

# **Chapitre I**

**Généralités sur les régulateurs classiques**

## I.1 Introduction

Les systèmes asservis doivent répondre aux exigences technologiques telles que la précision, la rapidité, la qualité et la stabilité. Ces qualités fondamentales sont difficiles, à réaliser en même temps. En effet, c'est au dépend de la stabilité qu'il est possible d'améliorer la précision ; ce dilemme stabilité - précision a toujours été le problème essentiel de l'automaticien.

Dans la plupart des dispositifs de régulation et dans beaucoup de cas d'applications, on utilise des régulateurs standards " Régulateur PID ", en raison de la simplicité de leur algorithme de réglage et des expériences acquises avec ce type de correcteur. En plus, les résultats obtenus sont en général tout à fait satisfaisants de sorte que l'on n'a souvent pas besoin de faire appel à des régulateurs d'ordre supérieur ou à des lois de réglage plus complexes.

Le choix des correcteurs doit être adapté aux performances requises : temps de réponse, dépassement..., aux impératifs techniques, complexité de la commande, immunité aux parasites et aux contraintes économiques.

Dans ce chapitre on va expliquer les différents types des correcteurs et les méthodes classiques de synthèse de ces paramètres.

## I. 2 Définition d'un régulateur

Le régulateur est l'élément d'une boucle de régulation qui assure plusieurs fonctions, l'une d'entre elles devant nécessairement être la fonction de comparaison d'un signal de réaction et d'un signal de référence, les autres fonctions peuvent être des fonctions de correction, ...etc.

Le régulateur PID ou correcteur PID pour « proportionnel intégral dérivé » est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'une grandeur physique d'un système industriel ou « procédé » (voire automatique). C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de régler un grand nombre de grandeurs physiques.

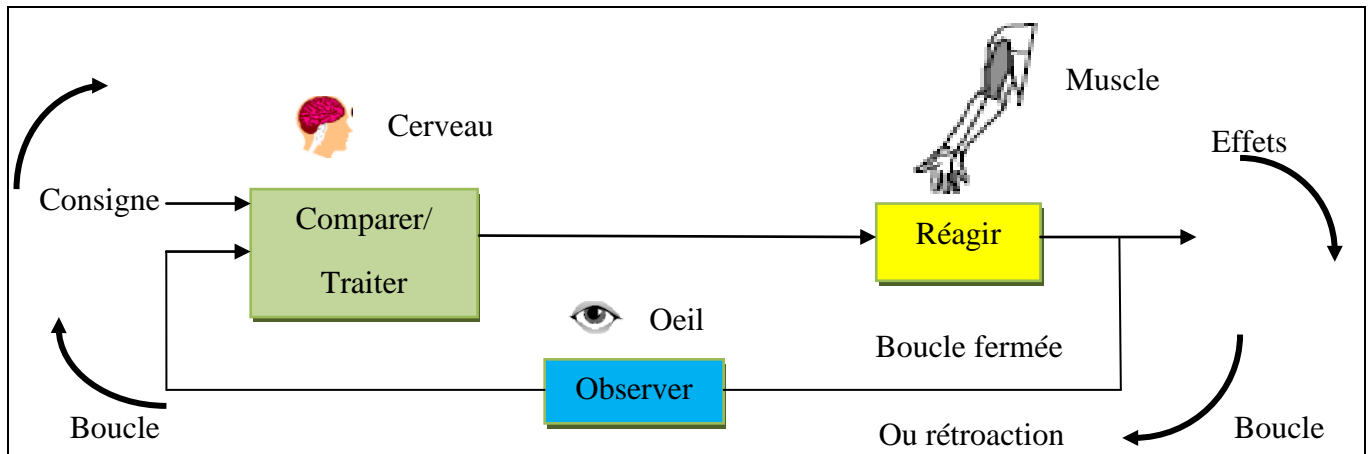
## I.3 Principe de la régulation

Dans la plupart des appareils et installations industrielles, tertiaires et mêmes domestiques, il est nécessaire de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs déterminées, en dépit des variations externes ou internes influant sur ces grandeurs. Le niveau d'un réservoir d'eau, la température d'une étuve, le débit d'une conduite de gaz, étant par nature variables, doivent donc être réglés par des actions convenables sur le processus considéré. Si les perturbations influant sur la grandeur à contrôler sont lentes ou négligeables, un simple réglage (dit en boucle ouverte) permet d'obtenir et de maintenir la valeur demandée (par exemple : action sur un robinet d'eau). Dans la majorité des cas, cependant, ce type de réglage n'est pas suffisant, parce que trop grossier ou instable. Il faut alors comparer, en permanence, la valeur mesurée de la grandeur réglée à celle que l'on souhaite obtenir et agir en conséquence sur la grandeur d'action, dite grandeur réglante. On a, dans ce cas, constitué une boucle de régulation et plus généralement une boucle d'asservissement.

Cette boucle nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de moyens de mesure, de traitement de signal ou de calcul, d'amplification et de commande d'actionneur, constituant une chaîne d'éléments associés : la chaîne de régulation (ou d'asservissement).

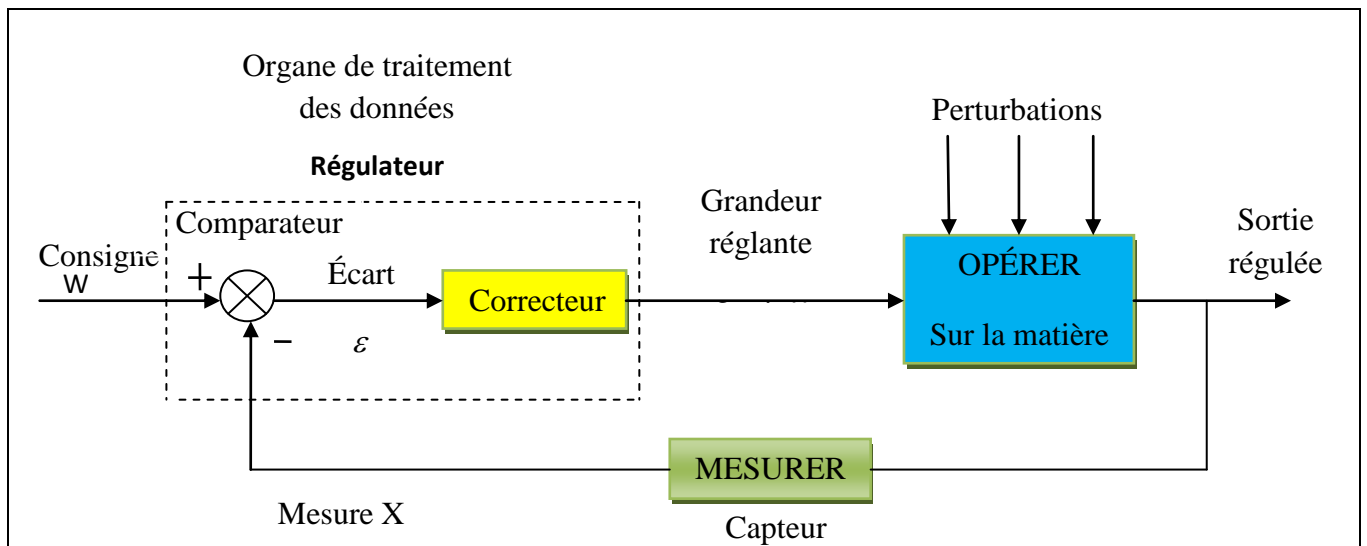
Les paramètres qui régissent le processus sont ainsi stabilisés en permanence à des niveaux souhaités. [7]

Par analogie avec l'homme, une boucle de régulation peut être analysée selon la figure suivante :



**Figure I.1 Schéma de Principe de fonctionnement d'une boucle de régulation.**

Dans une régulation automatique, chaque fonction est assurée par un organe spécifique.



**Figure I.2 Schéma de Principe d'une boucle de régulation.**

Avec:

Écart :  $\varepsilon = \text{Consigne} - \text{Mesure}$

W : Consigne de régulation

Y : Grandeur réglante (sortie du régulateur).

X : Grandeur régulée (mesure)

$Y = f(\varepsilon, t)$  : Algorithme (loi de commande).

## I.4 Classification des régulateurs

### I.4.1 Régulateur à action proportionnelle P

Le rôle de l'action proportionnelle est de minimiser l'écart  $\varepsilon(t)$  entre la consigne et la mesure et elle réduit le temps de monter et le temps de réponse. On constate qu'une augmentation du gain  $K_p$  du régulateur entraîne une diminution de l'erreur statique et permet d'accélérer le comportement global de la boucle fermée. On serait tenté de prendre des valeurs de gain élevées pour accélérer la réponse du procédé mais on est limité par la stabilité de la boucle fermée. En effet, une valeur trop élevée du gain augmente l'instabilité du système et donne lieu à des oscillations. [7]

La relation entre la sortie  $U(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est:

$$U(t) = K_p \varepsilon(t) \quad (\text{I.1})$$

Sa fonction de transfert est donc:

$$C(P) = K_p \quad (\text{I.2})$$

Avec  $K_p$  le gain proportionnel (appelé aussi  $G_r$ ).

On définit aussi la Bande Proportionnelle (BP) ainsi:

$$BP\% = \frac{100}{G_r} \quad (\text{I.3})$$

Le correcteur proportionnel P n'est généralement pas utilisé seul. On verra que tout correcteur possède au moins l'action proportionnelle. [8]

### I.4.2 Régulateur à action intégrale I

L'action intégrale agit proportionnellement à la surface de l'écart entre la consigne et la mesure, et elle poursuit son action tant que cet écart n'est pas nul. On dit que l'action intégrale donne la précision statique (Elle annule l'erreur statique).

Comme dans le cas de l'action proportionnelle, un dosage trop important de l'action intégrale engendre une instabilité de la boucle de régulation. Pour son réglage, il faut là aussi trouver un compromis entre la stabilité et la rapidité. [7]

L'ajout du terme intégral permet d'améliorer la précision mais en contrepartie, il introduit malheureusement un déphasage de  $-\frac{\pi}{2}$  ce qui risque de rendre le système instable du fait de la diminution de la marge de phase. [8]

Le correcteur intégral présente le défaut de saturer facilement si l'écart ne s'annule pas rapidement ce qui est le cas des systèmes lents. [7]

La relation entre la sortie  $U(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est:

$$U(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (\text{I.4})$$

Sa fonction de transfert est donc:

$$C(P) = \frac{1}{T_i P} \quad (\text{I.5})$$

Avec  $T_i$  la constante de temps de l'action intégrale, exprimé en minutes ou en secondes.

Le correcteur à action exclusivement Intégrale n'est pratiquement jamais utilisé, en raison de sa lenteur et de son effet déstabilisant. Il est, en général, associé au correcteur Proportionnel. [8]

### I.4.3 Régulateur à actions proportionnelle et intégrale PI

L'introduction d'un correcteur PI permet d'améliorer la précision et de rejeter les perturbations de type échelon. Par contre, ce type de correcteur possède certaines limitations sur l'amélioration de la rapidité et peut même introduire une instabilité du système en boucle fermée. [9]

La relation entre la sortie  $U(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est:

$$U(t) = K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt \quad (\text{I.6})$$

Sa fonction de transfert est donc:

$$C(P) = K_p + \frac{1}{T_i P} \quad (\text{I.7})$$

Le correcteur idéal permet d'avoir une structure avec un gain commun à toutes les actions.

Dans ce cas la fonction de transfert devient:

$$C(P) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i P}\right) = K_p \frac{1 + T_i P}{T_i P} \quad (\text{I.8})$$

### I.4.4 Régulateur à action dérivée D

Elle est une action qui tient compte de la vitesse de variation de l'écart entre la consigne et la mesure, elle joue aussi un rôle stabilisateur, contrairement à l'action intégrale.

L'action dérivée va ainsi intervenir uniquement sur la variation de l'erreur ce qui augmente la rapidité du système (diminution des temps de réponses). [7]

L'action dérivée permet aussi d'augmenter la stabilité du système par apport de phase  $(+\frac{\pi}{2})$  ce qui augmente la marge de phase). [8]

L'annulation de cette action en régime statique impose donc de ne jamais l'utiliser seule : l'action dérivée n'exerce qu'un complément à l'action proportionnelle.

En pratique, il est souhaitable de limiter l'action dérivée afin de ne pas amplifier les bruits haute fréquence et de limiter l'amplitude des impulsions dues aux discontinuités de l'écart. [7]

La relation entre la sortie  $U(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est:

$$U(t) = T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{I.9})$$

Sa fonction de transfert est donc:

$$C(P) = T_d P \quad (\text{I.10})$$

Avec  $T_d$  la constante de temps de l'action dérivée, exprimé en minutes ou en secondes.

Le correcteur à action exclusivement dérivée n'est pratiquement jamais utilisé. Il est en général associé au correcteur Proportionnel. [8]

### I.4.5 Régulateur à actions proportionnelle et dérivée PD

Les correcteurs PD permettent de modifier le régime transitoire et sont utilisés pour réduire les oscillations et ainsi garantir la stabilité des systèmes. [9]

La relation entre la sortie  $U(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est:

$$U(t) = K_p \varepsilon(t) + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{I.11})$$

Sa fonction de transfert est donc :

$$C(P) = K_p + T_d P \quad (\text{I.12})$$

La fonction de transfert du correcteur idéal avec un gain commun:

$$C(P) = K_p (1 + T_d P) \quad (\text{I.13})$$

### I.4.6 Régulateur à actions proportionnelle, intégrale et dérivée PID

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. Le correcteur P ( $K_p$ ) apporte de la rapidité au système en réduisant le temps de montée. Il réduit également l'erreur statique, mais ne l'élimine pas. L'action intégrale I ( $K_i$ ) aura pour effet d'éliminer l'erreur statique. Elle ramène donc de la précision, mais dégrade la réponse transitoire. L'action dérivée D ( $K_d$ ) améliore la stabilité du système, réduit les dépassements et améliore le régime transitoire. [8]

La relation entre la sortie  $U(t)$  et le signal d'erreur  $\varepsilon(t)$  est:

$$U(t) = K_p \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (\text{I.14})$$


Sa fonction de transfert est donc :

$$C(P) = K_p + \frac{1}{T_i P} + T_d P \quad (\text{I.15})$$

La fonction de transfert du correcteur idéal avec un gain commun:

$$C(P) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i P} + T_d P\right) \quad (\text{I.16})$$

Les effets de chaque correcteur ( $K_p$ ,  $K_I$  et  $K_D$ ) sur la réponse en boucle fermée du système sont regroupés sur le tableau (I.1): [8]

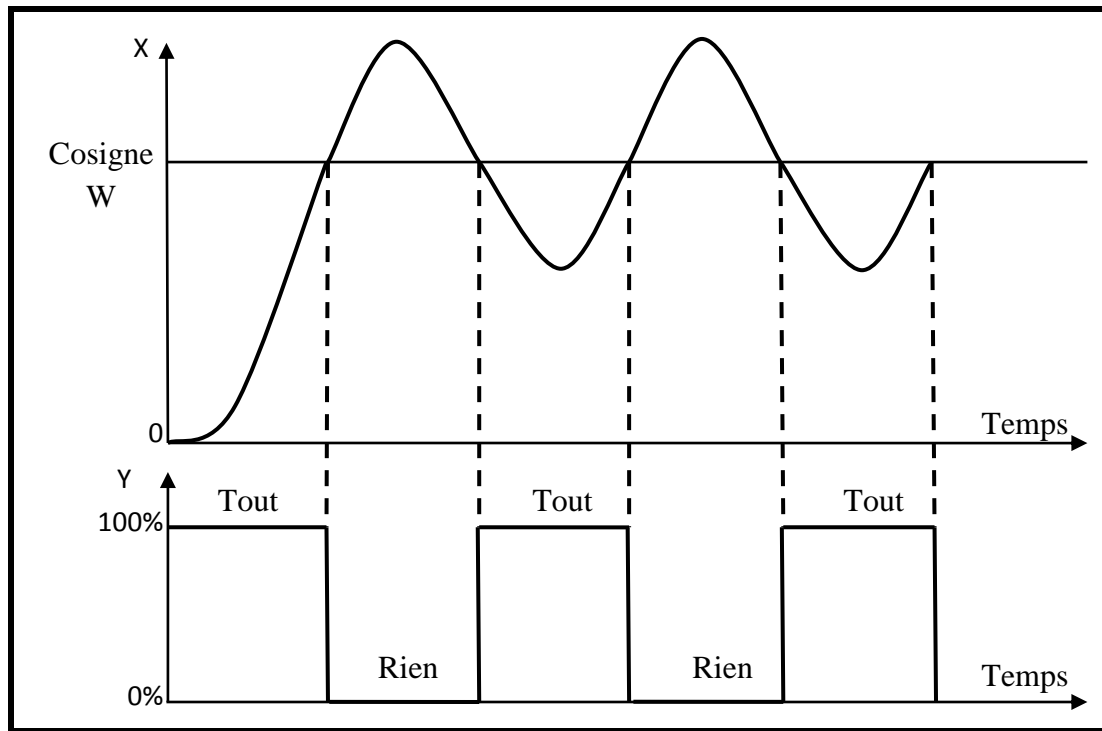
	Temps de montée	Dépassement	Temps de réponse	Erreur statique
$K_p$	Diminue	Augmente	Peu de changement	Diminue
$K_I$	Diminue	Augmente	Augmente	Éliminée
$K_D$	Peu de changement	Diminue	Diminue	Peu de changement

**Tableau I.1 Effets des correcteurs P, I, et D sur les régimes statique et dynamique du système en boucle fermée.**

### I.4.7 Régulateur Tout ou Rien

Ce mode d'action est essentiellement discontinu [10]. Comme indique à son nom la régulation TOR se caractérise par son action sur l'organe de réglage qui ne peut être que ON (fonctionne à 100%) ou OFF (arrêt à 0%). [11]

C'est la plus simple et la plus économique des régulations. Elle est utilisée pour des installations ayant une grande inertie et n'ayant pas besoin d'une grande précision : maintien d'une température d'un four, d'un niveau dans une cuve, d'une température d'eau dans un circuit...



**Figure I.3 Principe du fonctionnement d'un régulateur « TOUT ou RIEN ».**

Avec:

W: consigne de régulation.

X: grandeur régulée (mesurer).

Y: grandeur réglant (sortie du régulateur).

Si X est inférieur à W :  $Y=0$

Si X est supérieur à W :  $Y=1$

Dans la réalité, afin de diminuer le phénomène de battement à l'approche de la valeur de consigne, on introduit un deuxième seuil. La valeur de consigne W permettant d'arrêter la commande (RIEN:  $Y=0\%$ ).

La valeur du deuxième seuil permettant de remettre en marche la commande (TOUT:  $Y=100\%$ ), l'écart entre ces deux valeurs s'appelle l'Hystérésis.



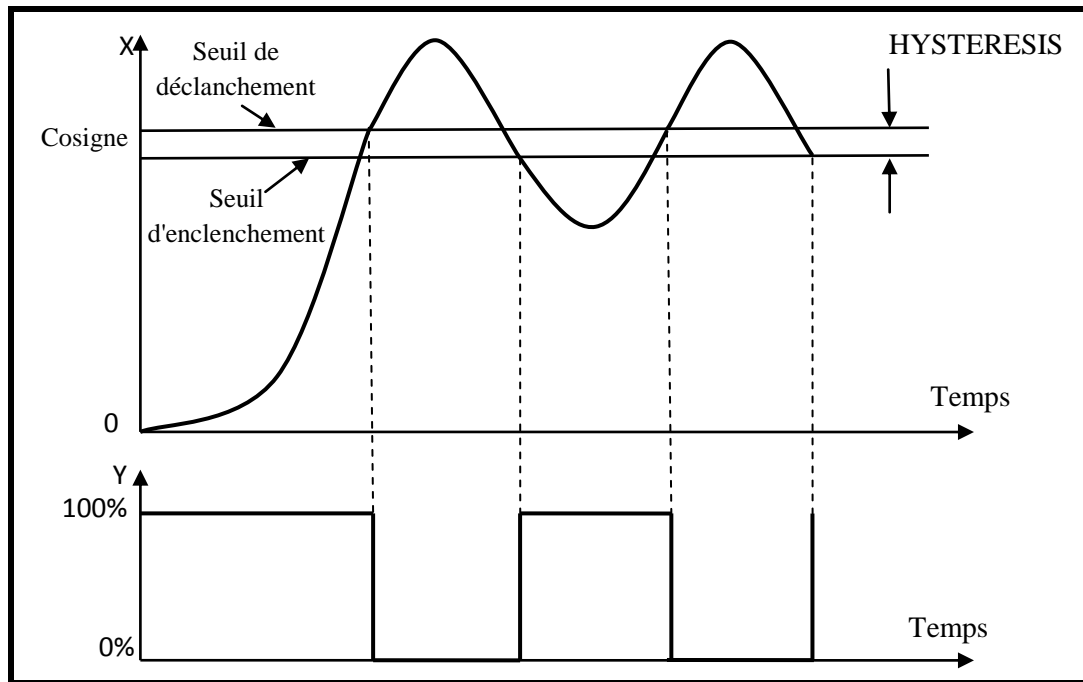


Figure I.4 Principe du fonctionnement d'un régulateur « TOUT ou RIEN » avec Hystérésis.

## I.5 Différents structures de PID

Structure du régulateur PID	Fonction de transfert	schéma de principe
série	$C(p) = K_p \frac{(1+T_i p)}{T_i p} (1+T_d p)$	
mixte	$C(p) = K_p (1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p)$	
parallèle	$C(p) = K_p + \frac{1}{T_i p} + T_d p$	

Tableau I.2 Différentes structures du régulateur PID.

## I.6 Exemple d'application

Prenant le cas d'un système mécanique masse-ressort-amortisseur représenté sur la figure ci-dessus. Par application du principe fondamental de la dynamique, l'équation différentielle décrivant le comportement de la masse **M** soumise à une force **F** est donnée par:

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + Kx = F \quad (\text{I.17})$$

Cette équation qui définit le système dans le domaine temporelle, prenant la transformation de Laplace de l'équation (I.17), on obtient la fonction de transfert du système définie par:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + bs + k} \quad (\text{I.18})$$

On suppose que:

**M=1kg, b= 10N.s/m, k= 20 N/m et F(s)= 1**

On aura donc:

$$\frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{s^2 + 10s + 20} \quad (\text{I.19})$$

L'objectif de ce problème est de montrer la contribution de chaque action P.I.D respectivement définie par **k<sub>p</sub>**, **k<sub>i</sub>**, **k<sub>d</sub>** pour:

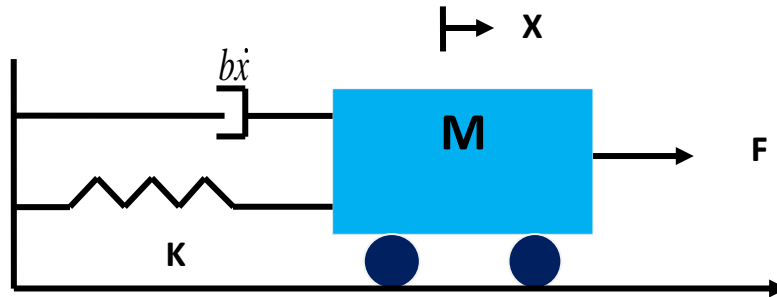


Figure I.5 Système mécanique.

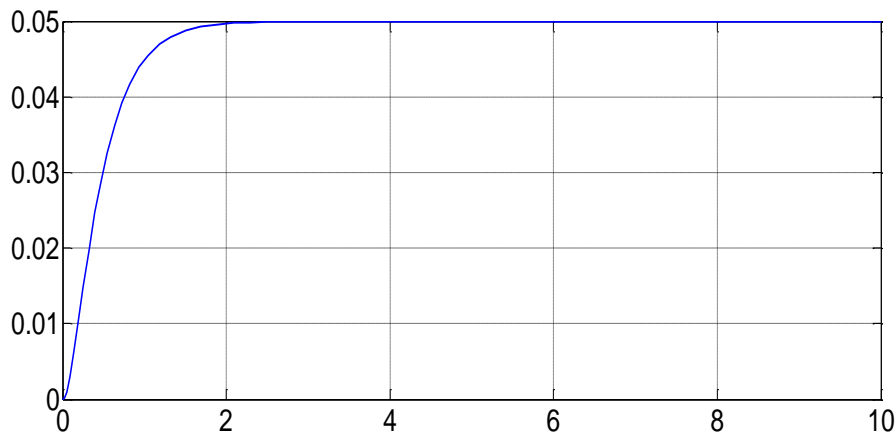


Figure I.6 Réponse indicielle du système en boucle ouverte.

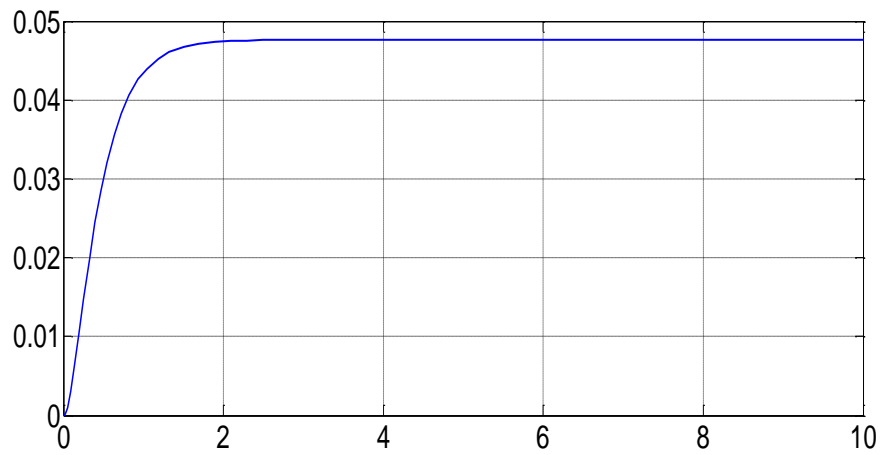


Figure I.7 Réponse du système en boucle fermée.

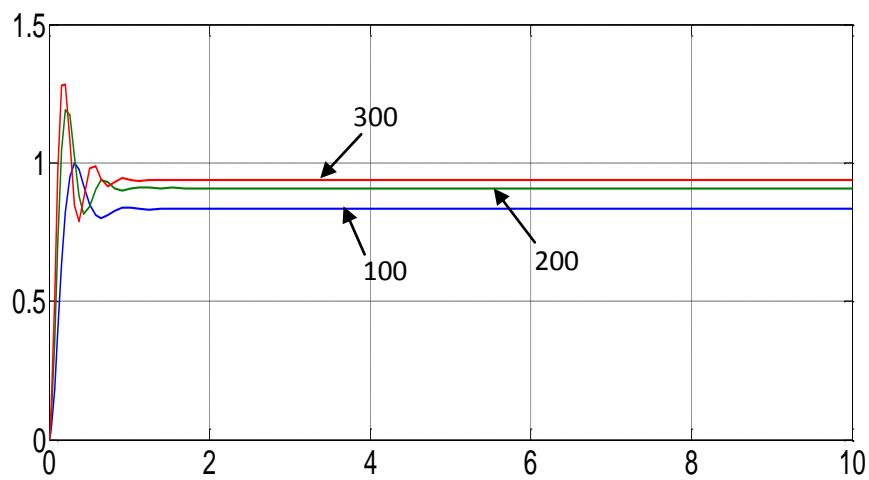


Figure I.8 La réponse en boucle fermée avec action proportionnelle  $K_p = (100, 200, 300)$ .

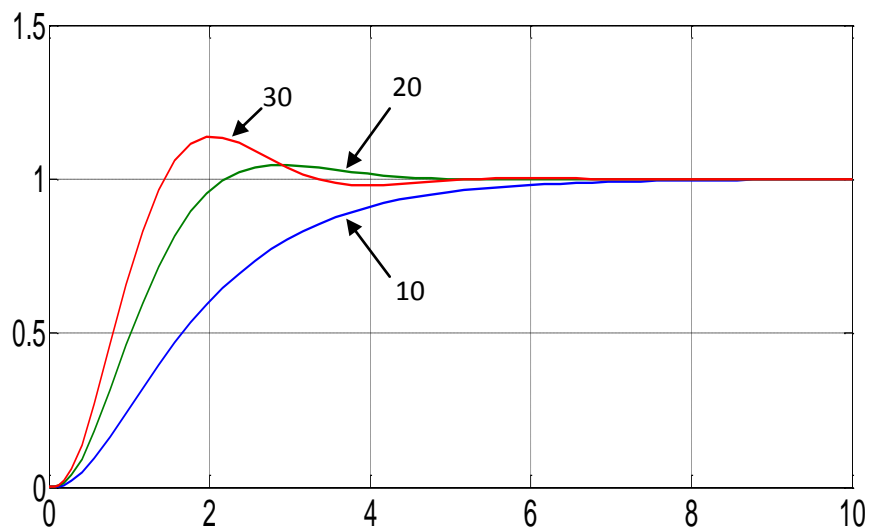
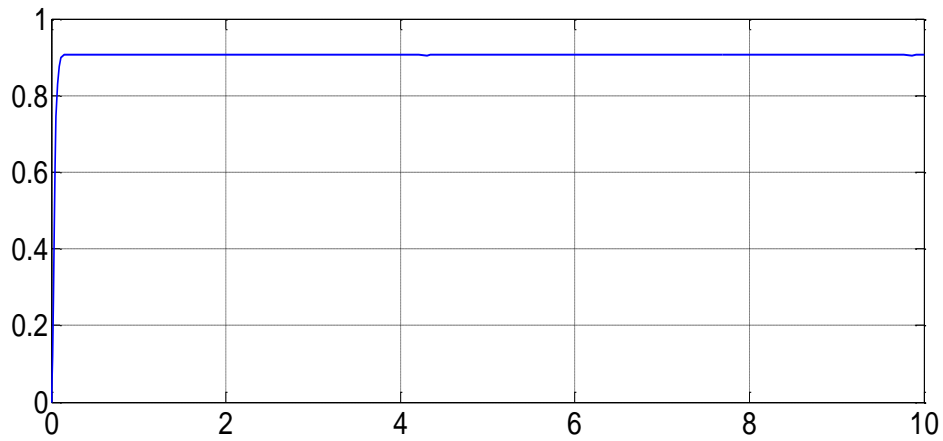
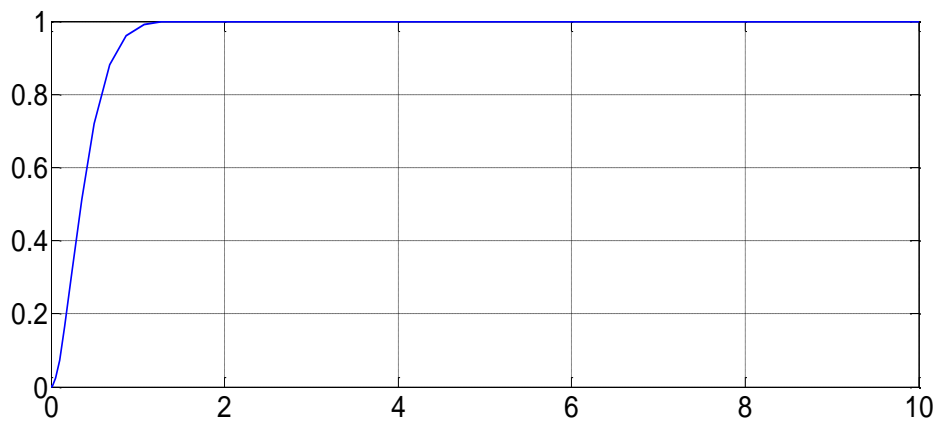


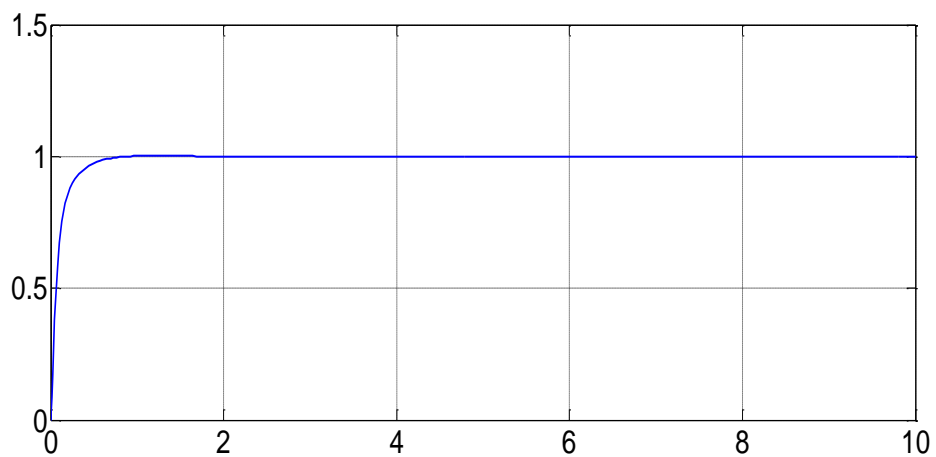
Figure I.9 La réponse en boucle fermée avec action intégrale  $K_i = (10, 20, 30)$ .



**Figure I.10 La réponse avec régulateur PD ( $k_p=192$ ,  $k_d=24$ ).**



**Figure I.11 La réponse avec régulateur PI ( $k_p=20$ ,  $k_i=52$ ).**



**Figure I.12 La réponse avec régulateur PID ( $k_p=96$ ,  $k_i=192$ ,  $k_d=12$ ).**

On constate d'après les résultats obtenus ci-dessus (Figures de I.6 à I-12) qu'un bon ajustement des actions P, I et D définies respectivement par  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  permet d'une manière ou d'une autre à :

- ✓ Minimiser le temps de réponse (améliore la rapidité);
- ✓ Assurer un dépassement minimal ;
- ✓ Avoir une erreur statique nulle (améliore la précision).

## I.7 Avantages et inconvénients

### I.7.1 Avantages

Matériel standardisé, conception et méthodes de calcul standard et simples, souvent empiriques.

### I.7.2 Inconvénients

Jamais utilisable pour les systèmes fortement non linéaires ou pour les systèmes multi-variables (non découplés). [12]

## I.8 Méthodes temporelles de synthèse des correcteurs PID

La synthèse des correcteurs consiste à en déterminer les paramètres afin de satisfaire un certain nombre de performances en boucle fermée. Ces derniers peuvent être résumés par :

- Stabilité de système en boucle fermée.
- Insensibilité aux perturbations (rejet de perturbations).
- Précision de la réponse du système en boucle fermée.
- Rapidité.
- Le signal de commande doit être limité en énergie.

Généralement il n'est pas possible de réaliser tous les objectifs puisqu'ils sont conflictuels. Par exemple, un correcteur PID qui minimise l'effet d'une perturbation, tend à donner un dépassement important. Tout est affaire de compromis... [9]

Il existe un grand nombre de méthodes de synthèses des correcteurs, nous présenterons uniquement les méthodes les plus fréquemment utilisées en domaine de génie électrique.

### I.8.1 Méthode par réglages successifs

Le procédé de réglages successifs des paramètres du régulateur PID doit être stabilisé au point de fonctionnement. [13]

- **Réglage de P**

P est choisi faible,  $D = 0$  et  $I = 9999$  (au maxi pour être inopérant)

En appliquant un échelon de 5 à 10% sur la consigne, la réaction doit se rapprocher de la forme du milieu.

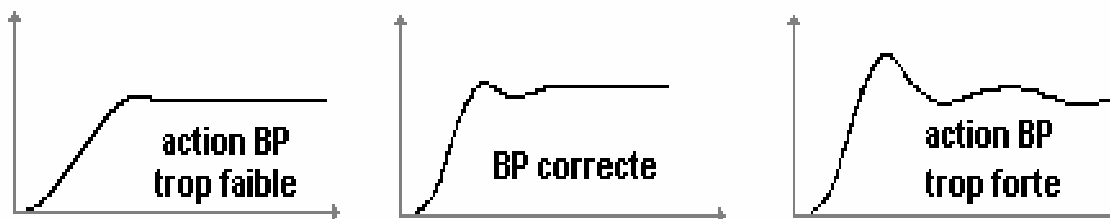


Figure I.13 Réglage de P [13].

Si l'action proportionnelle est trop faible, augmenter le gain (diminuer BP%) et inversement si l'action proportionnelle est trop forte.

- **Réglage de D**

D n'est utile que si le procédé induit un temps mort. Où  $D = Tr/3$  environ ( $Tr$  : temps mort)

L'action de D doit permettre de se rapprocher au mieux de la figure du milieu.

Il faut choisir un réglage de l'action dérivée qui minimise (ou élimine) le premier dépassement.

- **Réglage de I**

L'action intégrale n'est utile que s'il existe un écart résiduel entre Mesure/Consigne.

Il faut choisir un réglage de l'action Intégral qui donne une réponse de la Mesure avec un premier dépassement, par rapport à la consigne, d'environ 10 à 15 % de la variation de la Mesure.

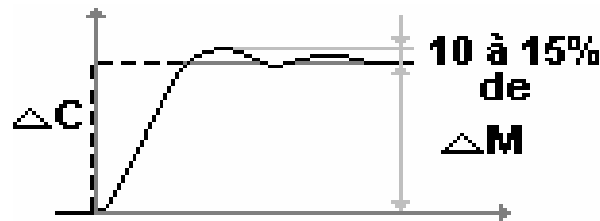


Figure I.14 Réglage de I [13].

## I.8.2 Méthode de Ziegler-Nichols (ZN)

### I.8.2.1 Méthode de Ziegler-Nichols en boucle ouverte(BO)

Elle consiste, à partir de la réponse indicielle d'un système apériodique en boucle ouverte, à identifier le système et à ajuster les paramètres du régulateur. [9]

On suppose que le système à réguler, de fonction de transfert  $G(p)$ , a donné la réponse indicielle (normalisée en amplitude) de la figure (I.15) suivante:

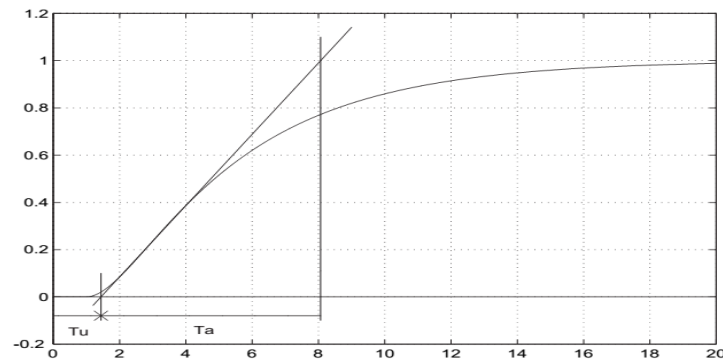


Figure I.15 Réponse indicielle d'un système en boucle ouverte [9].

On trace tout d'abord la tangente au point d'inflexion de la courbe de réponse indicielle, puis on relève les valeurs de  $T_u$  et  $T_a$ .

Cette réponse peut être approchée par :

$$G(P) = \frac{A e^{-PT_u}}{1 + PT_a} \quad (I.20)$$

Les règles de Ziegler et Nichols ont conduit au tableau:

Régulateur	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	$T_a/T_u$	-	-
PI	$0.9 T_a/T_u$	$3.3T_u$	-
PID	$1.2 T_a/T_u$	$2T_u$	$0.5 T_u$

Tableau I.3 Paramètres PID obtenus à partir du (ZN BO).

### I.8.2.2 Méthode de Ziegler et Nichols en boucle fermée (BF)

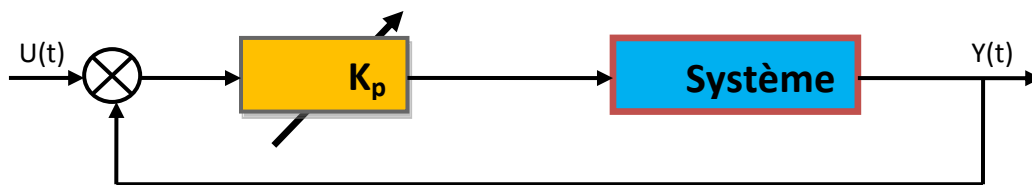


Figure I.16 Schéma fonctionnel d'un système avec gain  $K_p$  en boucle fermée.

La méthode de Ziegler et Nichols en boucle fermée consiste à déterminer la limite de pompage du système en boucle fermée. Le pompage est défini par l'apparition d'oscillations entretenues et en général indésirables. [9]

Pour cela, on associe le système à un correcteur  $P$ , dans une boucle fermée.

On augmente ensuite la valeur du gain proportionnel  $K_p$ , jusqu'à l'apparition d'oscillations entretenues sur la sortie du système : on est en limite de stabilité, le phénomène de pompage est atteint (voir la figure I.17):

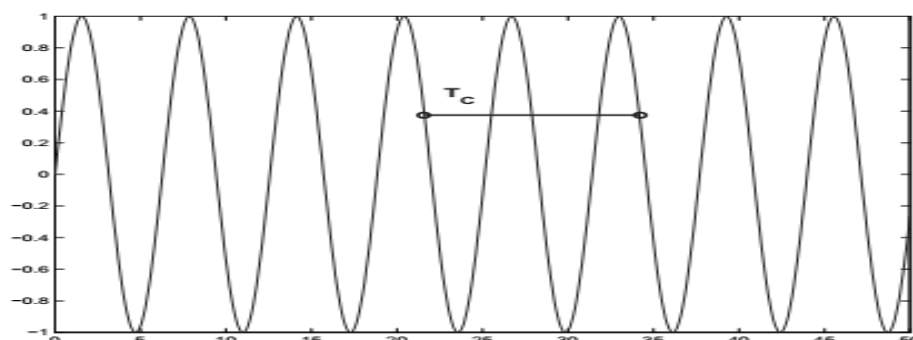


Figure I.17 ZN en boucle fermée: pompage [9].

Les règles de Ziegler et Nichols ont conduit au tableau suivant:

Régulateur	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_c$	-	-
PI	$0.45K_c$	$0.83T_c$	-
PID	$0.6K_c$	$1.5T_c$	$0.125 T_c$

**Tableau I.4 Paramètres du régulateur PID obtenus à partir du (ZN en BF).**

### I.8.3 Méthode de Chien, Hornes et Reswick

Chien, Hornes et Reswick ont également proposé une méthode de synthèse des correcteurs basée sur la même réponse apériodique en boucle ouverte que Ziegler et Nichols (donc en boucle ouverte). Leurs résultats sont résumés par le tableau (I.5) ci-dessous. Ces résultats permettent d'obtenir un système en boucle fermée à réponse soit apériodique (régulation), soit avec un premier dépassement de l'ordre de 20% (poursuite). [9]

Type du régulateur	Paramètres du Régulateur	Régulation	Poursuite
P	$K_P$	$0.3T_a/T_u$	$0.7T_a/T_u$
PI	$K_P$	$0.6T_a/T_u$	$0.7T_a/T_u$
	$T_i$	$4T_u$	$2.3T_u$
PID	$K_P$	$0.95T_a/T_u$	$1.2T_a/T_u$
	$T_i$	$2.4T_u$	$2T_u$
	$T_d$	$0.42T_u$	$0.42T_u$

**Tableau I.5 Paramètres PID obtenus à partir du (CHR).**

### I.8.4 Synthèse par placement des pôles

Cette méthode calcule les paramètres du régulateur PID à partir de la spécification des pôles désirés en boucle fermée et en connaissant le modèle du procédé. En considérant la fonction de transfert en boucle fermée est :



$$H(S) = \frac{CG(S)}{1+CG(S)} \quad (\text{I.21})$$

L'équation caractéristique qui permet le calcul des pôles de  $H(S)$  est donc :

$$1+CG(S)=0 \quad (\text{I.22})$$

On étudie le cas général où le procédé est de la forme :

$$H(S) = \frac{1+b_i S}{a_0 + a_1 S + a_2 S^2} \quad (\text{I.23})$$

Avec les  $a_i$  et les  $b_i$  connus.

On désire obtenir un polynôme caractéristique  $P(S) = 1 + P_1 S + P_2 S^2 + P_3 S^3 + P_4 S^4$  (donc  $P_i$  connus, choisis par l'utilisateur).

Le choix du polynôme caractéristique se fait en utilisant la forme normalisée des systèmes du deuxième ordre. Les paramètres du régulateur peuvent être calculés en identifiant les termes de même puissance de  $P$  des deux polynômes caractéristiques, celui désirée et celui donné par la boucle fermée.

#### I.8.4.1 Exemple d'application (pour calculer le gain $K_p$ )

Le procédé est  $G(S) = \frac{2}{S(1+10S)}$ . Avec l'utilisation d'un régulateur proportionnel, la fonction de transfert de la boucle fermée est donc :

$$H(S) = \frac{1}{\frac{5}{K_p} S^2 + \frac{0.5}{K_p} S + 1} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} S^2 + \frac{2\zeta}{\omega_n} S + 1} \quad (\text{I.24})$$

Ne pouvant modifier qu'un seul paramètre ( $K_p$ ), il n'est pas possible de placer les deux pôles de  $H(s)$  de façon indépendante. Une approche efficace consiste à calculer  $K_p$  de façon à ce que le facteur d'amortissement  $\zeta$  soit égal à 0.7. En comparant les termes de degré deux des dénominateurs de l'équation 2.14 on obtient :

$$\omega_n = \sqrt{0.2K_p} \quad (\text{I.25})$$

La comparaison des termes degré 1 et l'insertion de l'équation (I.24) conduisent à :

$$\zeta = \frac{\omega_n}{4K_p} = \frac{\sqrt{0.2K_p}}{4K_p} = 0.7 \quad (\text{I.26})$$

d'où :  $K_p = 0.0255$ .

## **I.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons d'abord introduit une classification aux différents types de régulateurs. Ensuite nous avons présenté les méthodes temporelles de synthèse des correcteurs PID.

Ces méthodes sont simples mais leur inconvénient est qu'ils sont linéaires et ne peuvent pas contrôler les systèmes ayant des changements de paramètres et une grande non linéarité. Donc la solution était d'introduire des méthodes modernes d'ajustement des paramètres des régulateurs PID que en on va détailler au prochain chapitre.