

11/621.817

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des sciences et de la Technologie  
Département d'Electronique et Télécommunications



**Mémoire de fin d'étude**  
**Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : **Sciences et Techniques**  
Filière : **Electronique**  
Spécialité : **Systemes Electroniques**



---

---

***Réglage Optimal des Paramètres du Régulateur PID***

---

---

Présenté par :

**ZAOUIA Abdessamed**

Sous la direction de :

**Dr. BOUDJEHEM Djalil**

Mai 2014



14/3064



## Remerciements

Liage à dieu, qui nous a aidés durant nos études, et qui nous a facilité la réalisation de ce modeste travail

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Boudjehem Djalil**, Docteur à l'université 08 mai 1945 Guelma, Directeur de laboratoire de contrôle avancé. Pour avoir encadré et dirigé mes recherches. Je le remercie pour m'avoir soutenu et appuyé tout au long de ma thèse. Ses précieux conseils, son exigence et ses commentaires ont permis d'améliorer grandement la qualité de mes travaux et de ce mémoire. Sincèrement, grâce à lui, j'ai pu apprendre beaucoup de choses dont certaines fort utiles pour mes travaux académiques bien sûr, mais aussi des choses importantes pour mon développement personnel. Je n'oublie pas enfin son aide précieuse dans la relecture et la correction de ma thèse.

Merci à Tolbi Bilal, Doctorant à l'université 08 mai 1945 Guelma, son aide et ses conseils m'ont chaque fois permis de rebondir dans les moments difficiles. Je le remercie vivement pour l'aide scientifique précieuse et tous les conseils qu'il a pu me fournir pendant la durée de cette thèse.

Je tiens également à remercier Boulegue hecen , le chef du notre département de électronique et Télécommunications, pour son soutien et ses conseils mais surtout pour ses qualités humaines, et aussi pour avoir accepté de rapporter mon travail et pour leurs remarques constructives. Je remercie aussi Younssi, Boulssina, Menaciria. Pour avoir accepté de participer à mon jury de thèse.

Aussi je remercie tous mes professeurs et tous mes enseignants, pour avoir contribué à mon instruction.

A tous mes amis un grand merci, Merci à Naili Yakoub, Khezene Abderrahmenne, Bouchmela Mohamed. Et a tous les amis qui m'ont soutenu de proche ou de loin.

A vous mes parents, je dis un grand merci. Je vous suis infiniment reconnaissant pour votre soutien et vos encouragements.

Je remercie également ma sœur, qui m'a encouragé et soutenu moralement.

Enfin et surtout, je remercie ma fiancée pour ses encouragements et son soutien. Elle a toujours été disponible et compréhensive. Je la remercie aussi pour son écoute et surtout son amour qui m'a été essentiel durant ces dernières années.

---

# TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION</b>	
<b>GENERAL</b>	.....(01)

<b>CHAPITRE 01</b>	<b>Régulateur P.I.D</b>
1.1	Objectif de la régulation automatique.....(04)
1.2	Définition de la régulation automatique.....(04)
1.3	Principe de régulation.....(04)
1.4	Asservissement et régulation.....(05)
1.5	Régulation en boucle ouverte.....(06)
1.6	Régulation en boucle fermée.....(06)
1.7	Régulation industriel.....(06)
1.7.1	Principe de régulation (à base de régulateur PID).....(07)
1.7.2	Schéma fonctionnel d'un PID.....(08)
1.7.3	Description des régulateur PID.....(08)
1.7.4	Régulateur PID.....(08)
1.7.5	Les caractéristiques du régulateur PID.....(10)
1.7.6	La structure de régulateur PID.....(11)
1.7.7	Les actions de régulateur PID.....(13)
1.8	Conclusion.....(16)

<b>CHAPITRE 02</b>	<b>L'utilisation de Régulateur P.I.D</b>
2.1	Introduction.....(18)
2.2	Problématique.....(18)
2.3	Choix du type de régulateur.....(18)
2.4	Choix d'une méthode de réglage.....(19)
2.4.1	Les Critères de réglage.....(19)
2.4.2	Simplicité de mise en œuvre.....(20)
2.4.3	Réglage de régulateur.....(21)
2.5	Les différents méthodes de réglage d'un PID.....(24)
2.5.1	Calcul des coefficients.....(24)
2.5.2	Les méthodes de réglage.....(28)

# TABLE DES MATIERES

2.5.3	Réglage par défaut.....	(29)
2.5.4	Méthodes de réglage moderne.....	(30)
2.5.4.1	Les Algorithmes d'optimisation.....	(30)
2.5.4.2	Les Algorithmes génétiques.....	(31)
1.	Intérêt des algorithmes génétiques.....	(32)
2.	Applications.....	(32)
3.	Principe de fonctionnement.....	(32)
4.	Les avantages.....	(34)
2.6	Conclusion.....	(36)

## CHAPITRE 03

### Etude des techniques de réglage PID optimisé

3.1	Présentation de problème.....	(38)
3.1.1	Le système étudié.....	(38)
3.1.2	Les systèmes désirés.....	(40)
1.	Système désiré (01) 2 <sup>ème</sup> ordre.....	(40)
2.	Système désiré (02) 3 <sup>ème</sup> order.....	(41)
3.1.3	Régulateur PID.....	(42)
3.1.4	La comparaison entre les systèmes.....	(43)
3.1.5	Le problème.....	(44)
3.1.6	La résolution de problème.....	(44)
3.2	Etude de résolution de problème.....	(45)
3.2.1	Le système désiré (01) .....	(46)
3.2.2	Le système désiré (02) .....	(51)
3.3	Conclusion.....	(55)

## CONCLUSION

### GENERAL

.....	(56)
-------	------

## BIBLIOGRAPHIE

.....	(58)
-------	------

## Table des figures

<i>1.1 : Principe de Régulation.....</i>	<i>(05)</i>
<i>1.2 : Réponse d'un procédé régulé à un échelon de perturbation.....</i>	<i>(06)</i>
<i>1.3 : Exemples des régulateurs.....</i>	<i>(07)</i>
<i>1.4 : Principe de régulation (à base de régulateur PID) .....</i>	<i>(07)</i>
<i>1.5 : présentation d'un schéma fonctionnel d'un régulateur .....</i>	<i>(08)</i>
<i>1.6 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID.....</i>	<i>(09)</i>
<i>1.7 : Schéma fonctionnel de Procédé commandé par régulateur PID.....</i>	<i>(09)</i>
<i>1.8 : Les réponses des chaque effets.....</i>	<i>(11)</i>
<i>1.9.1 : Schéma d'un régulateur PID en Parallèle.....</i>	<i>(12)</i>
<i>1.9.2 : Schéma d'un régulateur PID Mixte.....</i>	<i>(12)</i>
<i>1.9.3 : Schéma d'un régulateur PID Série.....</i>	<i>(13)</i>
<i>1.10 : Intégrale d'un échelon.....</i>	<i>(14)</i>
<i>1.11 : La réponse de l'action dérivée.....</i>	<i>(15)</i>
<i>2.1 : La réponse type d'un procédé stable.....</i>	<i>(22)</i>
<i>2.2 : Résultat des oscillations.....</i>	<i>(25)</i>
<i>2.3 : Réponse en boucle ouverte du procédé à un échelon de commande Du. ....</i>	<i>(26)</i>
<i>2.4 : Réponse en boucle ouverte du procédé à un échelon de commande .....</i>	<i>(27)</i>
<i>2.5 : Organigramme d'un AG Standard.....</i>	<i>(35)</i>
<i>3.1 : Système étudié.....</i>	<i>(38)</i>
<i>3.2 : la réponse indicielle de système.....</i>	<i>(39)</i>
<i>3.3 : Schéma Fonctionnel de système.....</i>	<i>(40)</i>
<i>3.4 : la réponse indicielle de système désiré(01) .....</i>	<i>(40)</i>
<i>3.5 : Schéma Fonctionnel de système désiré(01) .....</i>	<i>(41)</i>
<i>3.6 : la réponse indicielle de système désiré(02) .....</i>	<i>(41)</i>
<i>3.7 : Schéma Fonctionnel de système désiré(02) .....</i>	<i>(42)</i>
<i>3.8 : Schéma fonctionnel de type Parallèle(PID) .....</i>	<i>(42)</i>
<i>3.9 : Schéma fonctionnel présenté La comparaison entre les systèmes.....</i>	<i>(43)</i>

# TABLE DES MATIERES

<b>3.10</b> : Comparaison de réponses indicielles.....	(43)
<b>3.11</b> : Schéma fonctionnel que présente le problème.....	(44)
<b>3.12</b> : Schéma fonctionnel de réglage optimal d'un paramètre PID.....	(44)
<b>3.13</b> : Comparaison des réponses indicielles (avec $f_{min}$ ) [Système désiré (1)] .....	(47)
<b>3.14</b> : Comparaison des réponses indicielles (avec $patternsearch$ ) [Système désiré (1)] ..	(48)
<b>3.15</b> : Comparaison des réponses indicielles (avec $f_{minunc}$ ) [Système désiré (1)] .....	(49)
<b>3.16</b> : Comparaison des réponses indicielles (avec $f_{mincon}$ ) [Système désiré (1)] .....	(50)
<b>3.17</b> : Comparaison des réponses indicielles (avec $f_{min}$ ) [Système désiré (2)] .....	(52)
<b>3.18</b> : Comparaison des réponses indicielles (avec $patternsearch$ ) [Système désiré (2)] ..	(53)
<b>3.19</b> : Comparaison des réponses indicielles (avec $f_{minunc}$ ) [Système désiré (2)] .....	(54)
<b>3.20</b> : Comparaison des réponses indicielles (avec $f_{mincon}$ ) [Système désiré (2)] .....	(55)

## Liste des Tableaux

<b>2.1</b> : récapitulant l'influence d'un PID série sur le système qu'il corrige si l'on augmente séparément l'action proportionnelle (P), intégrale (I) ou dérivée (D) .....	(22)
<b>2.2</b> : Tableau pour le calcul des paramètres PID. Réglage Ziegler-Nichols en boucle fermée.....	(25)
<b>2.3</b> : Tableau pour le calcul des paramètres PID. Réglage Ziegler-Nichols en boucle ouverte. ....	(27)



La régulation est au cœur de toutes nos actions : conduire sa voiture, régler la température de sa douche le matin, réaliser une recette de cuisine...

La régulation (ou asservissement) consiste à agir de façon à ce que une mesure soit égale à une consigne. Si l'on cherche à atteindre une consigne (de position ou de température), on parlera de poursuite ou asservissement ; si l'on cherche à éliminer des perturbations pour qu'une valeur reste constante (ex : garder la température intérieure de la voiture constante quelle que soit la température extérieure), on parlera de régulation. L'industrie utilise à foison des systèmes d'asservissement ou de régulation : que ce soit pour gérer le débit d'un fluide dans une conduite, la température d'un produit, la hauteur d'un niveau de cuve...

Historiquement, les régulateurs n'étaient pas intégrés dans l'unité centrale des Automates Programmables Industriels, mais se présentaient sous forme de modules autonomes gérant leur environnement propre (acquisition, calcul, commande...).

De plus en plus, les automates intègrent les régulateurs au sein de l'unité centrale. Soit sous la forme de module autonome émulant un régulateur externe au sein de l'UC (évitant ainsi la redondance de câblage qu'imposait l'utilisation de régulateur externe), soit sous la forme de blocs primitifs intégrables au sein du code au même titre qu'un bloc temporisateur.

Les régulateurs permettent ainsi de lier plus simplement les parties séquentielle et continue du procédé. La régulation fait partie intégrante de la qualité de production : c'est donc un point non négligeable de la chaîne de valeurs d'une installation.

Les régulateurs **PID** répondent à plus du 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine pétrolière, par exemple, se compte par milliers. Malheureusement, 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.

Suite au développement sans cesse croissant de l'informatique, les méthodes d'optimisation connaissent de nos jours un essor considérable.

D'autre part, les contrôleurs de type 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.

Leurs recherches avaient deux objectifs principaux :

- mettre en évidence et expliquer les processus d'adaptation des systèmes naturels,
- concevoir des systèmes artificiels qui possèdent les propriétés importantes de régulateur **PID**.

Aujourd'hui, tous les systèmes susceptibles d'être décrits par un modèle mathématique sont optimisés. La qualité des résultats et des prédictions dépend de la pertinence du modèle, de l'efficacité de l'algorithme et des moyens pour le traitement numérique.

Notre mémoire a pour but d'exploiter l'efficacité des algorithmes d'optimisation dans réglage les Paramètres de régulateur **PID**.

Afin d'aboutir aux objectifs de ce travail notre mémoire sera structuré en trois chapitres comme suit :

**Le premier chapitre** englobe de régulateur **PID**, leur présentation générale, principe fondamental de fonctionnement.

**Dans deuxième chapitre** on a montré comment peut-on Utilisé le régulateur **PID**, et nous avons parlé sur les différents de Méthodes de réglage et basé sur les méthodes de réglage moderne.

**Dans le troisième chapitre** on a montré comment étudié le Système, et peut-on introduire les algorithmes d'optimisation en réglage optimal des paramètres **PID**, ainsi que les simulations numériques. On a testé notre programme d'algorithme génétique sur plusieurs fonctions test.

On terminera par une conclusion, mettant en relief l'efficacité des algorithmes d'optimisation (Algorithme génétiques) dans réglage optimal des paramètres **PID** pour Obteniez le système désiré.

---

***Chapitre 01 :***

***Régulateur P.I.D***

---

## **1- Régulateur P.I.D :**

### **1.1- Objectif de la régulation automatique :**

L'objectif d'une régulation ou d'un asservissement automatique d'un procédé est de le maintenir le plus près possible de son optimum de fonctionnement, prédéfini par un cahier des charges (conditions ou performances imposées). Les aspects de sécurité du personnel et des installations sont à prendre en compte comme ceux concernant l'énergie et le respect de l'environnement. Le cahier des charges définit des critères qualitatifs à imposer qui sont traduits le plus souvent par des critères quantitatifs, comme par exemple, de stabilité, de précision, de rapidité ou de lois d'évolution [1].

### **1.2- Définition de la régulation automatique :**

La régulation automatique regroupe l'ensemble des moyens matériels et techniques mis en œuvre pour maintenir automatiquement ( pas d'intervention manuelle) une grandeur physico-chimique parmi les grandeurs de sortie du procédé (grandeur réglée), égale à une valeur désirée appelée consigne, quelles que soient les entrées du procédé non commandables ou perturbations. Lorsque des perturbations ou un changement de consigne se produisent, la régulation automatique provoque une action correctrice sur une autre grandeur physique, parmi les grandeurs d'entrée du procédé (grandeur réglant), afin de ramener la grandeur réglée vers sa consigne initiale (cas de perturbations) ou vers sa nouvelle consigne (cas de changement de consigne c'est à dire changement de point de fonctionnement) [1].

### **1.3- Principe de régulation :**

Le contrôle de procédé met en œuvre une chaîne d'outils à plusieurs niveaux. Schématiquement, le lien entre le capteur et l'actionneur peut se représenter comme ci-dessus. Le but étant de maîtriser le procédé et, soit de le piloter, soit de l'empêcher d'évoluer en raison de perturbations.

Les éléments de la chaîne Le système se décompose en trois zones : mesurage, algorithme, commande [1].

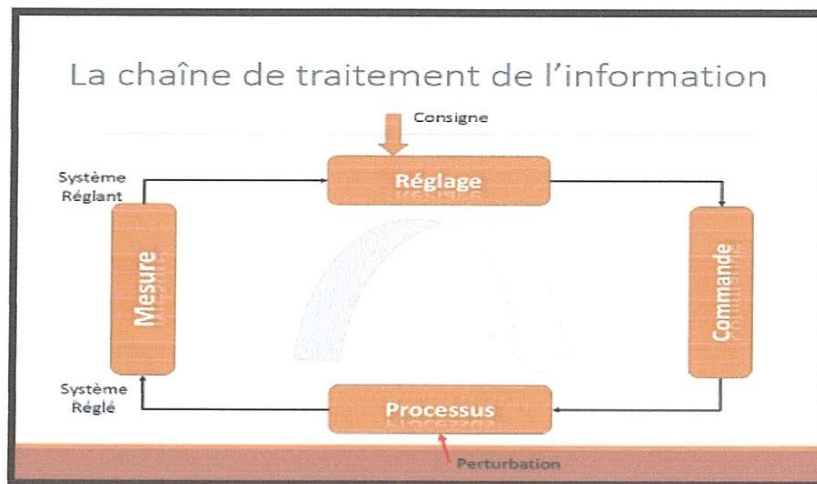


Figure 1.1 : Principe de Régulation

- La mesure englobe le capteur, l'acquisition par l'automate et le traitement de la mesure.
- L'algorithme correspond à la partie calcul de la commande, en respectant les consignes.
- La commande représente l'écriture sur la carte de sortie ainsi que l'actionneur.

## 1.4- Asservissement et régulation :

### 1.4.1- Asservissement :

Dans l'asservissement ou poursuite, la consigne  $C$ , traduisant l'objectif désiré du procédé, n'est pas constante et les grandeurs perturbatrices n'existent pas ou sont très peu influentes sur la grandeur réglée ou à maîtriser[2].

### 1.4.2- Régulation :

Dans ce cas la consigne  $C$ , traduisant l'objectif désiré du procédé, est constante et les grandeurs perturbatrices influencent fortement la grandeur réglée ou à maîtriser,  $y(t)$  (Figure 1.2)[2].

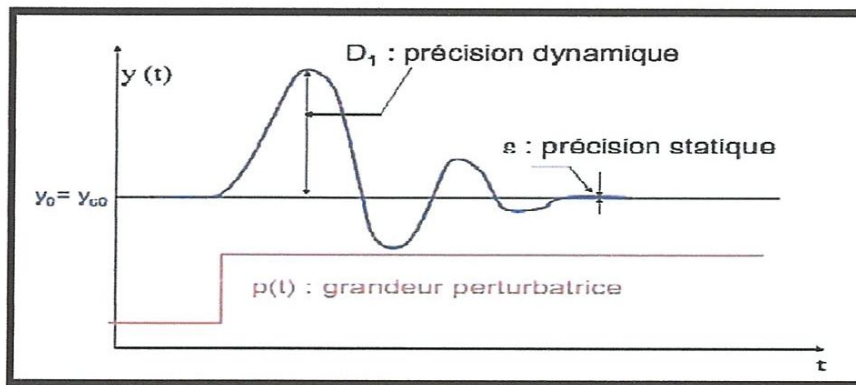


Figure 1.2 : Réponse d'un procédé régulé à un échelon de perturbation

### 1.5- Régulation en boucle ouverte :

Pour une variation manuelle d'amplitude finie de la commande  $u$ , on a une variation de la grandeur à maîtriser ou à réguler.

La régulation en boucle ouverte ne peut être mise en œuvre que si l'on connaît la loi régissant le fonctionnement du processus (autrement dit, il faut connaître la corrélation entre la valeur mesurée et la grandeur réglant).

### 1.6- Régulation en boucle fermée :

La grandeur réglant exerce une influence sur la grandeur réglée, pour la maintenir dans des limites définies malgré les perturbations.

### 1.7- Régulateur industriel :

Le régulateur industriel est un appareil qui a pour rôle essentiel de contrôler le procédé, c'est-à-dire de garantir les comportements dynamique et statique du procédé conformes au cahier des charges défini.

Ceci est réalisé par réglage et adaptation des paramètres de sa fonction de transfert au procédé à contrôler.

Les régulateurs **PID** répondent à plus du **90%** des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine pétrolière, par exemple, se compte par milliers. Malheureusement, 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[3].



Figure 1.3 : Exemples des régulateurs

### 1.7.1- Principe de régulation (à base de régulateur PID) :

- ❖ L'adjonction d'un régulateur (figure 1.4), a pour but d'améliorer les performances globales (stabilisation, linéarité,...) et plus particulièrement[3] :
- ✓ Obtenir une mesure qui recopie « au mieux » la consigne : c'est le comportement en asservissement, on dit aussi en poursuite.
- ✓ Diminuer l'influence de la perturbation : c'est le comportement en régulation.

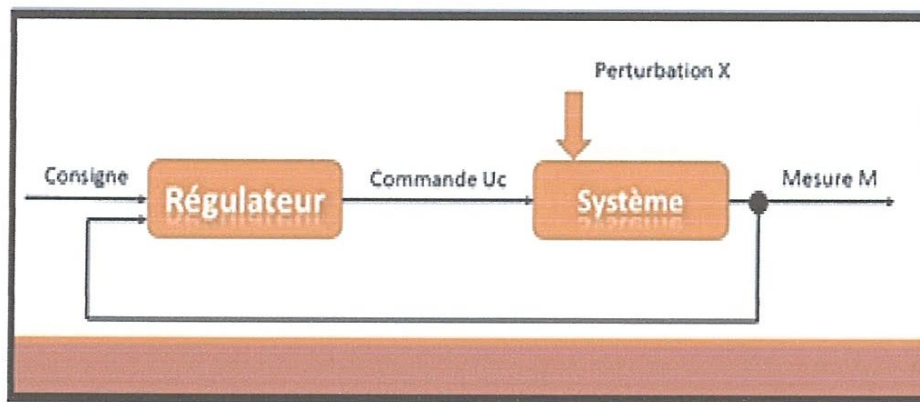


Figure 1.4 : Principe de régulation (à base de régulateur PID)

- ❖ Un correcteur est un algorithme de calcul qui délivre un signal de commande à partir de la différence entre la consigne et la mesure[3].

Le correcteur **PID** agit de trois manières :

- ✓ Action **Proportionnelle** : l'erreur est multipliée par un gain  $k_P$ .
- ✓ Action **Intégrale** : l'erreur est intégrée et divisée par un gain  $T_I$ .
- ✓ Action **Dérivée** : l'erreur est dérivée et multipliée par un gain  $T_D$ .

### 1.7.2- Schéma fonctionnel d'un régulateur :

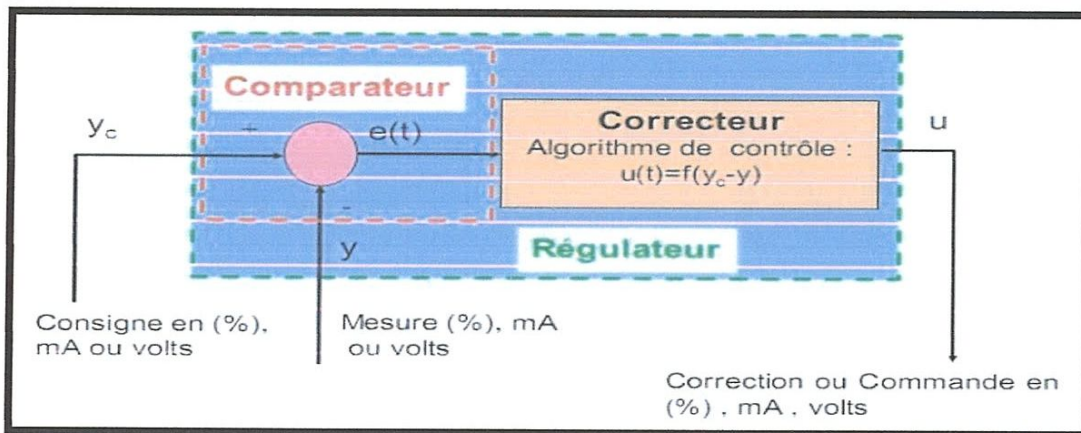


Figure 1.5 : présentation d'un schéma fonctionnel d'un régulateur

### 1.7.3- Description des régulateurs PID :

Un régulateur **PID** remplit essentiellement trois fonctions :

1. Il fournit un signal de commande  $u(t)$  en tenant compte de l'évolution du signal de sortie  $y(t)$  par rapport à la consigne  $w(t)$ .
2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

### 1.7.4- Régulateur PID :

Le régulateur **PID** relie directement le signal de commande  $u(t)$  au signal d'écart  $e(t)$ . Sa description temporelle est la suivante :

Cette combinaison des termes **P**, **I** et **D** est aussi désignée sous le nom de forme parallèle ou non-interactive. Le schéma fonctionnel d'un processus réglé à l'aide d'un tel régulateur est donné à la



figure 1.6. En plus des signaux définis plus haut, on y trouve la perturbation  $v(t)$ , le bruit de mesure  $n(t)$  et le signal de sortie non bruité  $x(t)$ [4].

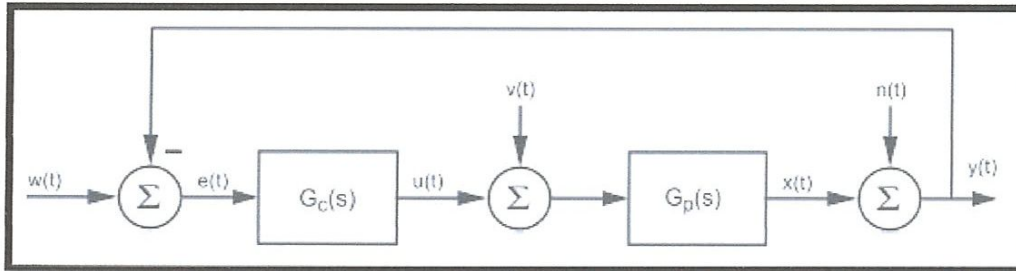


Figure 1.6 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID

Notions intrinsèques :

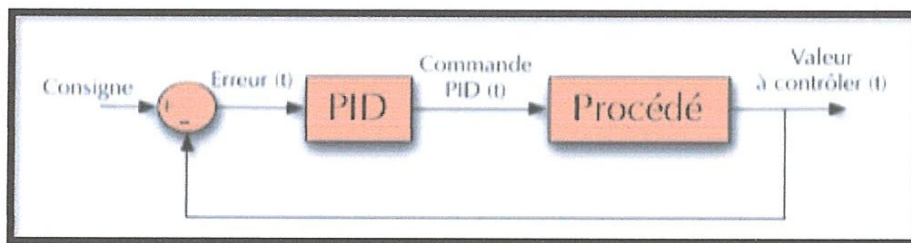


Figure 1.7 : Schéma fonctionnel de Procédé commandé par régulateur PID

$\left\{ \begin{array}{l} k \text{ le gain proportionnel} \\ T_i \text{ est le temps intégral – une constante de temps} \\ T_d \text{ est le temps dérivé – une constante de temps} \end{array} \right.$

$$u(t) = k \cdot \left[ \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) du + T_d \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] \quad (1.1)$$

On peut interpréter la commande **PID** comme l'addition de trois commandes intermédiaires :

- **Une commande proportionnelle :**

La commande proportionnelle est proportionnelle à la valeur actuelle de l'erreur[5].

- **Une commande dérivée :**

La commande dérivée est proportionnelle au taux de variation de l'erreur et en ce sens prend en considération le "futur" de l'erreur[5].

- **Une commande intégrale :**

La commande intégrale est proportionnelle à la somme des erreurs passées[5].

On comprend que cette action impose nécessairement une erreur permanente nulle sous peine de diverger.

### 1.7.5- Les caractéristiques du régulateur PID :

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur **PID** (proportionnel intégral dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse, ...) d'un processus modélisé par un deuxième ordre. Nombreux sont les systèmes physiques qui, même en étant complexes, ont un comportement voisin de celui d'un deuxième ordre. Par conséquent, le régulateur **PID** est bien adapté à la plupart des processus de type industriel et est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres du procédé[6].

Si la dynamique dominante du système est supérieure à un deuxième ordre, ou si le système contient un retard important ou plusieurs modes oscillants, le régulateur **PID** n'est plus adéquat et un régulateur plus complexe (avec plus de paramètres) doit être utilisé, au dépend de la sensibilité aux variations des paramètres du procédé[6].

#### ✓ Le régulateur proportionnel :

- En statique, l'augmentation du gain proportionnel diminue l'erreur.
- En dynamique, l'augmentation du gain proportionnel augmente la rapidité au détriment de la stabilité (En fréquence, la même phrase donne : augmente la bande passante en diminuant la marge de phase).

#### ✓ Le régulateur Proportionnel-Intégral :

- En statique, il élimine l'erreur finale vis à vis des entrées de consignes et de perturbations.
- En dynamique, aux hautes fréquences pour  $\omega \gg 1/T_i$ , l'effet intégral n'est pas significatif. En régime transitoire, le comportement est identique à celui du régulateur proportionnel seul.

#### ✓ Le régulateur Proportionnel-Intégral-Dérivé :

- En statique, Comportement identique à celui observé avec le régulateur **PI**.

- En dynamique, toute chose égale par ailleurs, l'effet dérivé (correctement dimensionné) améliore la stabilité par apport de phase. Concrètement, la boucle oscille ou dépasse moins. Cette amélioration permet d'augmenter la rapidité par une action proportionnelle accrue.

[1] PI.

[2] L'effet dérivé stabilise la boucle.

[3] Trop d'effet dérivé dégrade les performances.

[4] L'effet dérivé permet d'accélérer la boucle par accroissement du gain proportionnel.

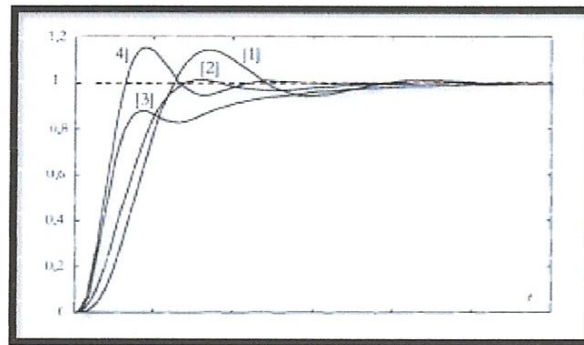


Figure 1.8 : Les réponses des chaque effets

### 1.7.6- La structure de Régulateur PID :

Il existe trois types d'algorithme **PID**, le **PID** série, le **PID** parallèle et le **PID** mixte.

$P = k.R$  : est l'action proportionnelle, sur la plupart des régulateurs, on règle la Bande Proportionnelle au lieu de régler le gain du régulateur :

- $I = \frac{1}{T_i}$  (min-1 en général) : est l'action intégrale.
- $D = T_D$  (S en général) : est l'action dérivée.

### PID parallèle :

C'est la commande que l'on envoie à l'actionneur lorsque toutes les grandeurs physiques sont à leur valeur Nominale.

En particulier  $y - y_c$  sont les grandeurs perturbantes à leurs valeurs normales. C'est **la Commande Nominale**.

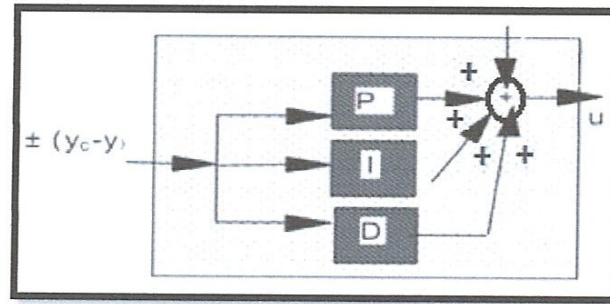


Figure 1.9.1 : Schéma d'un régulateur PID en Parallèle

La loi de commande s'écrit :

$$u = u_0 \pm \left\{ k_R \cdot (y_c - y) + \frac{1}{T_i} \int (y_c - y) \cdot dt + T_d \frac{d(y_c - y)}{dt} \right\}$$

$$e(t) = (y_c - y) \rightarrow E(t) = Y_c(t) - y(t)$$

$$U(t) = u - u_0$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_R + \frac{1}{T_i S} + T_d S \quad (1.2)$$

### PID Mixte :

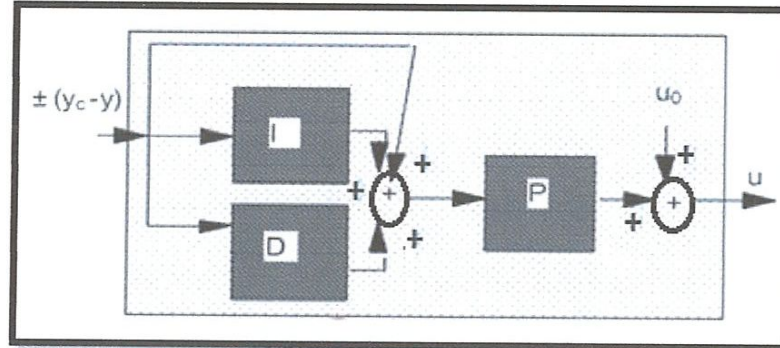


Figure 1.9.2 : Schéma d'un régulateur PID Mixte

La loi de commande s'écrit :

$$u = u_0 \pm \left\{ k_R \cdot (y_c - y) + \frac{K_R}{T_i} \int (y_c - y) \cdot dt + K_R \cdot T_d \frac{d(y_c - y)}{dt} \right\}$$

$$e(t) = (y_c - y) \rightarrow E(t) = Y_c(t) - y(t)$$

$$U(t) = u - u_0$$

$$FT: \frac{U(s)}{E(s)} = K_R \left( 1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (1.3)$$

**PID Série :**

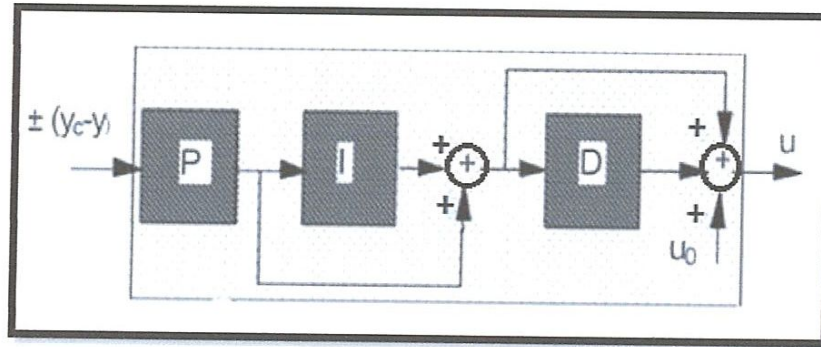


Figure 1.9.3 : Schéma d'un régulateur PID Série

La loi de commande s'écrit :

$$u = u_0 \pm \left\{ k_R \cdot \frac{T_i + T_d}{T_i} \cdot (y_c - y) + \frac{K_R}{T_i} \int (y_c - y) \cdot dt + K_R \cdot T_d \frac{d(y_c - y)}{dt} \right\}$$

$$e(t) = (y_c - y) \rightarrow E(t) = Y_c(t) - y(t)$$

$$U(t) = u - u_0$$

$$FT: \frac{U(s)}{E(s)} = K_R \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) (1 + T_d s) \quad (1.4)$$

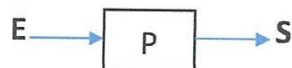
**1.7.7- Les Actions :**

✓ Un régulateur **PID** est obtenu par l'association de ces trois actions de base :

**1.7.7.1- Action Proportionnelle :**

Elle s'exprime par le gain **G** ou la bande proportionnelle **B<sub>p</sub>** (en %) :  $S = G \cdot E = \frac{100}{B_p} \cdot E \quad (1.5)$

Symbolisation :



La bande proportionnelle donne la variation qu'il faut en entrée (en %) pour obtenir une variation ΔS de 100%.

L'action proportionnelle est instantanée, mais souvent insuffisante pour annuler l'écart  $E$  entre consigne et mesure. Pour des gains trop importants, on peut faire osciller la boucle.

### 1.7.7.2- Action Intégrale :

$$S(t) = \frac{1}{T_I} \int_0^t E(t) dt \quad (1.6) \quad \text{Symbolisation : } E \longrightarrow \boxed{I} \longrightarrow S$$

En notation de Laplace :  $S(p) = \frac{1}{T_I \cdot p} E(p) \quad (1.7)$

L'action intégrale est caractérisé par :

$T_I$  (En s) ou  $k_I = 1 / T_I$  (en répétitions/s).

$T_I$  Temps d'intégration, peut être défini sur une réponse indicielle, par le temps au bout duquel la variation de la sortie  $\Delta S$  est égale à l'échelon appliqué (Figure 1.10).

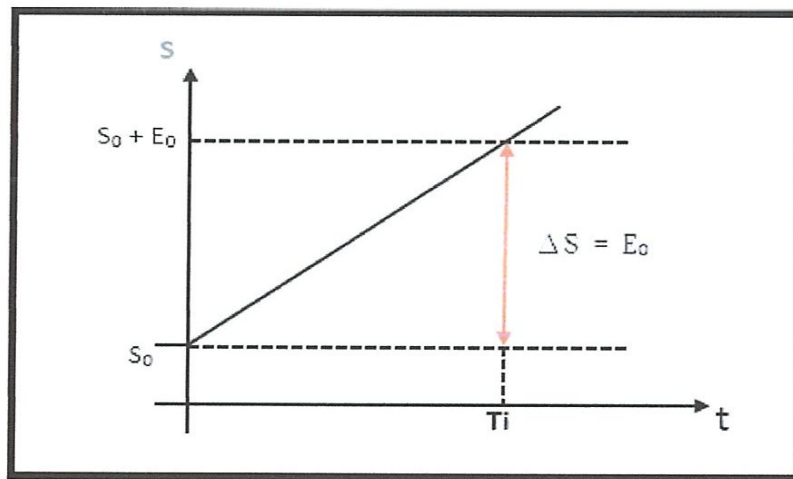


Figure 1.10 : Intégrale d'un échelon

L'action intégrale est d'autant plus rapide ou énergique que  $T_I$  est petit. Son rôle est d'annuler l'écart entre mesure et consigne en régime établi, c'est pourquoi elle est toujours appliquée sur l'écart. Elle a un effet déstabilisant.

A noter que la suppression de l'intégrale doit se traduire par  $T_I = \infty$ . En pratique on choisit une très grande valeur ; mais parfois dans certains logiciels, il faut paramétrer  $T_I = 0$  pour supprimer l'intégrale.

### 1.9- Conclusion :

Le **PID** représente les abréviations des trois actions qu'il utilise pour effectuer ses corrections, ce sont des ajouts d'un signal à un autre. Tous agissent sur la quantité régulée. Les actions aboutissent finalement à des soustractions de l'erreur de mesure, par ce que le signal proportionnel est habituellement négatif.

Les méthodes expérimentales permettent d'avoir de bonnes estimations génériques pour un système raisonnable simple (c'est-à-dire réglable par un **PID** !).

Cependant il faut très souvent procéder à un réglage fin des coefficients jusqu'à obtenir un système respectant le cahier des charges, pour cela utilise les règles suivants :

- ❖ Si  $K_p$  augmente alors la montée sera plus rapide mais il-y-aura plus de dépassement.
- ❖ Si  $K_I$  augmente alors la montée sera plus rapide et l'erreur statique sera plus long à atteindre.
- ❖ Si  $K_D$  augmente alors le dépassement diminuera et le temps d'établissement du régime stationnaire aussi, mais la sensibilité au bruit augmentera.

---



---

***Chapitre 02 :***

***L'Utilisation de Régulateur P.I.D***

---

## **2- L'Utilisation de régulateur PID**

### **2.1- Introduction :**

Le contrôle par régulateur **PID** (Proportionnelle, Intégral, Dérivée) est une méthode de régulation souvent employée pour les asservissements, vous ne savez pas ce qu'est une régulation ? Et bien, c'est un système, capable d'atteindre et de maintenir une consigne grâce aux mesures qu'il effectue[7].

Imaginez-vous, par exemple, dans une voiture sur l'autoroute. Vous souhaitez rouler à 120Km/h sans avoir à appuyer sur l'accélérateur, la commande de vitesse de croisière de voiture devra par elle-même maintenir cette vitesse. A l'approche d'une pente le système « s'aperçoit » que pour une même puissance au niveau du moteur. Il n'atteint plus la consigne 120Km/h et rajoutera un petit coup de « boost », qui mais de combien ? Et combien de temps faudra-t-il au système pour se stabiliser autour de la consigne ?

C'est tout le problème de contrôle par **PID** est un moyen de la résoudre !

Le régulateur **PID** est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie l'idée de cet organe de contrôle est modifier intentionnellement, la valeur de l'erreur qui subsiste entre la consigne et la mesure effectuée[7].

### **2.2- Problématique :**

Les problèmes de choix : choix d'un type de régulateur, choix d'une méthode de réglage, et donne quelques éléments sur les utilisations possibles du **PID** dans des configurations de boucles moins standard[7].

### **2.3- choix du type régulateur :**

Le chapitre 01 donne les 12 structures « standard » du **PID**. (Voir figure 1.4). Cela ne veut pas dire que l'on puisse trouver ces 12 types chez n'importe quel fabricant ; loin de là[7].

En pratique aujourd'hui, seuls quelques types sont utilisés. Le **PID** mixte est sans doute le plus répandu. Le régulateur parallèle l'est beaucoup moins. Les régulateurs avec gain et dérivée sur la mesure sont rares, du moins en version monobloc. La question du choix d'un type à

priori est donc encore prématurée, d'autant plus qu'il existe des types « non standard » tel que le *PID*.

La structure avec gain sur la mesure semble la moins utilisée : aucune méthode n'y fait référence ; peut-être parce que ce type donne 2 zéros à la *F.T.B.F.* Comme une structure avec actions sur l'écart si bien que sa spécificité n'est peut-être pas très différent.

La question du choix ne se pose d'ailleurs pas a priori, mais en fonction de la finalité de l'utilisation :

- En poursuite une dérivée sur la mesure est préférable pour limiter le dépassement,
- Si l'on veut obtenir un réglage de compromis (type placement de pôles), la dérivée et le gain sur la mesure sont recommandés,
- S'il s'agit au contraire de régler une boucle simple en régulation sur procédé stable, un *P.I.D* mixte avec actions sur l'écart conviendra.

Quant au choix entre parallèle, mixte et série, il semble que le régulateur série est plus universel et permet des réglages spécifique impossibles avec les autres types (Méthode de compensation)[7].

#### 2.4- Choix d'une méthode de réglage :

La question du choix d'une méthode est souvent posée. Y-a-t' il des bonnes méthodes ? La réponse est simple : La bonne méthode est qui adaptée au problème posé. Etre capable de poser le problème avec toutes ses contraintes est déjà une étape fondamentale [7].

##### 2.4.1- Les Critères de réglage :

Ils peuvent être exprimés de multiples façons :

- Critères de stabilité :

Ils conduisent plutôt à des réglages de compromis entre poursuite et régulation ; exemple Dindeleux[8], Kessler[9], Naslin[10].

- Critères de réponse indicielle :

Temps de réponse, rapport *D1/D2*, Dépassement, en poursuite ou en régulation ; ils concernent un large éventail des méthodes.

- Choix régulation ou poursuite :

Les réglages ne sont pas forcément compatibles entre eux : un bon réglage en poursuite conduit souvent à une régulation médiocre. Inversement une régulation rapide et efficace peut donner des dépassements importants en poursuite, c'est le cas de la méthode de Ziegler et Nichols ; les méthodes qui cumulent les 2 avantages sont plus rares : Placement de pôles mais au prix d'une structure peu répandue (**P & D sur M**), et d'un minimum de calculs.

- Critères d'optimisation (I.A.E, I.T.A.E) :

Ils ne sont pas forcément compatibles avec un dépassement imposé[7].

✓ Integral of Absolute value of Error  $I.A.E = \int_0^{\infty} |\varepsilon(t)| dt$

✓ Integral of Time Error  $I.T.A.E = \int_0^{\infty} t |\varepsilon(t)| dt$

- Choix de la réponse : C'est le cas des méthodes de synthèse directe, placement de pôles ou méthodes numérique, elles supposent une bonne connaissance de procédé pour estimer ce qu'il est raisonnable de viser comme objectif de performances.

### 2.4.2- Simplicité de mise en œuvre :

La méthode du gain critique de Ziegler et Nichols[11] est problèmes la plus connue, parce que simple à mettre en œuvre, directement en ligne, sans identification préalable, encore faut-il que le système puisse osciller, donc ordre  $\geq 2$ , ou avec retard.

En revanche les méthodes numériques demandent un minimum de calculs. Ces méthodes ne peuvent se développer que si elles sont dotées d'un minimum d'outils de choix, de calculs et de simulation : ils doivent donc être intégrés dans le régulateur pour simplifier le réglage, ou disponibles comme outils de développement et de réglage pour paramétrer les régulateurs.

Ces questions sont plus ou moins résolues dans les **S.N.C.C**, mais restant entières dans les régulateurs monoblocs ou blocs fonction dans les **A.P.I**.

### 2.4.3- Réglage du régulateur :

Le réglage d'un **PID** consiste à déterminer les coefficients  $k_p$ ,  $T_D$ , et  $T_I$ , afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être **robuste**, **rapide** et **précis**. Il faut pour cela :

- Dans le cas d'un fonctionnement en mode de régulation (consigne fixe) choisir des réglages permettant à la grandeur réglée de retourner dans un temps raisonnable à sa valeur de consigne,
- Dans le cas de fonctionnement de la boucle en mode d'asservissement (consigne variable), choisir des réglages permettant de limiter le ou les éventuels **dépassements** (*overshoot*) de la grandeur réglée.
- La robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Par exemple, les fonctions de transfert de certains procédés peuvent varier en fonction de la température ambiante ou de l'hygrométrie ambiante relativement à la loi de Pascal. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter à des usages non prévus/testés (dérive de production, vieillissement mécanique, environnements extrêmes...).
- La rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime stationnaire.
- Le critère de précision est basé sur l'erreur statique (ou de statisme).

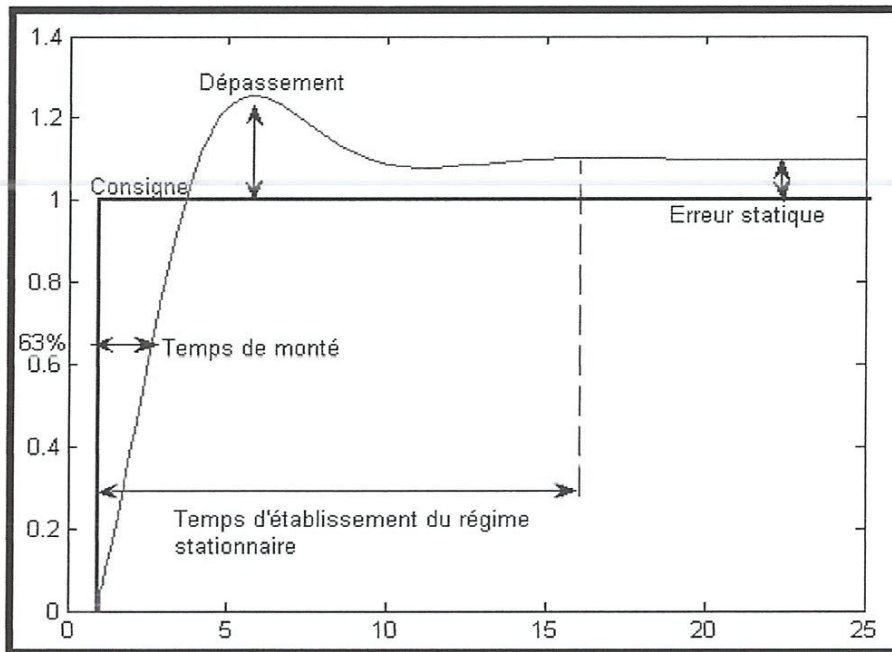


Figure 2.1 : La réponse type d'un procédé stable

Dans le cas des systèmes simples, les paramètres du **PID** influencent la réponse du système de la manière suivante :

	Précision	Stabilité	Rapidité
P			
I			
D			

Tableau 2.1 : récapitulant l'influence d'un PID série sur le système qu'il corrige si l'on augmente séparément l'action proportionnelle (P), intégrale (I) ou dérivée (D).

- $k_p$  : Lorsque  $k_p$  augmente, le temps de montée (*rise time*) est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement varie peu et l'erreur statique se trouve améliorée.

- $T_I$  : Lorsque  $\frac{1}{T_I}$  augmente, le temps de montée est plus court mais il y a un dépassement plus important. Le temps d'établissement au régime stationnaire s'allonge mais dans ce cas on assure une erreur statique nulle. Donc plus ce paramètre est élevé, plus la réponse du système est ralentie.
- $T_D$  : Lorsque  $T_d$  augmente, le temps de montée change peu mais le dépassement diminue. Le temps d'établissement au régime stationnaire est meilleur. Pas d'influences sur l'erreur statique. Si ce paramètre est trop élevé dans un premier temps il stabilise le système en le ralentissant trop mais dans un deuxième temps le régulateur anticipe trop et un système à temps mort élevé devient rapidement instable.

Pour ces trois paramètres, le réglage au-delà d'un seuil trop élevé a pour effet d'engendrer une oscillation du système de plus en plus importante menant à l'instabilité.

Elle est réputée apporter une solution pour la quasi-totalité des besoins standards de régulation de grandeurs de processus (température, niveau, débit, pression, vitesse....).

Il existe de - trop ? - nombreuses méthodes de réglages de **PID** - mais aucune panacée malheureusement !

**Pourquoi n'existe-il pas une méthode de réglage universelle des PID ?**

- Essentiellement parce que si il est facile de comprendre qu'un réglage est clairement mauvais, il souvent plus difficile d'affirmer qu'un réglage est optimal. Le caractère optimal d'un réglage est toujours relatif à un critère... et il y aura toujours un compromis à faire entre stabilité (c'est à dire amortissement de la boucle corrigée) et rapidité (c'est à dire temps de réponse).

- De plus, il existe de nombreuses variantes de régulateurs **PID**, à la fois dans leur structure (**PID** série, mixte, parallèle) mais aussi dans leurs implémentations (anti-saturation intégrale, filtre, dérivation sur la mesure, algorithmes de calcul...). Il n'est pas toujours aisé de connaître la nature exacte du régulateur **PID** mis en œuvre effectivement.

## **2.5- Les différentes Méthodes de réglages d'un régulateur PID :**

### **2.5.1 - Calcul des coefficients :**

Nous allons désormais voir comment trouver les valeurs à attribuer aux trois coefficients ( $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$ ) de Régulation **PID**.

Il existe deux façons de procéder, l'une par la modélisation, l'autre par l'expérimentation, Sachant que souvent l'on complète à travers la deuxième.

Modéliser le système consiste à déterminer par le calcul son comportement et de la déduire des valeurs plausibles pour les coefficients. L'approche pas l'expérimentation signifie que l'on va utiliser une réponse réelle du système pour régler d'abord grossièrement puis finement les coefficients.

#### **2.5.1.1 - Approche par la modélisation :**

Le choix de procéder à la modélisation du système ou non est dicté par les contraintes inhérentes au système, souvent la complexité des systèmes réels place la modélisation hors d'atteinte, mais dans certains cas, en chimie ou en mécanique par exemple, les règles qui régissent le système sont suffisamment simples pour que l'on puisse tenter de modéliser le système. D'autre part, il se peut que dans les cas où le système est particulièrement critique ou difficile d'accès (processus industriel lourd, système qui ne peut être mis hors service). Il soit indispensable de modéliser le système afin d'avoir un jeu de coefficients suffisamment précis pour obtenir d'emblée un régulateur **PID** qui soit fonctionnel.

#### **2.5.1.2 - Approche expérimentale :**

Nous présentons ici deux approches possibles pour la détermination des coefficients par expérimentation : une méthode avec l'utilisation de régulateur **PID** et l'autre qui n'utilise pas. Nous indiquons aussi les avantages et inconvénients de ces deux méthodes.

L'existence de la deuxième méthode est justifiée par le fait que dans certains régulateurs matériels, les valeurs des coefficients ne sont pas modifiables, c'est le cas si par exemple le régulateur est un circuit électronique et que les coefficients sont déterminés par les composants (résistors, condensateurs....).



**a) Approche de Ziegler-Nichols pour les systèmes en boucle fermée :**

On réalise un essai de pompage. Pour cela, on fait  $T_I = \infty$  ;  $T_D = 0$  et on augmente  $K_P$  jusqu'à sa valeur critique  $K_{RC}$ , qui a amené le système en limite de stabilité (Figure 2.14). On mesure la période des oscillations. Ziegler et Nichols[11] proposent alors les valeurs de réglage du tableau suivant (Table 2.2)[6] :

	P	PI	PI Parallèle	PID Parallèle	PID Série	PID Mixte
$K_P$	$\frac{K_{RC}}{2}$	$\frac{K_{RC}}{2.222}$	$\frac{K_{RC}}{2.222}$	$\frac{K_{RC}}{1.7}$	$\frac{K_{RC}}{3.3}$	$\frac{K_{RC}}{1.7}$
$T_I$	-	$\frac{T_{osc}}{1.2}$	$\frac{2 \cdot T_{osc}}{K_{RC}}$	$\frac{0.85 \cdot T_{osc}}{K_{RC}}$	$\frac{T_{osc}}{4}$	$\frac{T_{osc}}{2}$
$T_D$	-	-	-	$\frac{K_{RC} \cdot T_{osc}}{13.3}$	$\frac{T_{osc}}{4}$	$\frac{T_{osc}}{8}$

Tableau 2.2 : Tableau pour le calcul des paramètres PID. Réglage Ziegler-Nichols en boucle fermée.

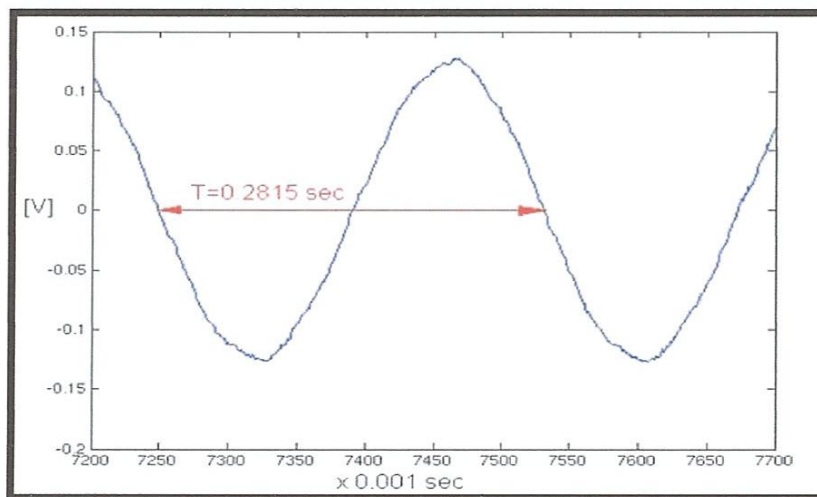


Figure 2.2 : Résultat des oscillations

**Avantage :**

- La méthode est facile à mettre en œuvre physiquement et au point de vue calcul.
- Elle peut être appliquée à un système déjà en production et permet une adaptation automatisée du régulateur pour s'adapter à l'évolution des paramètres intérieurs (usure) et extérieurs (environnement) au système.

**Inconvénients :**

- Le système peut devenir instable on passe dans des états dangereux (par exemple, pour les systèmes chimiques).
- La méthode peut nécessiter beaucoup de temps si le système réagit très lentement (jours, semaine dans le cas de certaines réactions chimiques).

Heureusement de nombreux systèmes ont des temps caractéristique faibles (systèmes électronique ou mécanique).

**b)- Méthode de réaction du Processus pour les systèmes en boucle ouverte :**

On dispose de la réponse  $Y(t)$  (variation de la sortie) suite à un échelon d'entrée  $U(t)=u_0$ , avec un point d'inflexion.

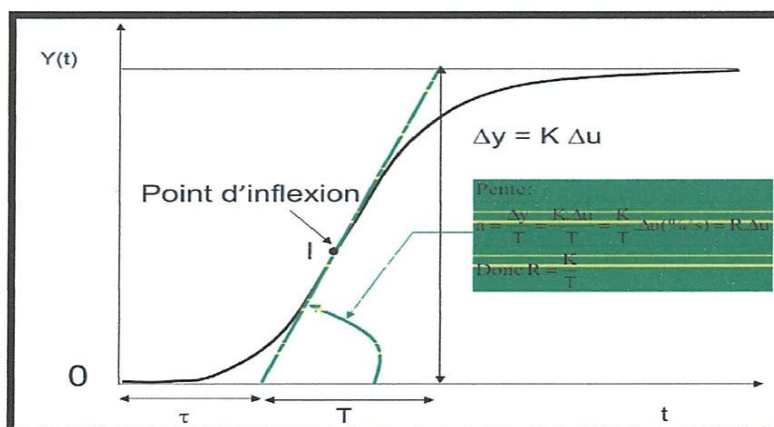


Figure 2.3 : Réponse en boucle ouverte du procédé à un échelon de commande  $Du$ .

Les valeurs des paramètres **PID** à régler sont données sur le tableau ci-dessous (Table 1.3). Le **PID** proposé est un **PID** mixte.

Ce réglage permet d'obtenir une réponse en *boucle fermée* satisfaisante caractérisé par un rapport entre deux dépassements (positifs) et successifs de 0.25.

Type de régulateur	Gain $K_p$	$T_I$	$T_D$
P	$\frac{0.9}{R \cdot \tau}$	-	-
PI	$\frac{1.27}{R \cdot \tau}$	$3.3 \tau$	-
PID	$\frac{1.27}{R \cdot \tau}$	$2 \tau$	$0.5 \tau$

Tableau 2.3 : Tableau pour le calcul des paramètres PID. Réglage Ziegler-Nichols en boucle ouverte

Cette approche est aussi valable pour un processus intégrateur. Le modèle recherché est de la forme

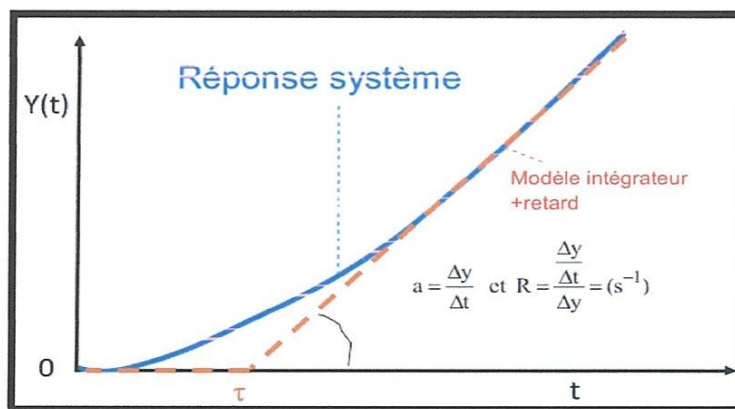


Figure 2.4 : Réponse en boucle ouverte du procédé à un échelon de commande

**Avantages :**

- Cette méthode ne nécessite pas d'avoir un système déjà asservi, ni de deviner une valeur pour  $K_p$ .

**Inconvénients :**

- Elle nécessite plus de matériel, enregistrement d'une courbe de réponse.
- Elle oblige à mettre le système « *offline* »
- Si la réponse montrée ci-dessus, cette méthode donne des valeurs qui peuvent ne pas convenir du tout (certains systèmes par exemple ne sont pas du tout réglables par des régulateurs *PID*).

**2.5.2- Les Méthodes de réglage :**

Le parcours des différentes méthodes montre que leur finalité est très liée au degré de précision ou de finesse du réglage désiré. Dans un but simplificateur mais sans doute aussi réducteur, on peut classer les méthodes en 4 groupes (méthodes de réglage rapide, méthodes intermédiaires, méthodes plus élaborées, méthodes générales utilisées pour le P.I.D)[7].

**2.5.2.1- Méthodes de réglage rapide :**

Ce sont celles qui utilisent des modèles simples, et qui permettent de dégrossir rapidement le réglage :

- Ziegler & Nichols[11].
- Cohen et coon[12].
- Takahashi[13].
- Dindeleux[8].
- P.I.D Flou[14].

**2.5.2.2- Méthodes intermédiaires :**

Les critères sont plus fins, les modèles plus nombreux, et supposent déjà une bonne connaissance du procédé :

- Compensation[15].
- Naslin industrielle[10].
- Optimisation[16].
- Chien Hrones et Reswick[17].
- Smal[18].
- Kessler[9].

**2.5.2.3- Méthodes plus élaborées :**

Elles permettent de choisir les performances désirées :

- Synthèse directe[19].
- Placement de pôles[20].
- Numérique[21].

**2.5.2.4- Méthodes générales utilisées pour le P.I.D :**

- Naslin[10].
- Fréquentielles[22].

**2.5.3- Réglage par défaut :**

L'examen de différentes méthodes montre de grands points communs pour les réglages des actions  $K_P$ ,  $T_I$ ,  $T_D$ .

Si l'on prend le modèle stable de **broiida**[24] ( $K$ ,  $T$ ,  $L$ ) les tendances de réglages peuvent s'exprimer ainsi[7] :

- $K_P$  est proportionnel à la réglabilité  $T/L$ .
- $T_I$  est proportionnel à la constante de temps  $T$  ;
- $T_D$  est proportionnel au retard pur  $L$ .

Les résultats sont équivalents pour les modèles du second ordre ou le retard devient constant de temps.

Dans le cas des systèmes instables les résultats sont analogues si l'on prend le modèle intégrateur et retard pur ( $T, L$ ), à l'exception de l'intégrale qui est proportionnelle au retard  $L$  et non au temps d'intégration  $T$ .

N'oublions pas qu'il vaut mieux démarrer les réglages avec des actions faibles :

- Gain faible,
- Action intégrale lente ( $T_I$  *grand*),
- Action dérivée faible ( $T_D$  *petit*).

#### **2.5.4- Méthodes de réglage moderne:**

Ces méthodes utilisent les algorithmes d'optimisation pour minimiser l'erreur entre le système désiré et le système à commander que ce soit dans le domaine fréquentielle ou temporelle pour vérifier les obligations du cahier de charge.

##### **2.5.4.1. Les Algorithmes d'optimisation :**

Un algorithme d'optimisation est une procédure mathématique qui permet d'obtenir les minima (ou maxima) d'une fonction réelle  $f$  (que l'on appelle fonction objective)

$$\min_{x \in \mathbb{R}} f(x)$$

Les problèmes d'optimisation peuvent être classés selon le type de contraintes :

- a) Optimisation sans contraintes.
- b) Optimisation avec contraintes d'égalité  $g(x) = 0 \quad i = 1, \dots, m_e$ .
- c) Optimisation avec contraintes d'égalité et d'inégalités  $g(x) \leq 0 \quad i = m_e + 1 \dots m$

Les algorithmes d'optimisation sont des processus itératifs qui génèrent une séquence de valeurs (vecteurs)  $x(n+1)$  à partir d'un point (vecteur) de départ  $X_0$ . Un algorithme est dit converger quand pour n'importe quel point de départ, la séquence arrive à la solution (maximum ou minimum).

Les algorithmes d'optimisation ont besoin (dans certains d'eux) des dérivées de premier ou de deuxième degré de la fonction, on peut utiliser la dérivation directe, ou son approximation[23]. Par exemple, la méthode de descente de gradient a besoin juste du premier dérivé ; la méthode de Newton[25] nécessite les deux premières dérivées de la fonction objective ; sans dérivée, on peut trouver les méthodes d'algorithme du simplexe, du recul simulé, les réseaux de neurone, algorithmes génétiques, recherche du tabou...

#### 2.5.4.2. Les algorithmes génétiques :

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes informatiques inspirés de la théorie darwinienne[26]. Cette théorie repose sur deux postulats simples :

-« dans chaque environnement, seuls les espèces les mieux adaptées perdurent au cours des temps, les autres étant condamnées à disparaître »

-« au sein de chaque espèce, le renouvellement des populations est essentiellement dû aux meilleurs individus de l'espèce »

Ce sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle, à savoir les croisements, les mutations, la sélection, . . . Etc.

Les algorithmes génétiques ont déjà une histoire relativement ancienne puisque les premiers travaux de John Holland[27] sur les systèmes adaptatifs remontent à 1962. Avant cette date quelques tentatives ont été faites pour modéliser les systèmes génétiques par des systèmes informatiques [28][29][30]. Cependant l'objectif fondamental de ces études était de comprendre quelques phénomènes biologiques.

John Holland[31] et ses étudiants dans l'université de Michigan étaient les premiers à reconnaître l'utilité des opérateurs génétiques dans les problèmes de l'adaptation artificielle. Mais c'était Bagley en 1967 qui a mentionné, en premier lieu, l'expression « algorithmes génétiques » et le premier à avoir présenté une application pratique de cette connaissance. Aujourd'hui, leurs champs d'application sont très vastes. Les raisons du grand nombre d'applications sont la simplicité et l'efficacité de ces algorithmes. Les algorithmes génétiques sont basés sur des mécanismes très *simples*, ils sont *robustes* car ils peuvent résoudre des problèmes fortement non-linéaires et discontinus, et *efficaces* car ils ne font évoluer pas une solution mais toute une population de solutions potentielles et donc ils bénéficient d'un parallélisme puissant.

### 1) Intérêt des algorithmes génétiques :

Contrairement à la recherche opérationnelle, l'algorithme génétique ne demande pas particulièrement de connaissance sur la manière dont le problème considéré doit être résolu. Il est seulement nécessaire de pouvoir évaluer la qualité de la solution. Dans le cas de la recherche de l'optimum des fonctions analytiques, on n'utilise ni dérivabilité ni continuité.

La mise en œuvre d'un algorithme génétique est simple, avec une programmation spécifique minimale au problème. En effet, plus le problème est complexe, plus l'algorithme génétique montre sa supériorité.

#### ❖ Terminologie :

- **Les chromosomes** : sont les éléments à partir desquels sont élaborées les solutions (*mutation et croisement génétiques*).
- **La population** : (*génération*) est l'ensemble des chromosomes (individu)
- **La reproduction** : est l'étape de recombinaison des chromosomes

### 2) Applications :

Les applications des AGs sont multiples : optimisation de fonctions numériques difficiles (discontinues...), traitement d'image (alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects...), optimisation d'emplois du temps, optimisation de conception, contrôle de systèmes industriels, apprentissage des réseaux de neurones, etc...

Les AG peuvent être utilisées pour contrôler un système évoluant dans le temps (chaîne de production, centrale nucléaire...) car la population peut s'adapter à des conditions changeantes. Ils peuvent aussi servir à déterminer la configuration d'énergie minimale d'une molécule.

Les AG sont également utilisées pour optimiser des réseaux (câbles, fibres optiques, mais aussi eau, gaz...), des antennes ... Ils peuvent être utilisés pour trouver les paramètres d'un modèle petit-signal à partir des mesures expérimentales.

### 3) Principe de fonctionnement d'un algorithme génétique :

Un algorithme génétique recherche le ou les extrema d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer Les cinq (05) éléments suivants :



a. **un principe de codage de l'élément de population** : cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Cette structure conditionne le succès des algorithmes génétiques.

b. **un mécanisme de génération de la population initiale** : ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures.

c. **une fonction d'adaptation** : celle-ci retourne une valeur appelée *fitness* ou fonction d'évaluation de l'adaptation de l'individu à son environnement.

d. **des opérateurs** : ils permettent de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace recherche. Ces opérateurs sont : la sélection qui permet de sélectionner les meilleurs individus pour passer à l'évolution, le croisement qui recompose les gènes d'individus existant dans la population, et la mutation qui garantit l'exploration de l'espace de recherche.

e. **des paramètres de dimensionnement du problème** : tels que la taille de la population, le nombre total de générations ou critère d'arrêt de l'algorithme, les probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation...etc.

Le principe général du fonctionnement d'un algorithme génétique repose sur les étapes suivantes :

1- Produire une population initiale d'individus aléatoires.

2- Exécuter itérativement les sous-étapes suivantes jusqu'à satisfaction du critère d'arrêt :

- assignez une valeur d'aptitude à chaque individu de la population en utilisant la fonction d'évaluation- créez une nouvelle population de chromosomes en appliquant les opérateurs génétiques. Ces opérations sont appliquées à des chromosomes choisis de la population avec une probabilité basée sur leurs aptitudes :

**(a)Reproduction** : reproduire un individu existant en le copiant dans la nouvelle population.

**(b)Croisement** : créer deux nouveaux individus à partir de deux individus existants par recombinaison génétique de leurs chromosomes par l'opération croisement (*crossover*).

(c) **Mutation** : créez un nouvel individu à partir d'un individu existant en subissant une mutation.

3- L'individu qui représente la meilleure adaptation de la fonction à optimiser est retourné comme étant le meilleur chromosome produit.

Chaque itération complète est appelée une génération. Une population est un groupe de candidats de solutions sur lequel on applique les opérations de reproduction, mutation, croisement. A chaque génération correspond une nouvelle population.

Le codage génère une population de solutions candidates en code binaire, décimal (réel) ou autres. Les techniques de codage ont une influence significative sur la convergence des algorithmes génétiques. En règle générale, le code binaire est utilisé dans les algorithmes génétiques. Cependant, pour des raisons de convergence de calcul et de temps de calcul, le code décimal peut être utilisé. Face aux problèmes les plus délicats et complexes, il est indispensable d'essayer de trouver des stratégies génétiques qui peuvent les régler de manière efficace.

Pour passer d'une génération  $t$  à la génération  $t+1$  les trois opérations suivantes sont répétées pour des éléments de la population  $t$ .

De génération en génération, la taille de population reste constante, lors d'une génération, la totalité d'une population peut être remplacée par ses descendants, l'algorithme génétique est alors dit "générationnel" (*generational*). Ou au contraire, un petit nombre d'individus, un ou deux, sont remplacés, on se trouve alors en présence d'un algorithme "stationnaire" (*steadystate*). Différents critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis :

- Le nombre de génération que l'on souhaite exécuter peut être fixé à priori.
- L'algorithme peut être arrêté lorsque la population n'évolue plus.

#### 4) Les avantages des algorithmes génétiques :

D'après le principe de fonctionnement des algorithmes génétiques, on peut identifier les avantages des algorithmes génétiques sur les méthodes classiques d'optimisation :

- Les algorithmes génétiques utilisent un codage des paramètres, et non les paramètres eux-mêmes.
- Les algorithmes génétiques utilisent une population de solutions à la place d'une seule solution (un espace de recherche plus vaste, limité par la taille de la population).

- Les algorithmes génétiques utilisent des règles de transitions probabiliste et non déterministe comme des outils pour guider l'exploration de l'espace de recherche.
- Les algorithmes génétiques n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée ou une autre connaissance auxiliaire (ils utilisent une information globale à partir de l'espace entier).

L'organigramme de la figure 2.5 donne une description générale d'un algorithme génétique standard.

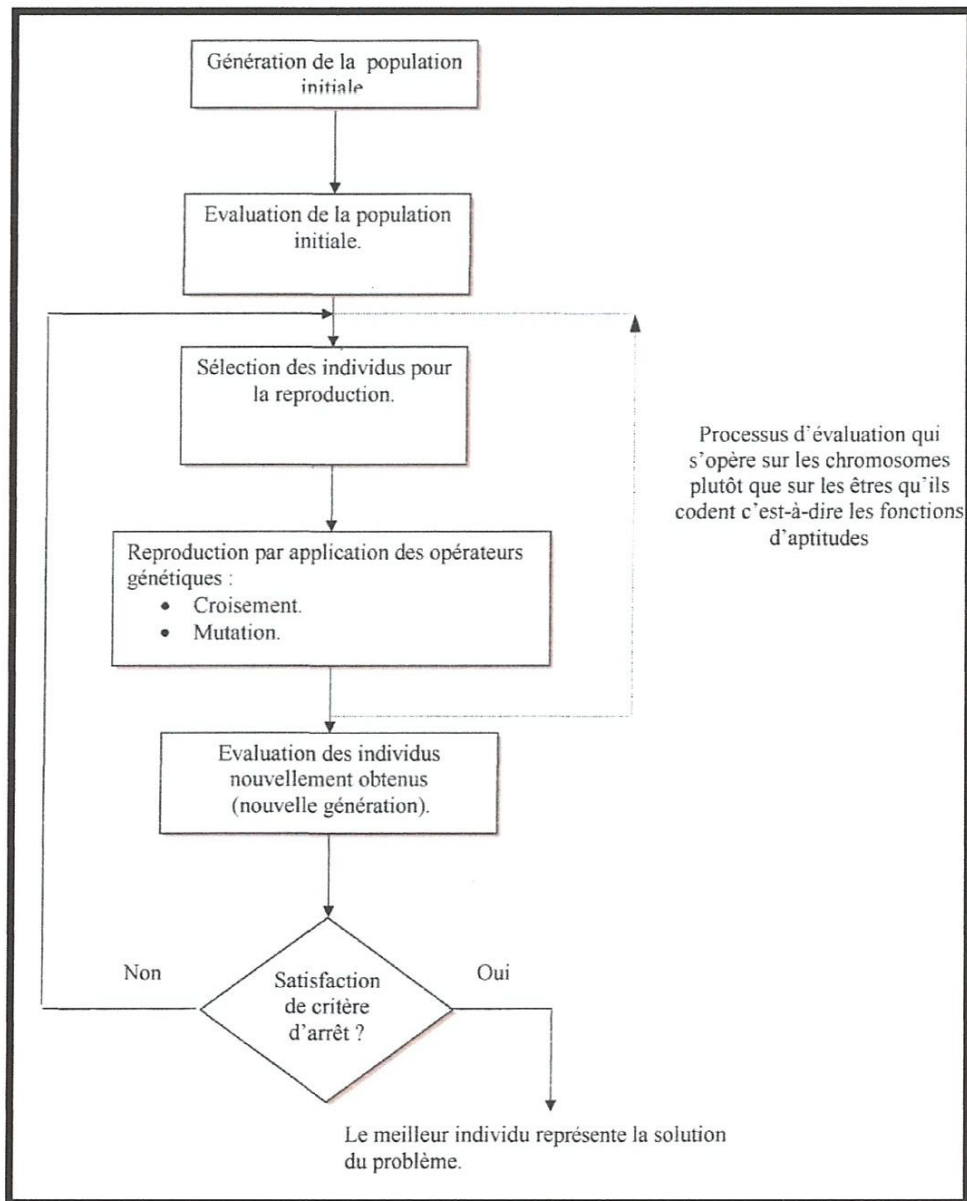


Figure 2.5 : Organigramme d'un AG Standard

### **2.6- Conclusion :**

Les régulateurs de type **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 paramètres du contrôleur étaient alors exprimés en termes de ces caractéristiques par des formules simples. Ces méthodes, bien que nécessitant peu d'information sur le système, comportent un inconvénient de taille.

L'utilisation de régulateurs **PID** conduit à un comportement dit robuste. Cela signifie que le comportement reste satisfaisant même si des erreurs sont faites sur le modèle du procédé, ou encore que le procédé évolue en cours de fonctionnement pour diverses raisons (non linéarités, vieillissement...).

Dans ce chapitre, nous avons présenté aussi une introduction rapide sur les algorithmes génétiques et leur manière d'optimiser un objectif.

---

***Chapitre 03 :***

***Etude des techniques de réglage P.I.D  
Optimisée***

---

### 3- Etude des techniques de réglage PID Optimisé :

#### 3.1- Présentation de problème :

##### 3.1.1- Le Système étudié :

- Le système que nous allons modéliser est représenté dans la figure 3.1. Il est composé d'un ressort  $K$ , d'un amortisseur  $b$  et d'une masse  $M$ . on applique une force  $F$  sur  $M$  et on mesure son déplacement  $X$ .
- La force  $F$  représente l'entrée du système donc  $E_1$  correspond à  $F$ .
- La tension de commande  $u$  du système peut être assimilée au ressort  $K$  et à l'amortisseur  $b$ .
- Le déplacement  $X$  est ce qu'on cherche à mesurer, c'est donc la sortie du système.  $S_1$  correspond à  $X$ .

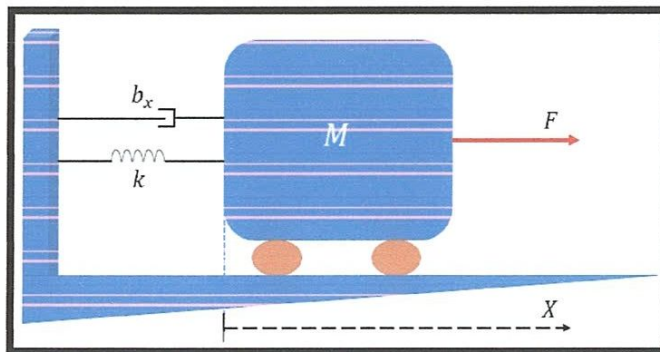


Figure 3.1 : Système étudié

- Ce système est caractérisé par l'équation :

$$F = M \cdot x'' + b \cdot x' + k \cdot x \quad (3.1)$$

- La transformée de Laplace de l'équation est :

$$F(p) = M \cdot p^2 \cdot X(p) + b \cdot p \cdot X(p) + k \cdot x(p) \quad (3.2)$$

- La fonction de transfert est : 
$$\frac{X(p)}{F(p)} = \frac{1}{M \cdot p^2 + b \cdot p + k} \quad (3.3)$$

- D'une manière générale, on écrit la fonction transfert d'un système de 2<sup>ème</sup> ordre de façon suivante :

$$H_{sys}(p) = \frac{k \cdot \omega_0^2}{p^2 + 2\xi \omega_0 \cdot p + \omega_0^2} \quad (3.4)$$

➤ A partir du système de données :

$$\begin{cases} k = 0.0501 \\ \xi = 1.1194 \\ \omega_0 = 4.4740 \end{cases}$$

### Etude de Système :

- Les valeurs des paramètres du système sont connues, donc La fonction de transfert est :

$$H_{sys}(p) = \frac{1}{p^2 + 10p + 20} \quad (3.5)$$

- la réponse indicielle du système est montrée dans la figure 3.2 suivante :

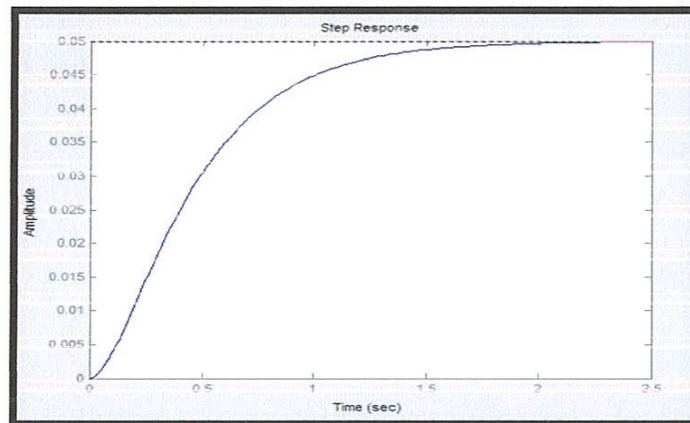


Figure 3.2 : la réponse indicielle de système

- Ce système montre les performances temporelles suivantes :
  - Temps de montée: **0.8844**
  - Temps de réponse: **1.5894**
  - Dépassement: **0**
  - Temps de Peak: **0.0500**

**Remarque :** D'après ces valeurs en remarque que le système possède d'une erreur statique très large et un temps de réponse un peu long.

- En utilisant le Simulink du Matlab, on a réalisé le modèle de notre système suivant :

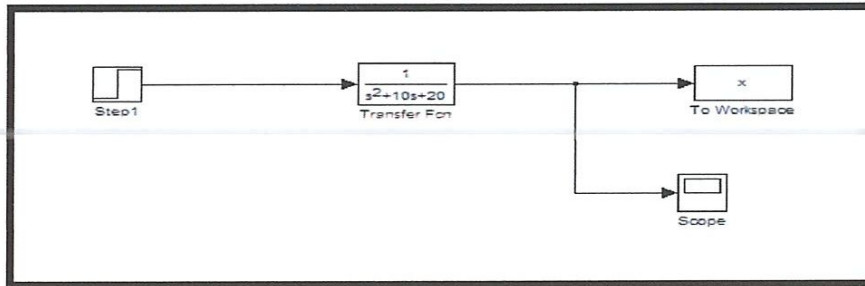


Figure 3.3 : Schéma Fonctionnel de système

- On impose à ce que la fonction de transfert en boucle fermée, soit d'ordre deux avec les spécifications suivantes :
  - Précision (erreur statique nul).
  - Dépassement indiciel inférieur à 5%.
  - Temps de réponse à 5% d'ordre de 0.6s.

### 3.1.2- Les Systèmes Désirés :

#### 1) Le Système désiré (01) 2<sup>ème</sup> Ordre :

- La fonction de transfert été connue comme ci-dessus :  $H_{desire(1)}(p) = \frac{25}{p^2+7p+25}$  (3.6)
- Pour définir notre système, en utilise l'logiciel de Matlab Source. Après l'exécution du Programme, on a tracé la réponse indicelle, montré dans la figure 3.4 suivante :

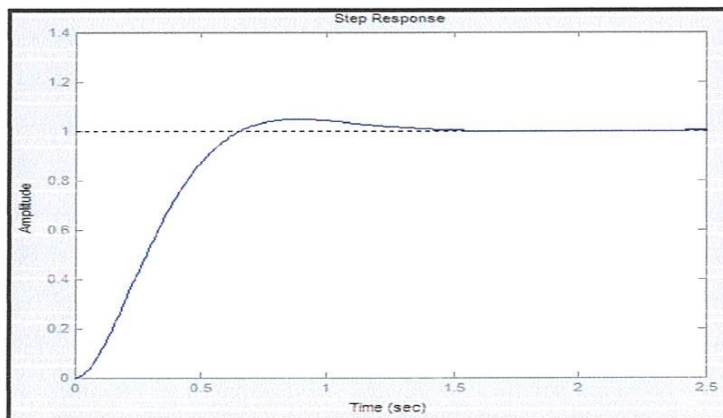


Figure 3.4 : la réponse indicelle de système désiré(01)



- Le système montre les performances temporelles suivantes :
  - Temps de monté: **0.4254**
  - Temps de réponse: **1.1958**
  - Dépassement: **4.5976**
  - Temps de Peak: **1.0460**
- En utilisant le Simulink du Matlab, on a réalisé le système désiré suivant :

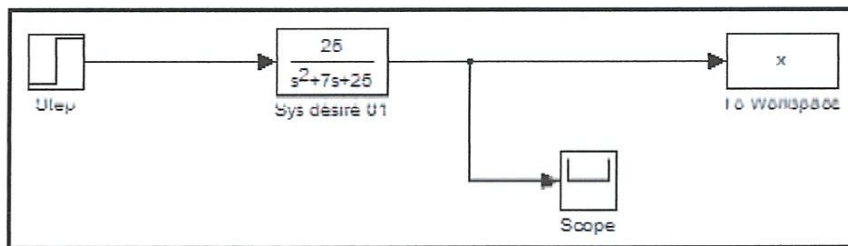


Figure 3.5: Schéma Fonctionnel de système désiré(01)

## 2) Le Système désiré (02) 3<sup>ème</sup> Ordre :

- La fonction de transfert en troisième ordre, été connue comme ci-dessus :

$$H_{desire(2)}(p) = \frac{50p^2+400p+350}{p^3+60p^2+400p+350} \quad (3.7)$$

- Pour définir notre système, en utilise l'logiciel de Matlab Source. Après l'exécution du Programme, on a tracé la réponse indicielle, donnée par la figure3.6 suivante :

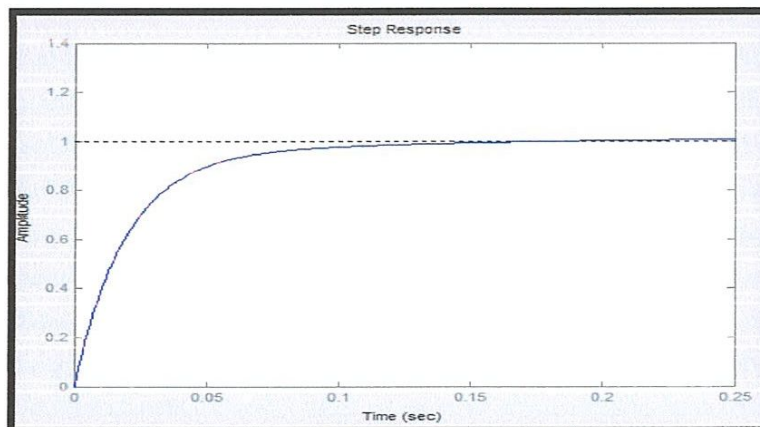


Figure 3.6 : la réponse indicielle de système désiré(02)

- Le système montre les performances temporelles suivantes :
  - Temps de monté : **0.0487**
  - Temps de réponse : **0.1061**
  - Dépassement : **0.6313**
  - Temps de Peak: **1.0063**

**Remarque 02 :** D'après ces valeurs en remarque que le système possède d'une erreur statique très faible et un temps de réponse un peu court.

- En utilisant le Simulink du Matlab, on a réalisé le système désiré suivant :

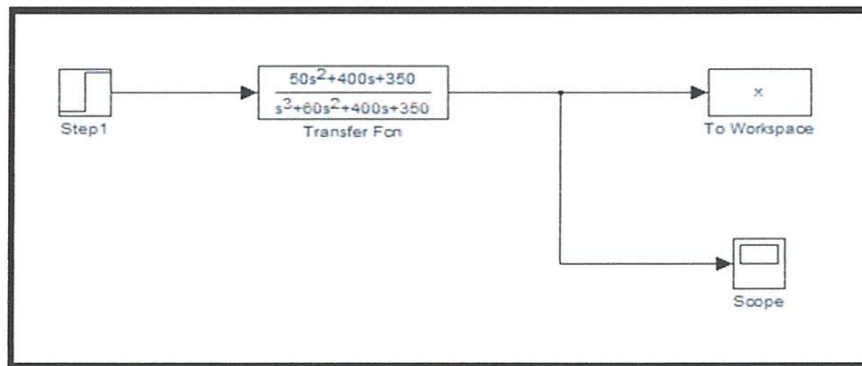


Figure 3.7: Schéma Fonctionnel de système désiré(02)

### 3.1.3- Régulateur PID :

- Choix de type de régulateur : **Parallèle.**
- Schéma fonctionnel :

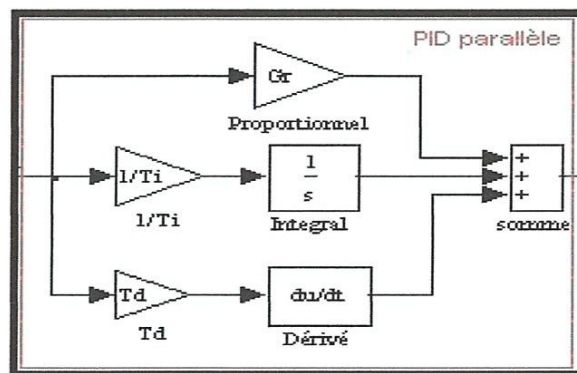


Figure 3.8 : Schéma fonctionnel de type Parallèle(PID)

➤ La fonction de transfert :  $C(p) = k_p + \frac{k_I}{p} + k_D \cdot p$  (3.8)

➤ Par ce que les paramètres régulateur PID, variable, on suppose :  $\begin{cases} k_p = x(1) \\ k_I = x(2) \\ k_D = x(3) \end{cases}$

**3.1.4- La comparaison entre Le Système réel et Les Systèmes Désirés :**

- En utilisant le Simulink de Matlab, on a réalisé la comparaison entre les systèmes désirés et Système réel comme suivant :

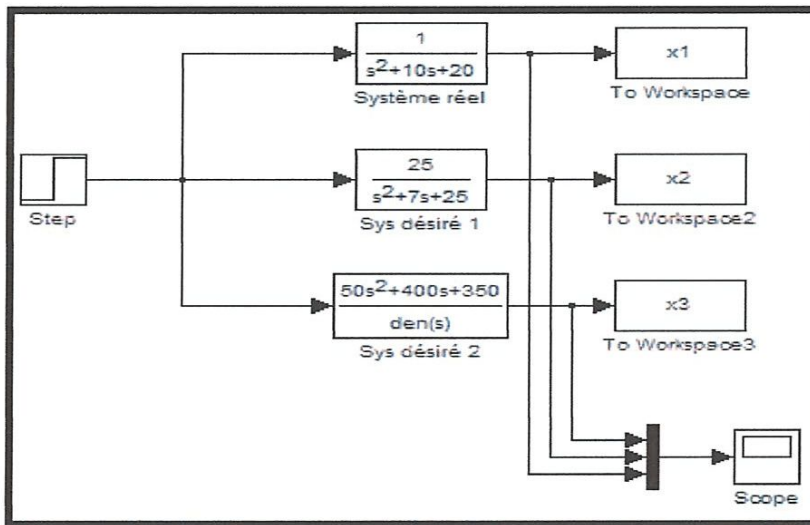


Figure 3.9 : Schéma fonctionnel présenté La comparaison entre les systèmes

La comparaison des réponses indicielles (Avec Simulink) :

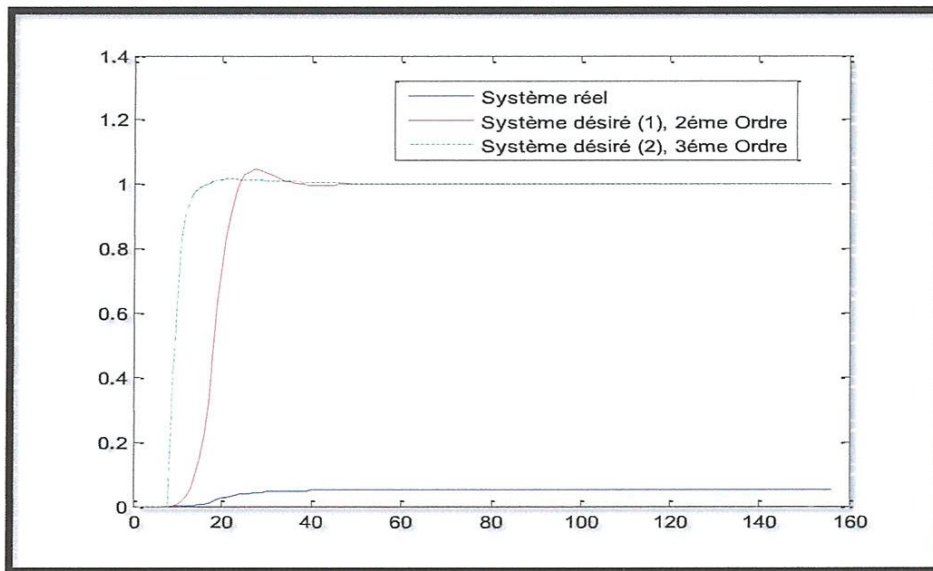


Figure 3.10 : Comparaison de réponses indicielles

### 3.1.5- Le Problème :

- Le problème à résoudre maintenant est présente dans le schéma ci-dessus :

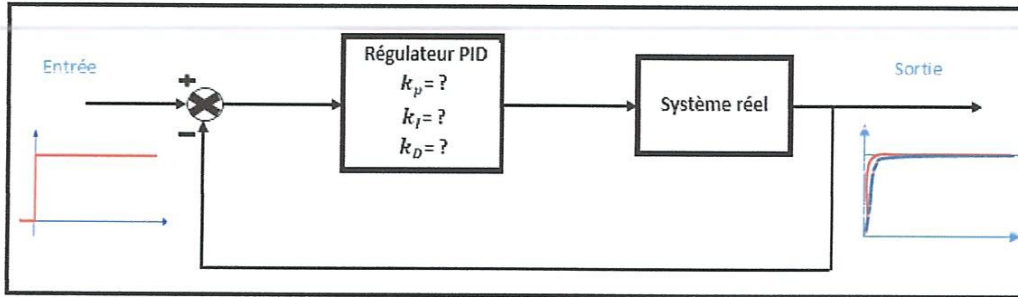


Figure 3.11 : Schéma fonctionnel que présente le problème

### 3.1.6- La résolution de Problème :

- Le Schéma ci-dessus, que présente La résolution de problème :

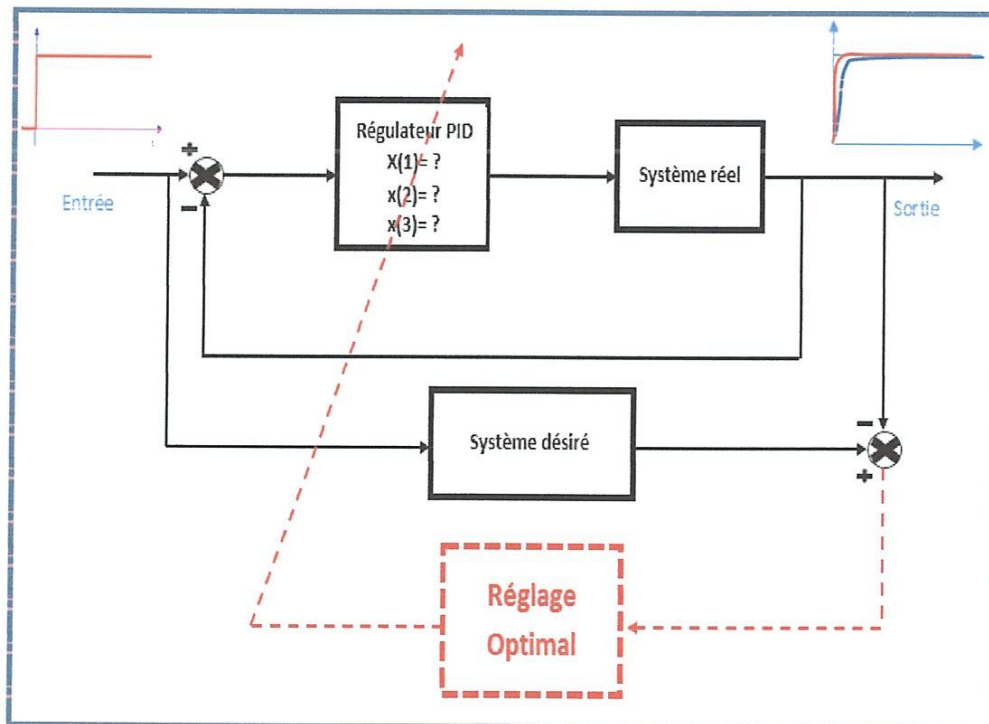


Figure 3.12 : Schéma fonctionnel de réglage optimal d'un paramètre PID

$$\begin{cases} k_p = 26,201 \\ k_i = 37,666 \\ k_D = 0,008 \end{cases} \quad f_{min} = 14,43$$

La fonction de transfert du régulateur optimal est donnée par l'équation 3.14 :

$$c(p) = 26,201 + \frac{37,666}{p} + 0,008p \quad (3.14)$$

On voit que la méthode d'optimisation proposera un régulateur de type **PID**.

La réponse de système commandé par le régulateur optimal obtenu est montrée dans la figure 3.14 :

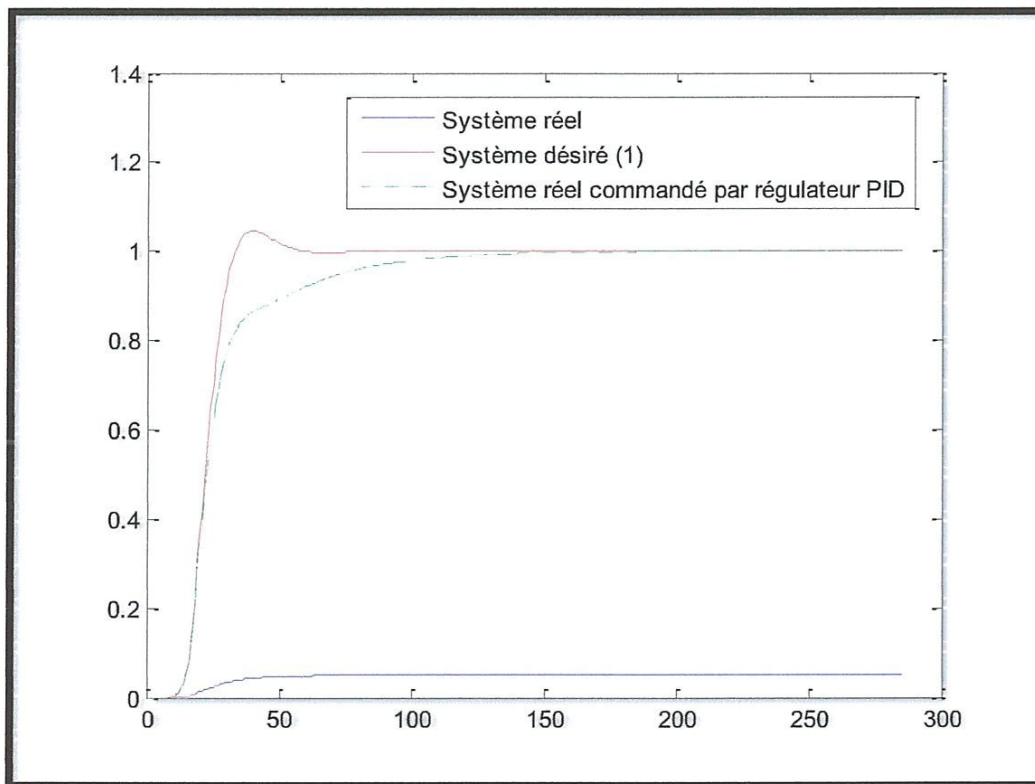


Figure 3.14 : Comparaison des réponses indicielles (avec patternsearch)

### ➤ Algorithme 3 :

Le deuxième algorithme utilisé est l'algorithme donné par la méthode de La fonction *fminunc*, Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{cases} k_p = 25,246 \\ k_I = 72,373 \\ k_D = 0 \end{cases} \quad f_{min} = 0.008 \cong 0$$

La fonction de transfert du régulateur optimal est donnée par l'équation 3.15 :

$$c(p) = 25,246 + \frac{72,373}{p} \quad (3.15)$$

La réponse de système commandé par le régulateur optimal obtenu est montrée dans la figure 3.15 :

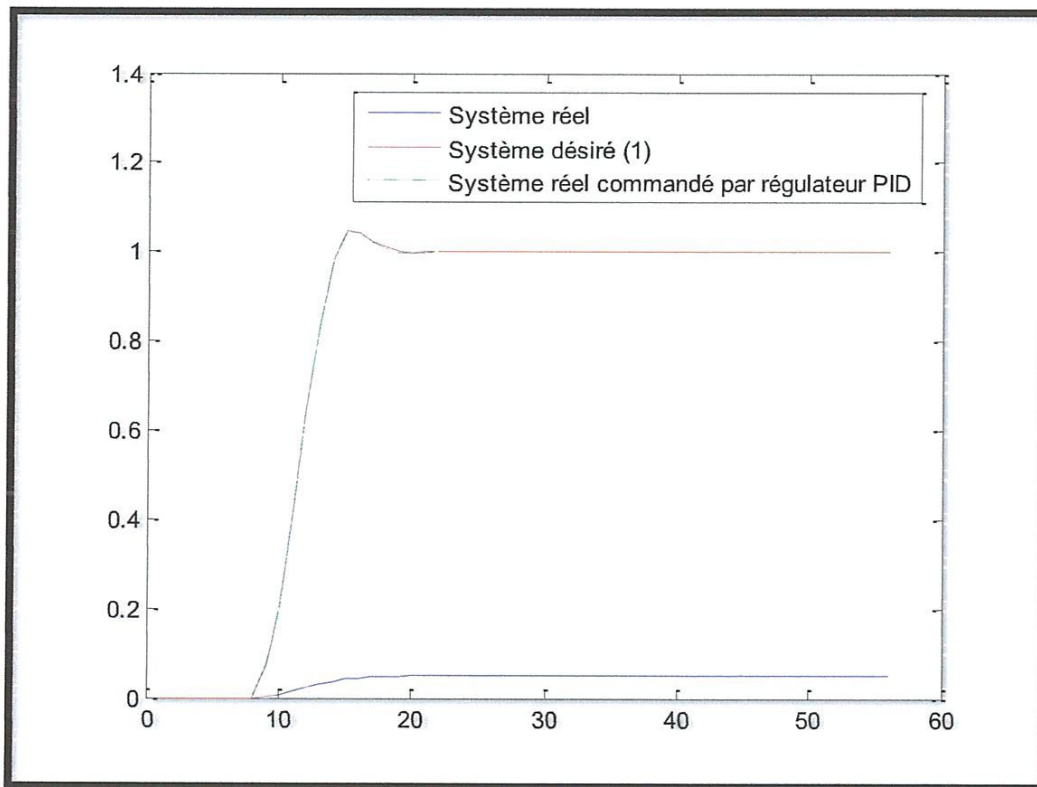


Figure 3.15 : Comparaison des réponses indicelles (avec *fminunc*)

#### ➤ Algorithme 4 :

Le deuxième algorithme utilisé est l'algorithme donné par la méthode de La fonction *fmincon*, Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{cases} k_p = x(1) = 24.406 \\ k_I = x(2) = 42.552 \\ k_D = x(3) = 0.001 \end{cases} \quad f_{min} = 7.68$$

La fonction de transfert du régulateur optimal est donnée par l'équation 3.16 :

$$c(p) = 24.406 + \frac{42.552}{p} + 0.001p \quad (3.16)$$

La réponse de système commandé par le régulateur optimal obtenu est montrée dans la figure 3.16 :

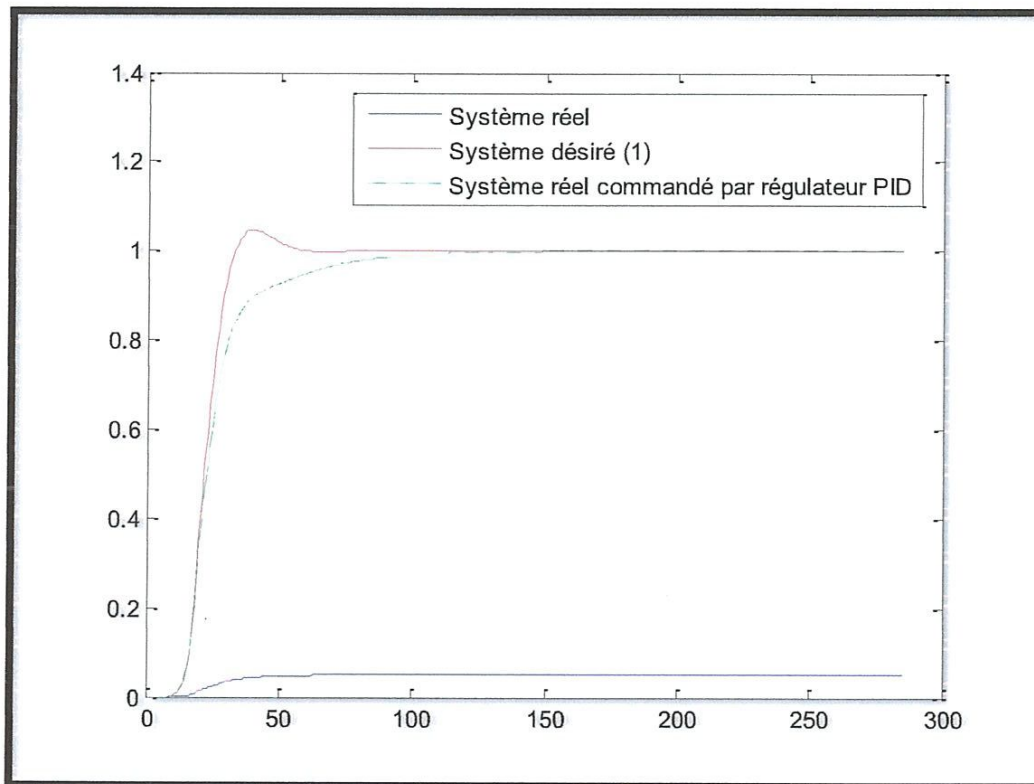


Figure 3.16 : Comparaison des réponses indicielles (avec *fmincon*)

**3.2.2- Système Désiré 02 :**

En comparaisant les deux équations (3.7) et (3.11), par comme ces (et en remplace  $p$  par  $iw$ ):

$$f_{min} = \sum_{w_{min}}^{w_{max}} (\|H_{désiré(2)}(iw)\| - \|H_{sys}(iw)\|)^2 + (phase(H_{désiré(2)}(iw)) - phase(H_{sys}(iw)))^2$$

Pour la minimisation de cette fonction d'erreur on a appliqué plusieurs méthodes d'optimisation afin d'obtenir les paramètres optimaux de notre régulateur qui vérifient les performances désirées de système.

**❖ Algorithmes d'optimisations :**

Dans cette partie on va utiliser les algorithmes génétiques en combinaison avec quelque méthode d'optimisation classique afin d'obtenir des meilleurs résultats pour la minimisation de la fonction objective (3.12).

**➤ Algorithme 1 :**

Le premier algorithme utilisé est l'algorithme donné par la méthode de la fonction  $f_{min}$ , Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{cases} k_p = x(1) = 398,296 \\ k_I = x(2) = 1165,484 \\ k_D = x(3) = 49,898 \end{cases} \quad f_{min} = 0.0212 \cong 0$$

La fonction de transfert du régulateur optimal est donnée par l'équation 3.17 :

$$c(p) = 398,296 + \frac{1165,484}{p} + 49,898.p \quad (3.17)$$



La réponse de système commandé par le régulateur optimal obtenu est montrée dans la figure 3.17 :

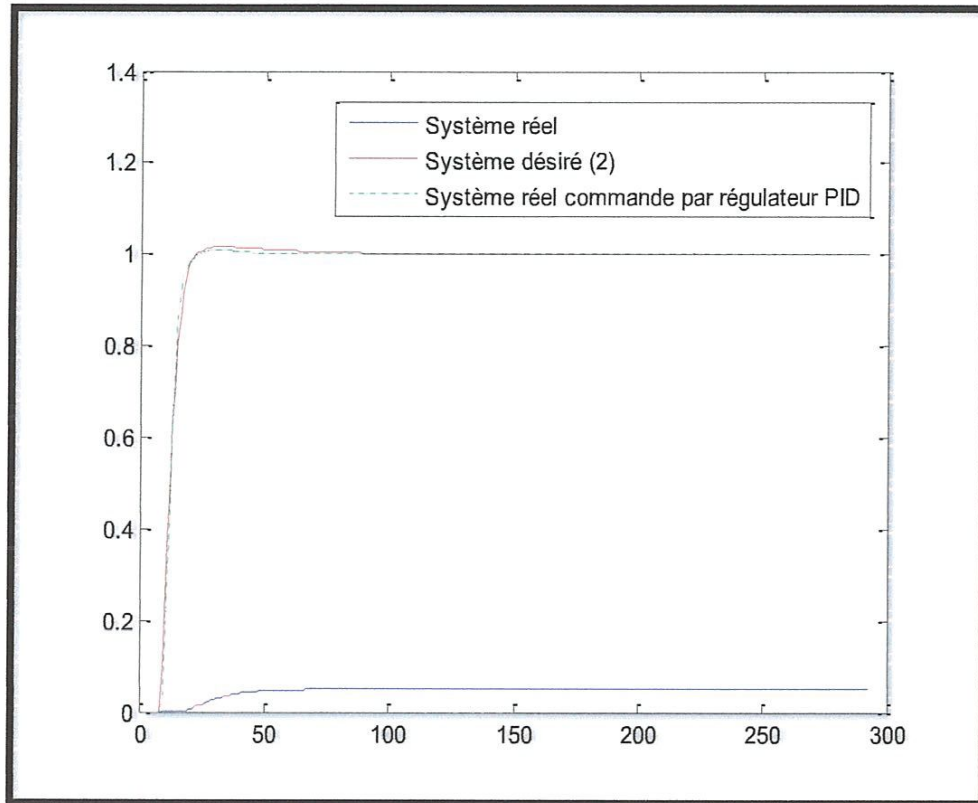


Figure 3.17 : Comparaison des réponses indicelles (avec  $f_{min}$ )

➤ **Algorithme 2 :**

Le deuxième algorithme utilisé est l'algorithme donné par la méthode de La fonction *patternsearch*, Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{cases} k_p = x(1) = 398,295 \\ k_I = x(2) = 1165,475 \\ k_D = x(3) = 49,899 \end{cases} \quad f_{min} = 0.0212 \cong 0$$

La fonction de transfert du régulateur optimal est donnée par l'équation 3.18 :

$$c(p) = 398,295 + \frac{1165,475}{p} + 49,899p \quad (3.18)$$

La réponse de système commandé par le régulateur optimal obtenu est montrée dans la figure 3.18 :

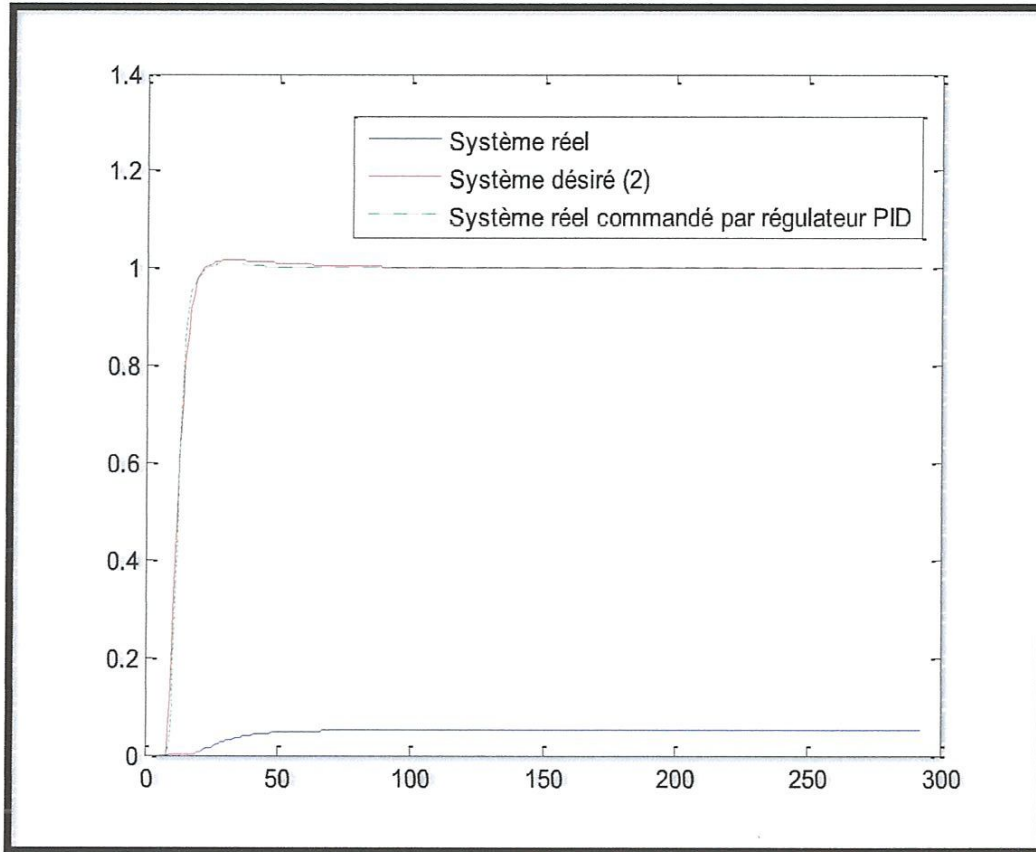


Figure 3.18 : Comparaison des réponses indicielles (avec patternsearch)

### ➤ Algorithme 3 :

Le deuxième algorithme utilisé est l'algorithme donné par la méthode de La fonction ***fminunc***, Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{cases} k_p = x(1) = 398.271 \\ k_I = x(2) = 1165,07 \\ k_D = x(3) = 49,894 \end{cases} \quad f_{min} = 0.0212 \cong 0$$

La fonction de transfert du régulateur optimal est donnée par l'équation 3.19 :

$$c(p) = 398.271 + \frac{1165,07}{p} + 49,894p \quad (3.19)$$

La réponse de système commandé par le régulateur optimal obtenu est montrée dans la figure 3.19 :

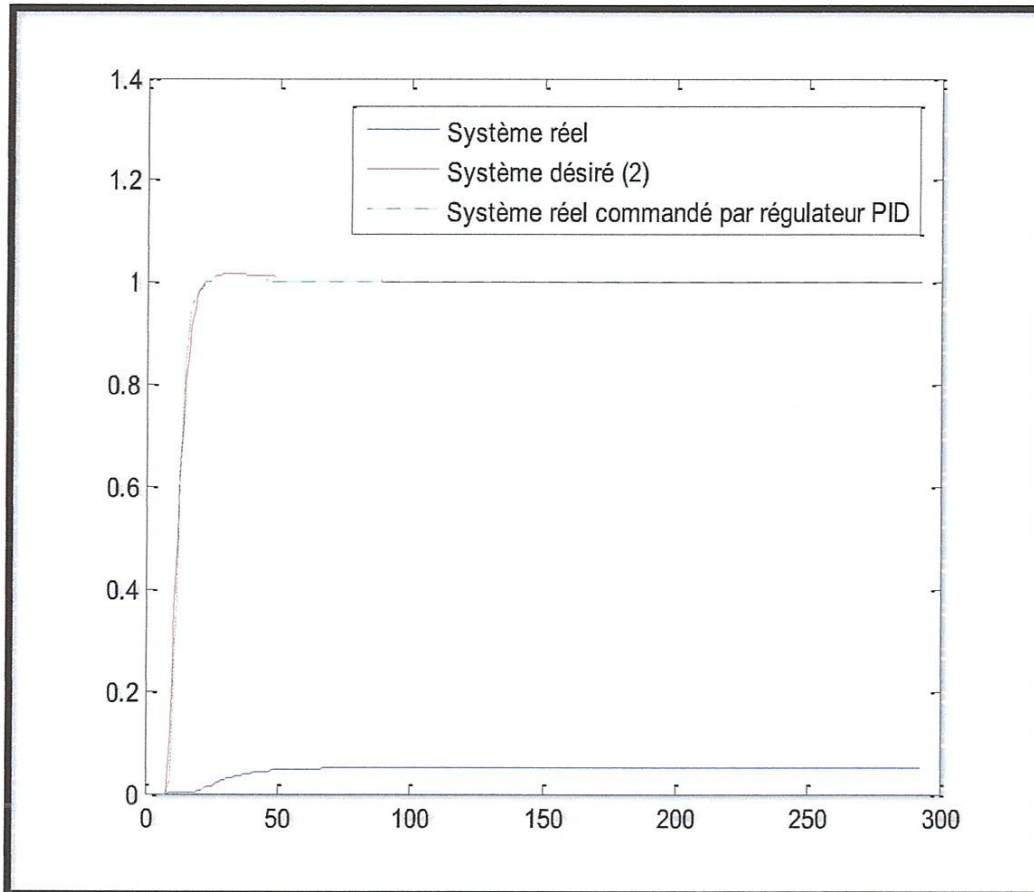


Figure 3.19 : Comparaison des réponses indicielles (avec *fminunc*)

#### ➤ Algorithme 4 :

Le deuxième algorithme utilisé est l'algorithme donné par la méthode de La fonction *fmincon*, Les résultats obtenus sont les suivants :

$$\begin{cases} k_p = 451.708 \\ k_I = 234.953 \\ k_D = 49.154 \end{cases} \quad f_{min} = 0.918 \cong 0$$

La fonction de transfert du régulateur optimal est donnée par l'équation 3.20 :

$$c(p) = 451.708 + \frac{234.953}{p} + 49.154p \quad (3.20)$$

La réponse de système commandé par le régulateur optimal obtenu est montrée dans la figure 3.20 :

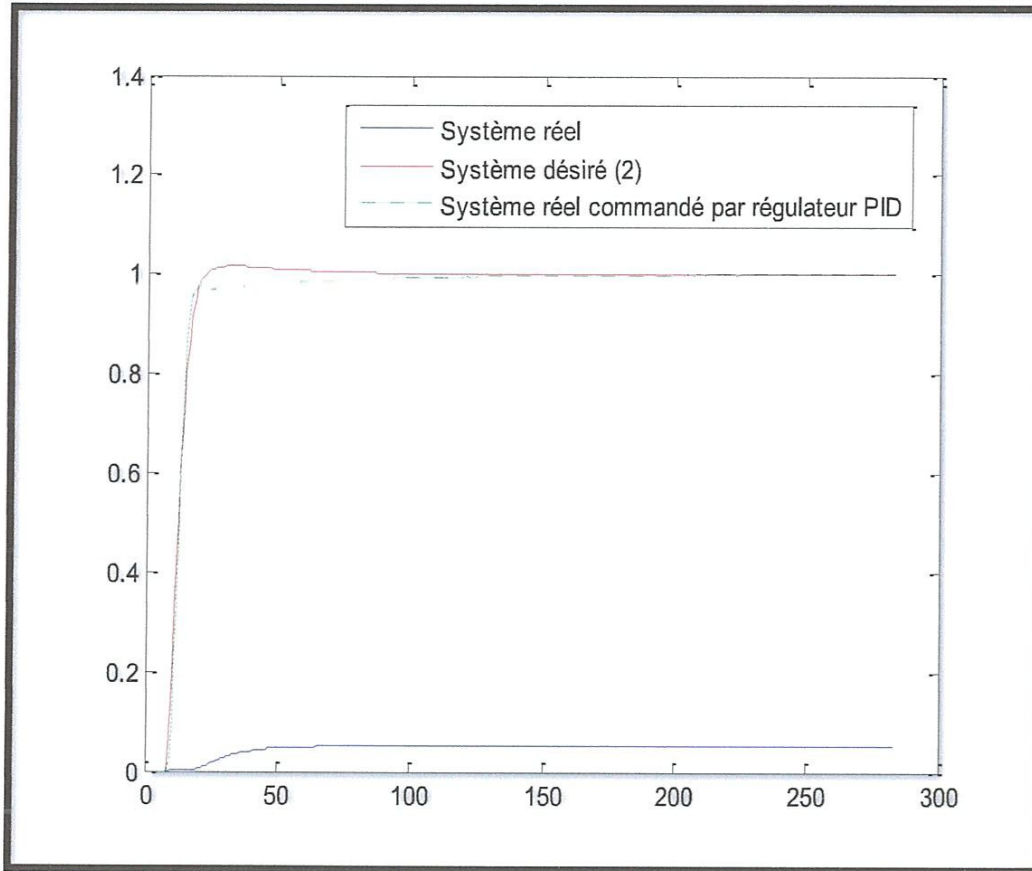
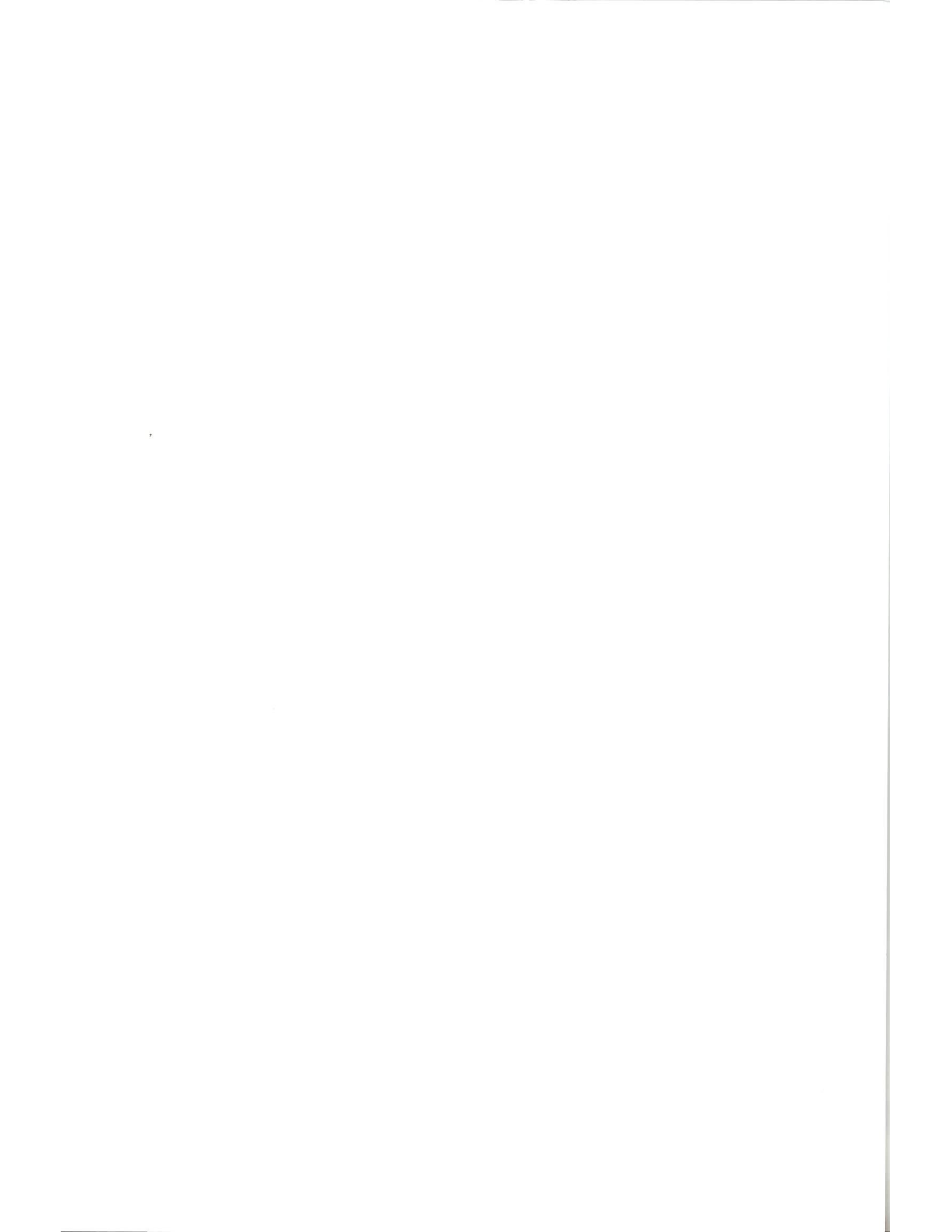


Figure 3.20 : Comparaison des réponses indicielles (avec fmincon)

### 3.3- Conclusion :

- ✓ C'est très important de visualiser la fonction que l'on veut optimiser avant de choisir l'un ou l'autre des algorithmes et pour déterminer la valeur initiale à introduire pour notre analyse.
  
- ✓ La mise en œuvre d'un algorithme génétique est simple, avec une programmation spécifique minimale au problème. En effet, plus le problème est complexe, plus l'algorithme génétique montre sa supériorité.



## Conclusion général

Dans notre travail présent, on a traité le problème régulation des systèmes. Tel que le problème de la régulation optimal des paramètres qui caractérise un tel système.

Après une brève présentation de la théorie de commande, et plus particulièrement l'utilisation des régulateurs PID dans ce dernier, et les différentes méthodes du réglage PID (Classique et moderne). Ont étudié beaucoup précisément la régulation PID moderne.

Dans ce travail nous résolu le problème de réglage des paramètres d'un système en utilisant une procédure qui combine l'algorithme génétique et l'algorithme d'optimisation classique.

Pour démontrer que cette approche est capable de trouver des paramètres très optimal, on comparer notre procédure avec un système désiré. (Les résultats obtenus, sont des résultats bien clairs et précisé).

