est faible, plus la précision de notre système de régulation est grande, puisque la grandeur réglée varie dans un intervalle de faible amplitude. Pour le régulateur TOR simple, on précise uniquement la valeur de la mesure désirée.

L'organe de commutation est souvent un dispositif électromécanique. Un bouilleur pour l'eau chaude domestique possède un thermostat qui enclenche ou déclenche le corps de chauffe selon la température de l'eau dans la cuve.

La valeur de consigne W permettant d'arrêter la commande (RIEN: $Y = 0\%$). La valeur du deuxième seuil permettant de remettre en marche la commande (TOUT : $Y = 100\%$). Ceci se repère

sur le schéma de régulation de la figure (**Fig 2.7**) par les flèches montante (enclenchement) et descendante (déclenchement).

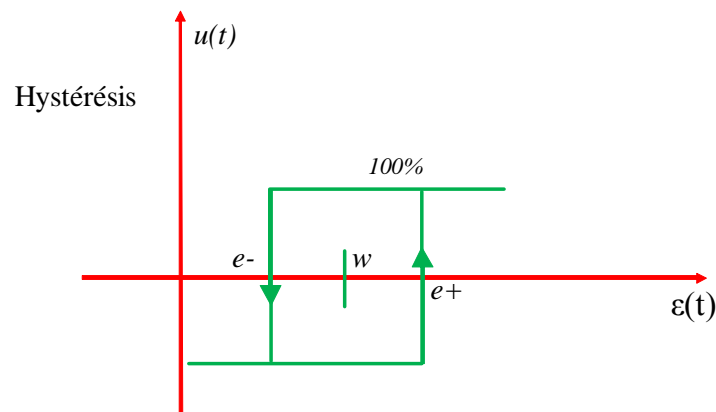


Figure 2.7 : sortie d'un régulateur TOR à deux seuils.

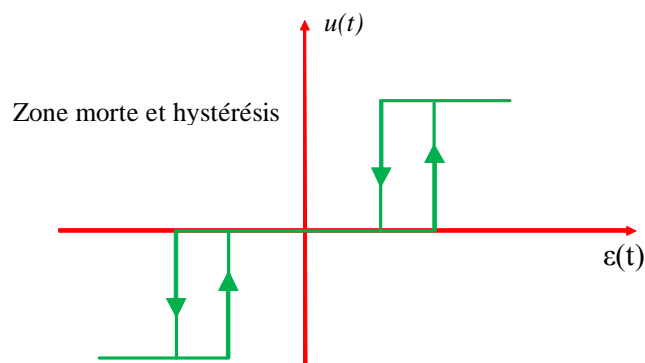


Figure 2.8: Sortie d'un régulateur TOR à deux seuils et zone morte.

La figure (**Fig 2.9**) représente la sortie d'un régulateur TOR à deux seuils. 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 ($e+$). Dès lors que la grandeur à régler devient inférieure à la consigne l'organe de réglage est réenclenché.

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

- La consigne W , fournie en unité de mesure ;
- Le seuil ($e+$), donné généralement en % de la consigne.

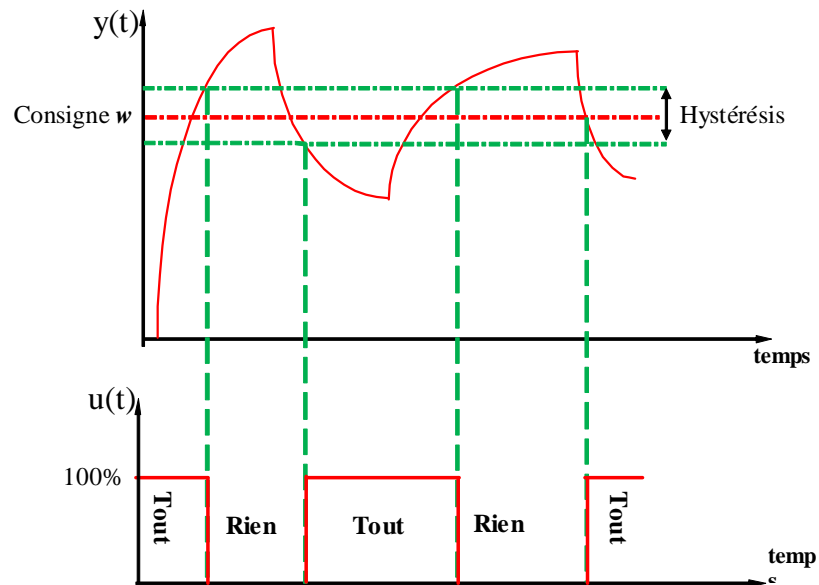


Figure 2.9 : Réponse d'un système avec un régulateur TOR à deux seuils.

3.4. Exemple:

Prenons un exemple de régulation de la température ambiante par un groupe frigorifique. Supposons une consigne placée à 27°C (**Fig 2. 10**).

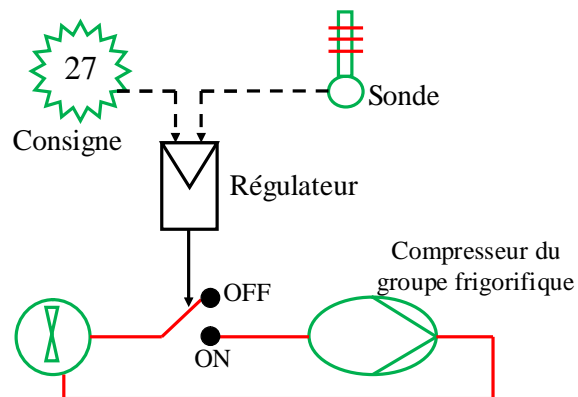


Figure 2.10 : Exemple de régulation TOR.

Dans le cas où un régulateur TOR à un seul seuil est utilisé, si la température ambiante dépasse la valeur de consigne (27.10°C), le régulateur le détecte et ferme l'interrupteur. Le compresseur est enclenché à 100 % et la température du local redescend. Une température de 26.90°C suffit pour arrêter le groupe frigorifique, donc, le compresseur passe de « marche » à « arrêt », puis à « marche », ... avec une telle fréquence de commutation, le matériel va souffrir. Ainsi, on peut déduire de ces considérations que le régulateur TOR avec hystérésis est plus adapté, dont la valeur est réglable. Par exemple: le compresseur s'enclenche à 28°C et s'arrête à 26°C (**Fig 2. 11**).

Effectivement, le fait que la température oscille dans un intervalle plus grand implique une augmentation de la stabilité et par la même occasion une limitation du phénomène de pompage (réduction du nombre de commutation).

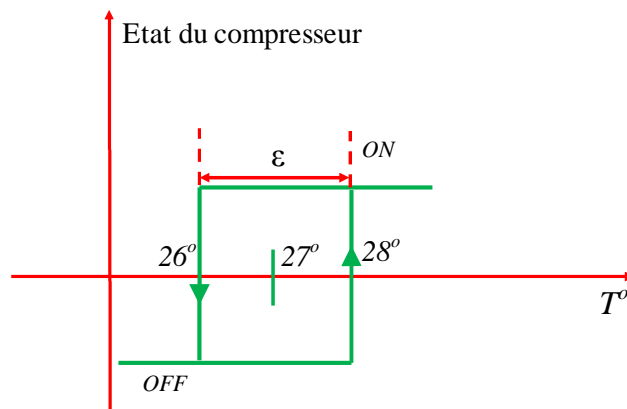


Figure 2.11 : Régulateur TOR. « Exemple de Régulation de température »

Plus le différentiel (ϵ) est élevé plus la machine travaille dans de bonnes conditions (longues plages de travail propices à un bon rendement du compresseur), mais plus la température oscillera dans le local ... Ceci diminue le confort.

Le différentiel dépend généralement du type d'application. Ainsi, la régulation d'une résistance chauffante électrique peut se concevoir avec un différentiel beaucoup plus court: une résistance accepte sans dommage une alimentation très « hachée », avec un enclenchement à 26.9° et un déclenchement à 27.1° , par exemple, pour une consigne à 27° .

3.5. Réalisation comparateur à hystérésis

Le comparateur à hystérésis présenté utilise un montage de base de l'amplificateur opérationnel communément appelé : « comparateur à deux seuils ou Trigger de Schmitt » inverseur. Ci-dessous le schéma du montage du comparateur (**Fig 2. 12**).

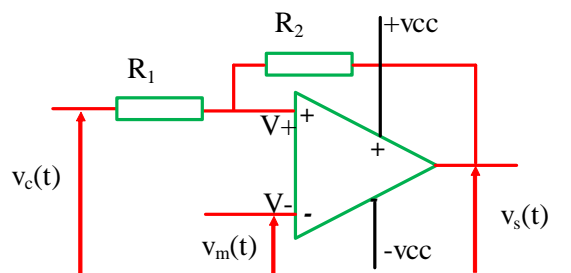


Figure 2.12: Montage du comparateur à hystérésis.

Calcul des résistances R_1 et R_2 :

Nous supposons la précision du régulateur de 0.5, autrement dit, la mesure oscille de façon permanente autour de la valeur consigne avec un écart (hystérésis) de plus ou moins **0.5**.

Etant donné que le facteur 'amplification entre la mesure et la tension est défini tel que $100 \Leftrightarrow 50V$, la différence entre la tension consigne v_c et la tension mesurée v_m ne doit pas excéder $0.025V$. On veut donc $e \Leftrightarrow v_+ - v_-$ la largeur de la fenêtre du cycle égale à $0.05V$.

Où v_+ est la tension de basculement positif faisant passer la tension en sortie v_s de $+V_{cc}$ (tension de saturation positive de l'AOP) à $-V_{cc}$ (tension de saturation négative de l'AOP) et v_- est la tension de basculement négatif faisant passer v_s de $-V_{cc}$ à $+V_{cc}$.

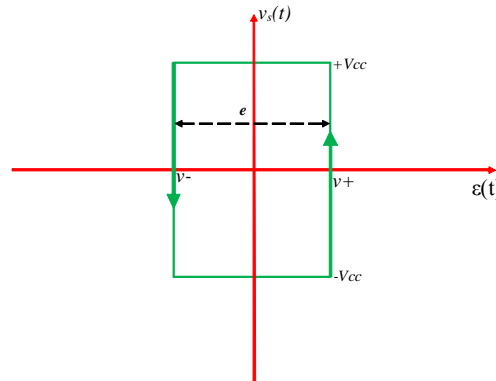


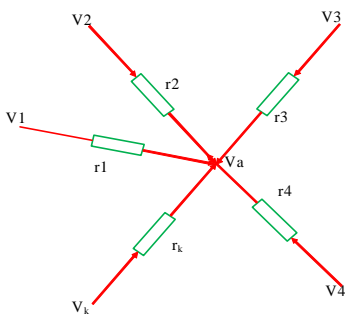
Figure 2.13: Sortie d'un comparateur à hystérésis.

Détermination de v_+ et v_- .

Dans un premier temps, il convient de préciser qu'étant donné l'absence de contre-réaction sur l'entrée inverseuse, ce montage fonctionne en régime non linéaire ou saturé. Ainsi, on a:

$$V_+ \neq V_- \text{ et } v_s = \begin{cases} +V_{cc} \text{ si } V_+ > V_- \\ -V_{cc} \text{ si } V_+ < V_- \end{cases}$$

Néanmoins, le passage d'un état saturé à un autre se fait toujours par un passage en régime linéaire. De fait, l'utilisation des caractéristiques d'un amplificateur opérationnel en mode linéaire est correcte.



Rappel : théorème de Millman:

$$\left\{ \begin{aligned} V_a &= \frac{\sum_{i=1}^k V_i \times g_i}{\sum_{i=1}^k g_i} \\ g_i &= \frac{1}{r_i} \end{aligned} \right.$$

L'application ce théorème nous donne:

$$V_+ = \frac{\frac{v_c}{r_1} + \frac{v_s}{r_2}}{\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}} = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times v_s}{r_1 + r_2} \text{ on a aussi : } v_m = V_-$$

Soit la tension différentielle $V_+ - V_-$:

$$V_+ - V_- = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times v_s}{r_1 + r_2} - v_m$$

D'après l'hypothèse de fonctionnement en régime linéaire lors du passage d'un état saturé à un

autre on a : $V_+ - V_-$ - impédance d'entrée infinie $\Rightarrow v_m = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times v_s}{r_1 + r_2}$

Suivant le signe de v_s on peut donc définir la tension de basculement positif v_+ et la tension de basculement négatif v_- tel que :

$$\begin{cases} v_s = +V_{cc} \Rightarrow v_+ = v_m = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times (+v_{cc})}{r_1 + r_2} \\ v_s = -V_{cc} \Rightarrow v_- = v_m = \frac{r_2 \times v_c}{r_1 + r_2} + \frac{r_1 \times (-v_{cc})}{r_1 + r_2} \end{cases}$$

Ainsi :

$$e = 2 \frac{r_1 \times v_{cc}}{r_1 + r_2}$$

Enfin pour trouver les valeurs des r_1 et r_2 , on fixe l'une des résistances et on calcule l'autre par la

dernière formule. Comme exemple, si $e=0.05$ et $V_{cc}=10V \Rightarrow 0.05 = 20 \frac{r_1}{r_1 + r_2}$

$$\text{si } r_1 = 1k\Omega \Rightarrow 0.05 = 20 \frac{1}{r_1 + r_2} \Rightarrow r_2 + 1 = 400 \Rightarrow r_2 = 399k\Omega$$

4. Régulateur PID :

La loi de commande (Algorithme) du régulateur la plus classique est l'association des trois actions élémentaires (Proportionnelle, Intégrale et **Dérivée**). C'est le régulateur **PID**.

Action Proportionnelle:	La sortie du correcteur est proportionnelle à l'erreur issue du comparateur. En régime permanent, il existe une erreur statique (grandeur réglée différente de la consigne). Une augmentation du gain proportionnel entraîne une diminution de cette erreur mais rend le système de plus en plus instable jusqu'à devenir oscillatoire, on parle alors de correcteur TOR (Tout Ou Rien).
Action Intégrale:	Cette action permet d'annuler l'erreur statique mais ralentit le système.
Action Dérivée:	Cette action permet d'anticiper et donc de compenser le retard introduit par l'action intégrale.

4.1. Action Proportionnelle :

Kp : gain ou amplification. Lorsque les signaux sont exprimés sous forme de pourcentage, le cas le plus courant : le gain n’a pas d’unité.

L’équation temporelle de cette action est notée par :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + u_0$$

Où u_0 lorsque l’erreur est nulle. Cette valeur permet de commander l’actionneur avec une valeur non nulle. En effet, pour une vanne par exemple, une commande nulle est équivalente à une ouverture ou une fermeture totale. Or pour un système, il faut garder une certaine valeur à la grandeur réglante pour maintenir constante la mesure. La valeur u_0 est donc réglée pour le point de fonctionnement.

La fonction de transfert du régulateur proportionnel s’obtient en prenant la transformé de Laplace de l’équation précédente comme suit :

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p$$

Comme exemple : avec un retour unitaire sur un système du deuxième ordre

$$G(s) = \frac{K w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2}$$

La fonction de transfert de la boucle fermée :

$$H(s) = \frac{Kp \cdot K \cdot w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + Kp + w_n^2}$$

Avec une action proportionnelle il y aura la possibilité de modifier la pulsation naturelle du système (w_n) et aussi le coefficient d’amortissement (ξ). Et l’erreur statique due ce type de système d’autant plus faible que K_p grand.

Comme la valeur de $2 \cdot \xi \cdot w_n$ est constante, donc l’augmentation de la pulsation w_n naturelle en boucle fermée mène à la diminution de ξ .

	BO	BF	Erreur Statique	Stabilité
w_n	w_n^2	$Kp + w_n^2$ →		
ξ	ξ	→	→	→

Un inconvénient majeur du régulateur proportionnel est son incapacité à éliminer les erreurs en régime permanent, après un changement de point de consigne ou une charge. A cause de cette limitation, le contrôleur proportionnel ne s’emploie que rarement.

4.1.1. Bande Proportionnelle (Proportionnal band) :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + u_0$$

La bande proportionnel P_b est la plage d'erreur dans laquelle $u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}$

Ou encore
$$u_{\min} - u_{\max} = K_p P_b$$

Si on considère
$$u_{\min} - u_{\max} = 100\% \text{ alors}$$

$$K_p = \frac{100}{P_b}$$

$$u(t) = \frac{1}{P_b} \varepsilon(t) + u_0$$

Il faut noter que pour une P_b supérieur à 100% entraîne une variation réelle de U limitée et inférieur à 100%. (pour $P_b = 200\%$ on a $\Delta U = 50\%$). Généralement, la valeur de réglage proposée par le fabricant est comprise entre 2% et 1000%. Par exemple pour une valeur de $P_b = 50\%$ donne

$$K_p = \frac{1}{50\%} = \frac{100}{50} = 2$$

Pour une valeur de $P_b = 200\%$ donne
$$K_p = \frac{1}{200\%} = \frac{100}{200} = 0.5$$

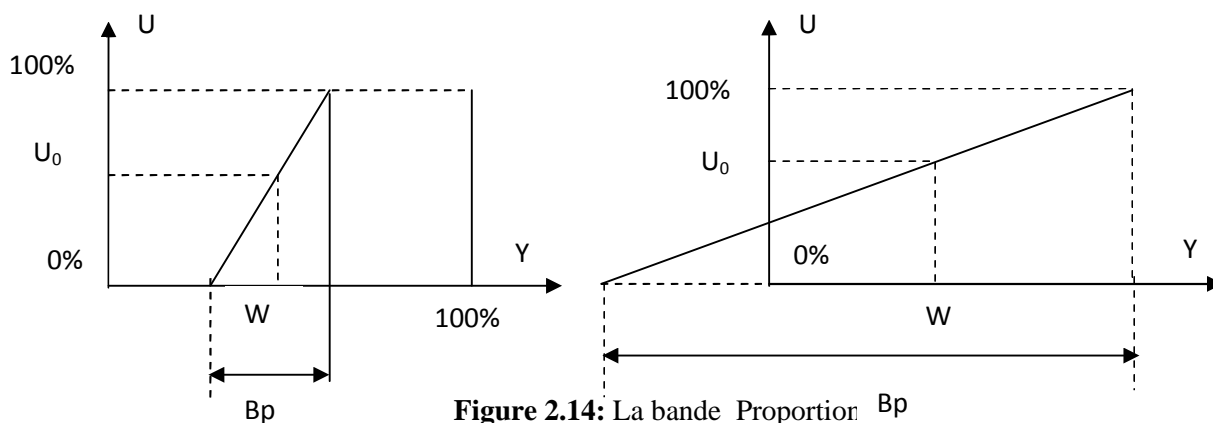


Figure 2.14: La bande Proportion Bp

Un tel régulateur effectue l'opération de multiplication du signal de sortie par coefficient K_p , de plus il inverse le signal à la sortie. Sa réponse indicielle est représentée sur la figure (Fig 2. 15):

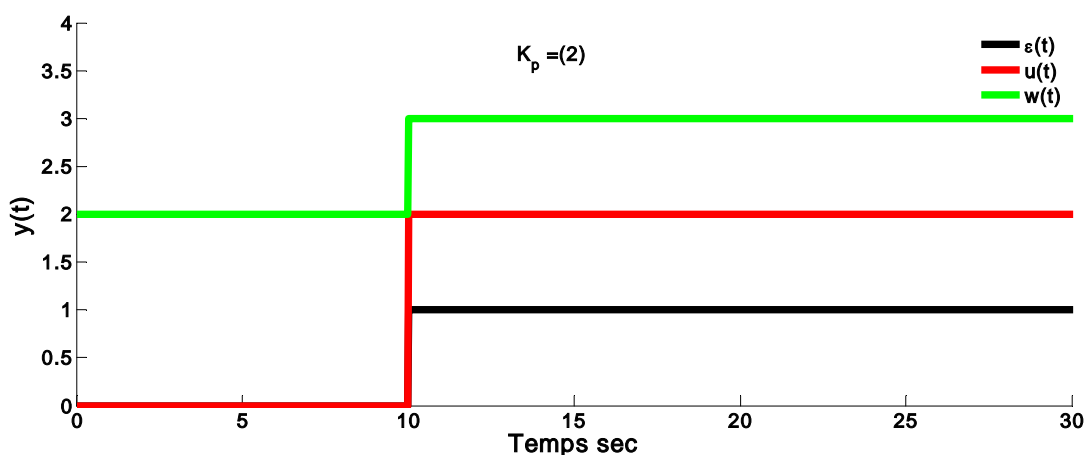


Figure 2.15: Réponse indicielle d'un Régulateur Proportionnel.

Exemple : Considérons le modèle du premier ordre $\frac{1}{3s+1}$. La figure (Fig 2. 16) présente la réponse à un échelon de consigne unitaire en boucle fermée avec un régulateur proportionnel pour différentes valeurs de K_p . La figure (Fig 2. 17) présente la réponse à un échelon de consigne unitaire en boucle ouverte avec un régulateur proportionnel pour différentes valeurs de K_p du système du deuxième ordre $\frac{1}{s^2 + 1.4s + 1}$.

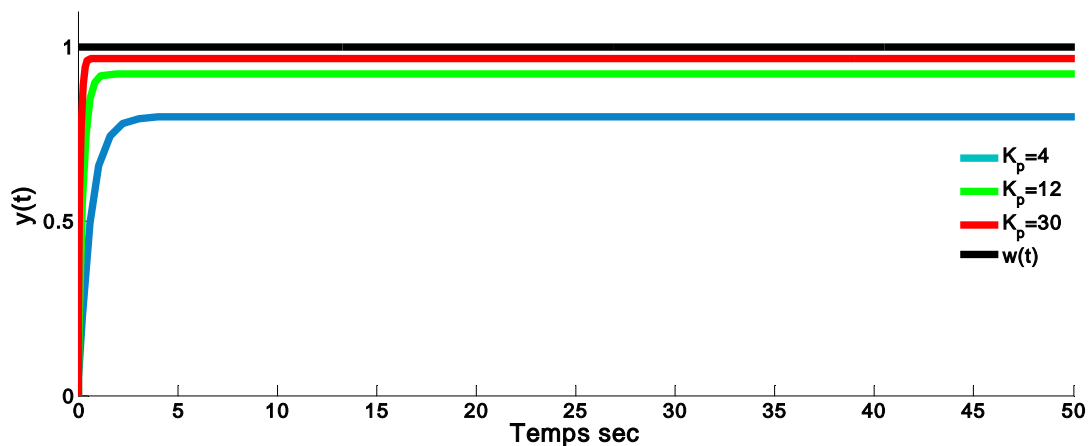


Figure 2.16 : Réponse indicielle d'un système du premier ordre bouclé avec régulateur proportionnel.

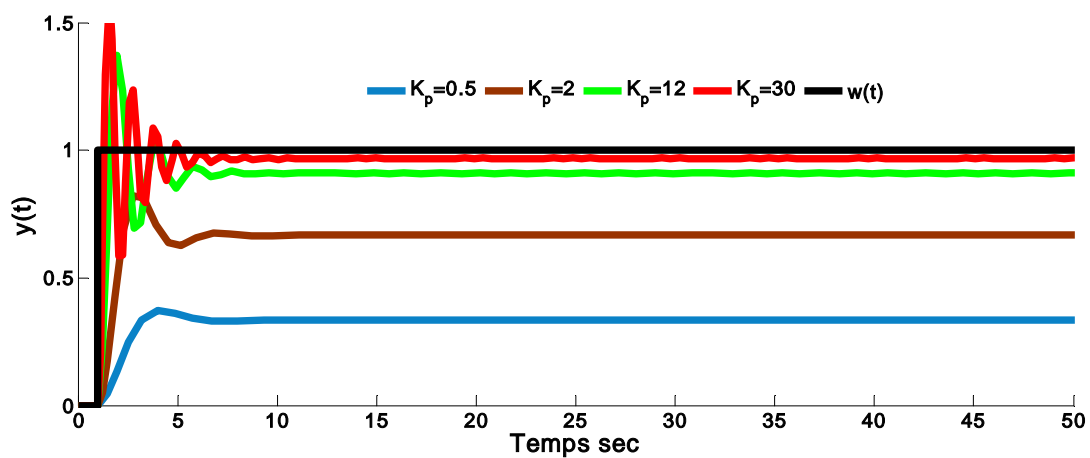


Figure 2.17 : Réponse indicielle d'un système du deuxième ordre bouclé avec régulateur proportionnel.

Les deux figures (Fig 2.16, Fig 2.17) montrent que l'augmentation de K_p diminue l'écart en régime statique, et augmente la rapidité en régime dynamique tant que le système n'est pas trop oscillatoire.

4.1.2. Réalisation Régulateur Proportionnel Analogique (avec des amplificateurs opérationnels)

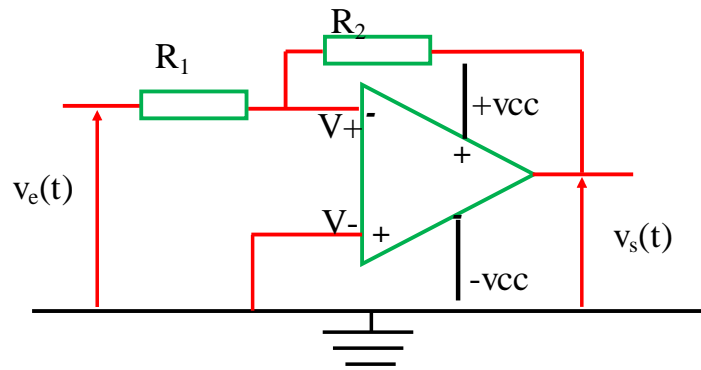


Figure 2.18 : Réalisation d'un Régulateur Proportionnel.

Si on suppose que l'amplificateur opérationnel est idéale (c. à. d.) a une impédance d'entrée infinie. On applique la loi des mailles on trouve :

$$V_e = R_1 \cdot i_1 + e$$

$$R_2 i_2 + e = V_s$$

$$e = V^+ - V^-$$

$$e = V^+ - V^- = Z \cdot i_e$$

$$Z \approx \infty \Rightarrow e \approx 0 \Rightarrow i_1 = i_2$$

$$i_1 = i_2 = \frac{V_e}{R_1} \quad V_s = R_2 \cdot i_2 = R_2 \cdot \frac{V_e}{R_1}$$

La fonction de transfert de ce régulateur s'écrit :

$$\left[\begin{array}{l} Z_1 = R_1 \\ Z_2 = R_2 \end{array} \right] \Rightarrow G_R(S) = -\frac{V_s(S)}{V_e(S)} = -\frac{R_2}{R_1} = K_p$$

4.2. Régulateur intégral.

La sortie d'un régulateur intégral est de la forme :

$$u(t) = \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

Le signal de sortie est proportionnel à l'intégral du signal d'entrée (erreur).

Le coefficient T_i est appelé la constante de temps intégrale et s'exprime en sec^{-1} . L'ajustage de T_i permet de doser l'effet de l'intégrale: T_i représente le temps nécessaire pour que la variation de sortie du régulateur soit égale à celle de l'amplitude d'une variation en échelon sur l'entrée du régulateur.

La fonction de transfert du régulateur intégral s'obtient en prenant la transformé de Laplace de l'équation précédente comme suit :

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{1}{Ts_i}$$

Sa réponse indicielle est représentée sur la figure (**Fig 2. 19**):

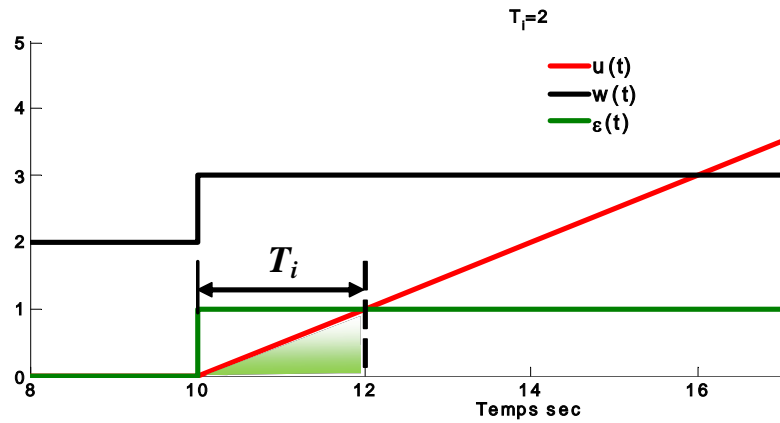


Figure 2.19 : Sortie d'un régulateur intégral pur.

Exemple : Considérons le modèle du deuxième ordre précédent. La figure (Fig 2. 20) présente la réponse à un échelon de consigne unitaire en boucle fermée avec un régulateur intégral pour différentes valeurs de T_i .

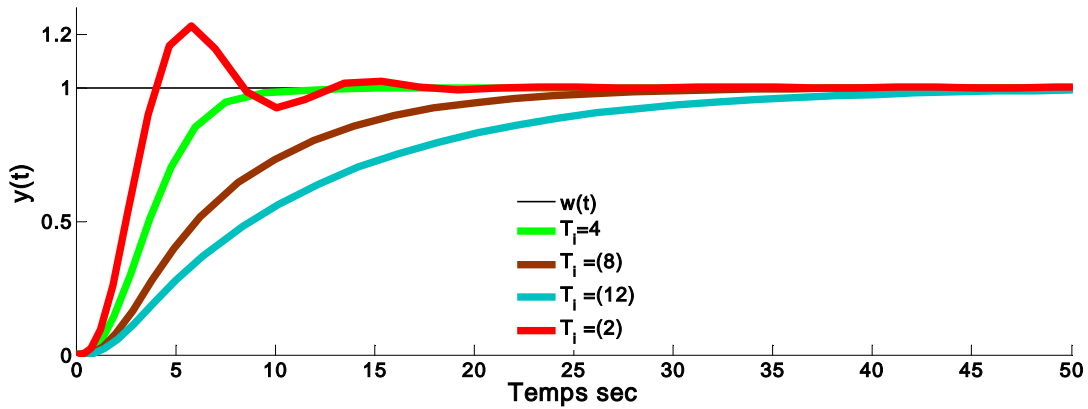


Figure 2.20 : Réponse indicielle d'un système du deuxième ordre bouclé avec régulateur intégral.

4.2.1. Réalisation Régulateur Intégral Analogique (avec des amplificateurs opérationnels)

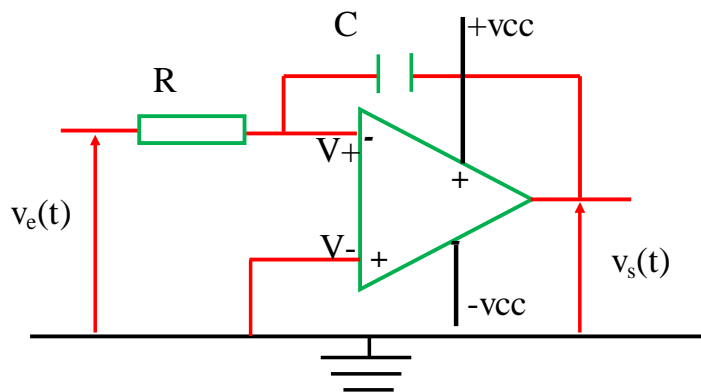


Figure 2.21: Réalisation d'un Régulateur Intégral.

$$\begin{aligned}
 V_s &= V_C + e \\
 V_e &= R.i_R + e \\
 e &= Z_e.i_e \\
 Z &= \infty \Rightarrow e = 0 \\
 e = 0 &\Rightarrow i_R = i_C \\
 i_C &= C \frac{\partial V_C}{\partial t} = C \frac{\partial V_s}{\partial t}
 \end{aligned}
 \Rightarrow G_i(S) = -\frac{V_s(S)}{V_e(S)} = \frac{1}{RCS}$$

$$V_e = R.i_C = R.C \frac{\partial V_s}{\partial t}$$

$$\Rightarrow G_i(S) = \frac{1}{T_i S}$$

$$T_i = RC$$

4.3. Action dérivée

Le signal de sortie est proportionnel à la dérivée du signal d'entrée (erreur).

La sortie d'un régulateur intégral est de la forme :

$$u(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

Le temps dérivé T_d s'exprimer en unité de temps est appelée temps de dérivée. La fonction de transfert est de la forme :

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = T_d S$$

L'objectif de l'action dérivée est d'anticiper les variations à venir du signal de mesure en appliquant une correction proportionnelle à sa vitesse de variation.

La réponse indicielle et celle à une rampe pour un dérivateur idéal est présentée sur la figure (Fig 2.22):

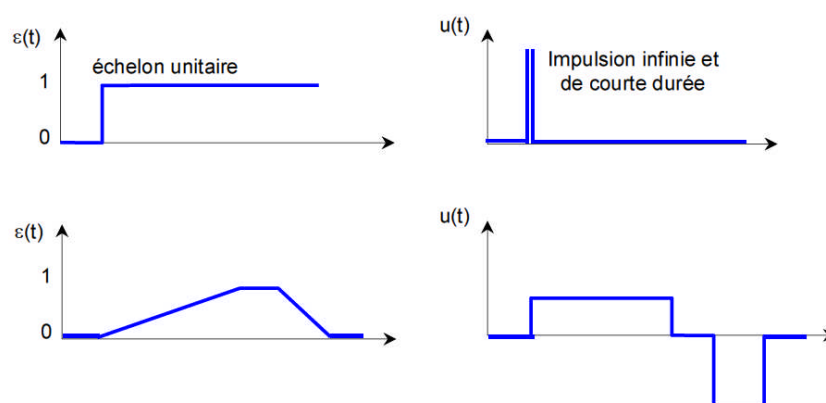


Figure 2.22 : Réponse indicielle et réponse en à une rampe d'une action dérivée.

Filtrage de la dérivée

En pratique, il n'est pas possible de réaliser un régulateur dérivée idéal et 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, on utilise en fait un module de dérivée filtrée :

$$K(s) = \frac{T_d S}{1 + \frac{T_d S}{N}}, N \geq 10$$

L'effet 'dérivée' est destiné à accélérer la réponse du régulateur. Cette accélération n'est en général pas souhaitée lors des changements de consigne, mais seulement pour corriger une erreur due à une perturbation.

Exemple : Considérons le modèle du deuxième ordre précédent. La figure (Fig 2. 23) présente la réponse à un échelon de consigne unitaire en boucle fermée avec un régulateur dérivé filtré pour différentes valeurs de T_d .

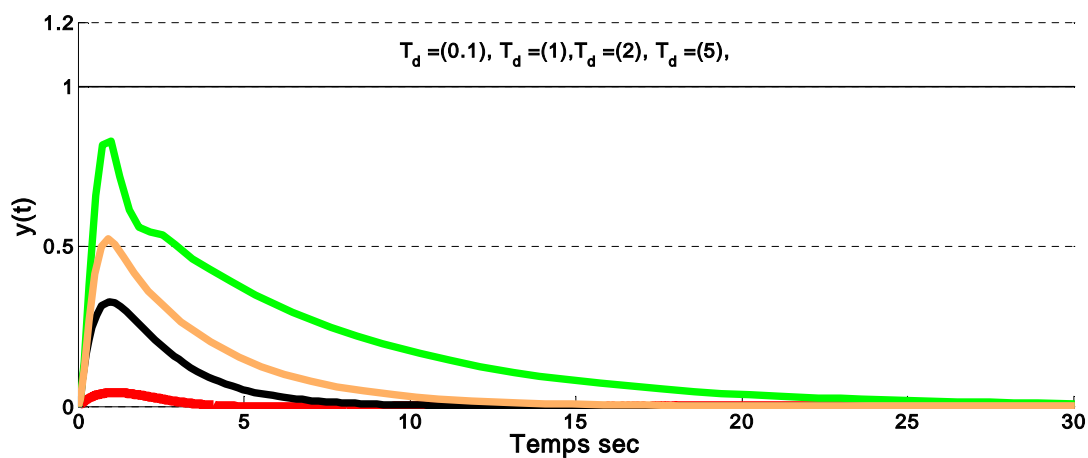


Figure 2.23: Réponse indicielle d'un système du deuxième ordre bouclé avec action dérivée.

En régime dynamique il améliore la rapidité du système.

Le temps T_d est le temps pour que l'entrée W-Y augmente de la valeur de la sortie U .

Plus T_d est grand, plus la valeur de la sortie U sera importante.

Pour supprimer l'action dérivée, il suffit de mettre T_d à 0.

L'action dérivée n'agit pas sur l'erreur statique mais elle améliore la stabilité et donc la précision dynamique (premier dépassement). Associée à l'action proportionnelle elle agit sur les hautes fréquences du système. L'action dérivée amplifie les bruits. C'est pourquoi cette action peut être associée à un filtre.

4.3.1. Réalisation action dérivée Analogique (avec des amplificateurs opérationnels)

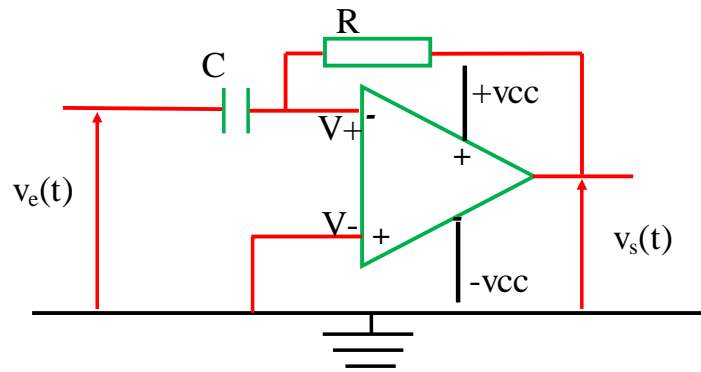


Figure 2.24: Réalisation d'un Régulateur Dérivée.

On obtient la fonction de transfert du régulateur.

Avec :

$$\left. \begin{matrix} Z_1 = 1/CS \\ Z_2 = R \end{matrix} \right\} \Rightarrow G_R(S) = -\frac{V_s(S)}{V_e(S)} = RCS$$

avec :

$$T_d = RC \text{ Donc :}$$

$$G_R(S) = T_d S$$

Où :

T_d : constante du temps

$$V_s(t) = T_d \frac{dV_e(t)}{dt}$$

Généralement, les actions intégrale et dérivée ne s'emploient jamais seules mais en combinaison avec l'action proportionnelle.

Action	Temps de montée	Dépassement	Temps de réponse	Erreur statique
P	Augmente	Augmente	Chang. faible	Diminue
I	Diminue	Augmente	Augmente	Éliminée
D	Changement. faible	Diminue	Diminue	Chang. faible

5. Différentes structures d'un régulateur PID

Les régulateurs rencontrés sur les installations industrielles combinent les effets proportionnel, intégral et dérivée. Différentes possibilités d'associations des modules P, I et D existent. Ces structures sont fonctionnellement équivalentes, et il est facile de convertir les coefficients utilisés dans l'une pour obtenir ceux d'une autre]. Les configurations les plus utilisées sont:

5.1. Action Proportionnel intégrale (PI)

L'action intégrale est rarement utilisée seule, car son effet ne devient sensible que lorsque l'erreur dure depuis un certain temps .Pour obtenir une réponse initiale plus rapide, on l'utilise avec une

action proportionnelle. On peut trouver deux structures des régulateurs **PI**, la structure parallèle et la structure série.

5.1.1. PI parallèle :

La sortie d'un régulateur PI parallèle est de la forme suivante :

$$u(t) = K_p \varepsilon(t) + \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

La fonction de transfert d'un régulateur P-I parallèle est : $K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{1}{T_i s}$

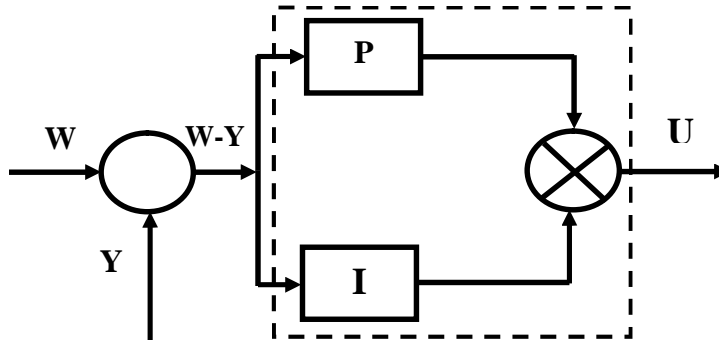


Figure 2.25 : Structure parallèle d'un Régulateur P.I.

Réponse indicielle

La figure (Fig 2. 26) présente la réponse (sortie) de ce type de régulateur, on observe la réponse $u(t)$ à un échelon d'erreur, dont, la mesure reste constante aux bornes du régulateur et on relève la réponse $u(t)$ du régulateur à un échelon de consigne. La réponse $u(t)$ est alors composée de deux parties distinctes :

- Un échelon résultant de l'action proportionnelle ;
- Une rampe résultant de l'action intégrale;

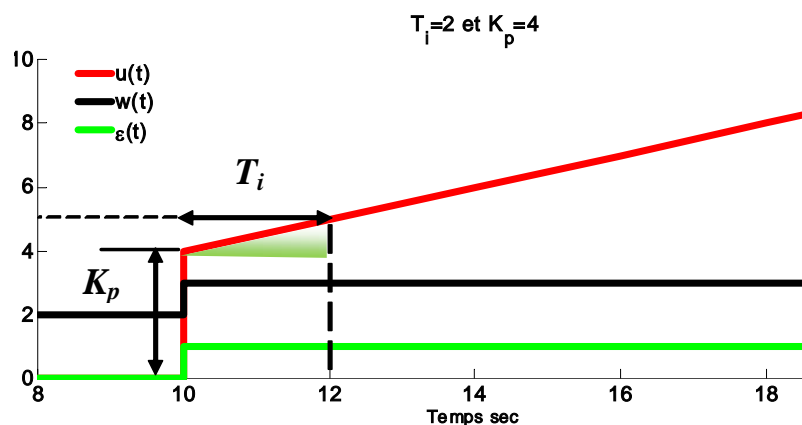


Figure 2.26: réponse indicielle d'un régulateur P-I parallèle.

5.1.2. PI Série

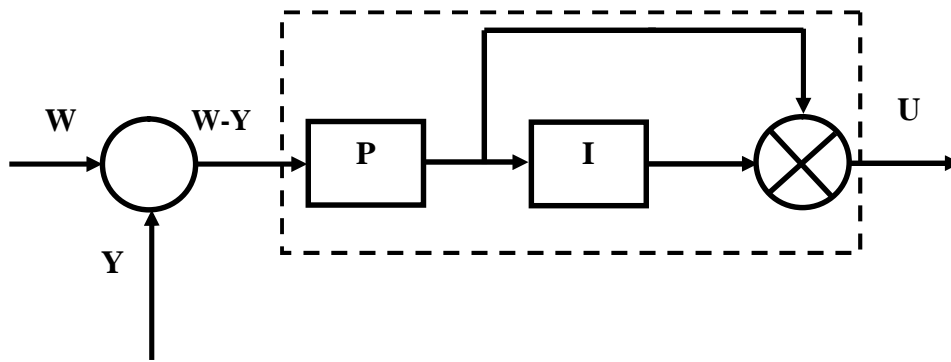


Figure 2.27: Structure série d'un Régulateur PI.

La sortie d'un régulateur PI série est de la forme suivante :

$$u = K_p (w - y) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t (w - y) dt + U_0$$

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

La figure (Fig 2.28) présente la sortie de ce type de régulateur, on observe la réponse $u(t)$ à un échelon d'erreur, dont la mesure reste constante aux bornes du régulateur et on relève la réponse $u(t)$ du régulateur à un échelon de consigne. La réponse $u(t)$ est alors composée de deux parties distinctes :

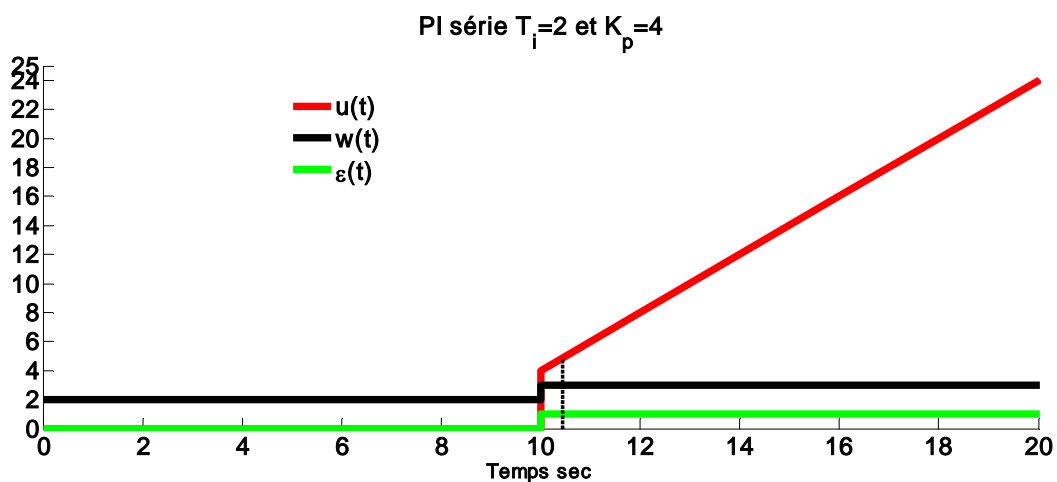


Figure 2.28: Réponse indicielle d'un régulateur PI série.

5.2. Action proportionnelle dérivée (PD)

L'objectif de l'action dérivée est d'anticiper les variations à venir du signal de mesure en appliquant une correction proportionnelle à sa vitesse de variation. L'action dérivée a un effet prédictif. La sortie d'un régulateur PD idéal est de la forme :

$$u = K_p (w - y) + \frac{K_p}{T_d} \frac{d(w - y)}{dt} + U_0$$

La fonction de transfert du régulateur PD idéal s'obtient en prenant la transformée de Laplace de l'équation précédente:

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p (1 + T_d s)$$

La figure (**Fig 2.29**) présente la réponse à un échelon de consigne unitaire en boucle fermée avec deux régulateurs différents, l'un proportionnelle Intégral **PI** et l'autre proportionnel dérivé **PD**

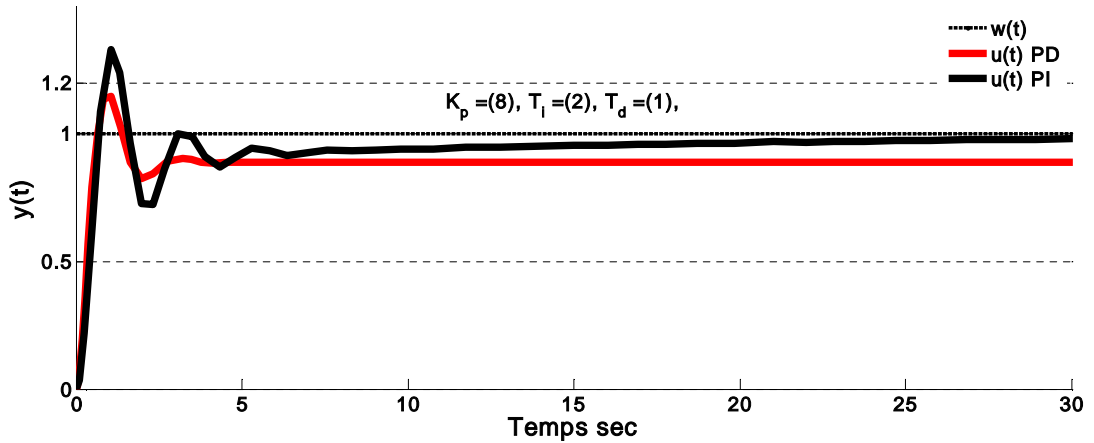


Figure 2.29: Réponse à un échelon de consigne unitaire en boucle fermée avec deux régulateurs différents.

D'après la figure (**Fig 2.29**) on remarque que:

- **PI:** Un grand dépassement ; un temps de montée rapide et un grand temps de réponse et une erreur statique nulle.
- **PD :** Diminution du dépassement; le temps de montée rapide presque le même que le régulateur PI, diminution du temps de réponse et une erreur statique remarquable.

5.3. Différentes structures d'un régulateur PID

PID série

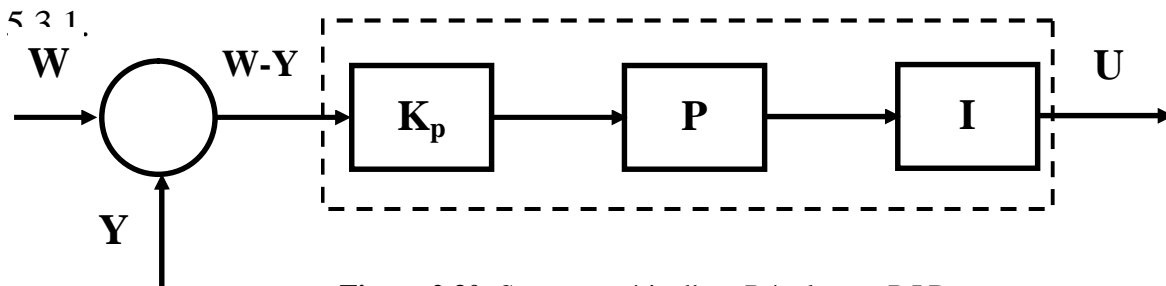


Figure 2.30: Structure série d'un Régulateur P.I.D.

La sortie d'un régulateur PID série est de la forme suivante :

$$u(t) = K_p \left(\frac{T_i + T_d}{T_d} \right) (w - y) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t (w - y) dt + K_p T_d \frac{d(w - y)}{dt} + U_0$$

La fonction de transfert du régulateur PID série s'obtient en prenant la transformée de Laplace de l'équation précédente :

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_d s)$$

Réponse indicielle

La figure (Fig 2.31) présente la réponse indicielle d'un régulateur PI D structure série, on observe sa réponse à un échelon d'erreur, dont la mesure reste constante aux bornes du régulateur et on relève la réponse $u(t)$ du régulateur à un échelon de consigne. La réponse $u(t)$ est alors composée de trois parties distinctes:

- Un pic résultant de l'action dérivée ;
- Un échelon résultant de l'action proportionnelle ;
- Une rampe résultant de l'action intégrale;

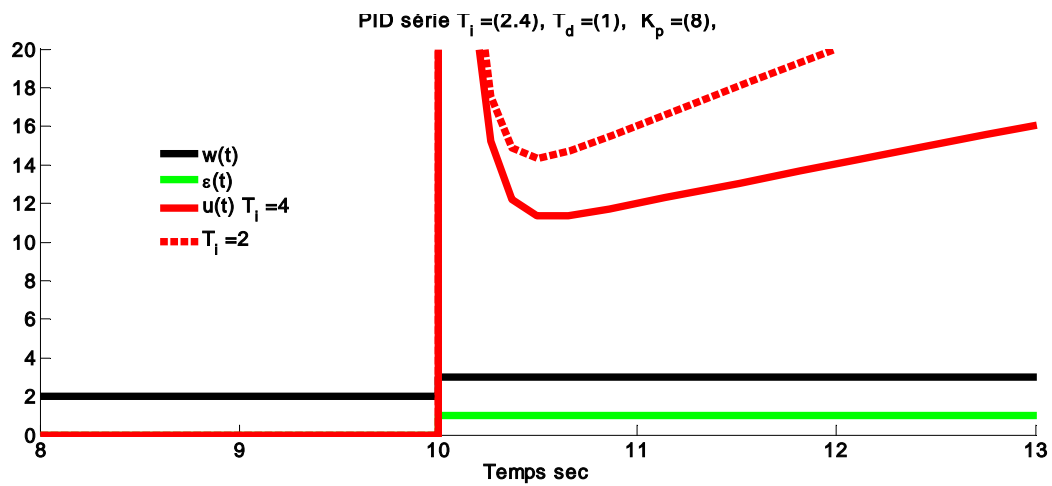


Figure 2.31: Réponse indicielle d'un régulateur PID série.

5.3.2. PID Parallèle

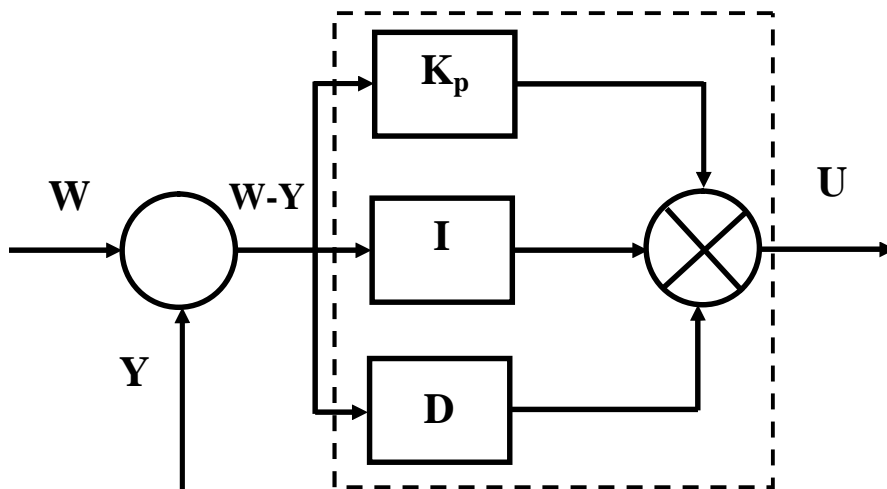


Figure 2.32: Structure parallèle d'un Régulateur P.I.D.

La sortie d'un régulateur PID parallèle est de la forme suivante :

$$u(t) = K_p (w(t) - y(t)) + \frac{1}{T_i} \int_0^t (w(t) - y(t)) dt + T_d \frac{d(w(t) - y(t))}{dt} + U_0$$

La fonction de transfert du régulateur PID série s'obtient en prenant la transformée de Laplace de l'équation précédente :

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s$$

Réponse indicielle

La figure (**Fig 2.33**) présente la réponse indicielle d'un régulateur PI D structure parallèle, on observe sa réponse à un échelon d'erreur, dont la mesure reste constante aux bornes du régulateur et on relève la réponse $u(t)$ du régulateur à un échelon de consigne. La réponse $u(t)$ est alors composée de trois parties distinctes:

- Un pic résultant de l'action dérivée ;
- Un échelon résultant de l'action proportionnelle ;
- Une rampe résultant de l'action intégrale;

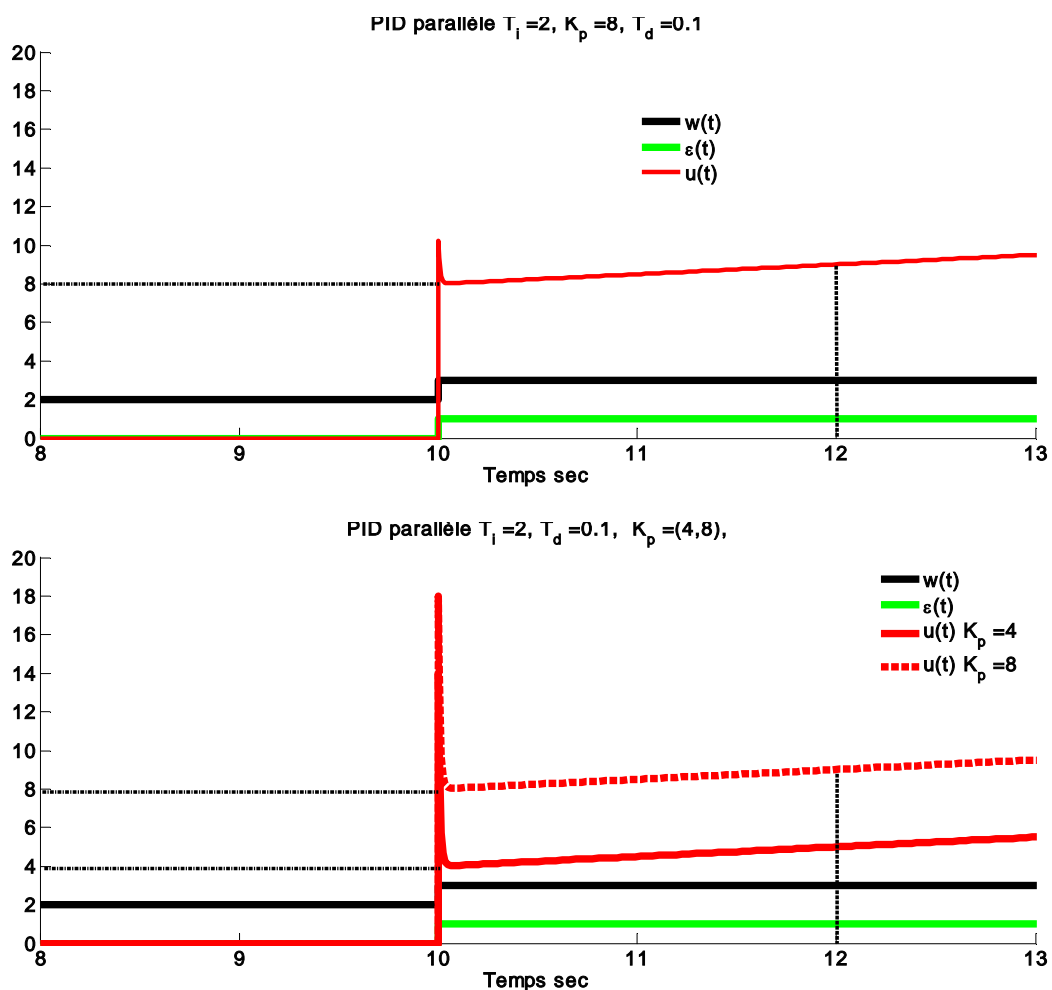


Figure 2.30: Réponse indicielle d'un régulateur PID parallèle.

5.3.3. PID structure mixte :

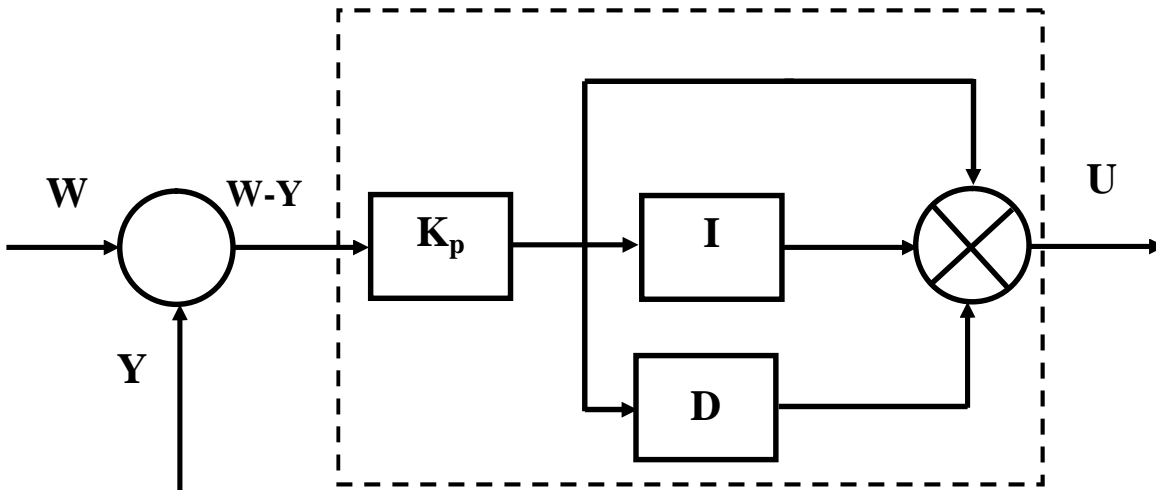


Figure 2.34: Structure mixte d'un Régulateur P.I.D.

La sortie d'un régulateur PID parallèle est de la forme suivante :

$$u(t) = K_p (w(t) - y(t))(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t (w(t) - y(t)) dt + K_p T_d \frac{d(w(t) - y(t))}{dt} + U_0$$

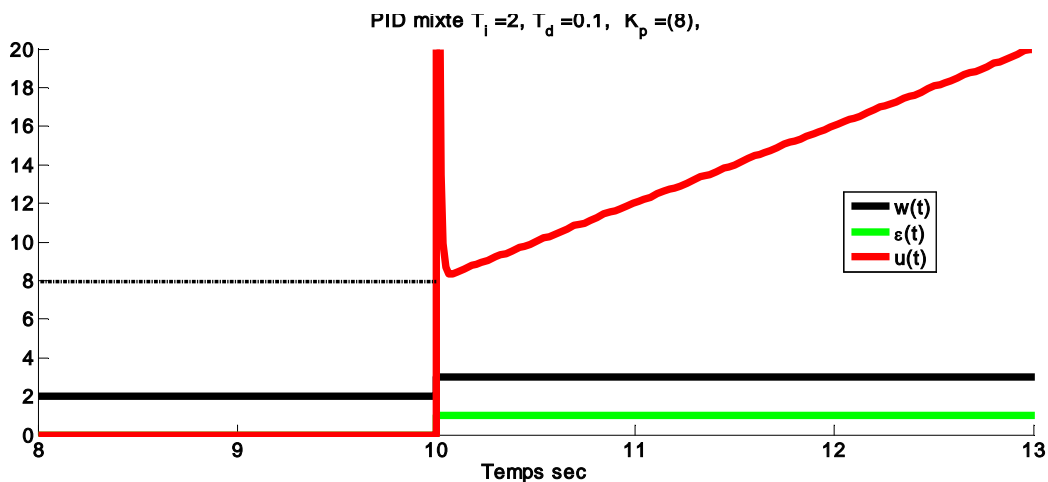
La fonction de transfert obtenue est donnée par:

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Réponse indicielle

On observe la commande d'un régulateur en réponse à un échelon d'erreur, dont la mesure reste constante aux bornes du régulateur et on relève la réponse $u(t)$ du régulateur à un échelon de consigne. La réponse $u(t)$ (**Fig 2.35**) est alors composée de trois parties distinctes :

- Un pic résultant de l'action dérivée ;
- Un échelon résultant de l'action proportionnelle ;
- Une rampe résultant de l'action intégrale;



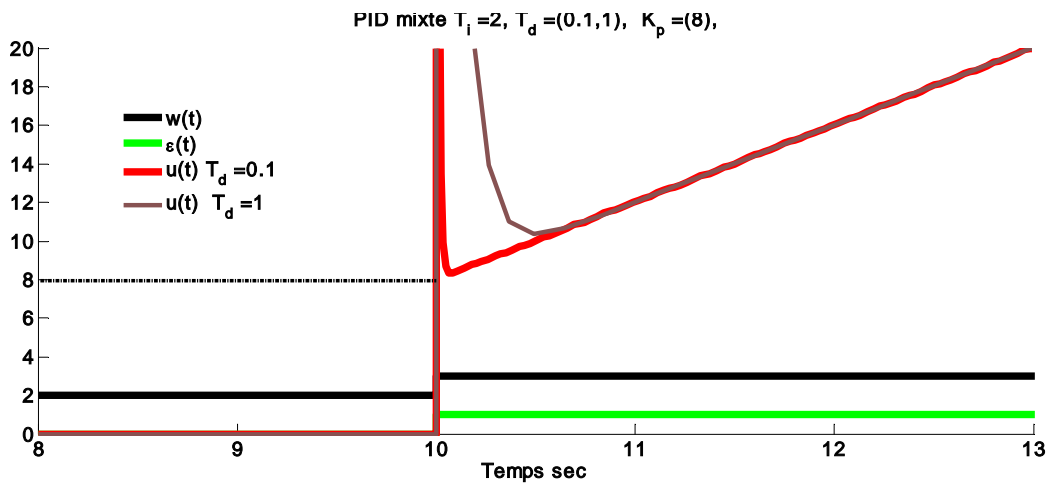


Figure 2.35: Réponse indicielle d'un régulateur PID parallèle.

6. Identification d'une structure de régulateur PI.

Lorsque l'on dispose d'un régulateur **PI** dont on veut déterminer la structure, il faut maintenir la mesure constante aux bornes du régulateur. On relève la réponse $u(t)$ du régulateur à un échelon de consigne, puis on modifie la valeur du K_p du régulateur et on procède à un nouvel échelon de consigne.

- Si la pente de la réponse $u(t)$ reste inchangée, alors le régulateur **PI** possède une structure *parallèle*.

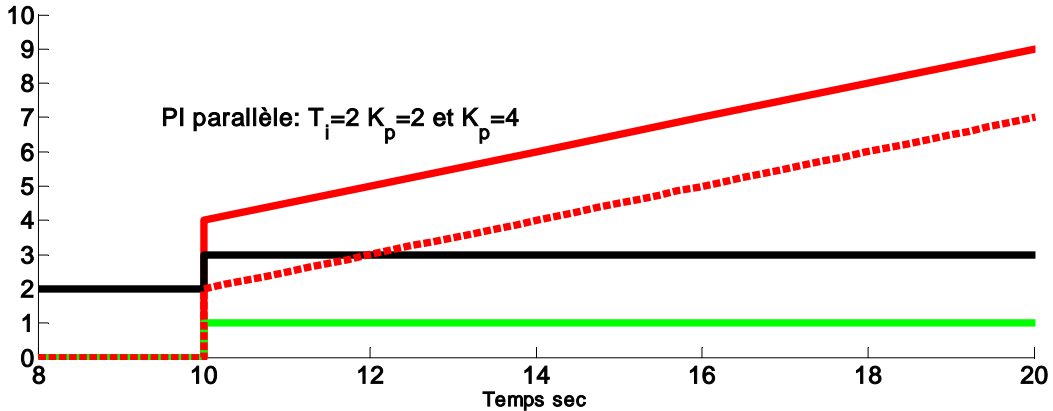


Figure 2.36: Identification de la structure parallèle d'un Régulateur P.I.

- Si la pente de la réponse $u(t)$ est modifiée, alors le régulateur **PI** possède une structure *série*.

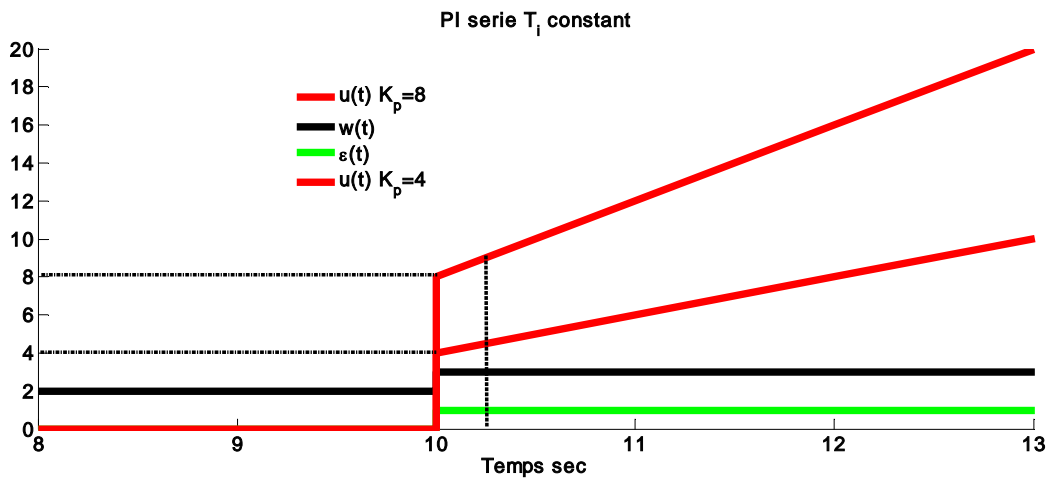


Figure 2.37: Identification de la structure série d'un Régulateur P.I.

7. Indentification d'une structure de régulateur PID

Pour identifier une structure parallèle, on fait la même façon que pour le régulateur PI : Pour $T_d = 0$, on fait varier la valeur du K_p .

Si, à mesure constante, un échelon de consigne provoque des rampes de $u(t)$ de pente identique, cela veut dire que le régulateur possède une structure parallèle figure (Fig 2.38).

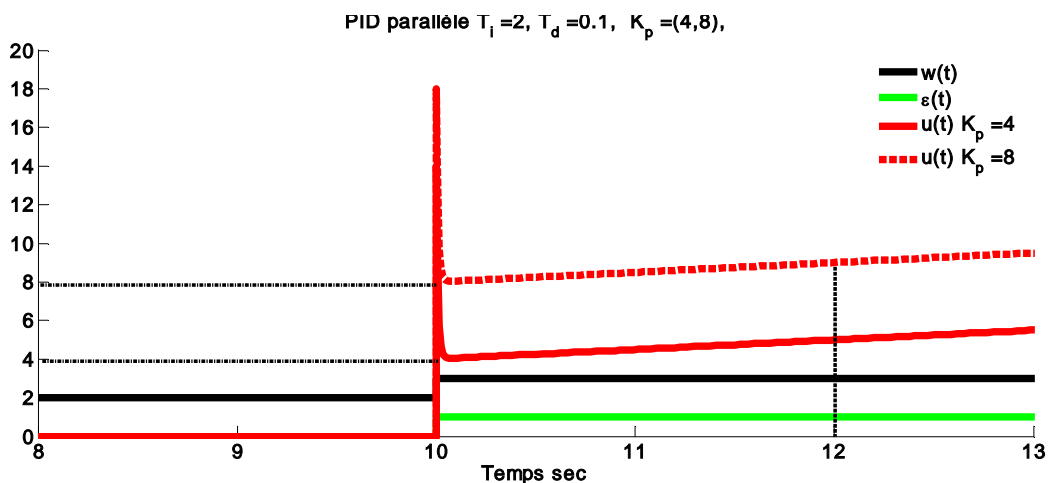


Figure 2.38: Identification de la structure parallèle d'un Régulateur P.I.D.

Dans le cas contraire, on fixe K_p et T_d à des valeurs fixes et on fait des échelons de consigne pour des valeurs différentes de T_i .

- Si le saut effectué à $t = 0$ par $u(t)$ reste constant, cela signifie que la structure est mixte.

La figure (Fig 2.39) présente la sortie d'un régulateur PID mixte, dans le cas où on fixe K_p et T_d et t_i variable.

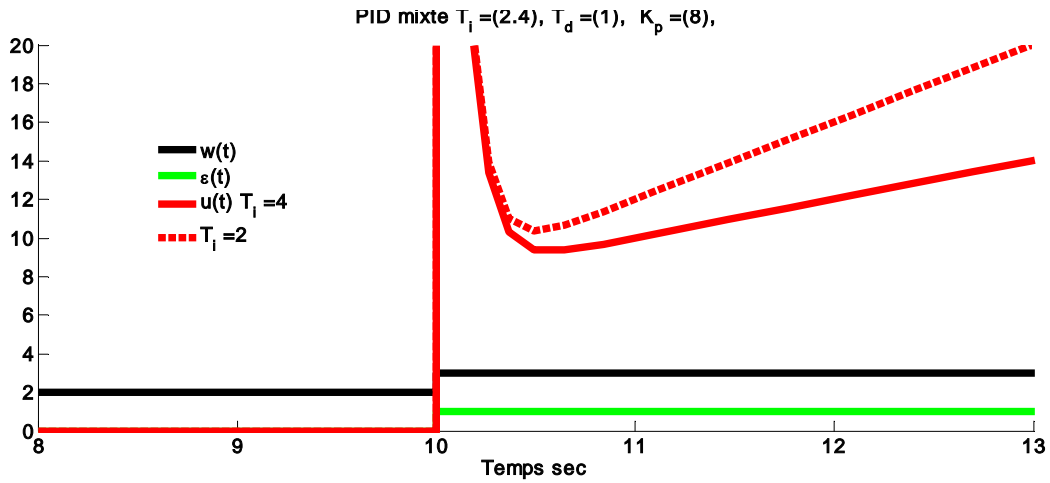


Figure 2.39: Identification de la structure mixte d'un Régulateur P.I.D.

Si le saut effectué à $t = 0$ par $u(t)$ varie avec T_i , cela signifie que le PID a une structure série. La figure (Fig 2.40) présente la sortie d'un régulateur PID série, dans le cas où on fixe K_p et T_d et T_i variable.

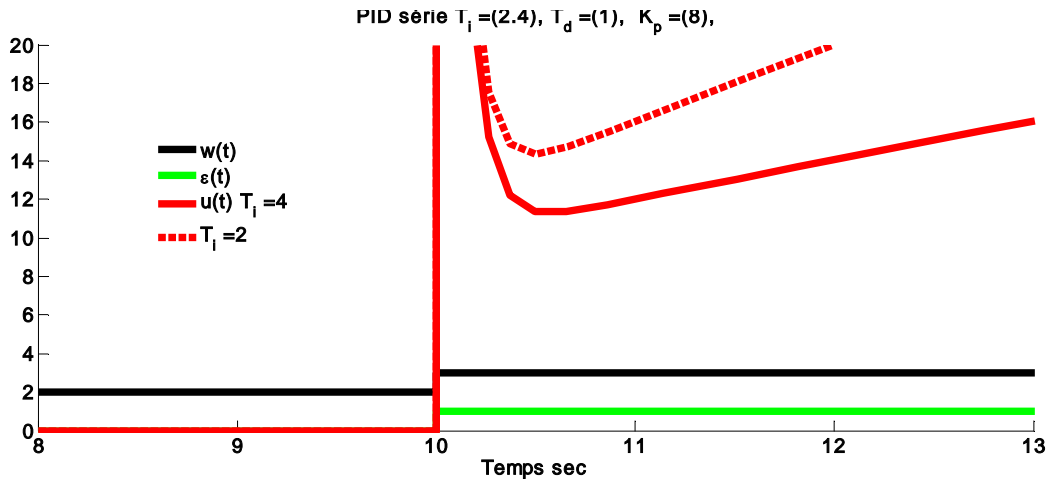


Figure 2.40: Identification de la structure série d'un Régulateur P.I.D.

Généralement, le PID mixte est le plus adapté par rapport aux deux autres types, car il donne de meilleures performances à tous les niveaux (temps de montée, temps de réponse et dépassement).

1. Introduction :

Le problème de la détermination des régulateurs est connu par la synthèse des systèmes bouclés. La synthèse du régulateur PID n'est plus alors qu'un problème de réglage des actions proportionnelle, intégrale et dérivée, c'est-à-dire K_p , T_i et T_d . Le réglage de ces paramètres est un problème essentiel dont l'objectif est de mettre en œuvre des méthodes simples, rapides et suffisamment précises. Ces méthodes de synthèse sont très nombreuses et une classification n'est pas une tâche facile. Ce problème a bien sûr débouché sur nombreuses méthodes. On présente dans le cadre de ce chapitre quelques types de méthodes:

- **Méthodes empiriques :** Encore très utilisées dans l'industrie. ces méthodes ne nécessitant pas une connaissance parfaite du modèle du procédé à commander.

La pratique industrielle, on utilise directement des régulateurs PID, construits par des spécialistes en matière

Les paramètres du régulateur seront calculés à partir des observations expérimentales sur le procédé (Relevé de la réponse indicielle par exemple). L'intérêt majeur de ces méthodes réside dans leur simplicité. Elles sont largement utilisées dans le domaine industriel et elles sont dans la plus part des cas suffisantes mais ne permettent pas un réglage fin.

- **Méthodes Analytiques:** Ces méthodes nécessitent l'identification préalable (un modèle mathématique du procédé).
- **Méthodes théoriques :** Ces méthodes basées sur la connaissance du modèle du système sous forme de fonction de transfert par exemple. Les actions du régulateur seront calculées de façon à obtenir la fonction de **transfert souhaitée** en boucle ouverte ou en boucle **fermée**.

➤

2. Méthodes empiriques :

En 1942 **Ziegler** et **Nichols** ont proposé deux approches expérimentales destinées à fixer rapidement les paramètres des régulateurs **P**, **PI** et **PID**. La première nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle du système à régler, alors que la deuxième exige d'amener le système en boucle fermée à sa limite de stabilité. Il est important de noter que ces méthodes ne s'appliquent en générale qu'à des systèmes sans comportement oscillant. Ces systèmes possèdent souvent un retard pur et/ou plusieurs constantes de temps. On les rencontre surtout dans les processus Physicochimiques tels que les régulations de température, de niveau, de pression, etc....

2.1. Méthode Ziegler et Nichols en Boucle ouverte:

La méthode de Ziegler et Nichols est basée sur les deux paramètres T_u et T_a de la réponse indicielle résultant d'un essai en boucle ouverte. Pour obtenir les paramètres de régulateur PID, il suffit

d'enregistrer la réponse indicielle du processus seul (c'est- à- dire dans régulateur). Figure suivante :

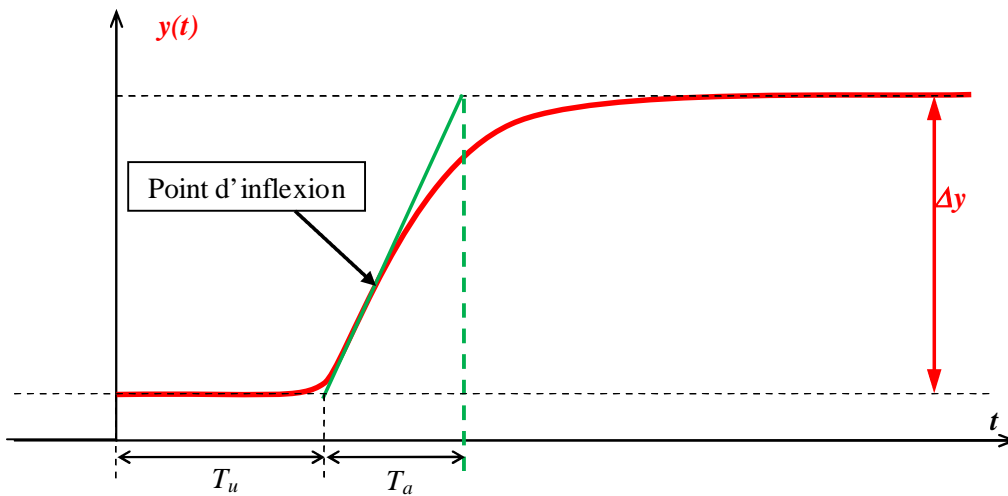


Figure 3.1: paramètres Ziegler –Nichols en boucle ouverte.

- S'il est possible d'ouvrir la boucle,
- On règle K_p à 1, T_i à 1^∞ et T_d à 0 sans débrancher le correcteur.
- On envoie un échelon d'amplitude A en entrée et on observe la sortie y .
- Sur l'enregistrement, on trace la tangente au point d'inflexion.
- On mesure ensuite le retard apparent T_u correspondant au point d'intersection de la tangente avec l'abscisse et le temps T_a mis pour atteindre A .

Le tableau suivant, fournit les paramètres du régulateur **PID** à structure mixte en fonction des paramètres caractéristiques relevés sur le processus dans le cas d'un essai en boucle ouverte:

Type	K_p	T_i	T_d
P	$T_a/(T_u.k)$	-----	-----
PI	$0.9T_a/(T_u.k)$	$3.3.T_u$	-----
PID	$1.2T_a/(T_u.k)$	$2.T_u$	$0.5T_u$

Figure 3.1: paramètres PID obtenus par Ziegler –Nichols en boucle ouverte.

K est le gain statique :

$$K = \Delta Y / \Delta U$$

2.1.1. Exemple :

Une illustration de cette démarche est donnée ci-dessous pour la réponse indicielle unitaire d'un

procédé $G(s) = k \frac{e^{-1.5s}}{1 + 10s}$ à un échelon unité.

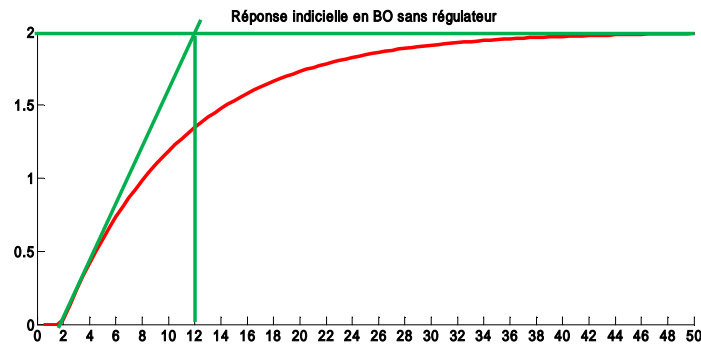


Figure 3.2: Exemple de paramètres Ziegler –Nichols en boucle ouverte.

On relève les paramètres suivants :

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{2}{1} = 2 \quad Tu = 2, Ta = 10$$

Le tableau de réglage proposé par Ziegler & Nichols est:

Type	K_p	T_i	T_d
P	2.5		
PI	2.25	6.6	
PID	3	4	1

Tableau 3.2: Exemple de calcul d'un PID obtenus par Ziegler et Nichols en Boucle ouverte.

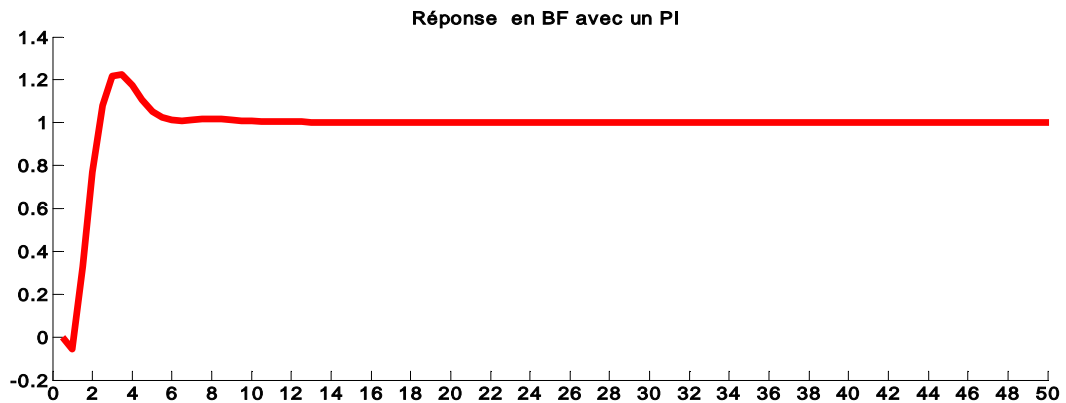


Figure 3.3: Réponse indicielle du système en boucle fermée avec PI obtenu.

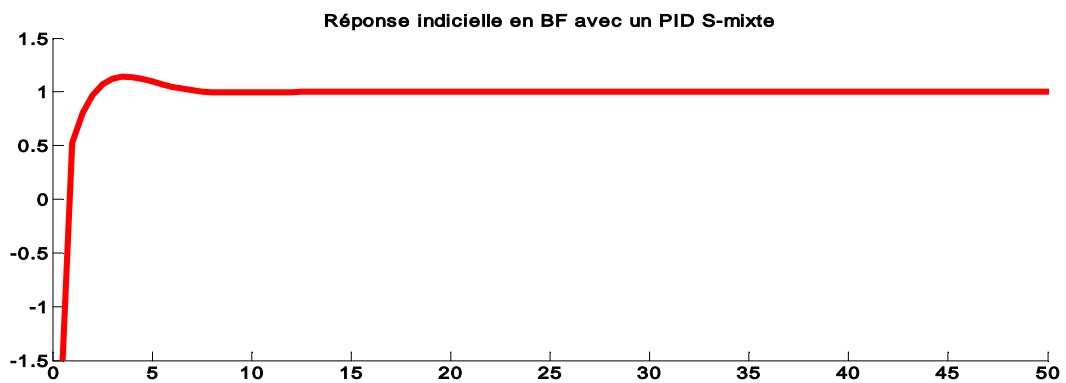


Figure 3.4: Réponse indicielle du système en boucle fermée avec PID obtenu.

Remarque :

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

2.2. Méthode Ziegler et Nichols en Boucle fermée:

Cette méthode nécessite de boucler le système 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 du système comme indique la figure (**Fig 3.5**).

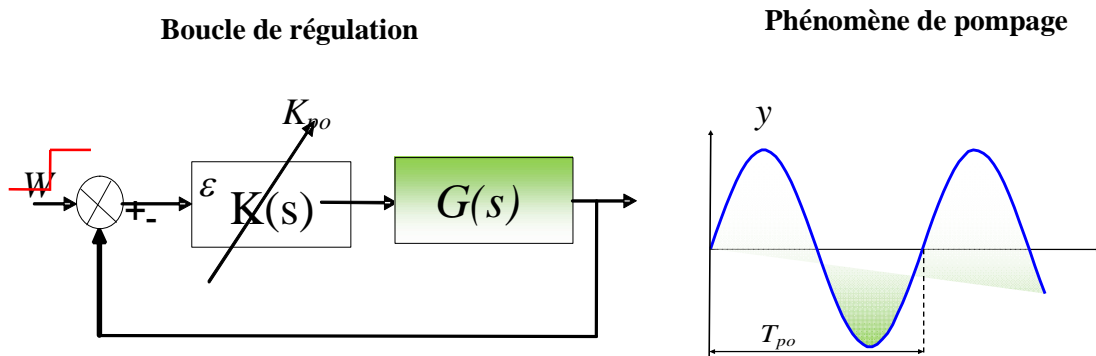


Figure 3.5: paramètres Ziegler –Nichols en boucle fermée.

Après avoir relevé le gain critique K_{po} et la période d'oscillation T_{po} de la réponse, on peut calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide du tableau suivant:

Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 \cdot K_{po}$	max	0
PI série	$0.45 \cdot K_{po}$	$0.83 \cdot T_{po}$	0
PI parallèle	$0.45 \cdot K_{po}$	$2 \cdot T_{po} / K_{po}$	0
PID série	$0.30 \cdot K_{po}$	$0.25 T_{po}$	$0.25 \cdot T_{po}$
PID parallèle	$0.6 \cdot K_{po}$	$0.85 \cdot T_{po} / K_{po}$	$K_{po} \cdot T_{po} / 13.3$
PID mixte	$0.6 \cdot K_{po}$	$0.5 \cdot T_{po}$	$0.125 \cdot T_{po}$

Tableau 3.3 : Paramètre d'un PID obtenus par Ziegler et Nichols en Boucle fermée.

Les valeurs proposées par **Ziegler et Nichols** ont été testées dans de très nombreuses situations et il faut souligner qu'ici également elles conduisent à un temps de montée relativement court assorti d'un dépassement élevé [].

2.2.1. Exemple : On prend l'exemple du système précédent :

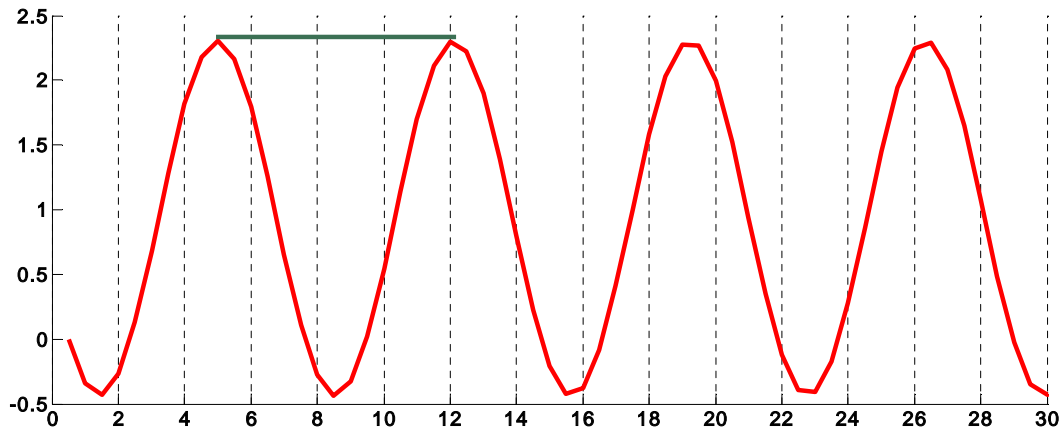


Figure 3.6: Exemple de paramètres Ziegler –Nichols en boucle fermée.

$K_{p0}=7.16$ et $T_{p0}=7$

Type	K_p	T_i	T_d
P	3.58	max	0
PI série	3.22	5.81	0
PI parallèle	3.22	1.96	0
PID série	2.15	1.75	1.75
PID parallèle	4.3	0.83	3.77
PID mixte	4.3	3.5	0.875

Tableau 3.4: Exemple de calcul d'un PID obtenus par Ziegler et Nichols en Boucle fermée.

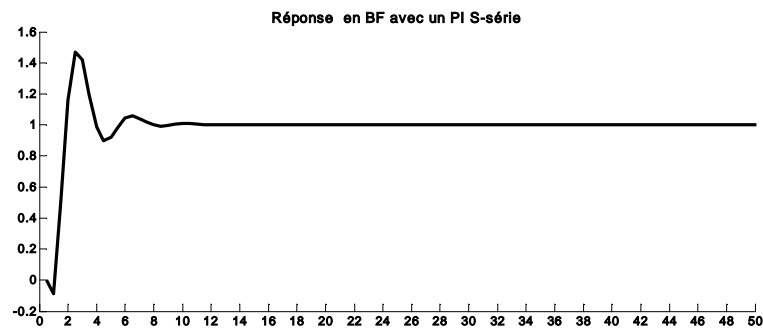


Figure 3.7: Réponse du système boucle fermée avec PI série.

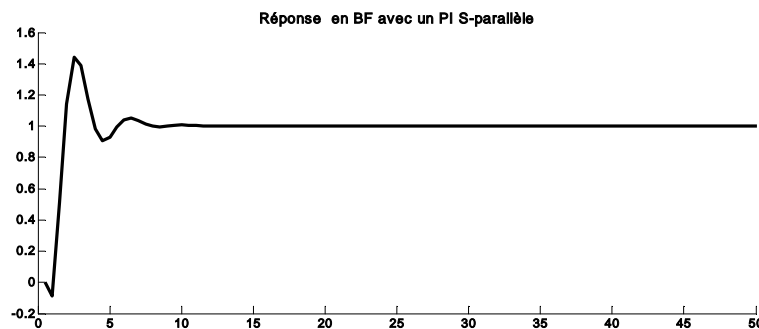


Figure 3.8: Réponse du système boucle fermée avec PI parallèle.

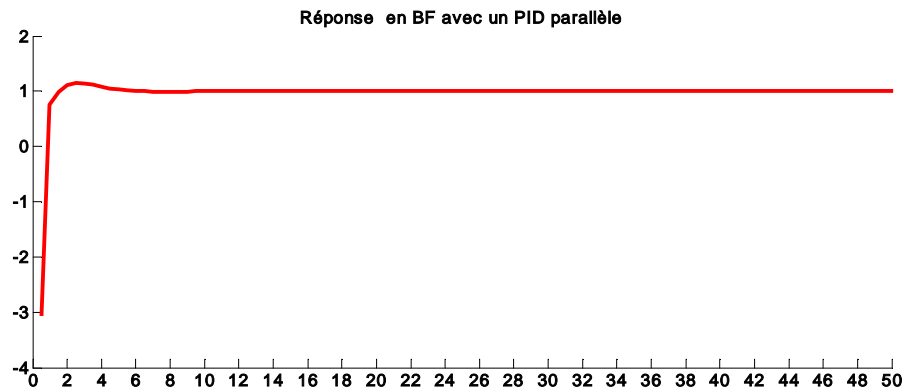


Figure 3.9: Réponse du système boucle fermée avec PID parallèle.

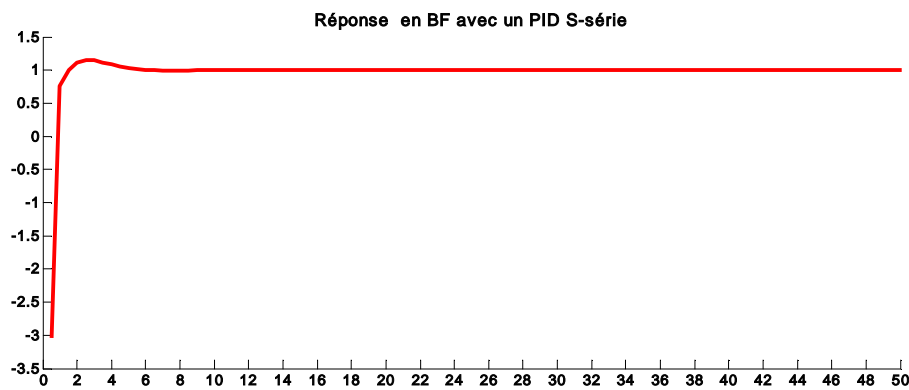


Figure 3.10: Réponse du système boucle fermée avec PID série.



Figure 3.11: Réponse du système boucle fermée avec PID mixte.

3. Méthode de réglage après Identification du procédé

Ces méthodes consistent d'abord à identifier le système à commander

3.1 Modèle non évolutif :

Le modèle retenu est de type **Broïda** $G(s) = k \frac{e^{-Ts}}{1 + \tau s}$ et le choix de régulateur va être lié au rapport

$$\frac{\tau}{T}$$

3.1.1. Choix du régulateur:

$\frac{\tau}{T} > 20$	Régulateur tout ou rien (TOR)
$10 < \frac{\tau}{T} < 20$	Régulateur P
$5 < \frac{\tau}{T} < 10$	Régulateur PI
$2 < \frac{\tau}{T} < 5$	Régulateur PID
$\frac{\tau}{T} < 2$	Limite du régulateur PID

Tableau 3.5 : choix d'un PID obtenus par identification d'un système stable.

3.1.2. Paramètres des régulateurs:

Les paramètres des régulateurs correspondants sont donnés sur le tableau suivant : Tab (3.6)

Action	P	PI série	PI parallèle	PID série	PID parallèle	PID mixte
K_p	$\frac{0.8.\tau}{kT}$	$\frac{0.8.\tau}{kT}$	$\frac{0.8.\tau}{kT}$	$\frac{0.85.\tau}{kT}$	$\frac{\frac{\tau}{T} + 0.4.\tau}{1.2.T}$	$\frac{\frac{\tau}{T} + 0.4.\tau}{1.2.T}$
T_i	Max	τ	$\frac{kT}{0.8}$	τ	$\frac{kT}{0.75}$	$\tau + 0.4.T$
T_d	0	0	0	$0.4.\tau$	$\frac{035.\tau}{k}$	$\frac{T.\tau}{T + 2.5.\tau}$

Tableau 3.6 : Paramètres d'un PID obtenus par identification d'un système stable.

3.2. Modèle évolutif :

L'identification s'effectue impérativement en boucle **fermée** : on relève le gain critique K_{cr} et la période des oscillations de pompage T_{osc} , le modèle choisi étant le modèle le plus **simple** :

$$G(s) = k \frac{e^{-\tau s}}{s}$$

Les valeurs de k et T sont données par les relations:

$$T = \frac{T_{osc}}{4}$$

et

$$k = \frac{Kcr}{6,28T_{osc}}$$

3.2.1. Choix du régulateur:

Le choix des paramètres du régulateur est lié à la réglabilité du produit kT :

$kT < 0,05$	Régulateur tout ou rien (TOR)
$0,05 < kT < 0,1$	Régulateur P
$0,1 < kT < 0,2$	Régulateur PI
$0,2 < kT < 0,5$	Régulateur PID
$kT > 0,5$	Limite du régulateur PID Régulateur en cascade ou faire la synthèse du correcteur

Tableau 3.7 : choix d'un PID obtenus par identification d'un système évolutif.

3.2.2. Paramètres des régulateurs:

Le tableau ci-dessous (Tab 3.8) donne les valeurs des paramètres des correcteurs correspondants :

Action	P	PI série	PI parallèle	PID série	PID parallèle	PID mixte
K_p	$\frac{0,8\tau}{kT}$	$\frac{0,8\tau}{kT}$	$\frac{0,8\tau}{kT}$	$\frac{0,85}{kT}$	$\frac{0,9}{kT}$	$\frac{0,9}{kT}$
T_i	max	5 T	$\frac{kT^2}{0,15}$	4,8 T	$\frac{kT^2}{0,15}$	5,2 T
T_d	0	0	0	0,4 T	$\frac{0,35}{k}$	0,4 T

Tableau 3.8 : Paramètres d'un PID obtenus par identification d'un système évolutif.

4. Réglage d'un régulateur PID basé sur les marges de gain et de phase:

4.1. Rappel

4.1.1. Marge de gain :

La marge de gain est $MG = \frac{1}{|G(j\omega_{-180^\circ})|}$ ou $(MG)_{dB} = -|G(j\omega_{-180^\circ})|_{dB}$ avec ω_{-180° telle que $\text{Arg } G(j\omega_{-180^\circ}) = -180^\circ$.

Sur le plan de Nyquist :

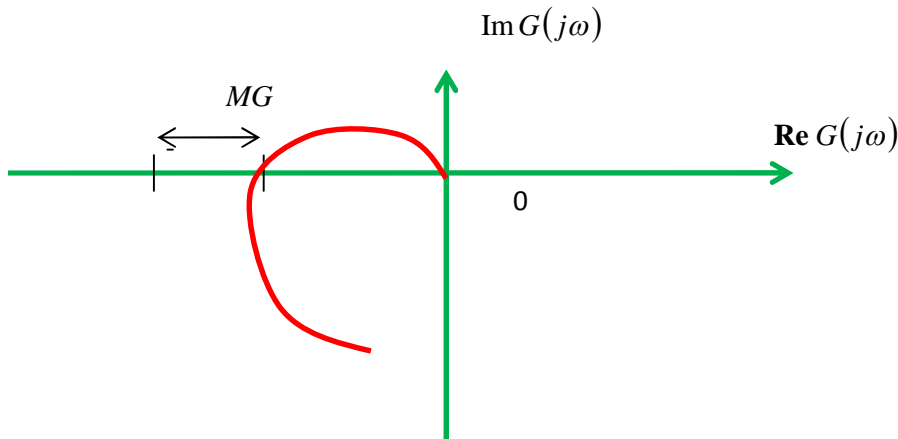
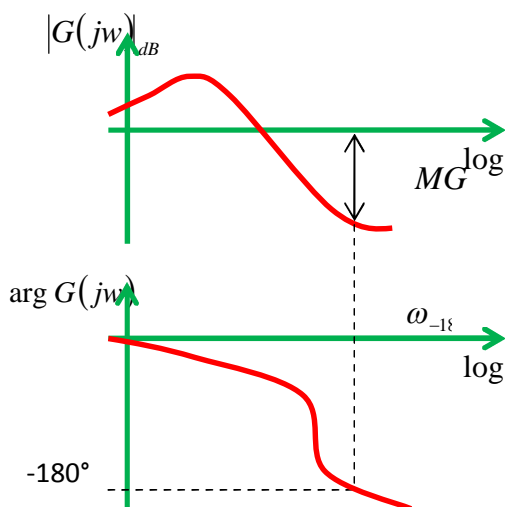


Figure.3.12: La marge de gain sur le plan de Nyquist.

Sur le plan de Bode :



Une petite marge de gain entraîne un degré de stabilité petit. Une valeur de marge de gain utilisée habituellement est 12 dB. ou bien 3

Figure.3.13 : La marge de gain sur le plan de Bode.

4.1.2. Marge de phase :

La marge de phase est $\Phi_m = 180^\circ + \arg G(j\omega_0)$ avec ω_0 la fréquence au gain unité en boucle ouverte, c'est-à-dire telle $|G(j\omega_0)| = 1$ ou $|G(j\omega_0)|_{dB} = 0$.

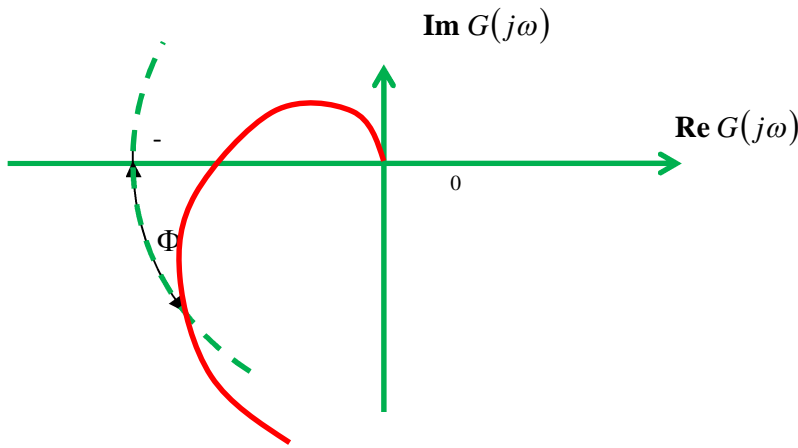
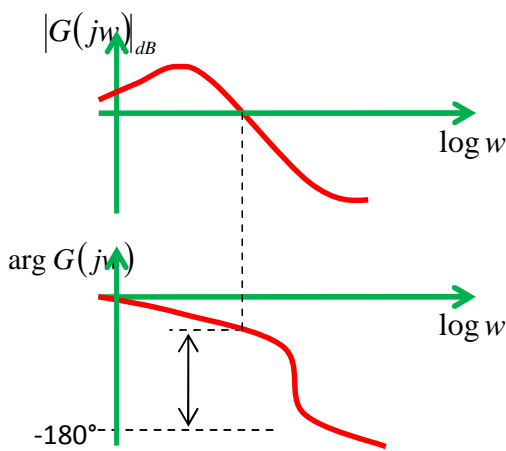


Figure.3.14 : La marge de phase sur le plan de Nyquist.

Sur le plan de Bode



Une marge de phase petite entraîne un degré de stabilité petit. On utilise couramment une marge de phase de 45° qui garantit un fonctionnement correct de la plupart des systèmes.

Figure.3.15: La marge de phase sur le plan de Bode.

4.2 Synthèse dans le cas d'un régulateur PI

Généralement, la régulateur PI est donné par $K(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$ et le système est représenté à l'aide d'un modèle Broïda

$$G(s) = k \frac{e^{-Ts}}{\tau \cdot s + 1}$$

Pour un processus donné, caractérisé par les paramètres (K, τ, T) et pour des marges de gain et de phase spécifiés (MG, Φ_m), Des Approximation des paramètres du régulateur sont données par :

$$K_p = \frac{\omega_\pi \cdot \tau}{MG \cdot k}$$

$$T_i = \left(2 \cdot \omega_\pi - \frac{4 \cdot \omega_\pi^2 T}{\omega_\pi} + \frac{1}{\tau} \right)^{-1}$$

$$\omega_\pi = \frac{MG \cdot \Phi_m + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot MG \cdot (MG - 1)}{(MG^2 - 1)T}$$

4.3. Exemple :

Soit le système de 5^{ème} ordre suivant :

$$G(s) = \frac{4.2}{302 s^5 + 634s^4 + 449s^3 + 141s^2 + 20s + 1}$$

Nous voulons de calculer les paramètres du régulateur PI permettant d'assurer une marge de gain de $MG=3$ et une marge de phase de $\Phi_m = 60^\circ$

Pour calculer les paramètres du régulateur nous traçons tous d'abord la réponse indicielle avec une entrée un échelon unitaire, la réponse est indiquée sur la figure (Fig 3.16):

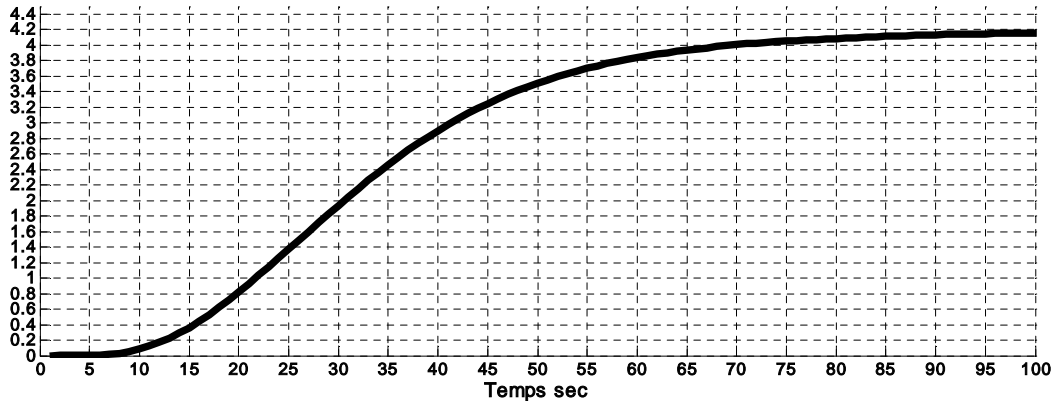


Figure 3.16: Réponse indicielle du système étudié.

D'après l'évolution de cette réponse on voit que le système est stable en boucle ouverte (entrées bornées et sorties bornées), donc nous pouvons proposer un modèle de Broïda de Type 2 :

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ts}}{1+\tau s}$$

La figure (Fig 3.17) présente le diagramme de Bode de ce système, d'après cette figure les valeurs des marges de gain et de phase sont plus faibles par rapport à les marges désirées (-1.04 dB) pour MG et (-7.19 deg) pour Φ_m . Ainsi la figure (Fig 4.18) représente la réponse indicielle du système bouclé sans régulateur, cette figure montre que le bouclage de ce système le rend instable, ce qui nous oblige de faire une correction avec un régulateur PI pour améliorer ces performances en boucle fermée.

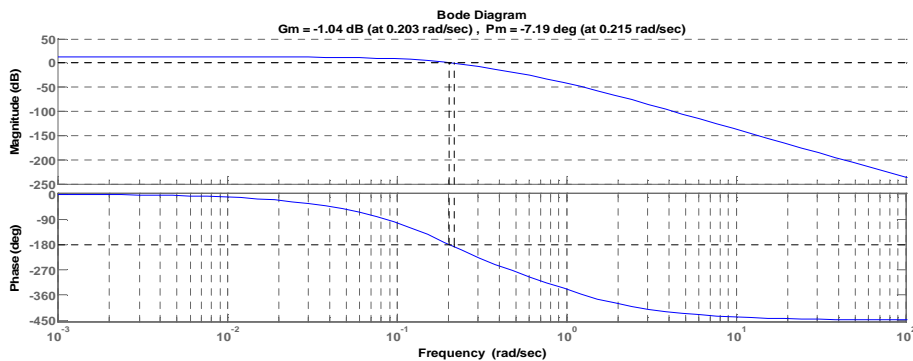


Figure.3.17 : Diagramme de Bode du système étudié.

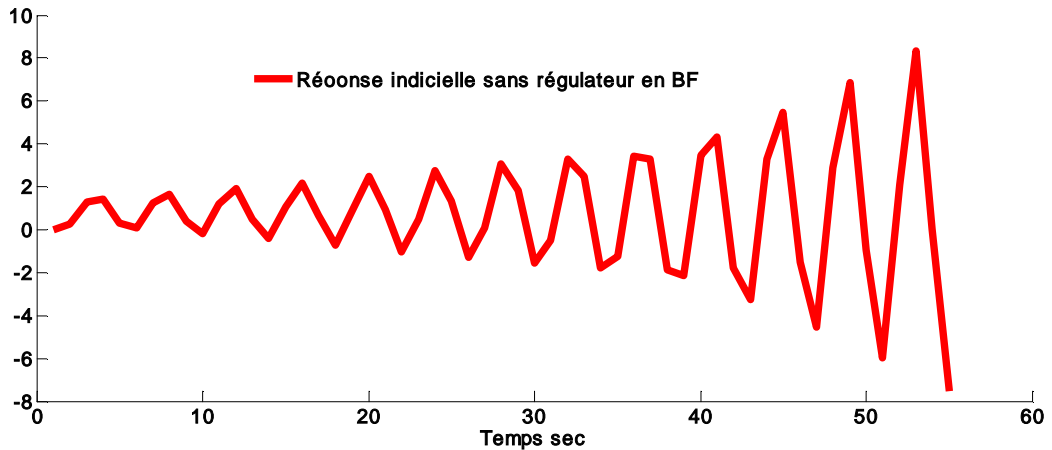


Figure.3.18: Réponse indicielle du système étudié en boucle fermée sans régulateur.

4.3.1. Calcul des paramètres du modèle :

La valeur finale de la réponse est 4.2, donc $\Delta y = 4.2 - 0 = 4.2$.

D'après la réponse de la figure (**Fig3.16**) le temps correspond 40% de la variation de la sortie ((1.68)) est 15.7 s

D'après la réponse de la figure (**Fig 3.16**) le temps correspond 28% de la variation de la sortie ((1.176)) est 13.13 s.

D'après les formules de calcul du modèle Broïda:

Gain statique : $K = \Delta Y / \Delta X = 4.2 / 1 = 4.2$

Constante de temps : $\tau = 5.5 * (t_2 - t_1) = 5.5 * (16 - 13) = 14.135$

Retard ou temps mort : $T = 2.8 * t_1 - 1.8 * t_2 = 2.8 * 13 - 1.8 * 16 = 8.5$

Donc le modèle identifié est donné par : $G(s) = \frac{4.2e^{-8.5s}}{1 + 14.135s}$

La figure (**Fig 3.19**) indique l'évolution de la réponse indicielle du système réel (courbe rouge) et celle du modèle identifié (courbe verte). Il faut noter que le modèle c'est une approximation du système réel.

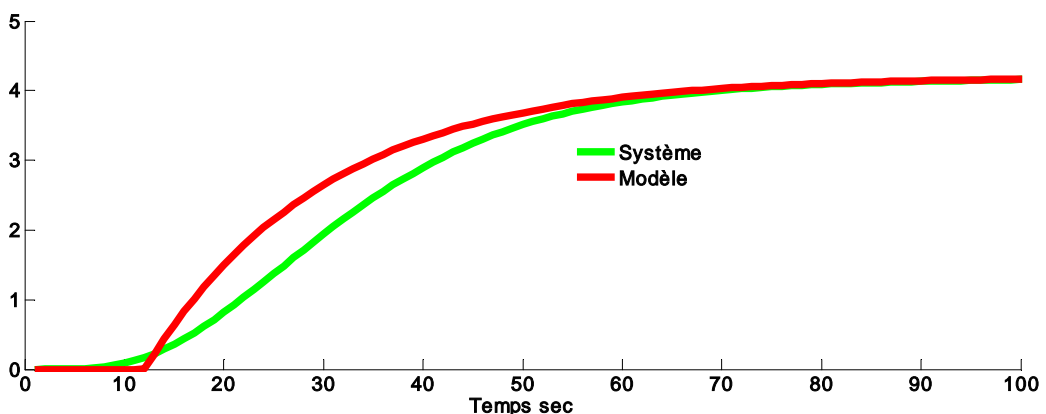


Figure.3.19: Réponse indicielle du système réel et celle du modèle identifié en boucle ouverte.

4.3.2. Calcul des paramètres du régulateur PI.

D'après la formule de calcul, et avec les paramètres du modèle de Broïda (K , T et τ) calculés, et les valeurs de Φ_m et MG désirées nous avons obtenu les paramètres K_p et T_i suivant :

$$K_p = 0.20, T_i = 12.5.$$

Concernant la méthode basée sur le tableau (3.6), les paramètres du régulateur peuvent être calculés par:

$$k_p = \frac{0.8 \cdot \tau}{kT} = \frac{0.8 * 14.135}{4.2 * 8.5} = 0.31 \text{ et la valeur de } T_i \text{ est } \tau = 14.135.$$

La figure (3.20) nous donne l'évolution de la réponse indicielle du système régulé en boucle fermée avec le régulateur PI calculé à partir de technique (calcul après identification du système), et la même réponse obtenu avec un PI basé sur les marges de stabilité.

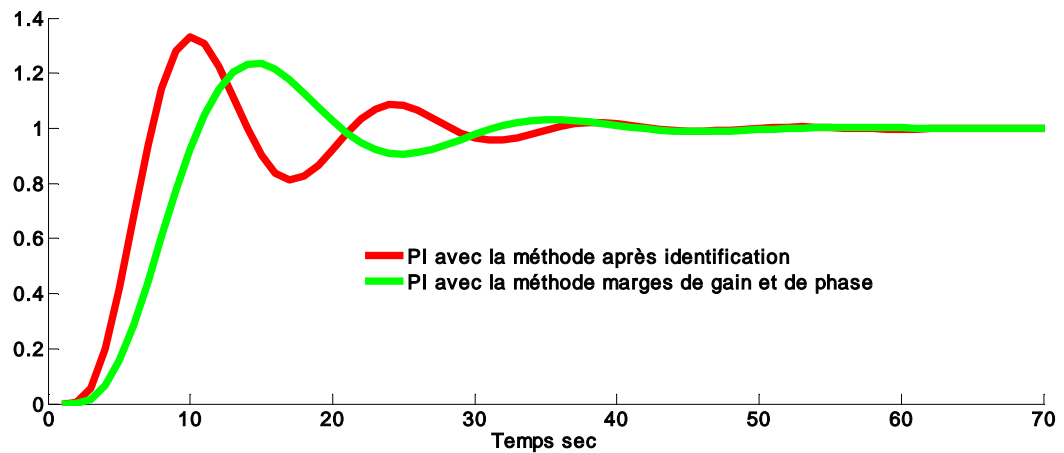


Figure 3.20: Réponse indicielle du système et celle du modèle identifié en boucle fermée

La figure (Fig 3.20) montre l'amélioration de certaines performances de ce système telles que l'erreur statique devient nulle, l'assurance de la stabilité globale. Le temps de réponse à 5% est 30.1 s, un dépassement légèrement supérieur.

5. Méthode théorique de réglage d'un régulateur PID :

Les méthodes théoriques (directes) sont très nombreuses et reposent sur la connaissance d'un modèle précis du système à commander. Les performances réelles obtenues dépendent de la qualité du modèle et de son aptitude à représenter le mieux possible le procédé.

Pour obtenir ce modèle, on peut partir des lois régissant les phénomènes physico-chimiques, notamment les lois de la chimie, de la thermique, de la mécanique, de l'hydraulique, de l'aérodynamique, de la mécanique des fluides, etc. A partir de là, tout processus peut être décrit sous la forme d'un ensemble d'équations mathématiques.

Connaissant ce modèle, il est possible de définir les caractéristiques du régulateur qui permettra de contrôler au plus près le processus par une des méthodes directes de synthèse.

Parmi les méthodes théoriques, on présente la méthode du modèle: elle est basée sur l'imposition d'un modèle en boucle fermée à atteindre (performances souhaitées).

La structure de commande en boucle fermée est la suivante (**Fig 3.21**):

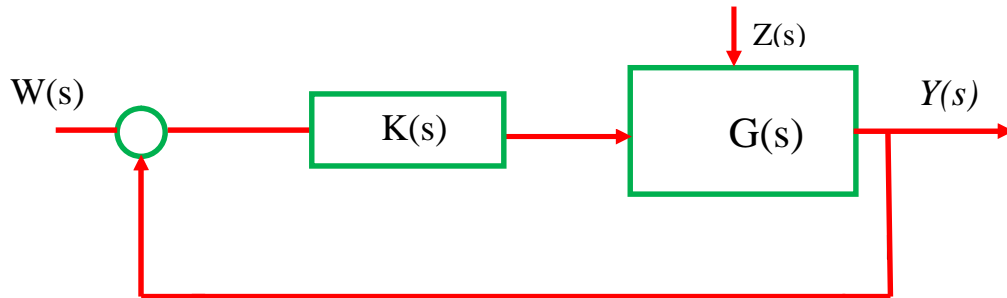


Figure 3.21: Structure de commande en boucle fermée.

La fonction de transfert en boucle fermée $FTBO(s)$ est donnée par : $G(s)K(s)$

La fonction de transfert en boucle fermée $T(s)$ est donnée par : $T(s) = \frac{FTBO(s)}{1 + FTBO(s)} = \frac{G(s)K(s)}{1 + G(s)K(s)}$

5.1. Principe de la méthode:

Si la fonction de transfert en boucle fermée $F(s)$ est donnée, c'est-à-dire qu'elle a été élaborée de manière à répondre au cahier des charges, le régulateur $K(s)$ est déterminé tout simplement par la relation suivante:

$$K(s) = \frac{F(s)}{G(s)(1 - F(s))}$$

Usuellement, le comportement souhaité en boucle fermée est celui d'un système d'ordre un ou d'ordre deux avec un gain statique unitaire, ce qui permet d'assurer une précision statique parfaite.

Une fois que la fonction de transfert en boucle fermée est établie, on détermine l'expression du régulateur $K(s)$ par la formule ci-dessus. On réorganise ensuite cette expression de manière à faire apparaître la structure d'un régulateur **PID**.

Il peut arriver que ce calcul conduit à une fonction de transfert non réalisable, c'est-à-dire le degré de son numérateur est supérieur à celui du dénominateur.

Cette méthode est conditionnée par la réalisabilité de $K(s)$ et donc de la différence du degré des polynômes entre le numérateur et le dénominateur de $K(s)$.

5.2. Exemple:

➤ Modèle d'ordre 1 en boucle fermée.

Soit $G(s) = \frac{2}{20s + 1}$ la fonction de transfert du système.

Dans cet exemple on impose à ce que la fonction de transfert en boucle fermée soit du premier ordre deux avec les spécifications suivantes :

- Précision statique nulle
- Temps de réponse à 5% de l'ordre de 15s

Pour satisfaire la première contrainte sur la précision statique, il faut prendre le gain statique en boucle fermée égal à 1; soit $K=1$.

Pour satisfaire la deuxième contrainte sur la rapidité, il faut prendre la constante de temps en boucle fermée égal à Tr à 5% /3; soit $\tau_{bf}=5$.

D'où la fonction de transfert désirée en boucle fermée est $F(s) = \frac{1}{5s+1}$:

$$K(s) = \frac{F(s)}{G(s)(1-F(s))} = \frac{\frac{1}{5s+1}}{\frac{2}{20s+1} \left(1 - \frac{1}{5s+1}\right)} = \frac{\frac{1}{5s+1}}{\frac{2}{20s+1} \left(\frac{5s+1}{5s+1} - \frac{1}{5s+1}\right)} = \frac{\frac{1}{5s+1}}{\frac{2}{20s+1} \left(\frac{5s}{5s+1}\right)}$$

$$K(s) = \frac{\frac{1}{5s+1}}{\frac{2}{20s+1} \left(\frac{5s}{5s+1}\right)} = \frac{\frac{1}{5s+1}}{\frac{10s}{(20s+1)(5s+1)}} = \frac{1}{10s} = \frac{20s+1}{10s}$$

$$K(s) = \frac{20s+1}{10s} = 2 + \frac{1}{10s} = 2\left(1 + \frac{1}{20s}\right)$$

De la fonction de transfert de $K(s)$, on peut facilement déterminer les paramètres d'un régulateur PI

de structure parallèle $\begin{matrix} K_p = 2 \\ T_i = 10 \end{matrix}$ ou de structure série $\begin{matrix} K_p = 2 \\ T_i = 20 \end{matrix}$

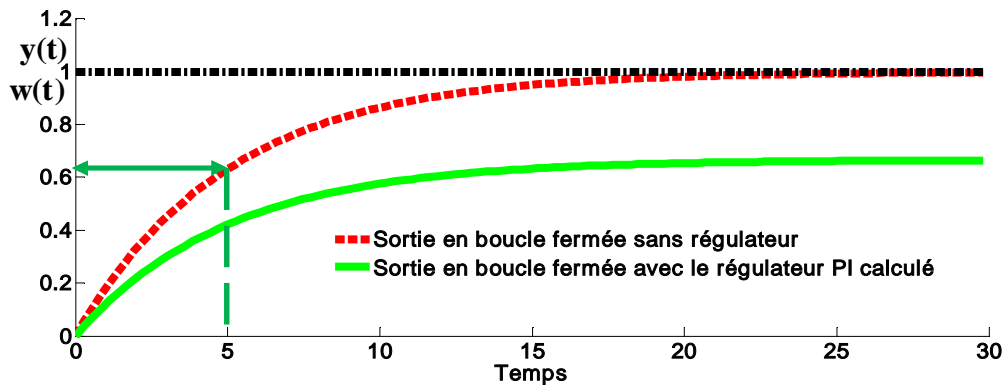


Figure 3.22: Réponse indicielle du système bouclé sans et avec régulateur.

➤ **Modèle de deuxième ordre en boucle fermée.**

Soit $G(s) = \frac{2}{s^2 + 2s + 1}$ la fonction de transfert du système.

Dans cet exemple on impose à ce que la fonction de transfert en boucle fermée soit du deuxième ordre avec les performances suivantes:

- Précision statique parfaite
- Dépassement indiciel maximal inférieur à 5%
- Temps de réponse à 5% de l'ordre de 1.5s

La fonction de transfert désirée en boucle fermée peut s'écrire sous la forme canonique :

$$F(s) = \frac{Kw_n^2}{s^2 + 2.\xi.w_n.s + w_n^2}$$

Pour satisfaire la première condition sur la précision statique, il faut prendre le gain statique en boucle fermée égal à 1; soit $K=1$.

La deuxième contrainte sera satisfaite en prenant $\xi = 0.7$, puisque d'après les caractéristiques des systèmes d'ordre deux, on sait que pour $\xi = 0.7$, le dépassement est 4.6% et le produit $Tr_{5\%}$ par w_n est égal à 3. De cette relation on déduit w_n par :

$$w_n = \frac{3}{Tr_{5\%}} = \frac{3}{1.5} = 1 \text{ rad / s .}$$

D'où la fonction de transfert désirée en boucle fermée est $F(s) = \frac{4}{s^2 + 2.8s + 4}$:

D'où la figure (Fig 3.23) représente la réponse indicielle de $F(s)$, il est clair que le temps de réponse est 1.5 s ainsi le premier dépassement est inférieur à 5%.

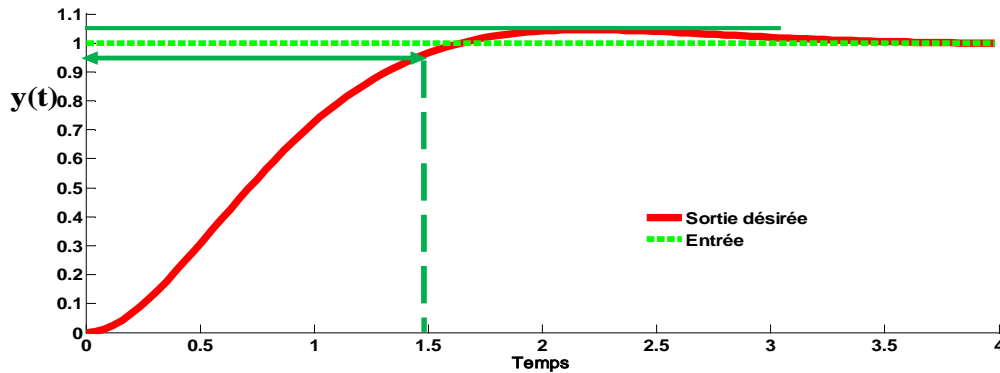


Figure 3.23: Réponse indicielle du modèle d'ordre 2 désiré.

$$K(s) = \frac{F(s)}{G(s)(1-F(s))} = \frac{\frac{4}{s^2 + 2.8.s + 4}}{\frac{2}{s^2 + 2s + 1} \left(1 - \frac{4}{s^2 + 2.8.s + 4} \right)} = \frac{\frac{1}{s^2 + 2.8.s + 4}}{\frac{2}{s^2 + 2s + 1} \left(\frac{s^2 + 2.8.s + 4}{s^2 + 2.8.s + 4} - \frac{4}{s^2 + 2.8.s + 4} \right)}$$

$$K(s) = \frac{\frac{4}{s^2 + 2.8.s + 4}}{\frac{2}{s^2 + 2s + 1} \left(\frac{s^2 + 2.8.s + 4}{s^2 + 2.8.s + 4} - \frac{4}{s^2 + 2.8.s + 4} \right)} = \frac{\frac{4}{s^2 + 2.8.s + 4}}{\frac{2}{s^2 + 2s + 1} \left(\frac{s^2 + 2.8.s}{s^2 + 2.8.s + 4} \right)} = \frac{2(s^2 + 2s + 1)}{s^2 + 2.8.s}$$

$$K(s) = \frac{2(s^2 + 2s + 1)}{s^2 + 2.8.s} = \frac{2(s+1)(s+1)}{s^2 + 2.8.s} = \frac{2(s+1)(s+1)}{s(s+2.8)} = \frac{2(s+1)(s+1)}{2.8s \left(\frac{s}{2.8} + 1 \right)} = 0.71 \frac{(s+1)(s+1)}{s \left(\frac{s}{2.8} + 1 \right)}$$

$$\Rightarrow K(s) = 0.71 \frac{(s+1)(s+1)}{s\left(\frac{s}{2.8}+1\right)} = 0.71 \left(\frac{(s+1)}{s}\right) \left(\frac{(s+1)}{(0.36s+1)}\right) = 0.71 \left(1+\frac{1}{s}\right) \left(\frac{s+1+0.64s-0.64s}{(0.36s+1)}\right)$$

$$\Rightarrow K(s) = 0.71 \times \left(1+\frac{1}{s}\right) \left(1+\frac{0.64s}{(0.36s+1)}\right)$$

Il s'agit d'un régulateur PID de type série filtré $K_p = 0.71 \quad T_i = 1 \quad T_d = 0.64$.

Cette méthode est facile dans son principe. Néanmoins, on peut citer les difficultés d'appliquer cette méthode :

- La traduction des éléments du cahier des charges pour obtenir la fonction de transfert désirée en boucle fermée $F(s)$.
- Il n'est pas toujours possible d'obtenir un régulateur réalisable au sens physique des termes, c'est-à-dire le degré du numérateur de $K(s)$ est inférieur ou égal à celui de son dénominateur.
- Cette méthode ne convient pas pour les systèmes pour lesquels la fonction de transfert $G(s)$ possède un zéro instable c'est-à-dire à partie réelle positive ou pour les systèmes possédant un retard pur.

La figure (Fig 3.24) fournit la réponse indicielle du système bouclé avec le régulateur PID obtenu, théoriquement cette réponse est presque la même que la réponse désirée représenté par (Fig 3.23).

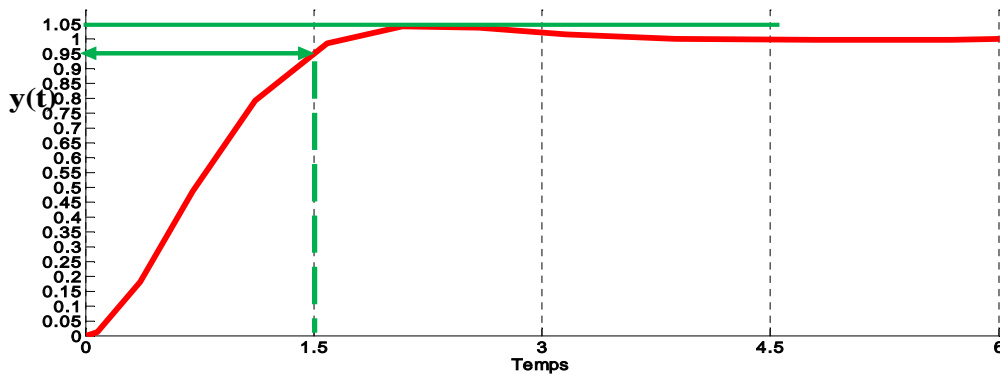
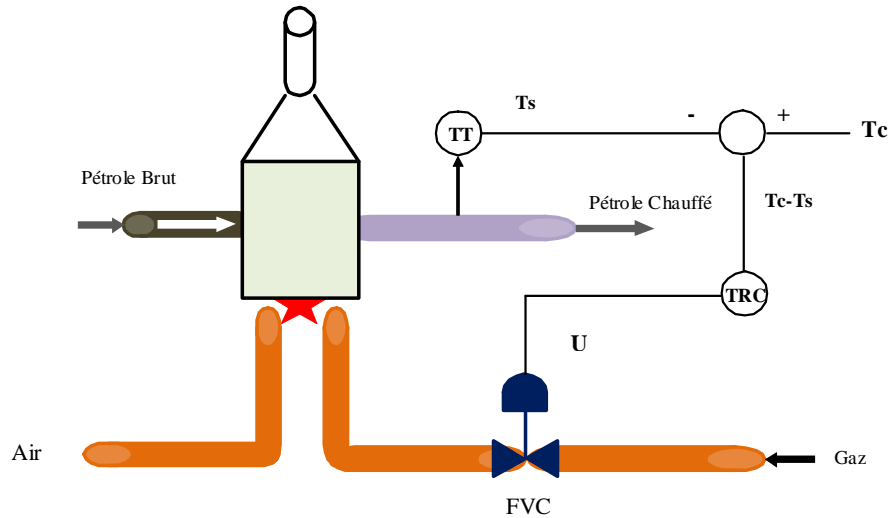
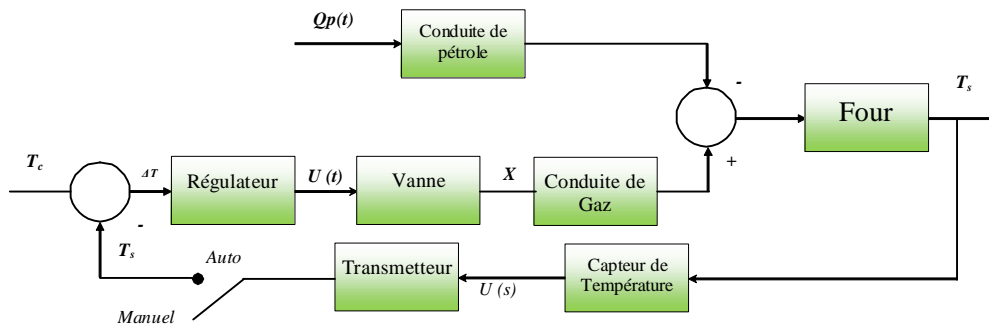


Figure 3.24: Réponse indicielle du système bouclée avec PID série filtré.

1. Régulation de température



1.2. Schéma fonctionnel du système de régulation



On définit d'abord les entrées-sortie : les variables à régler, régnautes et de perturbations :

- $T_s(t)$ Grandeur de sortie (température à la sortie - c'est la grandeur à régler), valeurs maximales et minimale de la variation de température : $T_{s_{max}} = 150^\circ\text{C}$, $T_{s_{min}} = 10^\circ\text{C}$; T_{s_o} valeur nominale de la température le fonctionnement $T_{s_o} = 70^\circ\text{C}$
- $P_g(t)$ Grandeur d'entrée (pression du gaz combustible - Grandeur réglante) ; valeurs maximales et minimale de la variation de la pression du gaz combustible : $P_{g_{max}} = 5 \text{ bars}$, $P_{g_{min}} = 0 \text{ bar}$; P_{g_o} valeur nominale de la pression du gaz combustible $P_{g_o} = 2 \text{ bars}$;
- Q_p Débit du pétrole à l'entrée (perturbation) ; débit nominale du pétrole à l'entrée: 15 ; $Q_{p_{max}} = 30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $P_{g_{min}} = 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

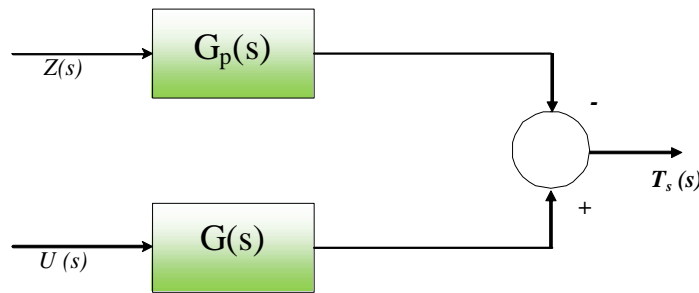
Il existe aussi d'autres perturbations (pouvoir calorifique du gaz, température ambiante etc...) que nous considérons comme constantes.

- x : déplacement du clapet de la vanne [0 5mm].
- U : sortie du régulateur pneumatique [0,2 1 bar]; valeur nominale (0,6 bar)

Influence des perturbations :

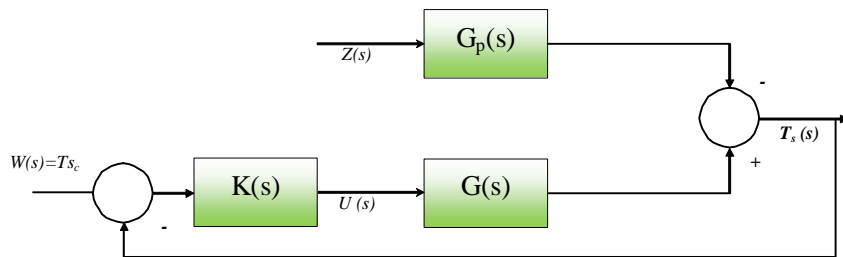
- Grâce à la propriété de superposition des systèmes linéaires, on peut étudier séparément l'influence des perturbations et de la commande sur la sortie du système. Ici pour simplifier la démarche on analyse uniquement une seule perturbation, celle du débit d'entrée du pétrole.

1. En boucle ouverte (sans correction) : La sortie subit l'influence de la commande (ici en manuelle) et celle de la perturbation ($Q_p(s)$) avec un signe (-) car l'augmentation du débit provoque la diminution de la température (le produit arrive à une température plus basse que celle du four)



$$T_s = G(s).U(s) - G_p(s).Q_p(s)$$

En boucle fermée (avec régulateur)



$$T_s = \frac{K(s).G(s)}{1 + K(s).G(s)}.T_c(s) - \frac{G_p(s)}{1 + K(s).G(s)}Q_p(s)$$

1.2.1 Choisir du cahier des charges

Le point de départ de n'importe quel projet est le cahier de charge. Pour un système de régulation, les spécifications restent souvent vagues en raison surtout de la grande diversité de problèmes de régulation. Les critères qualitatifs à imposer dépendent d'abord de la nature du processus à régler. A titre d'exemple, on ne peut imposer aveuglément un processus transitoire rapide ou un taux

d'amortissement de 0,75 pour n'importe quel système. En effet l'asservissement d'un ascenseur (qui nécessite un confort pour les passagers) ne tolère pas par exemple d'accélération. Les dépassements de la pression régulée dans un réacteur nucléaire ne doivent pas atteindre les seuils limites de tarage des soupapes de sécurité etc...

Cahier de charge

Les critères de performances classiques

- **Stabilité:** Cette condition est impérative mais avec un certain degré de stabilité (marge de sécurité). En général on impose une marge de gain de 2 à 2.5. L'utilisateur parle en terme de «pompage».
- **Précision :** L'exploitant demande à ce que le système possède une bonne précision en régime permanent d'où une nécessité de mettre un PI régulateur ou d'afficher un gain important dans le cas d'un P régulateur.
- **Rapidité :** On demande en pratique que le système soit capable rapidement de compenser les perturbations et de bien suivre la consigne.
- **Dépassement :** En général on recommande une régulation dont le régime transitoire soit bien amorti et dont le dépassement ne dépasse pas 5 à 10% la valeur nominale.

Dans notre cas : on exige à ce que la température de sortie soit égale à celle de consigne et que les perturbations soient entièrement compensées. Le régime transitoire doit être assez rapide en raison de la grande inertie du four et bien amortie (5 à 10)

1.3. Identification des processus :

- **Définition:**

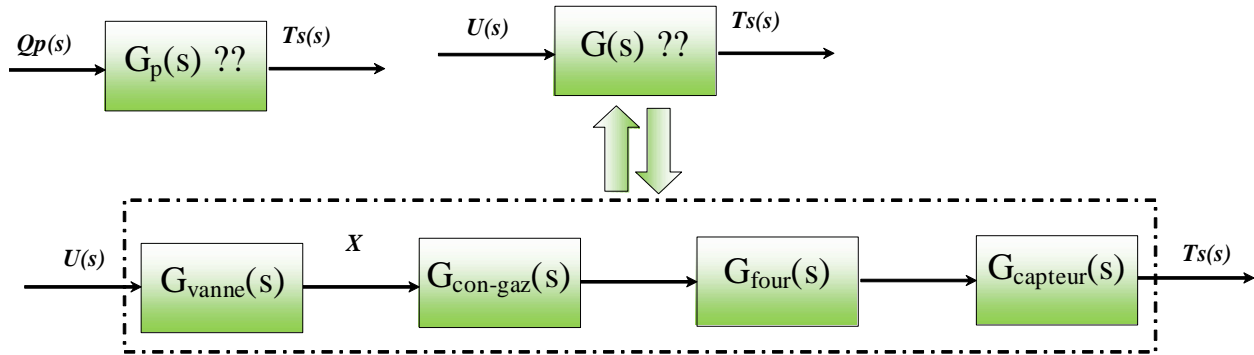
L'identification d'un système c'est la détermination de son modèle mathématique sur la base des observations expérimentales entrées-sorties. Le traitement mathématique des réponses graphiques du système est appelé **identification**, le modèle obtenu est dit de conduite ou de représentation

- **Principe**

1. Étape qualitative: Sur la base d'une connaissance à priori du système à identifier, on fixe une structure du modèle comportant des coefficients inconnus.
2. Étape quantitative: Elle consiste à la détermination des coefficients inconnus du modèle de façon que la différence entre les sorties réelles du système et celles du modèle soit minimale selon un critère donné qu'on résout par un algorithme d'identification.

1.3.1. Problématique pour le système étudié :

➤ **Détermination de la fonction de transfert :**



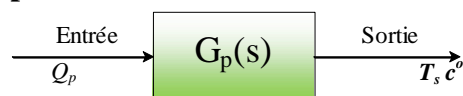
➤ **Expérimentation :**

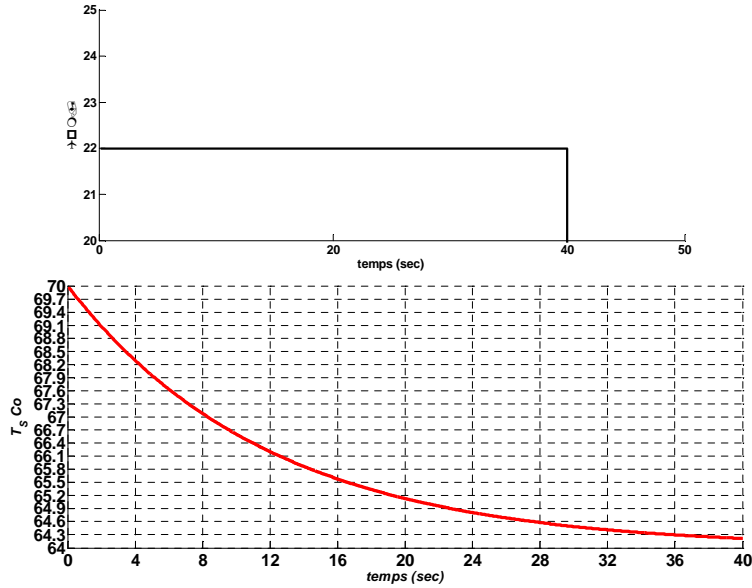
Dans cette partie, on utilise les méthodes s'appuyant sur les propriétés graphiques des réponses fondamentales (indicielle). Ces méthodes sont très utilisées par les spécialistes de régulation et des servomécanismes car elles fournissent une précision suffisante et ne nécessitent pas l'utilisation d'un outil mathématique compliqué. On peut traiter aussi bien la réponse indicielle, impulsionnelle qu'harmonique, mais l'un des signaux d'excitation le plus fréquent à mettre en œuvre est l'entrée en échelon. L'amplitude de l'échelon doit être choisie telle que le système ne sorte pas du domaine linéaire d'une part et les observations mesurables d'autre part.

➤ **Méthodologie :**

1. Dans un système de régulation en fonctionnement, le correcteur est d'abord mis en fonctionnement manuel. On attend que le système soit bien stabilisé
2. On applique au système un signal en échelon de + ou -10% de la valeur nominale de fonctionnement (afin de ne pas trop perturber le système). L'échelon d'entrée peut représenter le déplacement du clapet de la vanne. La réponse est enregistrée à la sortie du transmetteur dont les mesures doivent être choisies de façon que la réponse soit exploitable. Le modèle de conduite (ou la fonction de transfert) à déterminer du traitement de la réponse graphique décrit l'ensemble des systèmes (vanne, objet, capteur, transmetteur)

1.3.2. Identification de $G_p(s)$: Expérimentation





Solution :

A partir de la réponse indicielle (voir ci-dessous) du système industriel, dont le signal de commande subit une variation en échelon ΔQp 10% de la variation du débit du pétrole, on se propose de modéliser la fonction de transfert $G_p(s)$ de ce

système par $G_p(s) = \frac{K}{1 + \tau s}$.

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} = \frac{(Ts_{\infty} - Ts_0)}{(Qp_{\infty} - Qp_0)} = \frac{70 - 64.2}{22 - 20} = 2.9 C^{\circ} . S / m^3$$

$$\begin{aligned} 5.8 C^{\circ} &\longrightarrow 100 \% \Rightarrow Ts = \frac{5.8 \times 63}{100} = 3.65 C^{\circ} \Rightarrow Ts \text{ 63 \%} = 66.35 C^{\circ} \\ Ts C^{\circ} &\longrightarrow 63 \% \end{aligned}$$

De la réponse indicielle $66.35 C^{\circ} \mapsto 12 \text{ sec} \Rightarrow G_p(s) = \frac{2.9 C^{\circ} s / m^3}{1 + 12 s}$

$$\text{Le gain relatif } \mapsto K = \frac{\frac{\Delta Ts}{\Delta Qp_{\max}}}{\frac{AQp_{\max}}{30 - 10}} = \frac{5.8}{2} \Rightarrow K = 0.41 \Rightarrow G_p(s) = \frac{0.41}{1 + 12 s}$$

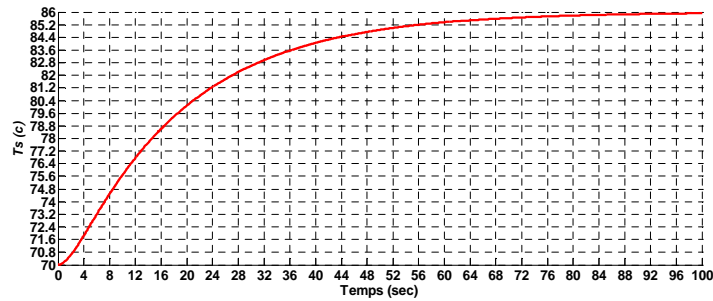
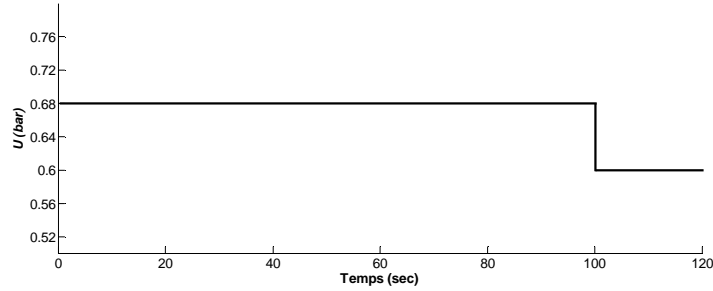
On détermine alors l'erreur relative maximale qui doit être inférieure à 10%.

En générale il est commode de prendre un gain unitaire (cela n'influe pas évidemment sur le résultat).

Pour avoir la sortie en C° on multiplie par la valeur maximale soit $140 C^{\circ}$

$$Ts(t) = L^{-1} \left\{ \frac{0.1}{s} \times \frac{0.41}{12s + 1} \right\} = \frac{1}{30 - 10} (0.1 \times 0.41 \times 140) \left(1 - e^{-\frac{t}{12}} \right) \% \Rightarrow Ts(t) = \frac{0.1 \times 0.41 \times 140}{20} \left(1 - e^{-\frac{t}{12}} \right) + 70 C^{\circ}$$

1.3.3. Identification de $G(p)$: Expérimentation :



Solution :

A partir de la réponse indicielle (voir ci-dessous) du système industriel, dont le signal de commande subit une variation en échelon ΔU 10% de la variation du débit du pétrole, on se propose de modéliser la fonction de transfert $G(s)$ de ce système on propose d'utiliser le modèle de Broïda $G(s) = \frac{Ke^{-\tau}}{1 + \tau s}$.

$$k = \frac{\Delta Ts}{\Delta U} = \frac{16}{0.08} = 200C^\circ / bar$$

On a

$$\Delta U_{max} = 1 - 0.2 = 0.8 \Rightarrow 2\% = \frac{0.8 \times 2}{100} = 0.08bar$$

$$\Rightarrow y_{28\%} = \frac{16 \times 28}{100} = 4.48 \quad \begin{matrix} 16 \longrightarrow 100\% \\ Ts \longrightarrow 28\% \end{matrix}$$

$$\Rightarrow y_{40\%} = \frac{16 \times 40}{100} = 6.4$$

De la réponse indicielle :

$$t_{40\%} = 11.95sec$$

$$t_{28\%} = 8sec$$

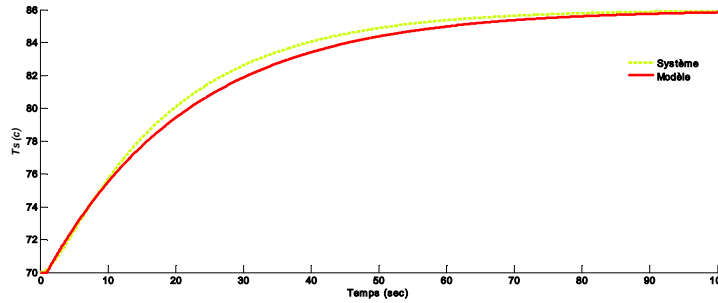
$$T = (2.8 \times t_{28\%} - 1.8 * t_{40\%}) = 2.8 \times 8 - 1.8 \times 11.9 = 0.98$$

$$\tau = 5,5(t_{40\%} - t_{28\%}) = 5.5(26 - 22.5) = 21.45$$

$$G(s) = \frac{200e^{-\tau s}}{1 + \tau s} \approx \frac{200e^{-0.98s}}{1 + 21.45s}$$

Le gain relatif

$$\mapsto K = \frac{\frac{\Delta T_s}{\Delta U_{\max}}}{\frac{\Delta U_{\max}}{1 - 0.8}} = \frac{16}{\frac{150 - 10}{0.08}} \Rightarrow K = 1.14 \Rightarrow G(s) = \frac{1.14 e^{-0.98s}}{1 + 21.45s}$$



$$G(s) = \frac{1.14 e^{-0.98s}}{1 + 21.45s} \cong \frac{-1.14(0.49s - 1)}{(21.45s + 1)(0.49s + 1)}$$

1.4.Modèle du système global à commander :

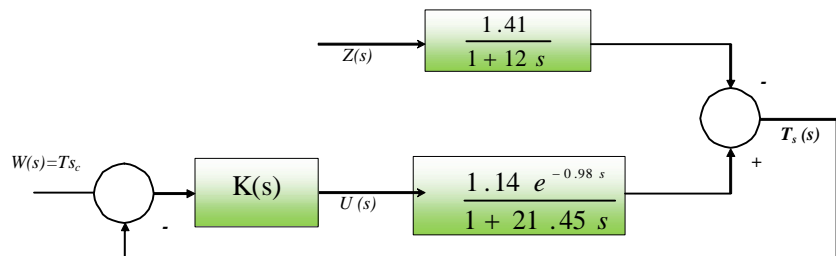
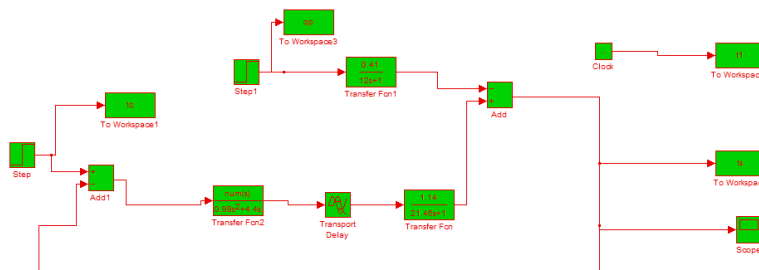
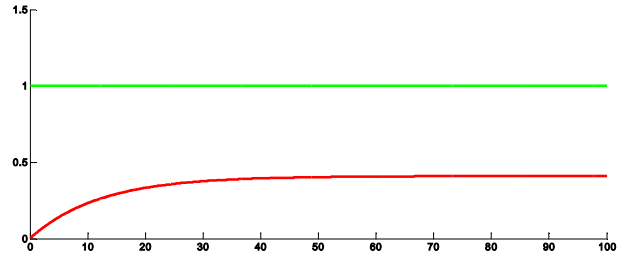
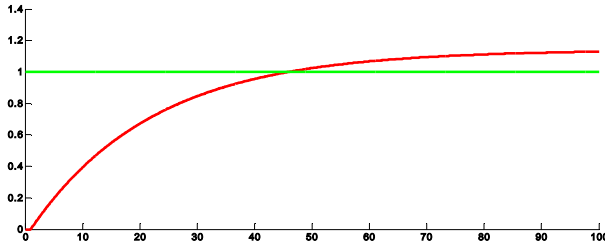


Schéma de simulation sur Matalab-simulink : Afin d’analyser aussi l’influence du retard sur les performances du système, on insère sur le schéma de simulation un bloc de retard pur (Transport delay). On peut utiliser la fonction « *tf* » pour simuler le système avec retard pur de la manière suivante :

`sys = tf(1.41,[20.45 1], 'Inputdelay',0.98)`, et la fonction « **pade** » pour approximer le modèle `syse=pade(sys,1)`





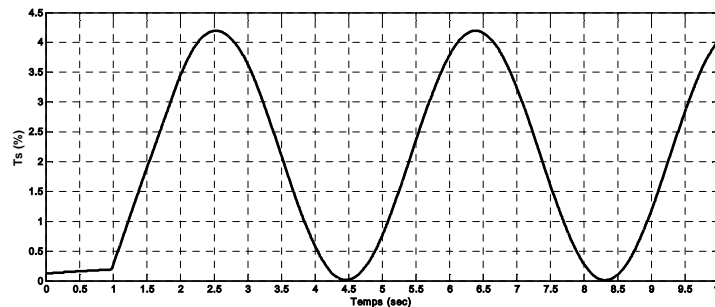
1.5. Objectifs de la régulation:

1. Eliminer les perturbations (ici le débit du produit à chauffer), mais aussi toutes les perturbations en réalité, puisque elles agissent toutes sur la sortie
2. «Bien» suivre la consigne , «bien», cela signifie sans trop de dépassement (5 à 10%), un système rapide, une erreur statique nulle et surtout un système en boucle fermée assez stable ($MG=2$ par exemple)

1.6. Méthode pratique de réglage du régulateur en boucle fermée :

On introduit un retard pur au système (sinon le système ne sera jamais en régime de pompage). Sur le schéma de simulation sur Simulink du système, on met le correcteur en action P ($T_i=\max$, $T_d=0$ ou $I=0$, $D=0$ sur le PID controller de Simulink) et on augmente le gain jusqu'à apparition du pompage, on fixe alors le gain critique K_{p0} et la période de l'auto-oscillation puis on détermine les paramètres du régulateur par la méthode de Ziegler et Nichols selon le tableau suivant:

Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 \cdot K_{p0}$	max	0
PI série	$0.45 \cdot K_{p0}$	$0.83 \cdot T_{p0}$	0
PI parallèle	$0.45 \cdot K_{p0}$	$2 \cdot T_{p0} / K_{p0}$	0
PID série	$0.30 \cdot K_{p0}$	$0.25 T_{p0}$	$0.25 \cdot T_{p0}$
PID parallèle	$0.6 \cdot K_{p0}$	$0.85 \cdot T_{p0} / K_{p0}$	$K_{p0} \cdot T_{p0} / 13.3$
PID mixte	$0.6 \cdot K_{p0}$	$0.5 \cdot T_{p0}$	$0.125 \cdot T_{p0}$



Obtention du régime de pompage :

La valeur de K_{p0} est 30.72 et $T_{p0}=5.4-1.5=3.9$

Type	K_p	T_i	T_d
P	15.36	max	0
PI série	13.83	3.24	0
PI parallèle	13.83	0.25	0
PID série	9.22	0.97	0.97
PID parallèle	18.43	0.11	9
PID mixte	18.43	1.95	0.49

PI parallèle

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{1}{T_i s}$$

PID parallèle

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{1}{T_i s} + T_d s$$

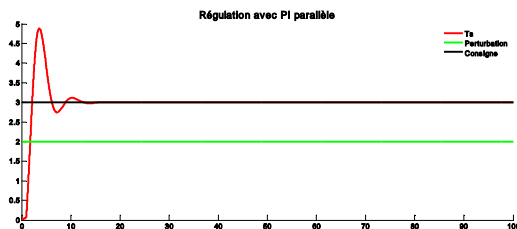
Le PID théorique un inconvénient c.-à-d. une amplification en hautes fréquences \Rightarrow sensibilité aux bruits. Pour éviter cela, on introduit un filtre passe-bas en hautes fréquences

PID parallèle avec action dérivée filtrée

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d s}{N}}, N \geq 10$$

PID parallèle

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = 13.83 + \frac{1}{0.25 s} = \frac{13.83 \times 0.25 s + 1}{0.25 s} = \frac{3.46 s + 1}{0.25 s}$$



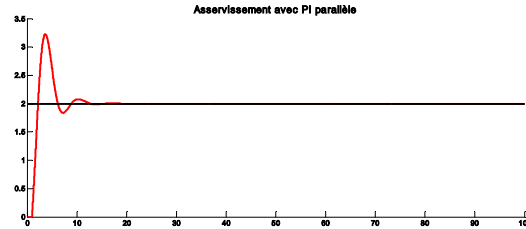
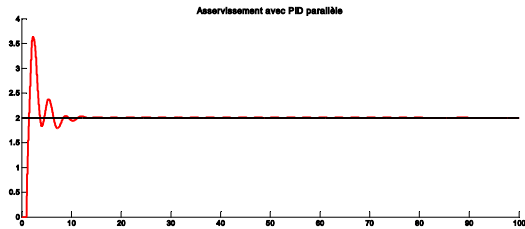
PID parallèle avec action dérivée filtrée

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = 18.43 + \frac{1}{0.11 s} + \frac{9 s}{1 + \frac{9 s}{N}}, N \geq 10 \Rightarrow K(s) = 18.43 + \frac{1}{0.11 s} + \frac{N \cdot 9 s}{N + 9 s} =$$

$$\frac{18.43(0.11 s) \cdot (1 + 9 s) + (N + 9 s) + 0.11 s \cdot N \cdot 9 s}{0.11 \times 9 s^2 + 0.11 N s}$$

$$K(s) = \frac{18.43(0.11 s) \cdot (N + 9 s) + (N + 9 s) + 0.11 s \cdot N \cdot 9 s}{0.11 \times 9 s^2 + 0.11 N s} = \frac{(0.99 N + 18.25) s^2 + (2 N + 9) s + N}{0.99 s^2 + 0.11 N s}$$

$$SiN = 40 \Rightarrow K(s) = \frac{(0.99N + 18.25)s^2 + (2N + 9)s + N}{0.99s^2 + 0.11Ns} = \frac{57.85s^2 + 89s + 40}{0.99s^2 + 4.4s}$$



PID mixte

$$K(s) = \frac{U(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d s}{N}} \right) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + \frac{K_p T_d s}{1 + \frac{T_d s}{N}} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + \frac{K_p T_d s}{N + T_d s}$$

$$K(s) = K_p + \frac{K_p}{T_i s} + \frac{N K_p T_d s}{N + T_d s} = \frac{K_p (T_i s)(N + T_d s)}{(T_i s)(N + T_d s)} + \frac{K_p (N + T_d s)}{T_i s (N + T_d s)} + \frac{(T_i s) N K_p T_d s}{(T_i s)(N + T_d s)}$$

$$K(s) = \frac{K_p T_i N .s + K_p T T_d .s^2 + K_p N + K_p T_d .s + T_i N .K_p .T_d s^2}{(T_i s)(N + T_d s)} = \frac{(K_p T_i T_d + T_i N .K_p .T_d) .s^2 + (K_p T_i N + K_p T_d) .s + NK_p}{T_i T_d .s^2 + NT_i .s}$$

$$K(s) = \frac{722 .s^2 + 1446 .6 .s + 737.2}{0.96s^2 + 19.6.s}$$

Travail demandé :

- Analyser les réponses indicielles du système par rapport à la consigne et à la perturbation en boucle ouverte sans régulateur.
- Etudier l'influence de chaque action d'un régulateur PID sur les performances du système (stabilité, rapidité et précision).
- **Réglage du correcteur : méthodes pratiques**
 - Discuter les résultats obtenus par la méthode de réglage en boucle fermée.
 - Calculer les paramètres du régulateur PID par la méthode de réglage en boucle ouverte et discuter les résultats obtenus ?
- **Réglage du correcteur : méthodes théoriques**

On impose les performances suivantes:

- Précision statique parfaite
- Dépassement indicial maximal inférieur à 5%
- Temps de réponse à 5% de l'ordre de 1.5s

Calculer le régulateur PID

2. Régulation de niveau :

On désire que le niveau h suive une valeur de consigne h_c affichée par un potentiomètre et ceci même en cas de variation du débit de fuite q_f . Pour cela, on applique une tension d'erreur:

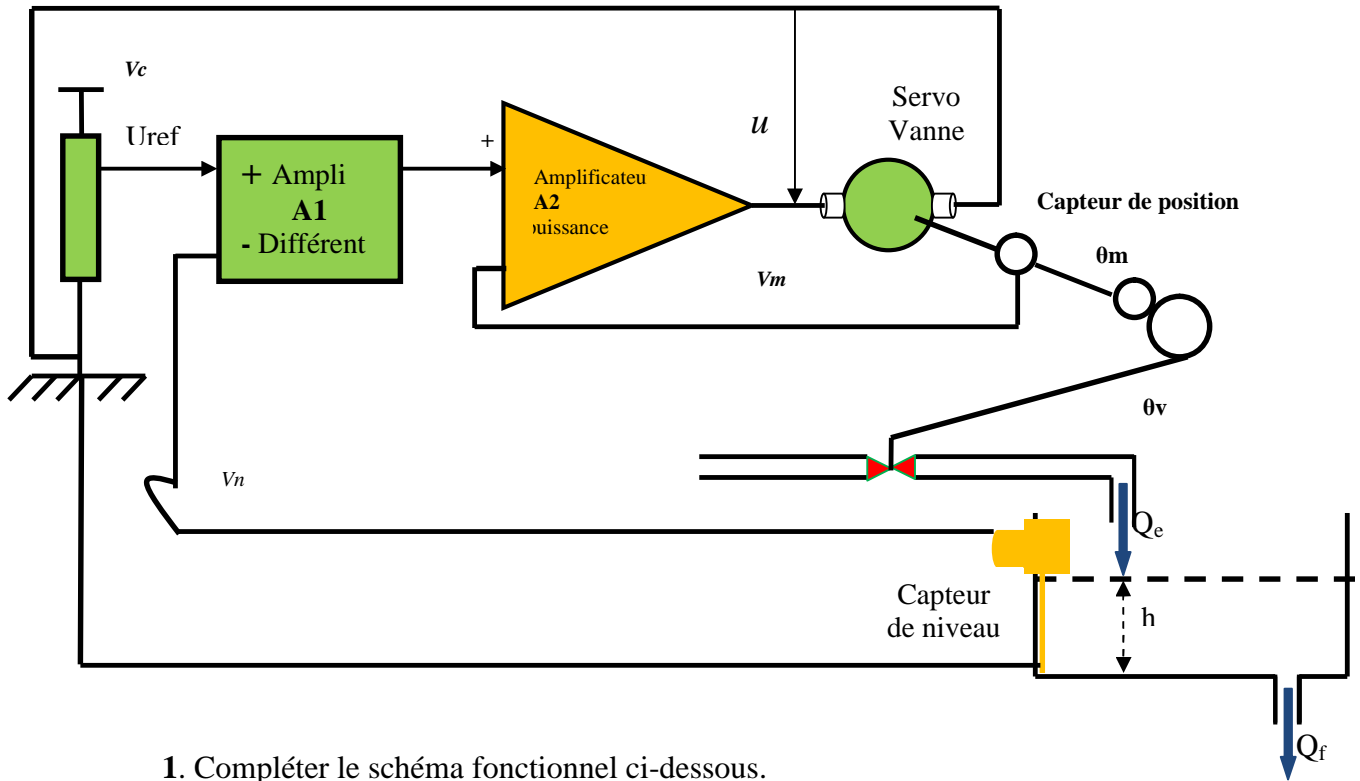
$\varepsilon(t) = v_c(t) - v_n(t)$ amplifiée par un amplificateur (de gain A_1) à un asservissement de position de vanne. Cet asservissement comporte un deuxième amplificateur (de gain A_2) qui alimente l'induit d'un moteur à courant continu. L'arbre du moteur entraîne un réducteur dont la sortie définit la position de la vanne et donc modifie le débit d'entrée q_e . La position de la vanne est mesurée par un capteur monté sur l'axe du moteur. Les différents composants possèdent les caractéristiques suivantes :

- Bac : niveau maximum $h_{max} = 0,5$ m, section $S = 0,5$ m²
- Capteur de niveau : tension de sortie $v_n = \lambda \cdot h$ avec $\lambda = 20$ V/m.
- Potentiomètre de consigne : gradué de 0 à h_{max} délivrant $v_c = \lambda \cdot h_c$ avec $\lambda = 20$ V/m
- Amplificateurs 1 et 2 : de gains A_1 et A_2 .
- Moteur M moteur à courant continu alimenté par l'induit, de fonction de transfert :

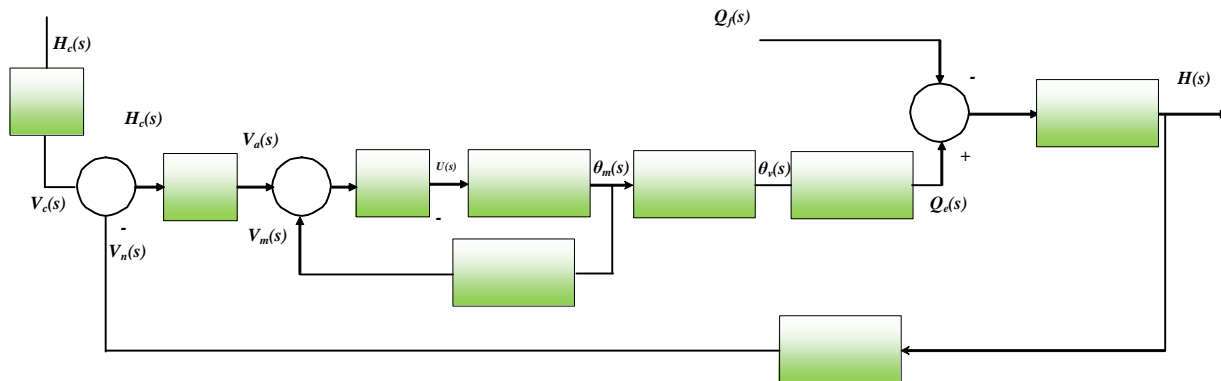
$$\frac{\theta_m(s)}{U(s)} = \frac{K_m}{s(1 + \tau_m s)}$$

Avec : $K_m = 0.5 \text{ rad / sec.v}$ et $\tau_m = 0.1 \text{ sec}$

- Capteur de position moteur $V_m = K_c \cdot \theta_m$, avec $K_c = 1 \text{ V / rad}$
- Réducteur : rapport de réduction : $\frac{1}{V} = \frac{\theta_m}{\theta_v} = 20$
- Vanne de débit : $V_m = q_e = K_v \cdot \theta_v$, avec $K_v = 0.1 \text{ m}^3 / \text{sec.rad}$.
- $q_e(t) - q_f(t) = s \frac{dh(t)}{d(t)}$.

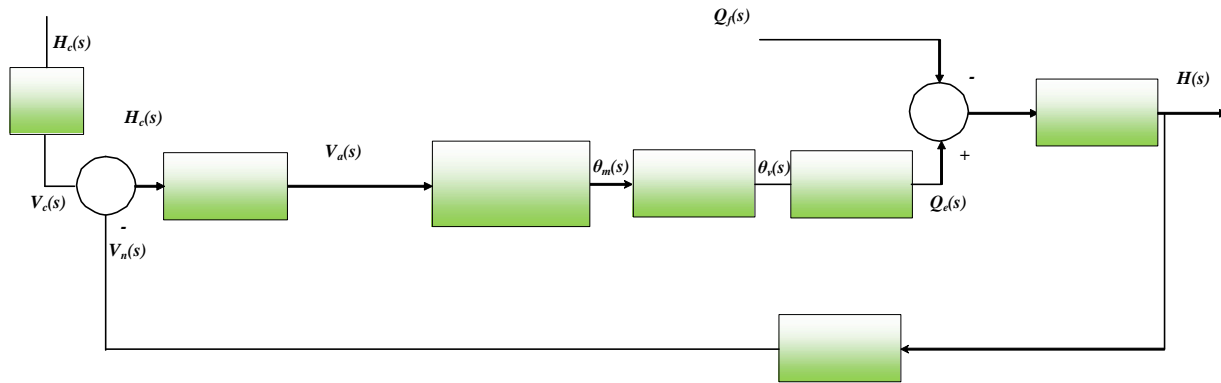


1. Compléter le schéma fonctionnel ci-dessous.



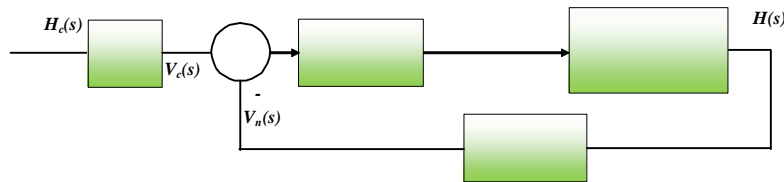
2. Quelle est la fonction de transfert en boucle fermée du moteur seul $G(s) = \frac{\theta_m(s)}{V_a(s)}$

Compléter le schéma fonctionnel 2 ci-dessous.



3. Pour $Q_f(s)=0$. Simplifier le schéma fonctionnel puis déterminer la fonction de transfert en boucle ouverte

$$H_{BO}(s) = \frac{V_n(s)}{V_c(s) - V_n(s)}$$



4. Déterminer la fonction de transfert en boucle fermée $H_{BF}(s) = \frac{H(s)}{H_c(s)}$ pour $Q_f(s) = 0$

1. E. Dieulesaint and D. Royer., Automatique appliquée, Système linéaires de commande à signaux analogiques avec 75 exercices résolus, Edition Masson, 1997.
2. J-M Flaus., La régulation industrielle, Edition Hermès, 1995.
3. K-J Astrom, and T. Haggund., PID Controllers: Theory, Design and Tuning, instrument Society of America, 1995.
4. P. Borne. Analyse et régulation des processus industriels tome1: Régulation continue. Editions Technip, 1993
5. P. De-Larminat. Automatique: Commande des systèmes linéaires. Editions Lavoisier, 1993.
6. R. Toscano. Commande et diagnostic des systèmes dynamiques. Editions Technosup, 2005.
7. T. Hans and P. Guyénot. Régulation et asservissement Editions Eyrolles, 1996.
8. [http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-6-regulation industrielle.](http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-6-regulation-industrielle)
9. <http://www.instrumentationtools.com>