



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Maintenance en Instrumentation**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Génie Industriel

**Spécialité :** Ingénierie de la Maintenance en Instrumentation

### **Thème**

**Étude et simulation de la commande cascade de niveau  
d'un système à deux réservoirs en cascade par logiciel  
Matlab**

Présenté et soutenu publiquement par :

Nom : TOUAOULA

Prénom : Ismail

Devant le jury composé de :

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement</b>	<b>Qualité</b>
Mr NEKROUF DJILLALI	MAA	IMSI-Univ.d'Oran2	<b>Président</b>
Mr BELKACEM BELKACEM	MAA	IMSI-Univ.d'Oran2	<b>Examineur</b>
Mr HAMIDA ABDALLAH	MAA	IMSI-Univ.d'Oran2	<b>Encadreur</b>

**Année 2018/2019**

# REMERCIEMENTS

Je remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu le jour sans l'aide et l'encadrement de Monsieur **HAMDA Abdallah**, Je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi à Messieurs, le président et les membres de jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nos profonds remerciements vont également à tous nos amis et collègues et toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus de près ou de loin principalement à tout l'effectif de l'Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle de l'Université d'Oran 2

# Dédicaces

Je tiens à dédier mon travail :

**À ma très chère mère**

Qui a fait tant de sacrifices pour m'élever et m'instruire et qui m'a encouragé tout le long de mon parcours scolaire et académique

**À mon cher père**

Qui m'a encouragé à travailler pour pouvoir s'instruire.

**À mes frères**

**À ma chère famille**

**À mon encadreur Mr HAMIDA ABDALLAH**

À tous mes amis et camarades d'études : Lokman, Abdelghafour, Yanis, Fares, Bachir, Zaghwa....

Aux étudiants IMI et toute la promo 2014

À tous ceux qui me connaissent.

# SOMMAIRE

## SOMMAIRE

❖ <b>CHAPITRE 1 : Introduction</b>	
1.1. Introduction	2
1.2. La régulation automatique	2
1.3. Notion de régulation avancée:	3
1.4. Objectif	3
❖ <b>CHAPITRE 2 GENERALITES</b>	
2.1 : Définitions :	
▪ le régulateur PID	5
▪ Bref historique de la régulateur PID	5
▪ Principe général	6
2.2 : Schéma fonctionnel général d'une boucle de régulation	12
2.3 : Caractéristiques statiques et dynamiques d'un procédé	12
2.4 : Caractéristiques statiques d'un procédé	13
2.5 : Caractéristiques dynamiques d'un procédé	13
2.6 : Réglage des correcteurs	14
2.6.1 : Problématique	14
2.6.2 : Principes fondamentaux de détermination des actions PID	15
2.6.3 : Actions des régulateurs PI et PID	15
2.7 : Réglage des paramètres du régulateur d'une boucle fermée	16
2.8 : Réglage des paramètres de régulateur d'une boucle cascade	18
❖ <b>CHAPITRE 3 : ETUDE MATHEMATIQUE DU SYSTEME</b>	
3.1 : Introduction	21
3.2 : Etude mathématique du procédé	21
3.2.1 : Caractéristiques et désignations des paramètres	21
3.2.2 : Modélisation du procédé pour régulation PID	22
3.2.3 : Choix des éléments de boucle	23

3.2.4 : Modélisation du procédé pour régulation cascade	25
---	----

❖ <b>CHAPITRE 4 : commande du procédé</b>	
4.1. Introduction	28
4.2. Commande PID simple	28
4.3. Commande du procédé par régulation cascade	34
❖ <b>ETUDE COMPARATIVE</b>	39
❖ <b>Conclusion</b>	41
❖ <b>Bibliographie</b>	42

## Listed de Figures

N° Figure	Nom de Figure
Fig. 2	Schéma bloc de la commande P proportionnelle
Fig.3	Schéma bloc de la commande PI Proportionnelle Intégrale
Fig. 4	Schéma bloc de la commande PD Proportionnelle Dérivée.
Fig.5	Schéma bloc de la commande PID série.
Fig. 6	Schéma bloc de la commande PID parallèle.
Fig. 7	Schéma bloc de la commande PID mixte
Fig. 2.1	schéma fonctionnel d'une boucle de régulation
Fig. 2.2	système stable
Fig. 2.3	système instable
Fig.2.4	réponse indicielle d'un système stable
Fig. 2.5	Schéma fonctionnel d'un système de 1 <sup>er</sup> ordre avec un correcteur PID
Fig. 2.6	Schéma fonctionnel d'un système de 2 <sup>ème</sup> ordre avec un correcteur PID
Fig. 2.7	Schéma fonctionnel de la boucle cascade
Fig. 3.1	Schéma technologique de boucle PID simple
Fig. 3.2	Schéma fonctionnel du système à régler
Fig. 3.4	Schéma fonctionnel du système avec régulation PID simple.
Fig. 3.5	Schéma technologique de boucle cascade
Fig. 3.6	Schéma fonctionnel de la boucle cascade
Fig. 4.1	Schéma technologique de boucle PID simple
Fig. 4.2.1	Schéma fonctionnel de boucle PID simple détaillé
Fig. 4.2.2	Schéma fonctionnel de boucle PID simple rectifié
Fig. 4.2.3	Schéma fonctionnel de boucle PID simple
Fig.4.3	Lieu de Bode du système $G(p)$
Fig.4.4	Lieu de Bode $K_2$
Fig.4.5	Lieu de Bode $K_2(p) \cdot G(p)$
Fig.4.6	Lieu de Bode $K_1$
Fig.4.7	Lieu de Bode $K_1 \cdot K_2 \cdot G$
Fig.4.8 a	Lieu de Bode $K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot G$
Fig.4.8 b	La réponse de régulateur PID simple par la méthode de BODE
Fig.4.9	La réponse de régulateur PID simple par la méthode de BODE avec et sans perturbation
Fig. 4.9	Schéma technologique de boucle cascade
Fig. 4.10	Schéma fonctionnel de la boucle cascade
Fig. 4.11	Schéma fonctionnel de la boucle interne de la régulation cascade
Fig. 4.12	Schéma fonctionnel de la boucle externe de la régulation cascade
Fig. 4.13	La réponse de régulateur PID cascade sans perturbation.
Fig. 4.14	La réponse de régulateur PID cascade avec perturbation.
Fig.4.15	La réponse en boucle fermée avec régulation cascade avec et sans perturbation
Fig. 5.1	Le schéma de simulation pour PID simple et la régulation PID cascade .
Fig. 5.2	Réponses de la sortie du procédé pour la régulation PID simple et la régulation PID cascade sans perturbation
Fig. 5.3	Réponses de la sortie du procédé pour la régulation PID simple et la régulation PID cascade avec perturbation

# **chapitre 01**

introduction  
**introduction**



### 1.1.Introduction [2]

La régulation est au cœur de toutes les actions quotidiennes ou industriels (régler une température, un niveau, un débit, une pression, conduire une voiture, chercher une chaîne de télévision, régler une machine à laver ou autre action) et dans tous les procédés industriels tels que raffinage et pétrochimie, aéronautique, sidérurgie, agroalimentaire et beaucoup d'autres.

Elle est devenue une nécessité incontournable. Son intérêt apparaît surtout dans les procédés où l'être humain ne peut intervenir directement par mesure de sécurité ou par limite de sa puissance par rapport à la puissance nécessaire à l'exécution de la tâche.

La régulation est utilisée pour améliorer la qualité et la quantité dans la production ce qui nous permet de gagner en temps et en argent.

La science de l'automatique fait partie des sciences de l'ingénieur. Cette discipline traite : la modélisation, l'analyse, la commande ou la régulation des systèmes dynamiques. Elle a pour fondements théoriques les mathématiques, la théorie du signal et l'informatique. L'automatique permet l'automatisation des tâches par des dispositifs fonctionnant sans intervention humaine. On parle alors de système asservi ou régulé. L'état désiré du système est nommé la consigne.

### 1.2. La régulation automatique : [1]

La régulation automatique, actuellement rebaptisée «automatique» est noyée dans les techniques modernes de commande- robotique, productique etc., en raison surtout à l'apparition de l'électronique, puis vers les années 60 du microprocesseur et donc de l'informatique

Mais il est utile de souligner que les vieilles techniques de régulation classiques restent encore très utilisées dans l'industrie et elles ont encore de beaux jours devant elles car, la théorie en automatique avance bien plus vite que l'application et cela parce que les moyens informatiques sont plus «performants» que la connaissance du système à traiter c'est à dire le modèle

Généralement la régulation est l'ensemble des mesures visant à limiter les variations des signaux d'un système de processus donné soumis à des grandeurs fenêtrée non désirée de telle manière à ce que l'évolutions du signale soit conforme aux nécessités et aux possibilités du système à commander, elle peut exister a l'état naturel et dans toutes les lois physiques, mais elle peut être utilisée quad elle est imposée par l'homme pour l'obtention des grandeurs de réglage désiré On parle alors de régulation automatique.

**1.3 Notion de régulation avancée: [1]**

Lorsque la régulation classique PID est incapable de stabiliser ou de réguler le processus, on doit ou bien changer la structure du système de commande ou proposer d'autres algorithmes de commande plus sophistiqués. Ces méthodes sont communément appelées méthodes avancées de régulation. La liste des méthodes modernes de réglage (commande floue, par réseaux de neurones,  $H_{\infty}$  etc.) est exhaustive mais ces méthodes restent pourtant encore du domaine de la recherche. est important de souligner que pratiquement toutes ces méthodes nécessitent un modèle ce qui évidemment limite leur utilisation à des systèmes simples ou de structure rigide tels que les systèmes mécaniques (robotique et aviation) En génie des procédés, on utilise surtout les méthodes classiques que nous venons de voir

Notre étude est limitée uniquement à la régulation mono-variable; nous citerons toutefois pour information le principe de la méthode de la régulation simple et celle de la régulation cascade

**1.4 Objectif: [1]**

L'objectif de notre étude est de présenter diverses techniques de synthèse du régulateur PID pour en améliorer les performances d'un système en boucle fermée . On concentre sur L'étude de comparaison entre une boucle simple et une boucle cascade. On prend comme exemple la régulation de niveau d'un système de deux capacités en cascade. Nous allons essayer de réguler le niveau du 2ème réservoir par le débit entrant dans le 1er réservoir en utilisant au départ une régulation simple puis on utilise en seconde partie la régulation cascade en prenant comme paramètre intermédiaire le niveau dans le 1er réservoir.

# **chapitre 02**

GENERALLITES  
**GENERALLITES**

## Généralité

### 2.1 Définitions: [4]

#### ➤ Le régulateur PID:

Il est appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

#### ➤ Bref historique de la régulateur PID:[6]

Les régulateurs de type (Proportionnel : P, Intégral : I et Dérivé : D) ou PID se révèlent suffisants pour résoudre un grand nombre de problèmes de contrôle et ce particulièrement lorsque la dynamique du système est bénigne et que les exigences en terme de performances sont modestes. Les régulateurs PID répondent à plus de 95% des besoins industriels. Malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies, pour les paramètres P, I et D, ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler.

L'histoire des régulateurs est déjà longue et il peut être intéressant de rappeler quelques étapes importantes. Les premiers régulateurs de type centrifuge apparaissent vers 1750 pour régler la vitesse des moulins à vent, suivi en 1788 du fameux contrôleur de vitesse d'une machine à vapeur de James Watt. En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux démarches permettant de trouver facilement les paramètres optimums pour une installation donnée.

Au fil des ans, les propositions de Ziegler et Nichols ont été adaptées ou modifiées selon les besoins. En 1963, Horowitz a ajouté un degré de liberté supplémentaire au régulateur PID afin de mieux contrôler les dépassements obtenus lors d'une réponse indicielle. Ce nouveau degré de liberté consiste, en particulier, à ne réinjecter vers le terme proportionnel qu'une partie du signal de sortie.

Au début des années 1990 et dans le but de fournir des règles d'ajustement simples mais plus performantes que celles de Ziegler-Nichols, Åström et ses collaborateurs ont analysé le comportement dynamique d'un grand nombre de

processus. Cette analyse a conduit à l'établissement de tableaux servant aux calculs des paramètres P, I et D à partir de mesures simples.

Dans ce qui suit, on présente des notions générales sur les régulateurs PID classiques. Actuellement les études se focalisent de plus en plus sur des techniques de l'amélioration des spécifications de la commande.

➤ **Principe général:[4]**

Un correcteur est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure.

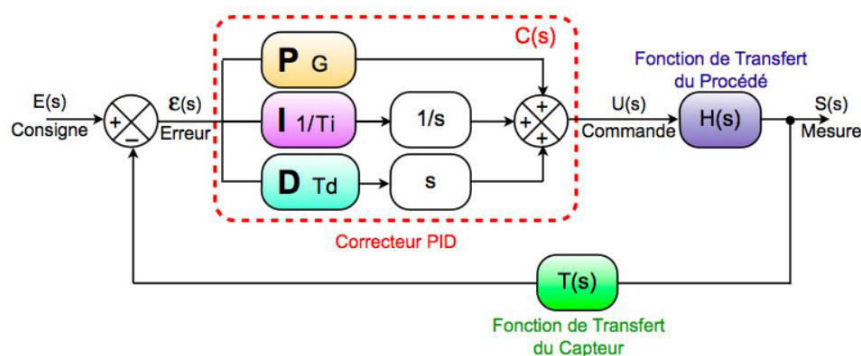
Le correcteur PID agit de trois manières :

**Action proportionnelle** : l'erreur est multipliée par un gain  $K_R$  appelé en industrie la bande proportionnelle en pourcentage **BP%**.

**Action intégrale** : l'écart consigne- mesure est intégrée et divisée par un constante d'intégration  $T_i$ .

**Action dérivée** : la vitesse de l'écart consigne-mesure est multipliée par une constante de dérivation  $T_d$ .

Il existe plusieurs architectures possibles pour combiner les trois effets (série, parallèle ou mixte), on présente ici la plus classique : une structure PID parallèle qui agit sur l'Erreur.



➤ **La grandeur réglée** : C'est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Par exemple : régulation de température.

➤ **La consigne** : C'est la valeur désirée que doit avoir la grandeur réglée.

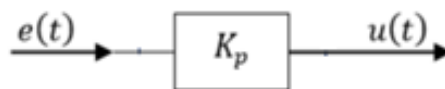
➤ **Les grandeurs perturbatrices** : sont les grandeurs physiques susceptibles d'évoluer au cours du processus et d'influencer la grandeur réglée. Par exemple : la température extérieure dans un système de chauffage.

➤ **La grandeur réglant:** C'est la grandeur de commande qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Par exemple le débit d'eau dans le système de chauffage.

➤ **Commande PID [6]**

Les contrôleurs PID sont des organes de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système en temps continu.

➤ **Commande proportionnelle P** Dans le cas d'un contrôle proportionnel, l'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système. La **Fig. 2** montre le schéma bloc du régulateur P.



**Fig. 2: Schéma bloc de la commande P proportionnelle**

- La loi de commande du gain proportionnel est :

$$\mathbf{u(t) = K_p \varepsilon(t)} \quad (2.1)$$

- La fonction de transfert du correcteur est donc :

$$C_p(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p \quad (2.2)$$

Avec:

**u(t):** La commande.

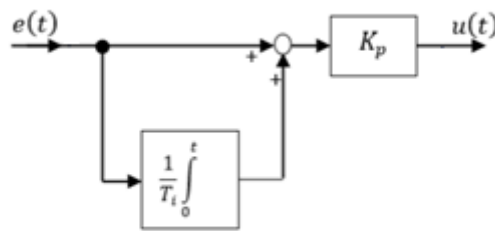
**K<sub>p</sub>:** Gain proportionnel.

**ε(t):** Signal d'erreur de processus (la consigne – la mesure).

➤ **Commande proportionnelle Intégrale PI**

Au contrôle proportionnel, nous pouvons ajouter l'intégration de l'erreur. Dans ce cas nous obtenons une régulation PI (proportionnelle et intégrée).

L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système. La **Fig. 3** illustre le schéma bloc correspondant au PI.



**Fig.3 : Schéma bloc de la commande PI Proportionnelle Intégrale.**

- La loi de commande du PI est :

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \quad (2.3)$$

- La fonction de transfert du correcteur est donc :

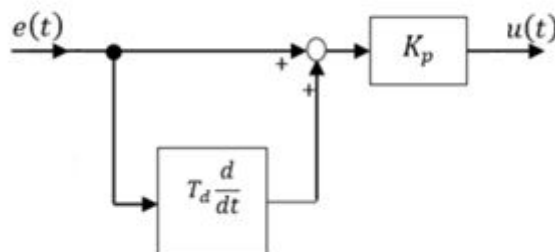
$$C_{PI}(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p \frac{1 + T_i p}{T_i p} \quad (2.4)$$

Ou encor :

$$C_{PI}(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = \frac{\frac{K_p}{T_i} + K_p}{p} \quad (2.5)$$

#### ➤ Commande proportionnelle Dérivée PD

L'action dérivée. D'est en général associée au correcteur proportionnel 'P' dont la commande résultante est un proportionnel Dérivé 'PD'. La **Fig. 4** illustre le schéma bloc correspondant au PD.



**Fig. 4:** Schéma bloc de la commande PD Proportionnelle Dérivée.

- La loi de commande du PD est :

$$u(t) = K_p \left( e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \tag{2.6}$$

La fonction de transfert du correcteur PD est donc :

$$C_{PD}(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p (1 + T_d p) \tag{2.7}$$

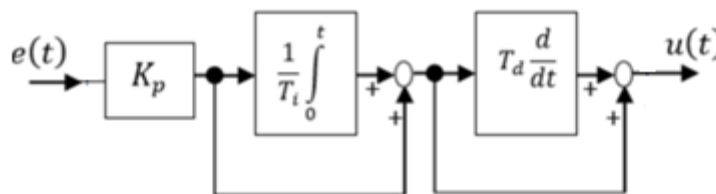
✓ **Commande proportionnelle Intégrale Dérivée PID :**

L'association des trois actions Proportionnelle P, Intégrale I et Dérivée forme le régulateur PID dont l'intérêt est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents.

Plusieurs implémentations des contrôleurs de ce type sont possibles, à savoir : structure série, structure parallèle et structure mixte.

**a. Structure PID série**

Le schéma bloc correspondant à l'architecture de PID série est donné par **Fig5**



**Fig.5 : Schéma bloc de la commande PID série.**

- La loi de commande du PID série est :

$$u(t) = K_p \left( \frac{T_i + T_d}{T_i} e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \tag{2.8}$$

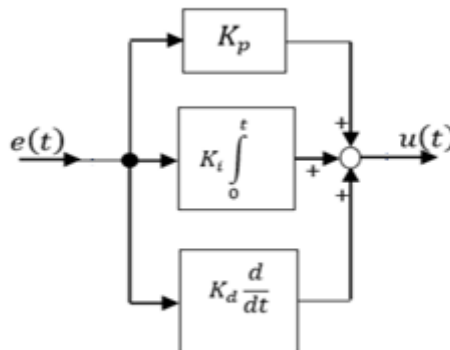
- La fonction de transfert du correcteur PID série est donc :

$$C_{PID}(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right) (1 + T_d \cdot p) \tag{2.9}$$



### b. Structure PID parallèle

Le schéma bloc correspondant à l'architecture de PID parallèle est donné par **Fig. 6**



**Fig. 6 : Schéma bloc de la commande PID parallèle.**

- La loi de commande du PID parallèle est :

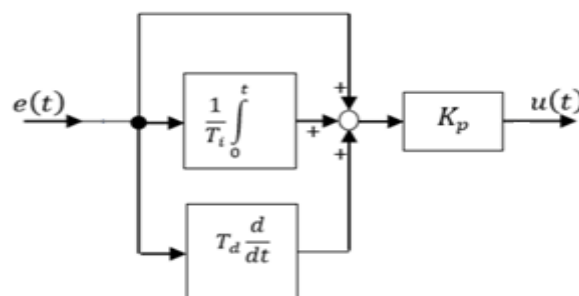
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.10)$$

- La fonction de transfert du correcteur PID parallèle est donc :

$$C_{PID}(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p + K_i \cdot \frac{1}{p} + K_d \cdot p \quad (2.11)$$

### c. Structure PID mixte

Le schéma bloc correspondant à l'architecture de PID mixte est donné par **Fig. 7**.



**Fig. 7: Schéma bloc de la commande PID mixte.**

- La loi de commande du PID mixte est :

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.12)$$

- La fonction de transfert du correcteur PID mixte est donc :

$$C_{PID}(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d p \right) \quad (2.13)$$

Le terme dérivé incorporé dans le contrôleur PID est  $T_d p$ . En fait, cette fonction de transfert est irréalisable physiquement car elle est non causale. Dans la pratique, la dérivée est réalisée

sous forme filtrée:  $\frac{T_d p}{1 + \frac{T_d p}{N}}$ .

Par conséquent, la fonction de transfert du contrôleur PID mixte devient sous la forme filtrée suivante:

$$C_{PID}(p) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + \frac{T_d p}{1 + \frac{T_d p}{N}} \right) \quad (2.14)$$

➤ **Avantages et inconvénients des actions d'un contrôleur PID :**

**a-Action proportionnelle P**

- ✓ Améliore la précision statique
- ✓ Améliore la rapidité mais déstabilise plus au moins le système.

**b- Action intégrale I**

- ✓ Annule l'erreur statique.
- ✓ Améliore la rapidité mais déstabilise aussi le système.

**c-Action dérivée D**

- ✓ Améliore la stabilité du système.
- ✓ Augmente la rapidité et l'amortissement en régime transitoire.
- ✓ Anticipe les erreurs futures.
- ✓ N'annule pas l'erreur statique (aucun effet en régime permanent).

2.2 Schéma fonctionnel général d'une boucle de régulation:

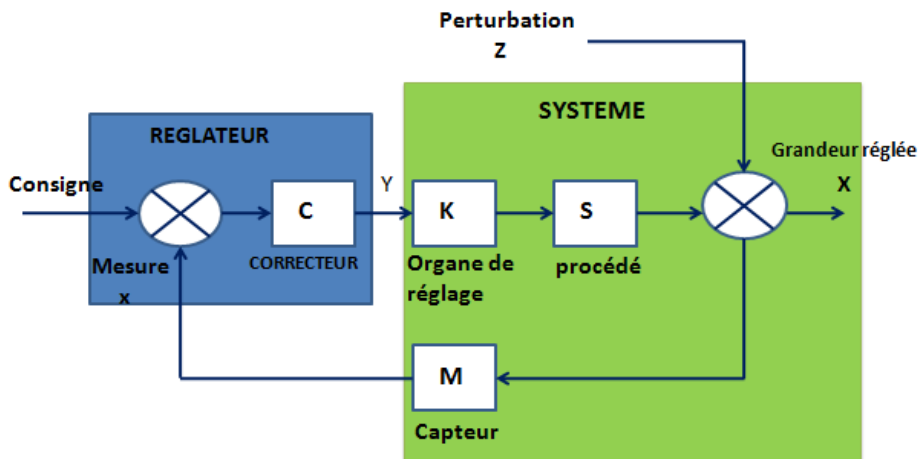


Fig. 2.1: schéma fonctionnel d'une boucle de régulation

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

2.3 Caractéristiques statiques et dynamiques d'un procédé: [1]

Stabilité:

➤ Procédés naturellement stables:

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

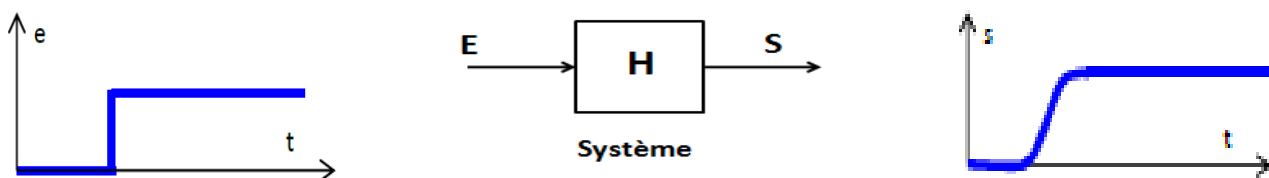


Fig. 2.2: système stable

➤ **Procédés naturellement instables:**

Un procédé est dit naturellement instable si à une variation finie de la grandeur réglant E correspond une variation continue de la grandeur réglée S

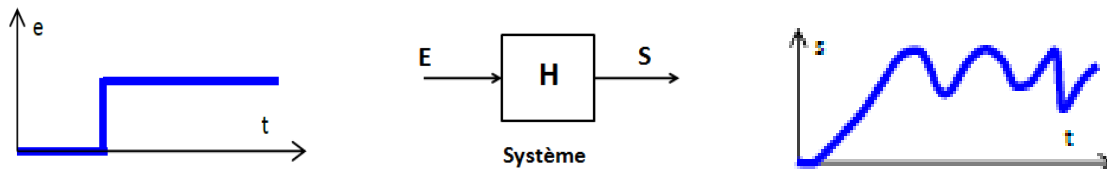


Fig. 2.3: système instable

## 2.4 Caractéristiques statiques d'un procédé: [1]

### Gain statique :

Si le système est naturellement stable, le gain statique G est le rapport entre la variation de la grandeur d'entrée S et la variation de la grandeur de sortie E.

$$G = \frac{\Delta S}{\Delta E} \quad (2.15)$$

## 2.5 Caractéristiques dynamiques d'un procédé: [1]

### Erreur statique:

Si le système est stable, l'erreur statique E est la différence entre la consigne W et la mesure de la valeur réglée X.

$$E = W - X \quad (2.16)$$

➤ **Temps de réponse : [1]**

C'est le temps mis par la boucle de régulation pour que la grandeur à régler pénètre dans le diapason de:  $(100\% \pm 10\%)$  et se stabilise autour de la valeur final (100%).

Parfois on choisit un temps de réponse pour  $(100\% \pm 5\%)$  ou  $(100\% \pm 2\%)$ .

Dans la figure 2.4, on mesure le temps de réponse à  $(100\% \pm 10\%)$  qui est égal à

$$t_r = T_1 - T_0 \quad (2.17)$$

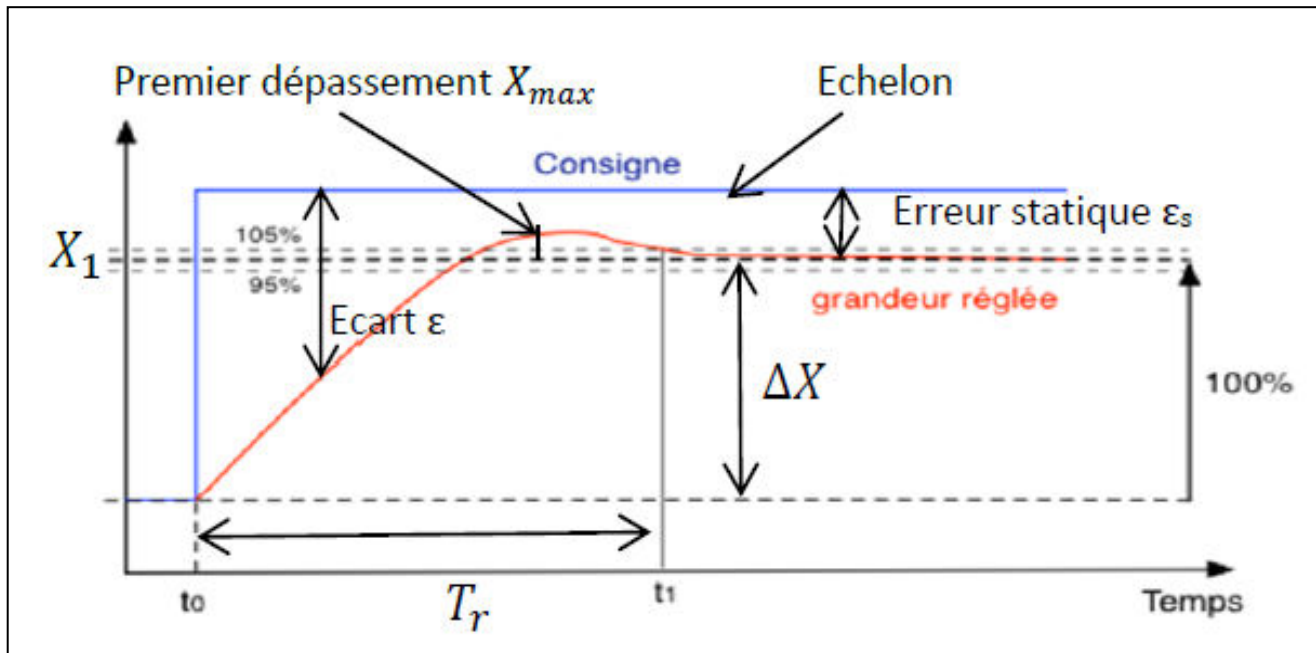


Fig.2.4: réponse indicielle d'un système stable

### ➤ 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. Souvent le premier dépassement doit être inférieur à 20 %.

Dans la réponse indicielle figure (2.4) le premier dépassement est de 20%.

## 2.6 Réglage des correcteurs : [1]

### 2.6.1 Problématique:

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

### 2.6.2 Principes fondamentaux de détermination des actions PID:

Dans le cas général, le réglage d'une boucle de régulation se fait en trois étapes:

- 1) Relevé des caractéristiques du système. Ces relevés se font soit en boucle ouverte soit en boucle fermée.
- 2) Détermination des paramètres représentant le système dans le modèle choisi.
- 3) A l'aide de ces paramètres, on calcule le correcteur PID adéquat

### 2.6.3 Actions des régulateurs PI et PID:

#### Action conjuguée PI:

En général, le régulateur ne fonctionne pas en action intégrale pure (trop instable). Fonctionne en correcteur Proportionnel Intégral (PI). Le couple (Bande Proportionnelle ou gain du régulateur et constante d'intégration ou taux d'action intégrale) définit deux types de fonctionnement (parallèle et mixte).

#### Action conjuguée PID :

En général, le régulateur ne fonctionne pas en action dérivée pure (trop instable). Il fonctionne en correcteur Proportionnel Intégral Dérivé (PID). Le triplet (Bande Proportionnelle constante d'intégration et constante de dérivation) définit aussi trois types de fonctionnement (série, parallèle et mixte)

### Résumé des actions des corrections P, I et D: [1]

Bande proportionnelle- $X_p$  Augmenté Diminue Temps Intégral- $T_i$  Augmenté Diminue Pas d'influence Temps dérivé - $T_d$  Diminue Augmenté Pas d'influence Réglage des paramètres du régulateur d'une boucle fermée: L'une des méthodes utilisées est la méthode appelée IMC (Intervalle Model control) d'un système en boucle fermée. On définit la dynamique que doit

Quand...augmente	Stabilité	Rapidité	Précision
Bande proportionnelle- $X_p$	Augmenté	Diminue	Diminue
Temps Intégral- $T_i$	Augmenté	Diminue	Pas d'influence
Temps dérivé - $T_d$	Diminue	Augmenté	Pas d'influence

2.7 Réglage des paramètres du régulateur d'une boucle fermée: [1]

L'une des méthodes utilisées est la méthode appelée IMC (Intervalle Model control) d'un système en boucle fermée. On définit la dynamique que doit prendre la boucle fermée et on calcule ainsi le correcteur qui nous donne cette dynamique en fonction du système à contrôler.

➤ Premier ordre :

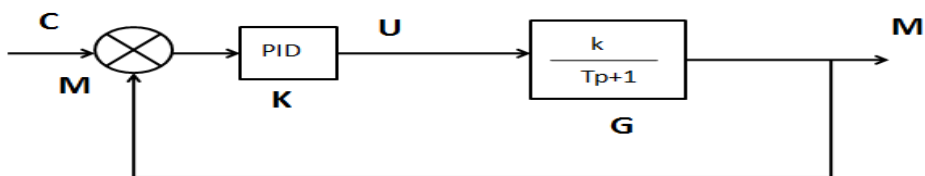


Fig. 2.5 : Schéma fonctionnel d'un système de 1<sup>er</sup> ordre avec un correcteur PID

➤ Deuxième ordre:

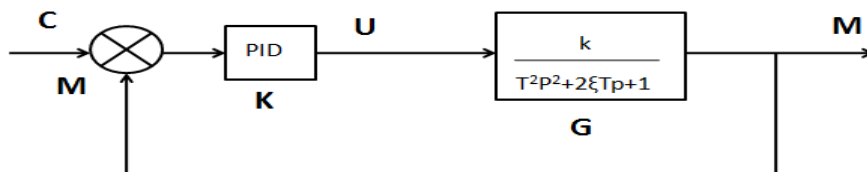


Fig. 2.6 : Schéma fonctionnel d'un système de 2<sup>ème</sup> ordre avec un correcteur PID

En boucle fermée nous avons: 
$$H(p) = \frac{K(p).G(p)}{1+K(p).G(p)} \tag{2.18}$$

A partir de l'équation (2.1), on trouve l'équation : 
$$K(p) = \frac{H(p)}{G(p).(1-H(p))} \tag{2.19}$$

Qui définit le correcteur à mettre dans la boucle.

2.7.1 La forme générale des correcteurs:

Les correcteurs qu'on utilise dans notre système sont de type suivant :

Régulateur PI : 
$$K(p) = \left(1 + \frac{1}{Ti.p}\right) \tag{2.20}$$

Régulateur PID : 
$$\mathbf{K(p)} = \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_d \cdot p\right) \tag{2.21}$$

Le tableau suivant résume les paramètres de réglage de régulateur PID par la méthode IMC: [1]

MODELE	DYNAMIQUE	KR	T <sub>i</sub>	T <sub>d</sub>	R <sub>f</sub>
$\frac{K1}{T1 \cdot p + 1}$	$\frac{1}{T \cdot p + 1}$	$\frac{T1}{TK1}$	T1	-	-
	$\frac{1}{T2 \cdot p^2 + 2\xi \cdot Tp + 1}$	$\frac{T1}{2\xi \cdot T \cdot K1}$	1	-	$\frac{1}{\frac{T}{2\xi} \cdot p + 1}$
$\frac{K2}{T2p^2 + 2\xi Tp + 1}$	$\frac{1}{T \cdot p + 1}$	$\frac{2\xi T2}{TK2}$	2\xi T2	$\frac{T2}{2\xi}$	-
	$\frac{1}{T2 \cdot p^2 + 2\xi \cdot Tp + 1}$	$\frac{T2}{TK2}$	2\xi T2	$\frac{T2}{2\xi}$	$\frac{1}{\frac{T}{2\xi} \cdot p + 1}$

On trouve avec le correcteur un filtre R<sub>f</sub> de réglage. 
$$\mathbf{R_f(p)} = \frac{1}{\frac{T}{2\xi} \cdot p + 1} \tag{2.22}$$

K1: Gain du procédé à régler du 1 ordre.

T1: Constante de temps du procédé à régler au 1 ordre.

T : Constante de temps de la dynamique désirée du 1<sup>er</sup> ordre ou temps caractéristique de la dynamique au 2<sup>ème</sup> ordre.

K2: Gain du procédé du 2<sup>m</sup> ordre

ξ : Amortissement du procédé à régler.

ε : Amortissement de la dynamique désirée, on choisit **ε=0.707**.

KR = gain du régulateur,

T<sub>1</sub> = constante d'intégration.

T<sub>d</sub> = constante de dérivation.

R<sub>f</sub> (p) = fonction de transfert du filtre à ajouter en série avec le PID, pas nécessairement.



## 2.8 Réglage des paramètres de régulateur d'une boucle cascade:

### ➤ Régulation cascade:

Ce type de régulation très utilisée dans l'industrie nécessite des moyens supplémentaires par rapport à la boucle simple (deux régulateurs, deux dispositifs de mesure et un organe de réglage qui peut être une vanne automatique).

Il utilise une variable intermédiaire et un autre régulateur appelé «régulateur esclave» dont la consigne est la sortie du régulateur principal dit «régulateur maitre».

La régulation en cascade permet d'une part, de diminuer le temps de réponse et de stabiliser le système puisque le système à commander est divisé en deux sous systèmes et d'autre part le régulateur esclave permet d'éliminer la perturbation principale avant qu'elle ne se répercute sur la grandeur à régler.

### ➤ Boucle de régulation cascade

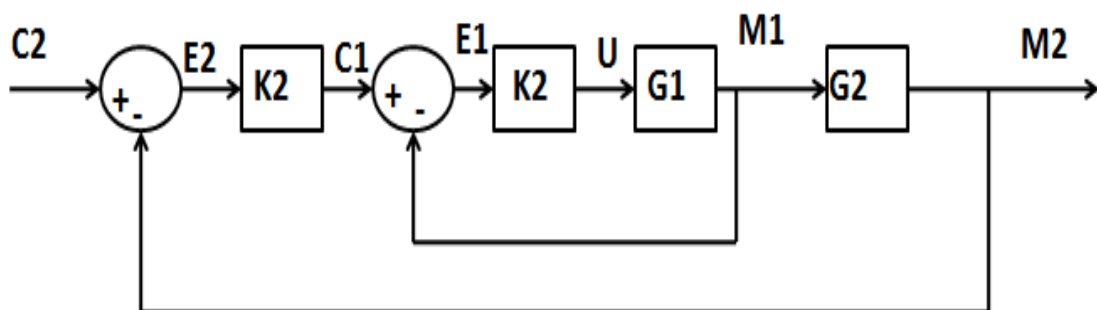


Fig. 2.7: Schéma fonctionnel de la boucle cascade

### ➤ Réglage d'une boucle cascade:

Tout d'abord, rappelons que pour obtenir de bons résultats avec une régulation cascade, la boucle interne doit être plus rapide que la boucle externe. Le régulateur interne peut être de type P ou PI. Un régulateur P seul peut suffire car on peut en générale tolérer de petites erreurs statique dans la boucle interne puisque celles-ci seront corrigées par la boucle externe qui contient en générale un régulateur PI ou PID.

➤ La forme des correcteurs en boucle cascade: [1]

Les paramètres de réglage de régulateur PID identifié par la méthode IMC :

❖ La boucle interne:

$$G1(p) = \frac{K1}{T1.p+1} \quad \text{avec } T1=R1.C1 \quad (2.23)$$

$$H1(p) = \frac{1}{T.p+1} \quad (2.24)$$

$$K(p) = \frac{H(p)}{G(p).(1-H(p))} = \frac{T1}{T.K1} \cdot \left(1 + \frac{1}{T1.p}\right) \quad (2.25)$$

❖ La boucle externe:

$$G2(p) = \frac{K2}{T2.p+1} \quad \text{avec } T2=R2.C2 \quad (2.26)$$

$$H2(p) = \frac{1}{T0.p+1} \quad (2.27)$$

$$G(p) = H1(p) \cdot G2(p) = \frac{K2}{(T1.p+1).(T2.p+1)} \quad (2.28)$$

$$K(p) = \frac{H2(p)}{G(p).(1-H2(p))} = \frac{T1+T2}{T0.K2} \cdot \left(1 + \frac{1}{(T1+T2).p} + \frac{T1.T2}{(T1+T2)} \cdot p\right) \quad (2.29)$$

$$K(p) = Kp + \frac{Ki}{p} + Kd.p \quad (2.30)$$

$$\text{Avec: } Kp = \frac{T1+T2}{T0.K2}, \quad Ki = \frac{1}{T0.K2}, \quad Kd = \frac{T1.T2}{T0.K2} \quad (2.31)$$

# **chapitre 03**

ETUDE MATHEMATIQUE DU SYSTEME  
**ETUDE MATHEMATIQUE DU SYSTEME**

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons trouver un modèle mathématique selon la commande à utiliser de notre procédé composé de deux capacités reliées en cascade. Le premier réservoir de capacité  $C1$  reçoit un débit réglant  $Q_e$  et un débit auxiliaire perturbant  $Q_1$ , le débit  $Q_0$  Sort du premier réservoir à travers une vanne manuelle de résistance  $R1$ , ce débit alimente à son tour le deuxième réservoir de capacité  $C2$ , un débit  $Q_s$  sort du deuxième réservoir à travers une vanne manuelle de résistance  $R2$

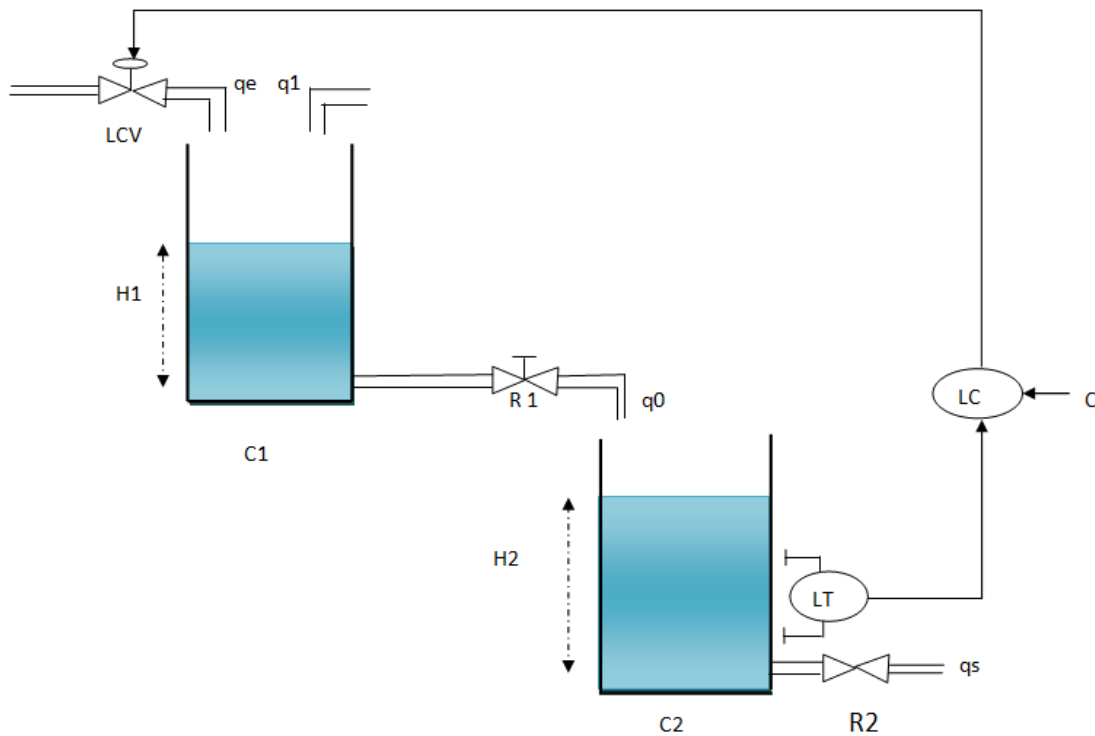


Fig. 3.1: Schéma technologique de boucle PID simple

### 3.2. Etude mathématique du procédé

#### 3.2.1 Caractéristiques et désignations des paramètres :

$Q_e$ : débit d'entrée avec  $Q_{e\max} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$Q_1$ : débit d'entrée auxiliaire perturbant avec  $Q_{1\max} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$Q_0$  débit de sortie intermédiaire entre les deux réservoirs.

$Q_s$  : débit de sortie de deuxième réservoir, avec  $Q_{s\max} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$ .

$R1$  : résistance d'écoulement de la vanne manuelle avec  $R1=50 \text{ s}/\text{m}^2$

$R2$  : résistance d'écoulement de la vanne manuelle avec  $R2= 50 \text{ s}/\text{m}^2$

C1: capacité du premier réservoir avec  $C1= 2 \text{ m}^2$

C2: capacité du deuxième réservoir avec  $C2=2 \text{ m}^2$ .

LC : (Level Controller)

LT : Transmetteur de mesure

LCV : (Level Controller Valve) la vanne automatique avec positionneur électropneumatique

**3.2.2. Modélisation du procédé pour régulation simple PID**

Nous avons les équations du bilan de matière suivante :

1<sup>er</sup> réservoir:  $Q_e + Q_1 - Q_o = C1 \cdot \frac{dh1}{dt}$  (3.1)

$$Q_o(t) = \frac{h1(t)}{R1}$$
 (3.2)

2<sup>ème</sup> réservoir:  $Q_o(t) - Q_s(t) = C2 \cdot \frac{dh2(t)}{dt}$  (3.3)

$$Q_o(t) = \frac{h1(t)}{R1}$$

Avec  $Q_s(t) = \frac{h2(t)}{R2}$  (3.4)

En utilisant la transformé de LAPLACE, on obtient:

$$H_1(p) = \frac{R1}{T1 \cdot p + 1} \cdot Q_e(p) + \frac{R1}{T1 \cdot p + 1} \cdot Q_1(p)$$
 (3.5)

$$H_2(p) = \frac{R2}{T2 \cdot p + 1} \cdot H_1(p)$$
 (3.6)

$$H_2(p) = \frac{R2}{T1 \cdot T2 \cdot p^2 + (T1 + T2) \cdot p + 1} \cdot Q_e(p) + \frac{R2}{T1 \cdot T2 \cdot p^2 + (T1 + T2) \cdot p + 1} \cdot Q_1(p)$$
 (3.7)

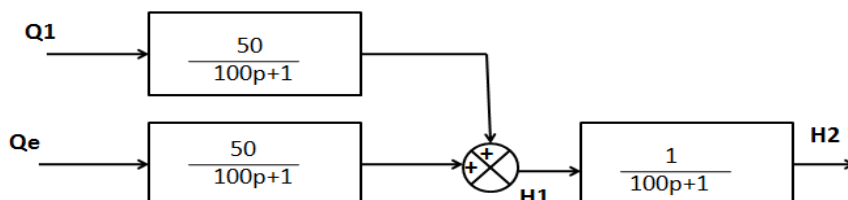


Fig. 3.2: Schéma fonctionnel du système à régler

### 3.2.3. Choix des éléments de boucle

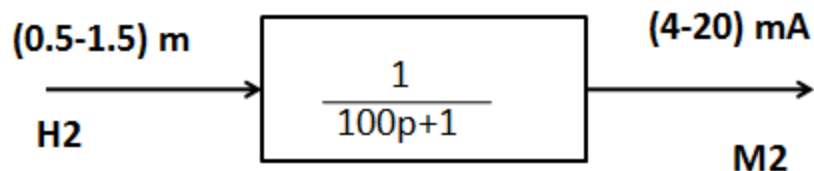
#### 3.2.3.1. Choix du dispositif de mesure

Il est composé d'un capteur et transmetteur de mesure de niveau à pression différentielle avec son circuit électronique LT.

La fonction de ce dispositif est de convertir le signal réel de mesure de niveau de 0.5 à 1.5 m en un signal électrique standard compris entre 4 à 20mA.

$M_2(p)$  : est le signal mesuré niveau dans le deuxième réservoir.

La fonction de transfert de l'appareil est la suivante:



**$K_m$** : Gain statique du dispositif de mesure.

**$T_m$** : La constante de temps de l'appareil de mesure

Signal de sortie de l'appareil standard: **4 à 20 mA**

Signal d'entrée (échelle de mesure : **0.5 à 1.5 m**)

Le gain statique du dispositif de mesure est:

$$\mathbf{K_m = \frac{20-4}{1.5-0.5} = 16 \quad K_m = 16 \text{ (mA/m)}} \quad (3.8)$$

On néglige la constante de temps du transmetteur électronique :  **$T_m = 0 \text{ s}$**

$$\text{L'équation de transfert de l'appareil de mesure est égale à } \mathbf{K_m = 16} \quad (3.9)$$

### 3.2.3.2. Choix du convertisseur électropneumatique

Dans le cas d'un régulateur électronique et une vanne pneumatique, on utilise un convertisseur électropneumatique qui reçoit un signal électrique standard (**4 à 20 mA**) du régulateur et élabore un signal pneumatique standard (0.2 à 1 bar) vers la vanne. On utilise dans l'industrie un positionneur électropneumatique pour aider la vanne à se positionner et pour convertir le signal électrique standard 4 à 20 mA en un signal pneumatique standard **0.2 à 1 bar**.

$$\text{Le gain: } \mathbf{K_{i/p} = \frac{1-0.2}{20-4} = 0.05 \text{ (bar/mA)}} \quad (3.10)$$

### 3.2.3.3. Choix de la vanne automatique :

Signal d'entrée pneumatique : 0.2 à 1 bar.

Grandeur de sortie : débit d'entée  $\mathbf{Q_{\max}=0.08 \text{ m}^3 /s}$ .

Le gain statique de la vanne est calculé par relation suivante :  $\mathbf{K_v = K_{v0} \cdot K_{i/p}}$

$$\mathbf{K_{v0} = \frac{0.08-0}{1-0.2} = 0.1 \text{ (m}^3 /s.\text{bar)}} \quad (3.11)$$

$$\text{Donc: } \mathbf{K_v = 0.005 \text{ (m}^3 /s.\text{bar)}} \quad (3.12)$$

On néglige aussi la constante de temps de la vanne automatique :  $\mathbf{T_v = 0 \text{ s}}$ .

La fonction de transfert de la vanne est donné par :  $\mathbf{K_v = 0.005}$

En ajoutons maintenant au système à régler les éléments indispensables de contrôle du procédé qui sont:

- 1- Le dispositif de mesure LT (capteur +transmetteur),
- 2- l'organe d'exécution qui est la vanne automatique avec positionneur électropneumatique **LCV**.

Nous obtenons ainsi le modèle élargi du procédé à régler.

. La figure (3.3) représente le schéma fonctionnel élargi du système à régler :

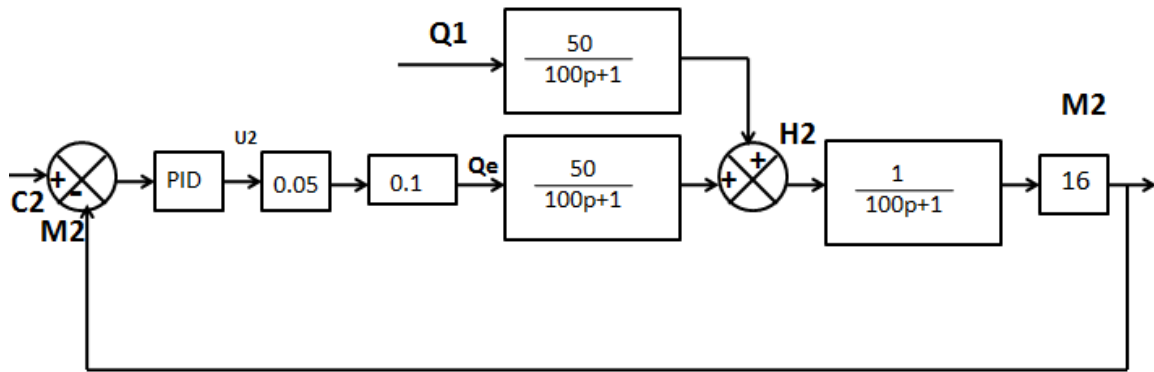


Fig. 3.4: Schéma fonctionnel du système avec régulation PID simple.

3.2.4. Modélisation du procédé pour régulation cascade

Nous présentons le schéma technologique de la régulation cascade (voir figure 3.5) ci-dessous:

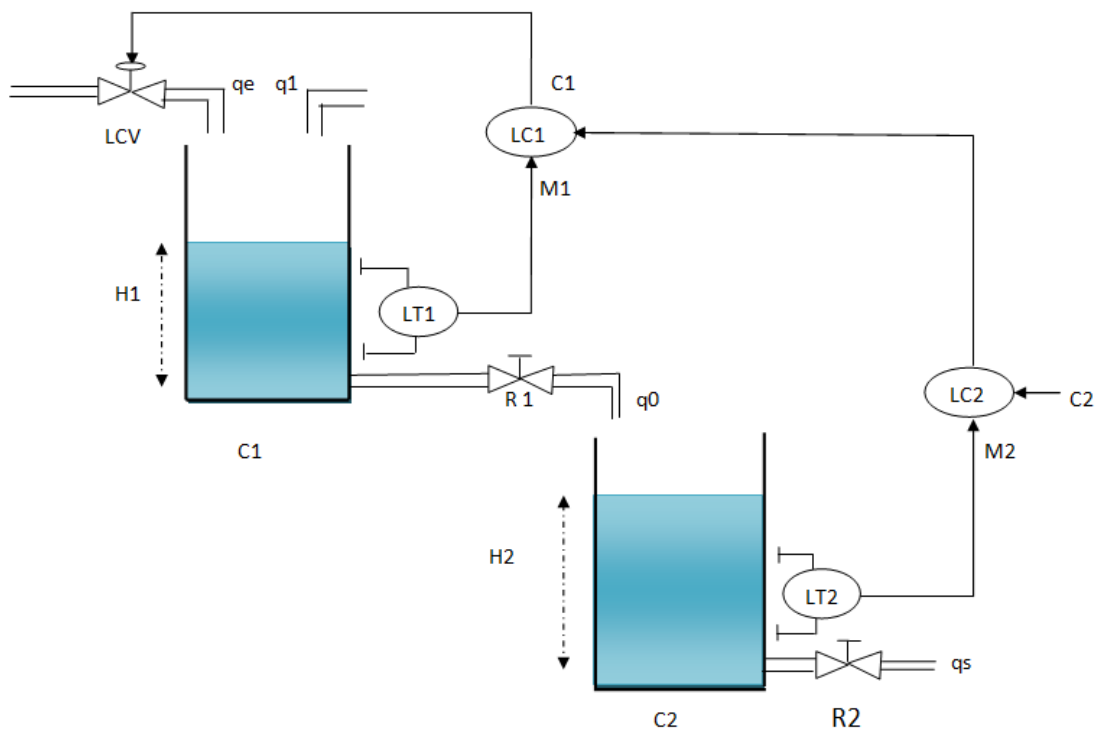


Fig. 3.5: Schéma technologique de boucle cascade



Les équations utilisées pour ce type de réglage sont:

$$H_1(p) = \frac{R1}{T1.p+1} \cdot Qe(p) + \frac{K2}{T2.p+1} \cdot Q1(p)$$

$$H_2(p) = \frac{R2}{T2.p+1} \cdot H1(p)$$

Nous obtenons le schéma fonctionnel de la boucle cascade suivant :

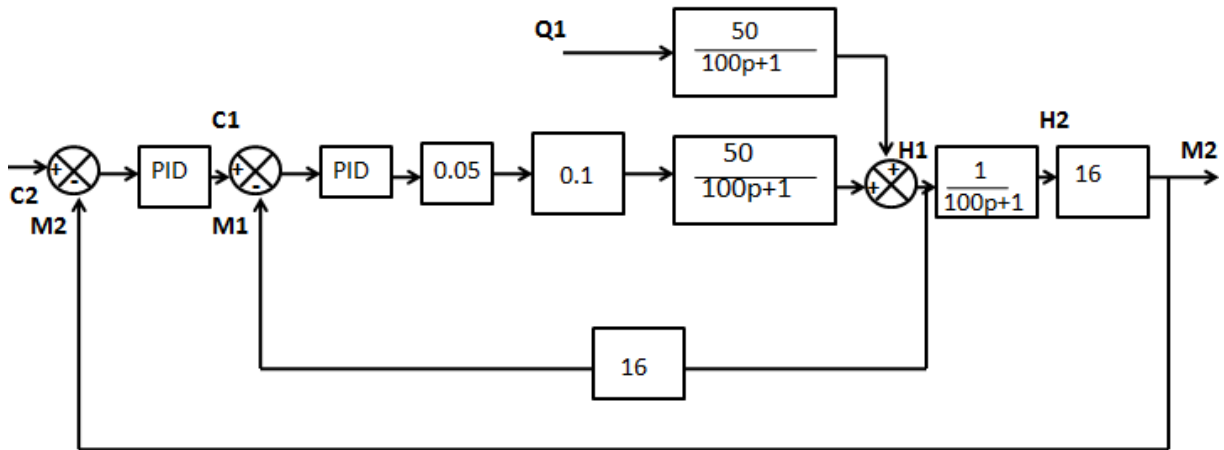


Fig. 3.6 : Schéma fonctionnel de la boucle cascade

# **chapitre 04**

commande du procédé  
**commande du procédé**

4.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons traiter deux types de commandes, la régulation simple PID et la régulation cascade sur le modèle élargi du système à l'aide de la simulation sur logiciel MATLAB, les résultats obtenus nous permettent de faire une étude comparative entre ces deux types commandes.

4.2. Commande PID simple

Nous présentons le schéma technologique de la boucle simple PID et son schéma fonctionnel

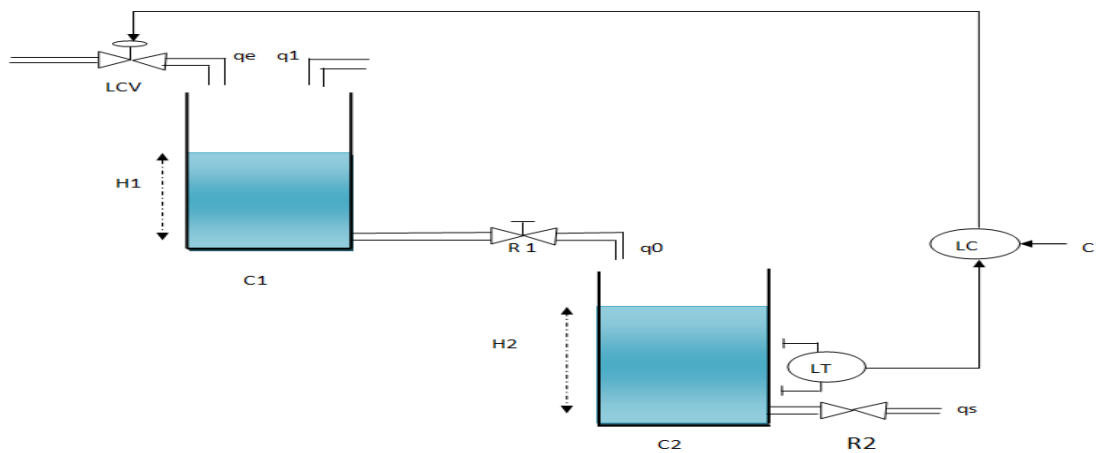


Fig. 4.1: Schéma technologique de boucle PID simple

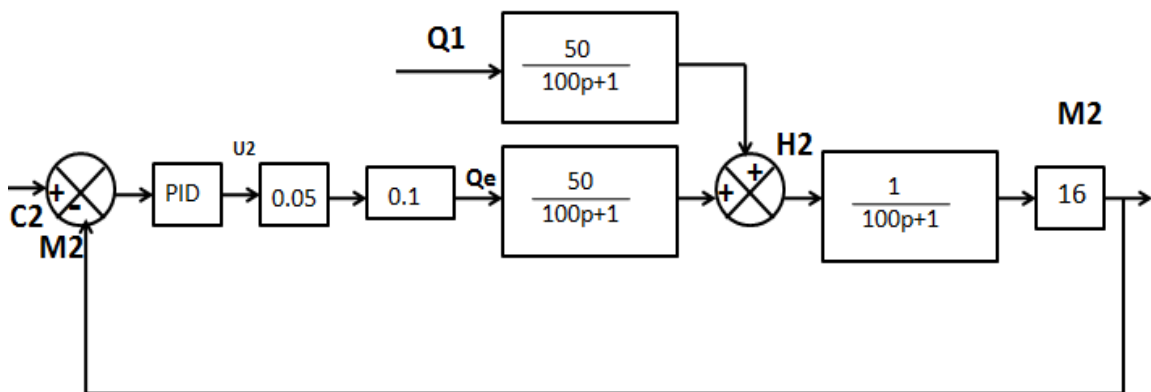


Fig. 4.2.1: Schéma fonctionnel de boucle PID simple détaillé

La boucle interne

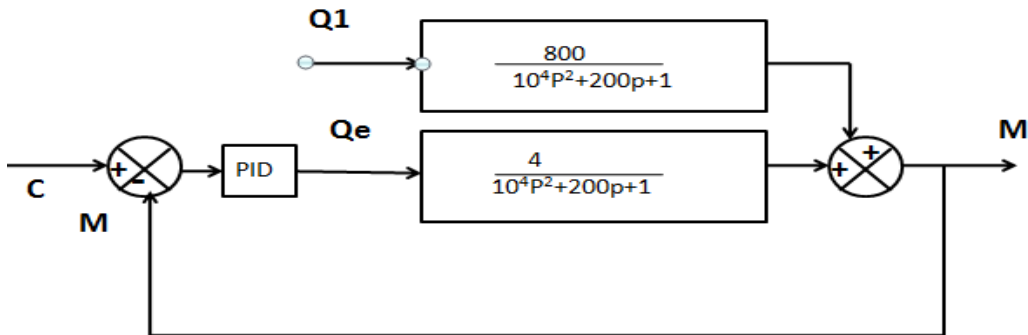


Fig. 4.2.2: Schéma fonctionnel de boucle PID simple rectifié

4.2.1 : Conception du correcteur PID par la méthode de BODE.

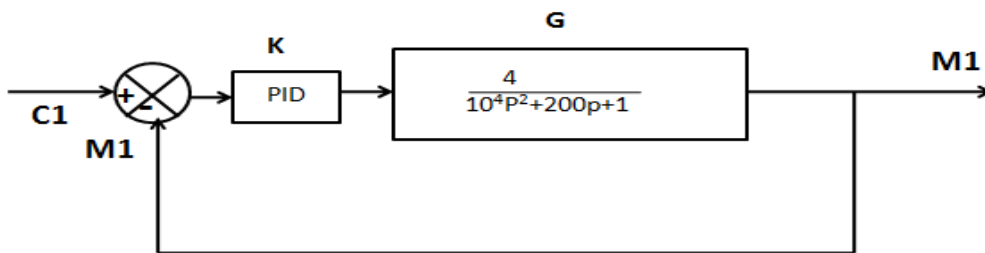


Fig. 4.2.3: Schéma fonctionnel de boucle PID simple

$$FTBF(p) = \frac{K.G}{1+K.G} = \frac{1}{Tp+1} \tag{4.1}$$

Avec  $K(p) = K_r [1 + \frac{1}{Ti p + 1} + T_d . p] = K_r + \frac{K_r}{Ti p + 1} + K_r . T_d . p = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d . p$  (4.2)

$$K_p = K_r \quad , \quad K_i = \frac{K_r}{T_i} \quad , \quad K_d = K_r . T_d \tag{4.3}$$

Après simplification on trouve :

$$K_p = K_0 (\tau_1 + \tau_2)$$

$$K_i = K_0 .$$

$$K_d = K_0 . \tau_1 . \tau_2$$

Nous calculons  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ , et  $K_0$  par la procédure suivante :

1. Nous traçons le lieu de Bode du système élargie en boucle ouverte
2. Nous prenons  $\omega_c = X$  rd/s qui a une phase proche de la zone instable ( $< -180$ ) dans le diagramme de Bode de l'équation élargie du système.
3. Nous calculons la différence de phase  $\Delta\phi$  entre la phase  $\phi$  ( $\omega_c < -180$ ) et la phase  $\phi = 135^\circ$  et en ajoutant une phase de sécurité  $\phi$  de sécurité.
4. Nous calculons  $T_2$  de l'action dérivée à l'aide de la formule suivante:

$$\text{Arc tg}(\omega_c \cdot T_2) = \Delta\phi + \phi \text{ de sécurité.} \tag{4.5}$$

5. Nous calculons  $T_1$  de l'action intégrale à une décade de la fréquence choisie  $\omega_c$ , donc:

$$\tau_1 = \frac{1}{\omega_1} \text{ avec } \omega_1 = \frac{\omega_c}{10} \tag{4.6}$$

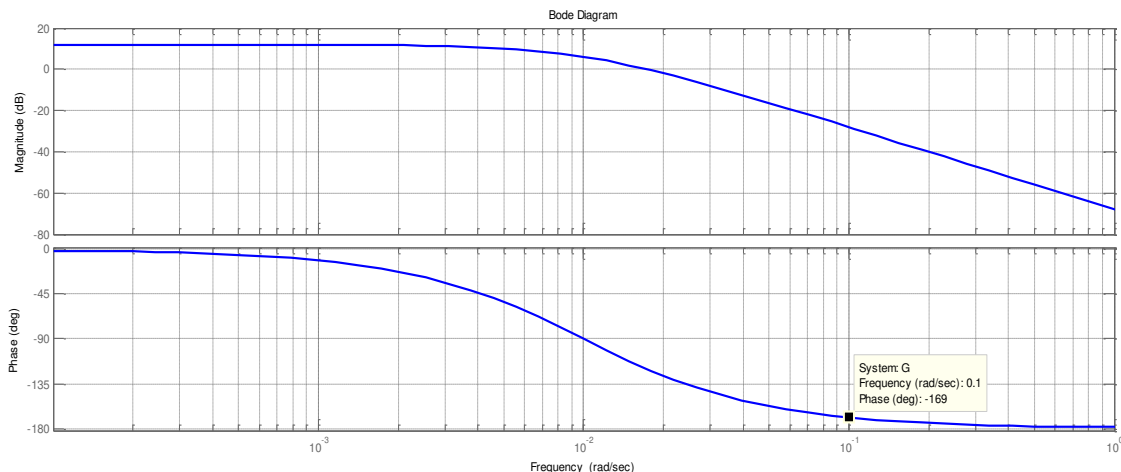
6. Nous calculons ensuite  $K_0$ , le gain de proportionnalité en utilisant la règle suivante :

$$K_0 = \frac{1}{10^{\frac{Adb}{20}}} \tag{4.7}$$

**Adb** est le gain qui correspond à  $\omega_c$ , dans le diagramme de Bode du système après l'insertion du correcteur intégrale et dérivé dans le système :  $\frac{1}{p} \cdot (\tau_1 p + 1)(\tau_2 p + 1)$  (4.8)

Application Numérique :  $G(p) = \frac{4}{10000.p^2 + 200.p + 1}$

1-On trace le lieu de Bode du système élargie en boucle ouverte:



**Fig.4.3: Lieu de Bode du système G(p)**

Sur la figure (4.3), nous choisissons la fréquence  $\omega_c = 0.1$ rd/s qui nous donne une phase égale à:

$\phi(\omega c) = -169^\circ$  qui se trouve proche de la zone d'instabilité du système.

**2-Calcul de  $\tau_2$  de l'action dérivé :**

Nous calculons la différence de phase entre  $(-135^\circ)$  et  $(-169^\circ)$ , on obtient  $34^\circ$ , on ajoute une phase de sécurité car l'action intégrale diminuera la phase, on ajoute environ  $(5^\circ)$ .

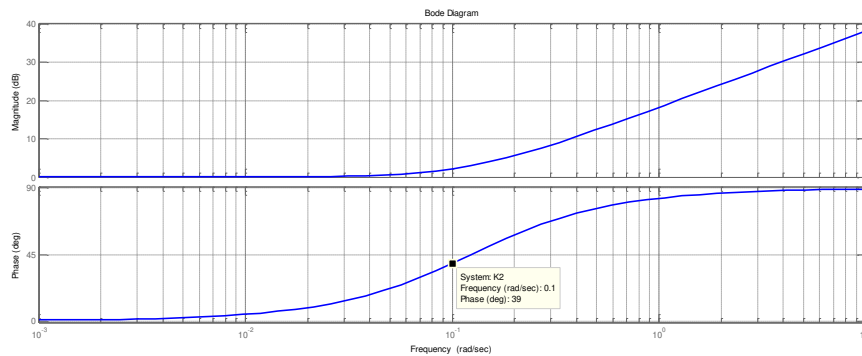
Nous calculons  $\tau_2$  par :  $\text{Arc tg}(0.1 \cdot \tau_2) = 34^\circ + 5^\circ = 39^\circ$  (4.9)

Cela donne :  $\tau_2 = \frac{\text{tg}39^\circ}{\omega c} = 8.098$  secondes

$$\tau_2 = 8.098 \text{ s}$$

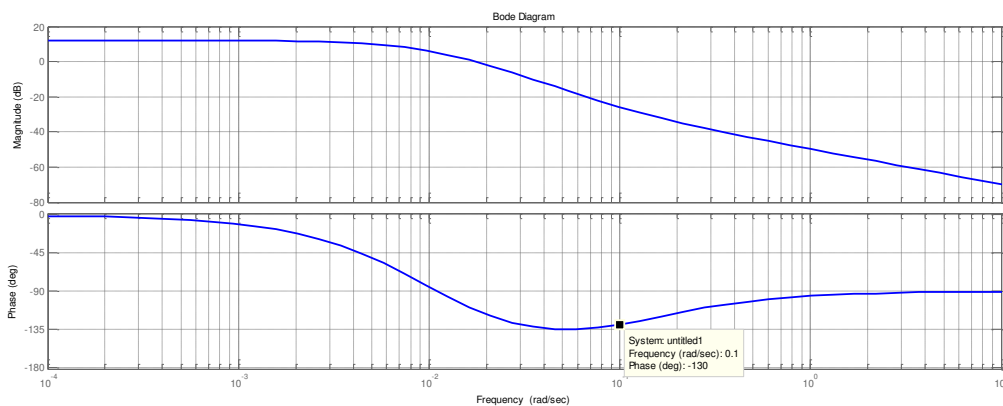
2-On trace dans la figure (4.3) le lieu de Bode de  $\mathbf{K2} = (8.098 \cdot p+1)$ ,

On remarque que cette partie apporte une phase de  $(39^\circ)$ .



**Fig.4.4 :Lieu de Bode K2**

Nous traçons le lieu de Bode de  $[K2(p) \cdot G(p)]$ , La figure (4.5) correspondante montre que pour  $\omega c=0.1$  rd/s la phase est égale à  $(-130^\circ)$  donc pour le moment une marge de phase  $MP=34^\circ$  qu'on peut diminuer par addition de l'action intégrale.



**Fig.4.5:Lieu de Bode K2(p) .G(p)**

3-Nous cherchons maintenant la partie intégrale  $\mathbf{K1} = (\tau \cdot 1.p+1)/p$

Pour ne pas perturber le réglage précédent, on choisit  $w_1$  inférieure au moins d'une décade par rapport à  $w_c=0.1$  rd/s donc on aura :

$$w_1 = \frac{w_c}{10} = 0.01 \tag{4.10}$$

$$\tau_1 = \frac{1}{w_1} = 100 \tag{4.11}$$

Nous obtenons :  $\tau_1 = 100$  s

Nous traçons le lieu de Bode  $K_1 = [(100 p + 1)/p]$  , on remarque sur la figure (4.6) que la phase a diminué d'environ ( $6^\circ$ ).

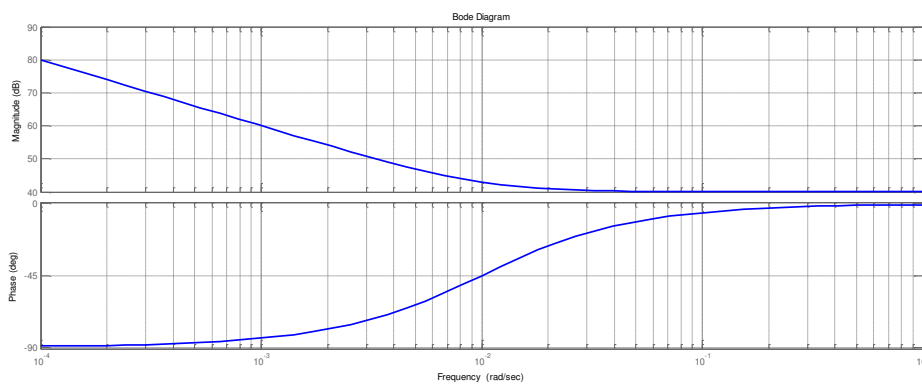


Fig.4.6 : Lieu de Bode K1

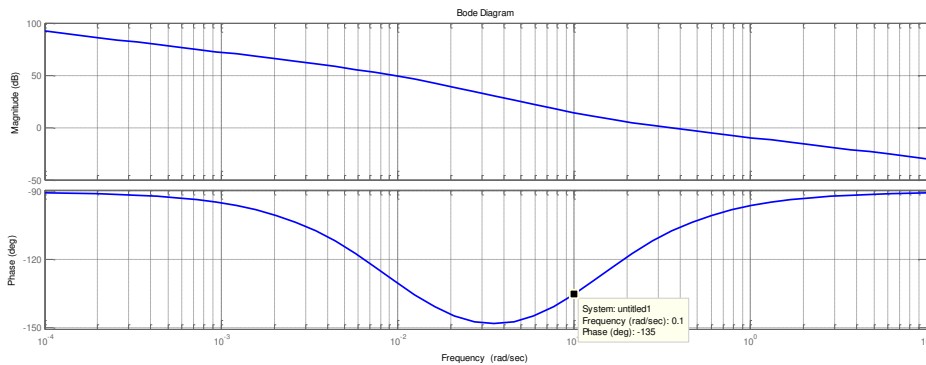


Fig.4.7 :Lieu de Bode K1.K2.G

La phase totale sera égale à ( $-135^\circ$ ) donc une marge de phase du système sera égale à ( $34^\circ$ ).voir la figure (4.7)

Calcul de  $K_0$  :

On insère le correcteur:  $\frac{K_0}{p} (100 p + 1)(8.098p + 1)$  (4.12)

Nous obtenons graphiquement :  $A_{db} = 14.2db$  pour  $w_c = 0.1$  rd/s

Le gain  $K_0 = \frac{1}{10^{\frac{14.2}{20}}} = 0.1995262315$

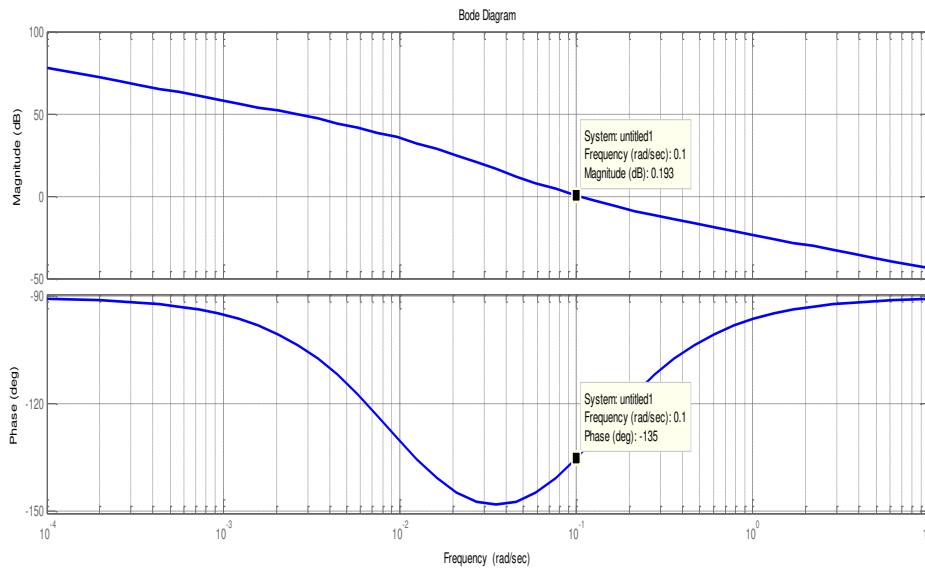


Fig.4.8 : Lieu de Bode  $K_0.K_1.K_2.G$

On calcule les coefficients  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  remplaçons les valeurs de  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  et  $K_0$  dans la formule on obtient:

$K_p = K_0 (\tau_1 + \tau_2) = 21.5683$  (4.13)

$K_i = K_0 = 0.1995262315$  (4.14)

$K_d = K_0 \cdot \tau_1 \cdot \tau_2 = 161.576342$  (4.15)

Alors l'équation du régulateur PID est :  $K(p) = 21.5683 + \frac{0.1995262315}{p} + 161.576342 \cdot p$  (4.16)

Après la simulation on trouve le graphe suivant :

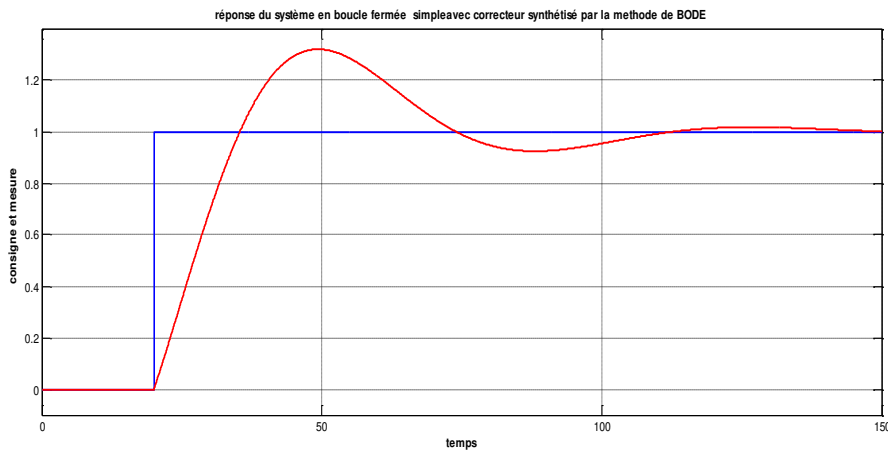
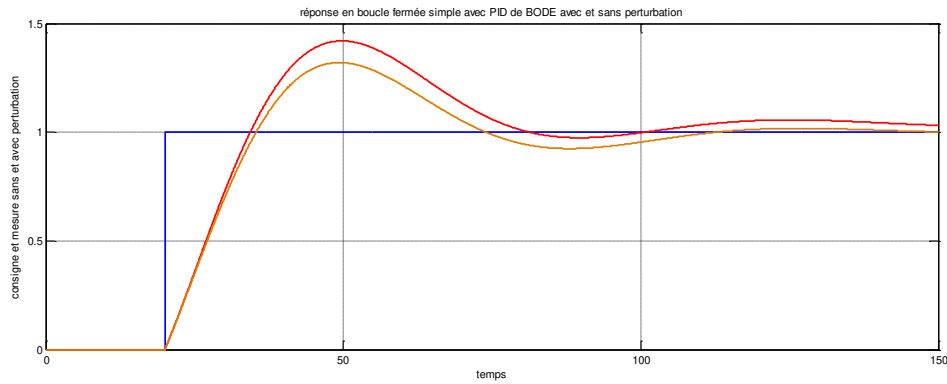


Fig.4.8 : La réponse de régulateur PID simple par la méthode de BODE



On a appliqué une variation d'échelon de  $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$  sur le débit  $Q1$  considéré comme une perturbation sur le système. On obtient le graphe rouge sur le figure ci-dessous. Nous voyons que la perturbation influence sur système. Pour cela, on voit la différence entre la courbe rouge et marron.

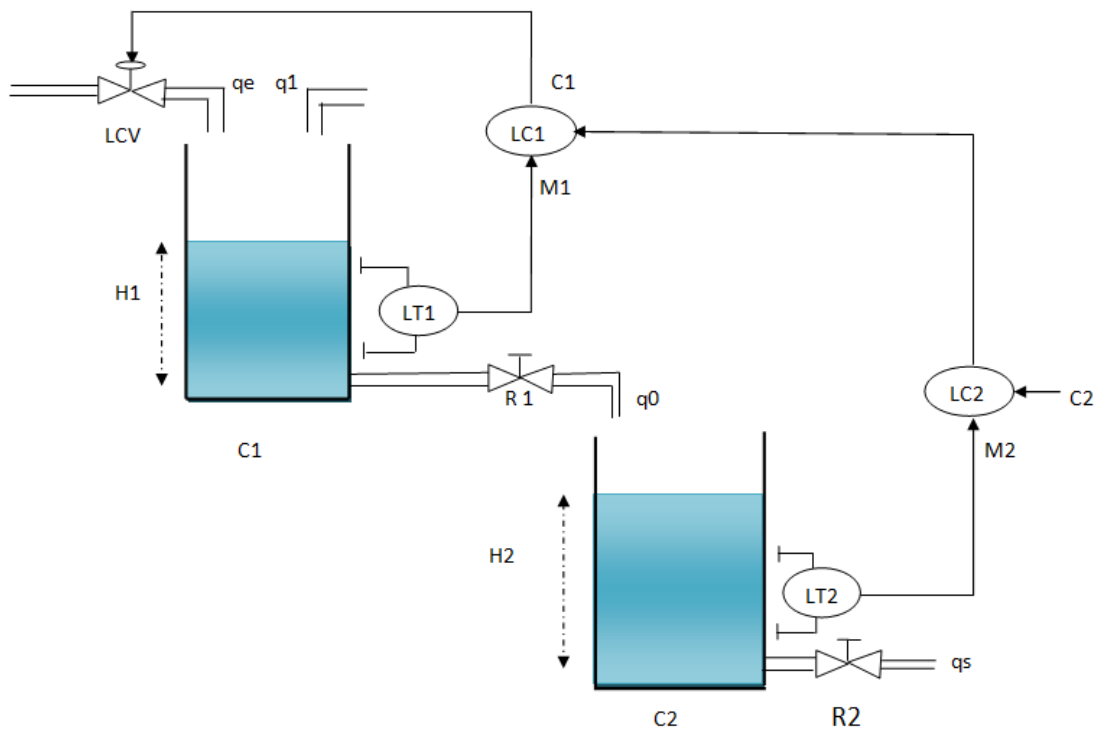


**Fig.4.9 : La réponse de régulateur PID simple par la méthode de BODE**

**Avec et sans perturbation**

**3 3.3. Commande du procédé par régulation cascade :**

Nous présentons le schéma technologique de la boucle cascade et son schéma fonctionnel.



**Fig. 4.9: Schéma technologique de boucle cascade**

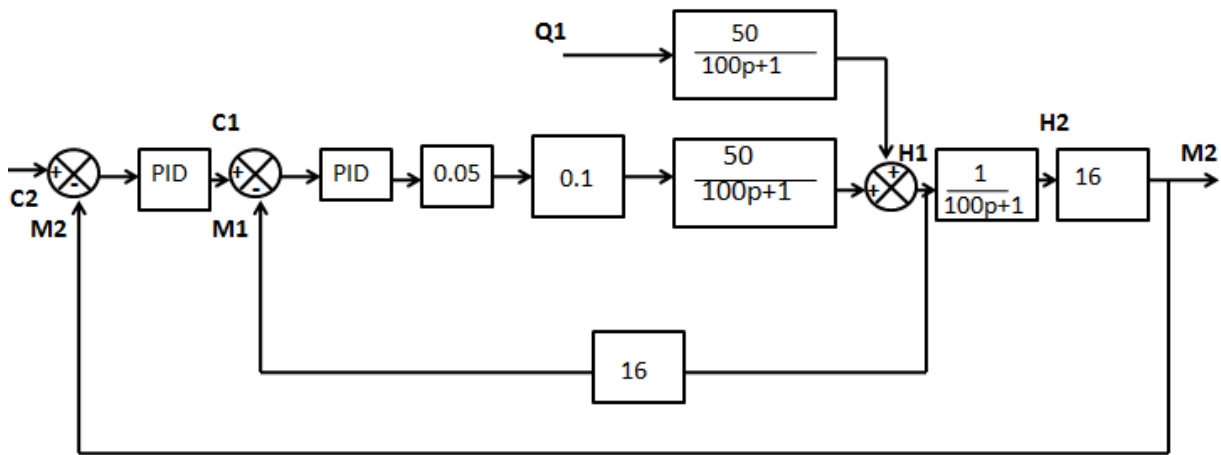


Fig. 4.10 : Schéma fonctionnel de la boucle cascade

3.3.3.1. Synthèse du correcteur de la boucle interne de la régulation cascade

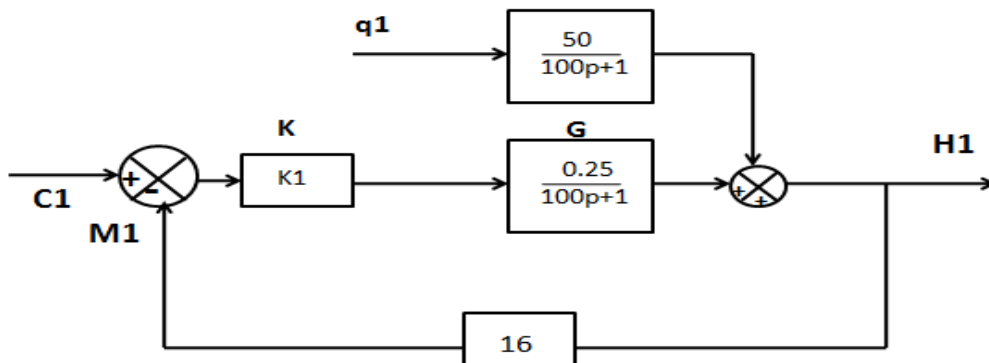
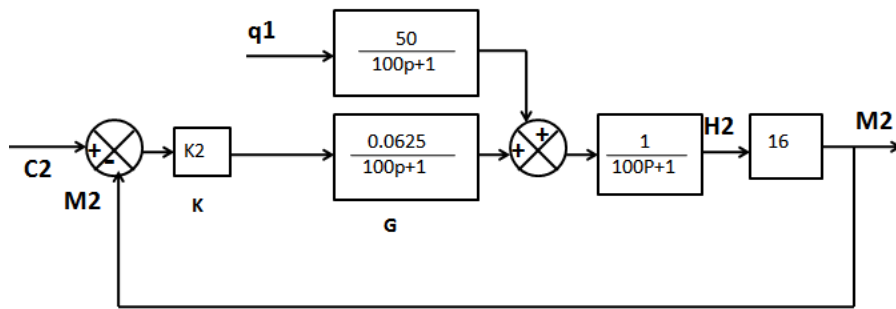


Fig. 4.11: Schéma fonctionnel de la boucle interne de la régulation cascade

On synthétise le correcteur  $K1(p)$  pour obtenir une dynamique de la boucle interne sous forme d'un système de 1<sup>er</sup> ordre de fonction  $(\frac{1}{100p+1})$  pour celui nous avons en boucle fermée :

$$FTBF_{interne} = \frac{0.25 \cdot K1}{100P+1+4K1} = \frac{0.0625}{100P+1} \tag{4.17}$$

On trouve que :  $K1(p) = 0.25 + \frac{0.0025}{p}$  c'est un régulateur PI. (4.18)



**Fig. 4.12: Schéma fonctionnel de la boucle externe de la régulation cascade**

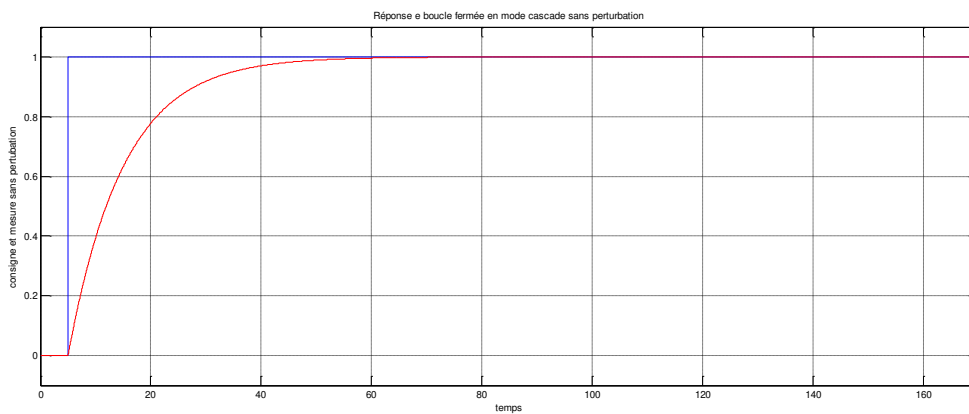
La fonction de transfert de la boucle fermée externe de la régulation cascade est donnée par :

$$FTBF_{\text{externe}} = \frac{K2}{10000p^2 + 200p + 1 + K2} = \frac{1}{10P + 1} \tag{4.19}$$

On trouve que :

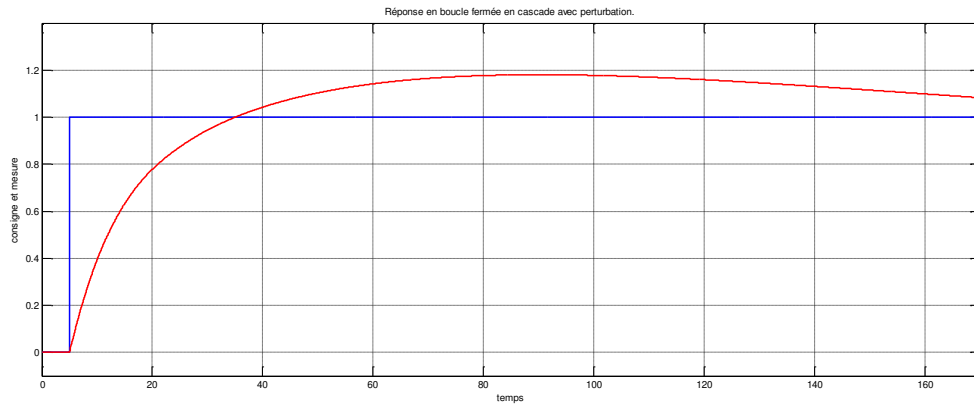
$$K2(p) = 20 + \frac{0.1}{p} + 1000 p \text{ c'est un régulateur principal PID} \tag{4.20}$$

Après la simulation de la boucle cascade sans perturbation, on obtient le graphe suivant :

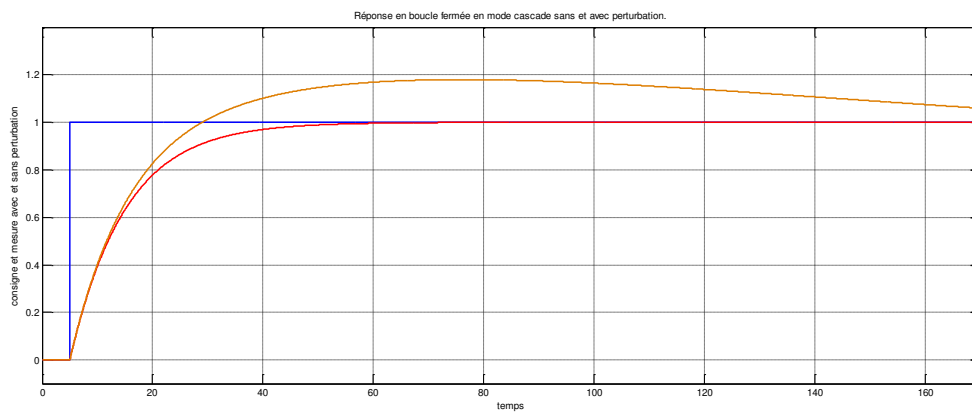


**Fig. 4.13 : La réponse de régulateur PID cascade sans perturbation**

On a appliqué une variation d'échelon de 0.01 m<sup>3</sup>/s sur le débit Q1 considéré comme une perturbation sur le système. On obtient le graphe rouge sur le figure ci-dessous.



**Fig. 4.14 : La réponse de régulateur PID cascade avec perturbation.**



**Fig.4.15 : La réponse en boucle fermée avec régulation cascade avec et sans perturbation**

la courbe rouge sans perturbation et celle marron avec perturbation. L'influence apparait mais les régulateurs primaire et secondaire ramènent la mesure à la consigne.

ETUDE COMPARATIVE

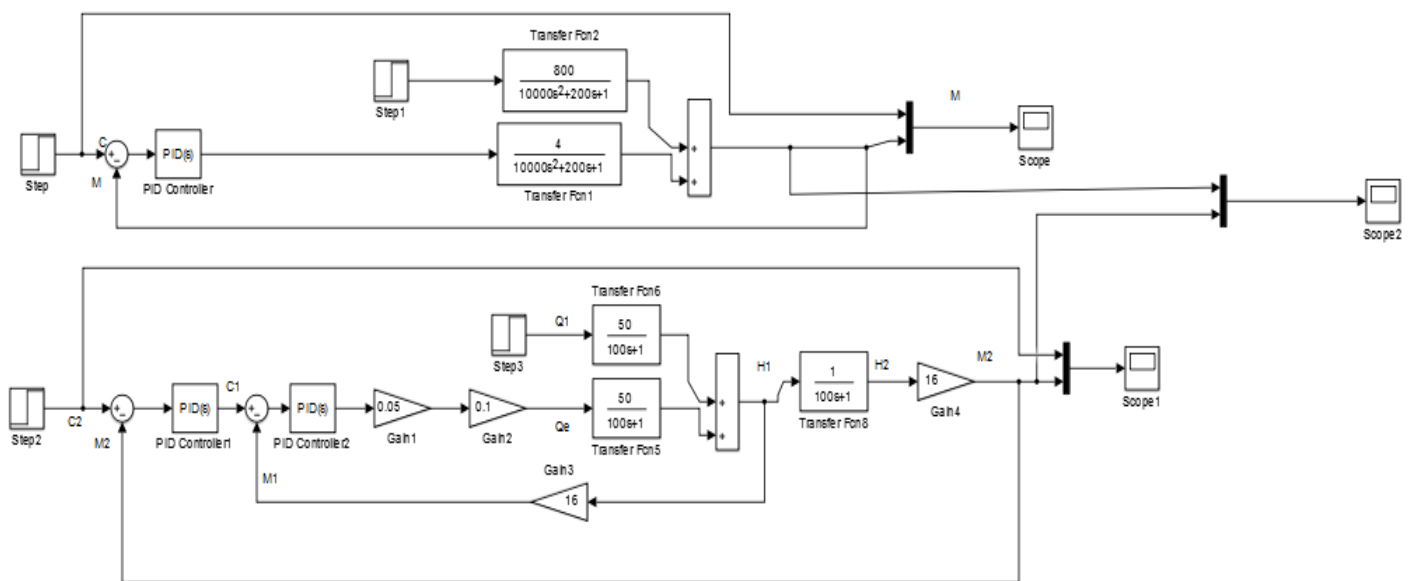
**ETUDE COMPARATIVE**

## 5.1 : INTRODUCTION

Nous allons faire une étude comparative entre la régulation PID simple et la régulation PID cascade

## 5.2 : Comparaison entre la régulation PID simple et la régulation PID cascade :

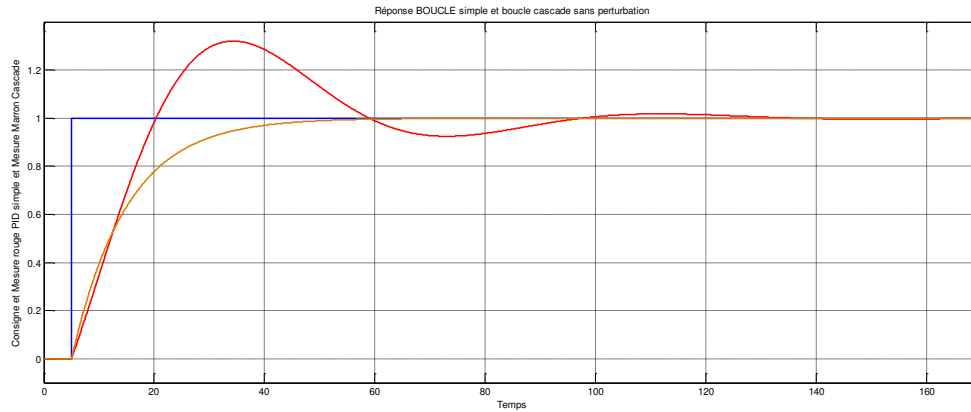
Le schéma de simulation pour la comparaison des deux types de commande PID simple et la régulation PID cascade



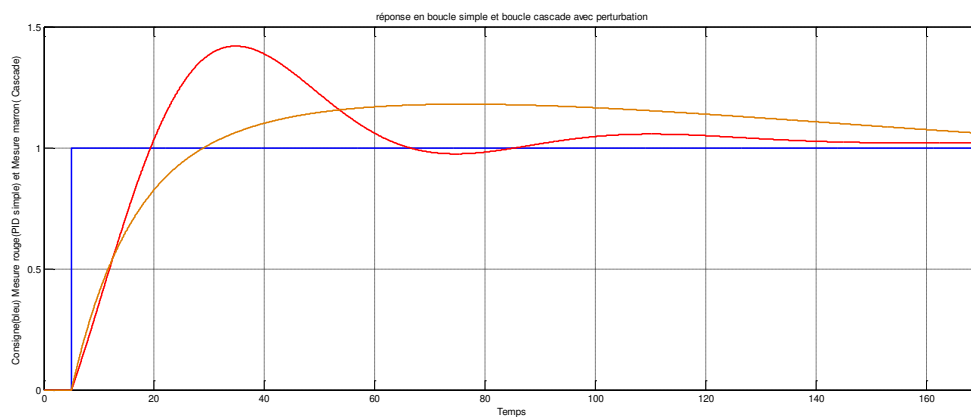
**Fig. 5.1 : Le schéma de simulation pour PID simple et la régulation PID cascade**

Nous voyons nettement la différence entre la régulation avec PID simple et la régulation avec PID cascade sur le temps de réponse et le dépassement.

La courbe rouge représente la réponse en boucle fermée PID simple et la courbe marron représente la réponse de la boucle fermée en mode régulation PID cascade .nous voyons nettement la différence.



**Fig. 5.2 : Réponses de la sortie du procédé pour la régulation PID simple et la régulation PID cascade sans perturbation**



**Fig. 5.3 : Réponses de la sortie du procédé pour la régulation PID simple et la régulation PID cascade avec perturbation**

Nous voyons l'influence de la perturbation ( ici débit Q1) sur le système , le dépassement de la boucle simple a augmenté jusqu'à environ 40% , de même pour la boucle cascade il y a aussi un dépassement d'environ 20% alors qu'il n'y avait pas sans perturbation.

**Conclusion**



---

## Conclusion:

Dans ce travail, nous avons fait une étude de deux types de régulation : la régulation PID simple et la régulation PID cascade et faire une comparaison entre les deux.

La régulation PID est assez satisfaisante dans la plupart des cas de procédé industrielle mais il faut faire une bonne étude du procédé pour pouvoir trouver correctement les paramètres du régulateur qui nous donnerait de bonnes performances (précision, rapidité et stabilité)

Nous avons appliqué la méthode de BODE pour synthétiser le correcteur PID de la boucle simple.

Pour la régulation cascade, nous avons calculer le correcteur secondaire de la boucle interne en imposant une dynamique de 1er ordre. de même, nous avons calculer le correcteur primaire de la boucle externe en imposant aussi une dynamique de 1er ordre.

La simulation à été faite par le Logiciel de MATLAB.

---

## Bibliographie

1. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme des études universitaires appliquées (DEUA)-Thème : la régulation simple et la régulation cascade –présenté par : Mr. CHERIFI Ahmed et Mr. DJAMEL Brahim encadré par Mr. HAMIDA Abdallah (promotion 2005/2006) Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle – université d'Oran.
2. Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Automatique - Thème : Etude comparative de quatre types de commande PID simple, cascade, Split-Range et feedforward (Appliquée à un système de deux capacités)- présenté par :Mr. NAAS LARABA Khaled et Mr. KHERAICHI Ahmed encadré par Mr. HAMIDA Abdallah ( promotion 2011/2012 ) Département d'Automatique , Université USTO ORAN.
3. Tsp5-0b crs 2 contrôle & régulation /T-SPCL Lycée Borde Basse (CARACTERISTIQUE D'UN SYSTEME DE REGULATION)
4. Wikipedia [https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur\\_PID](https://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gulateur_PID)
5. Pr I Zambettakis (LA REGULATION P.I.D)
6. Université Paris-sud XI-ENS de Cachan 2005 - ''commande des processus''
7. IMECS Journal, Hong Kong 2012-''IMC-Baced PID controllers Design for Two-Mass System''
8. Régulation automatique , Belkacem Ould Bouamama et réalisation des pages par Olivier Scrive. decembre 2005.