

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : **TECHNOLOGIE**

DEPARTEMENT : **ELECTRONIQUE**

N° : .....



DOMAINE : **sciences et technologies**

FILIERE : **Electronique**

OPTION : **Instrumentation**

*Mémoire présenté pour l'obtention*

***Du diplôme de Master***

**Par: SAADI Amina**

ZAHIR Ayat el rahmane

Intitulé

**Etude comparative des méthodes de réglage classique et intelligent des paramètres PID**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr : Gareh Messaoud	Université Mohamed Boudiaf –M'sila	Président
M <sup>er</sup> Mezaache Hatem	Université Mohamed Boudiaf –M'sila	Rapporteur
M <sup>me</sup> Fodil Malika	Université Mohamed Boudiaf –M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2021/2022.**



## Remerciement

Tout d'abord nous remercions dieu tout puissant qui nous a gardé en bonne santé afin de faire ce modeste travail et qui nous a permis de vivre ce bonheur.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice de mémoire , Mr. MEZAACHE Hatem . je le remercie de m'avoir encadre ,orienté ,aidé et conseille .

*Je remercie également tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :*

·GAREH MESSAOUDE

·FODIL MALIKA

Je tiens également à remercier mon professeur DJERIOUI MOHAMED et tous les enseignants Qui nous aider pendant la période d'étude à l'université.

*Je remercie l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique.*

Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce projet.



Je dédie ce mémoire

A mes chers parents ma père ALI et mon mère

A mes frères SALAH, AMAR et SIRADJ

A mes sœurs

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs

Encouragements

A mes cher oncle ALILI ELYAMINE

Et Atout ma famille

A mon cher ami CHARIFE ABD EL KARIME

Et A tous mes amies,

Et surtout Zineb , Meriem, Aya , Salsabile , Hadjre, Wafa.

A tous les gens qui me connaissent et que je connais en particulier

Charfe eldine, A.albasste, Ahmed.

Sans oublier tous les professeurs que ce soit du

Primaire, du moyen, du secondaire ou de

I 'enseignement supérieur

*Amina*

## *Dédicace*

*A mes chers parents, mon père Hakim et ma mère Warda, pour leurs sacrifices, leurs amour, leurs affection, leurs soutien et leurs prières tout au long de mes études,*

*A mes chères sœurs Ikram, Rim et Soundous pour leurs encouragements et leur soutien moral,*

*A mes chers frères Abdelbaset et Samado, pour leur soutien et leurs encouragements,*

*A mon fiancé, qui était plus grand que mes supporters pendant les deux années précédentes.*

*À tous mes chers amis sans exception ,en particulier Aya ,Hadjer, Bouchra.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Zahir Ayaterahmane*

## sommaire :

INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>Chapitre I :Généralité sur le système asservi et la régulation</b>	
Introduction .....	3
I .1.Notion de système .....	3
I .1.1.Performance d'un système .....	4
I .1.1.1. Définition (Point d'équilibre) .....	5
I .1.1.2. Stabilité .....	5
I .1.1.3. Rapidité .....	6
I .1.1.4. Précision :.....	7
I .1.2. structures de commande .....	7
I .1.2.1. Commande en boucle ouverte :.....	7
I .1.2.2. Commande en boucle fermée .....	8
I .1.3. Systèmes élémentaires .....	8
I .1.3.1. Propriété (Linéarité) .....	8
I .1.3.2. Système du premier ordre .....	9
I .1.3.3. Système du 2 ème ordre .....	9
I .2. Les asservissements .....	11
I .2.1. Principe et structure général d'un asservissement .....	11
I .2.2.Caractéristiques des asservissement .....	12
I .3. La régulation .....	12
I .3.1. Objectif de la régulateur .....	13
I .3.2.Principe général du règlement .....	13
I .3.3.Structure de principe d'un régulateur .....	13
I .3.4. Eléments constitutifs d'une boucle de régulation: .....	14
I .3.4. 1. Boucles de régulations : .....	14
I .3.4.2 .Les types de boucles .....	14

A. Régulation à chaîne ouverte :	14
B. Régulation à chaîne fermée :	15
I .3.5.Différence entre asservir et réguler	15
I .5.Le régulateur PID	15
I .5.1.Types de contrôleurs PID	16
I .5.1.1.Régulateur proportionnel (P)	16
I .5.1.2.Régulateur intégral (I)	17
I .5.1.3.Régulateur dérivatif (D)	18
I .5.2.Structure du régulateur proportionnelle intégrale dérivée PID:	19
A. Structure Série :	19
B. Structure Parallèle	19
C. Structure mixte	20
I .5. 3.Avantages et Inconvénients du régulateur PID	20
Conclusion	20

## **Chapitre II : Modalisation Moteur Courant Continu**

Introduction	21
II.1. Description de la machine à courant continue MCC	21
II.2. Constitution de la machine à courant continu MCC	21
II.2.1. L'inducteur (Stator)	22
II.2.2. L'induit (Rotor)	23
II.2.3. Le dispositif collecteur/ balais	24
II.3. Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu	24
II.4. Différents modes d'excitation d'un MCC	25
II.4.1. Excitation série	25
II.4.2. Excitation shunt (en dérivation)	25
II.4.3. Excitation compound (composé)	26
II.4.4. Excitation indépendante (séparé)	26

II.5. Modélisation d'un MCC à excitation indépendante .....	27
II.5.1. Fonction de transfert du moteur .....	29
II.5.2.La plaque signalétique : .....	31
II.5.3.Modèle mathématique de la réponse en vitesse .....	31
II.5.4.Modèle mathématique de la réponse en position .....	33
II.6.Avantages et inconvénients des moteurs à courant continu .....	34
II.7.Domaines d'utilisation des moteurs à courant continu .....	34
Conclusion .....	35

### **Chapitre III :Méthode Classique/ Intelligent**

Introduction .....	36
III .1.commande classique .....	36
III .1.1.Régulateur PID .....	36
III .1.2.Méthodes de synthèse du régulateur PID .....	36
III .1.3.Méthode de Ziegler –Nichols .....	37
III .1.3.1.Méthode de la réponse indicielle .....	37
III .1.3.2.Méthode du point critique .....	40
III .2. Commande Intelligente .....	41
III .2.1.Optimisation Par Essaims de Particule (PSO ).....	41
III .2.2.Principe du PSO .....	42
III .2.3.Formulation mathématique de PSO : .....	43
III .2.4. Algorithme de PSO .....	44
III .2.5.Principe algorithme PSO : .....	45
III .2.6.Organigramme de fonctionnement de PSO : .....	46
III .2.7.Avantages et inconvénients .....	47
III .2.7.1. Avantages .....	47
III .2.7.2. Inconvénients .....	47
Conclusion .....	47

## Chapitre IV :Application et corporisation des résultats

Introduction .....	48
IV.1. Asservissement position et vitesse .....	48
IV.1. 1.Interprétation .....	49
IV.2. Application de la commande PID en régulation de vitesse et position.....	50
IV.2.1. Ajustement des paramètres par la méthode de Ziegler & Nichols .....	50
A. Régulation en vitesse .....	50
IV.2.1.1.Interprétation :.....	51
B. Régulation en position .....	51
IV.2.1.2.Interprétation .....	51
IV.2.2. Ajustement des paramètres par la méthode PSO .....	52
A. Régulation en vitesse .....	52
IV.2.2.1. Interprétation .....	53
B. Régulation en position .....	53
IV.2.2.2. Interprétation .....	53
IV.3.Comparaison entre la méthode Ziegler-Nichols et PSO .....	54
IV.3.1 Interprétation des résultats .....	55
A. pour la vitesse.....	55
B. pour la position .....	55
Conclusion .....	55
CONCLUSION GENERALE.....	56
<b>Annex</b> .....	58

### **Bibliographique**

### Liste des figures :

#### Chapitre I :Généralité sur le système asservi et la régulation

**Figure 1 :**Modèle général d'un système.

**Figure2:**Système de chauffage central.

**Figure 3 :**Commande d'un moteur.

**Figure 4:**Performances d'un système de commande

**Figure 5 :**Système stable

**Figure 6 :**Système instable

**Figure 7 :**Rapidité de deux systèmes oscillatoire

**Figure 8 :**Précision de deux Systèmes apériodiques

**Figure 9 :**Commande en boucle ouverte.

**Figure 10 :**Commande en boucle fermée.

**Figure 11 :**Réponse indicielle d'un système du premier ordre

**Figure12 :**Réponse indicielle d'un système du second ordre où  $z < 1$

**Figure 13 :**structure générale d'un asservissement.

**Figure 14 :**Schéma de principe d'une boucle de régulation.

**Figure 15 :**Boucle ouverte.

**Figure 16. :**Boucle fermé.

**Figure 17 :**Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique

**Figure 18 :** les réponses d'un système en boucle fermée où le régulateur est de type P

**Figure 19:** les réponses d'un système en boucle fermée où le régulateur est de type I

#### Chapitre II : Modalisation Moteur Courant Continu

**Figure 1 :**Structure interne de la machine à courant continu(MCC).

**Figure 2 :**Schéma électrique de l'inducteur.

**Figure 3 :**Schéma l'induit d'un MCC .

**Figure 4 :** Collecteur d'un MCC

**Figure 5 :** Balais d'un MCC

**Figure 6 :** Schéma électrique du MCC a excitation série

**Figure 7 :** Schéma électrique du MCC a excitation shunt (en dérivation)

**Figure 8 :** Schéma électrique du MCC a excitation compound (composé).

**Figure 9 :** Modélisation électrique d'un moteur à excitation séparée

**Figure10:** Schéma équivalent d'un moteur à courant continu.

**Figure11:**Schéma bloc du Modèle de moteur électrique en vitesse

**Figure12 :**Modélisation sous MATLAB de la réponse en vitesse

**Figure13 :**Schéma bloc du modèle de moteur électrique en position

**Figure14 :**Modélisation sous MATLAB de la réponse en position

### **ChapitreIII :Méthode Classique/ Intelligent**

**Figure 1 :** Système de commande à retour unitaire classique

**Figure 2 :** La sortie d'un système stable et apériodique à une entrée en échelon.

**Figure 3 :** Réponse indicielle de la fonction de transfert  $G(s)$

**Figure 4 :** Réponse corrigée avec les correcteurs P, PI et PID par la méthode Ziegler& Nichols de la fonction de transfert  $G(s)$

**Figure 5 :** paramètres Ziegler –Nichols en boucle fermée.

**Figure 6 :**Groupe de : (a) oiseux, (b) poissons , (c) fourmis .

**Figure 7 :** Schéma de principe du déplacement d'une particule.

**Figure 8 :** Algorithme1-Algorithmme de base PSO.

**Figure 9 :** Organigramme de fonctionnement de PSO

### **Chapitre IV :Application et corporisation des résultats**

**Figure 1 :** Asservissement en position d'un MCC

**Figure 2 :** Asservissement en vitesse d'un MCC.

**Figure 3 :** Régulation en vitesse avec un PID classique basée sur la méthode d'ajustement de Ziegler-Nichols

**Figure 4 :** Régulation en position avec un PID classique basée sur la méthode d'ajustement de Ziegler-Nichols

**Figure 5 :** Régulation en vitesse avec un PID -PSO

### **Liste Tableau :**

**Tableau I.1 :** Avantages et inconvénients d'un régulateur PID

**Tableau II .1 :** Valeurs numériques d'un moteur à courant continu

**Tableau III.1 :** Paramètres PID obtenus à partir de la méthode de la réponse indicielle(ZN)

**Tableau III .2 :** Les valeurs calculées  $K_p$ ,  $T_i$  et  $T_d$  avec la méthode Ziegler & Nichols

**Tableau III .3 :** Les caractéristiques d'un contrôleur P , PI et PID appliqué à  $G(s)$

**Tableau III.4 :** Paramètres PID obtenus à partir du point critique

**Tableau IV.1 :** Performances obtenu en asservissement du MCC.

**Tableau IV.2 :** Comparaison entre, PSO- PID et ZN-PID régulation en vitesse.

**Tableau IV. 3 :** Comparaison entre, PSO- PID et ZN-PID régulation en position

### Liste abrégations :

Abréviation	Notation
MCC	Moteur à courant continu
PID	Proportionnel Intégral Dérivé
PSO	Optimisation Par Essaims de Particule

### Liste des symboles :

Symboles	Notations
$u(t)$	entrée de système .
$y(t)$	Sorti de système .
$\tau$	la constante de temps .
K	le gain statique .
$\omega_0$	La pulsation propre .
$\xi$	le coefficient d'amortissement du système .
$K_p$	le gain proportionnel .
$T_i$	le temps intégral .
$T_d$	le temps dérivatif .
$\Phi$	flux magnétique .
B	champ magnétique .

## Liste abrégations et des symboles

$U(t)$	<b>tension aux bornes de l'induit.</b>
$R$	<b>résistance de l'induit du MCC.</b>
$L$	<b>inductance de l'induit du MCC.</b>
$U_e(t)$	<b>tension aux bornes de l'inducteur.</b>
$L_i$	<b>inductance de l'inducteur du MCC.</b>
$T$	<b>constant de temps .</b>
$L$	<b>le retard apparent .</b>
$K_i$	<b>le gain intégrale .</b>
$K_d$	<b>le gain dérivé .</b>
$K_{pc}$	<b>gain critique .</b>
$T_c$	<b>la période d'oscillation .</b>
$W$	<b>compromis entre l'exploration locale et globale .</b>
$N$	<b>nombre de particules .</b>
$X_i$	<b>Position de la particule <math>P_i</math> .</b>
$V_i$	<b>vitesse de la particule <math>P_i</math> .</b>
$P$	<b>valeur aléatoire positive .</b>
$F$	<b>la fonction fitness à optimiser.</b>
$W$	<b>représente l'inertie .</b>

## Introduction générale

---

### Introduction générale :

Le contrôle PID est une méthode de contrôle couramment utilisée dans les systèmes asservis et aussi une technique qui est largement utilisée dans le contrôle des processus industriels. La raison principale de sa large acceptation dans l'industrie est sa capacité à contrôler la plupart des processus, ses actions sont faciles à comprendre et son mise en œuvre relativement simple, Ses fondements théoriques sont les mathématiques, la théorie du signal et l'informatique théorique. [1]

Les régulateurs Proportionnels Intégral Dérivés (PID) ont été largement utilisés pour le contrôle de la vitesse et de la position de diverses applications qui utilise des différents types de moteurs, et pour un bon fonctionnement de ce régulateur plusieurs méthodes ont été proposées pour la régulation de ces paramètres. Parmi ces méthodes on peut citer la méthode Ziegler - Nichols qui est bien connue comme une méthode classique de réglage des paramètres d'un régulateur de type P, PI et PID . Pour un large éventail de processus pratiques , cette approche de réglage fonctionne assez bien . Cependant, parfois, il ne fournit pas un bon réglage et tend à produire un grand dépassement .[2]

Pour améliorer les performances de réglage des paramètres des régulateurs PID classiques plusieurs techniques intelligentes ont été suggérées, parmi ces techniques on a trouvé la méthode d'optimisation d'essaim de particules (PSO) qui est une technique stochastique basée sur la population d'optimisation développée par le Dr. Eberhart et Dr. Kennedy en 1995, inspiré par le comportement social des oiseaux s'assemblant ou le banc de poissons, afin de trouver une performance optimale[3]

En utilisant MATLAB-Simulink, l'algorithme PSO est présenté pour trouver les valeurs optimales de gains proportionnels, intégrale et dérivé du contrôleur sans utiliser les solutions classiques

Le but de notre thème est d'étudier deux types de commande : une commande PID classique et une commande PID intelligente , pour un moteur à courant continu excitation indépendante afin de comparer les résultats et les performances de chacune

Notre travail est présenté dans un mémoire organisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré pour la présentation de quelques généralités essentielles dans le domaine du contrôle comme la définition d'un système,

## Introduction générale

---

les performances d'un système asservi, la notion sur l'asservissement et régulation et les différences entre asservi et réguler, structure de commande, les systèmes élémentaires : 1<sup>er</sup>, 2<sup>ème</sup> ordre, par la suite une présentation

du régulateur Proportionnel Intégral Dérivé (PID) est introduite, ainsi que les propriétés des actions proportionnelles, intégrateur et dérivateur et les différentes structures de PID

Dans le second chapitre, on présente le principe de la machine à courant continu, ses éléments principaux, les différents types de moteurs, la modélisation de MCC, et le modèle mathématique d'une réponse en vitesse et en position

Une présentation des différentes méthodes de synthèse d'un régulateur PID par la méthode classique de Ziegler Nichols et la méthode intelligente basée sur l'utilisation du PSO (Optimisation d'Essaim de Particules) sont présentées dans le troisième chapitre

Le dernier chapitre présente le fruit de notre travail où une simulation avec l'environnement MATLAB-SIMULINK est utilisée pour présenter une commande en vitesse et position d'un Moteur à Courant Continu en utilisant les deux techniques classiques (Ziegler Nichols) et intelligente (PSO) en suite une comparaison entre ces deux techniques est faite, et à la fin nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

## Introduction

L'automatique est la discipline qui d'une manière générale traite la commande des systèmes. Elle revêt donc un caractère très important dans le domaine industriel auquel elle apporte à la fois des solutions, des méthodes d'étude ainsi que des démarches systématiques d'analyse.

Dans le cadre de ce chapitre, présentée la notion de système et leur performance et ses type, notion de régulation et asservissement ainsi que les différents types des régulateurs.

### I.1. Notion de système

En automatique, on appelle système ou processus l'objet à étudier. La définition d'un système est liée aux grandeurs d'entrée et de sortie considérées. Il peut être défini comme un ensemble des éléments exerçant collectivement une fonction déterminée. Un système communique avec l'extérieur par l'intermédiaire de grandeurs, fonctions du temps, appelées signaux. En général, ces signaux (d'entrée et de sortie) ne sont pas de même nature. Les grandeurs d'entrée sont les grandeurs qui agissent sur le système. [4]

Il en existe deux types : Commandes (celles que l'on peut maîtriser) et perturbations (celles que l'on ne peut pas maîtriser).

Les signaux de sortie d'un système sont aussi appelés réponse du système. Un système possédant une seule entrée est dit mono variable, si de plus il possède une seule sortie, il est dit scalaire. Pour observer les grandeurs de sortie, on utilise des capteurs. C'est l'information de ces capteurs qui va permettre d'élaborer la commande.

Un système peut être représenté schématiquement de la manière de la figure I.1 suivante :

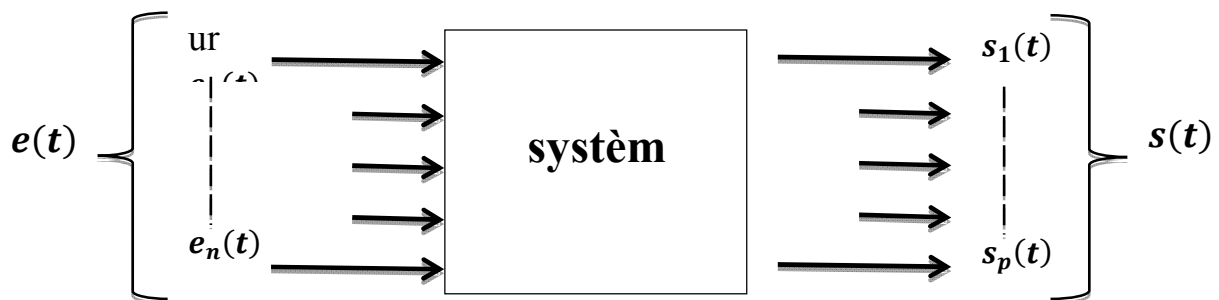
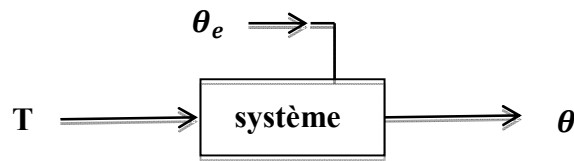


Figure I.1. Modèle général d'un système.

# CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

**Exemple :** le système de chauffage central d'un logement représenté :



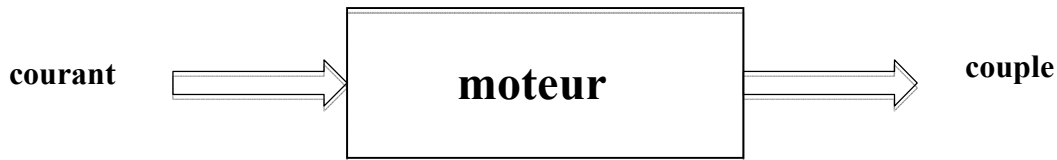
**Figure. I.2. Système de chauffage central.**

Avec :

$\theta$  : la température intérieure,

$T$  : la température de l'eau chaude envoyée dans les radiateurs,

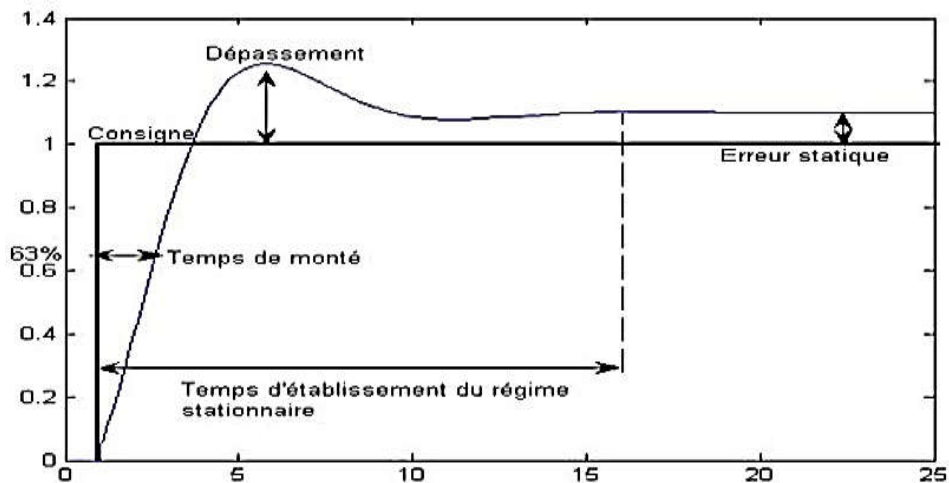
$\theta_e$  : la température extérieure (considérée comme une perturbation).



**Figure I.3. Commande d'un moteur.**

## I .1.1. Performance d'un système :[5]

Les performances des systèmes réglés définies dans un cahier des charges, sont illustrées par la figure



**Figure I.4. Performances d'un système de commande**

Les principales qualités d'un asservissement sont au nombre de trois : stabilité, précision, et rapidité

# CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

Dans un premier temps en considère que l'entrée  $u(t)$  est constante

## I.1.1.1. Définition (Point d'équilibre)

Le système est dans un état d'équilibre si il est placé dans cet état et il ne le quitte pas. La valeur du signal de mesure est alors constante.

## I.1.1.2. Stabilité

Un système est dit stable si et seulement si à une entrée bornée  $u(t)$  correspond une sortie bornée  $s(t)$ . Cette définition permet de qualifier la stabilité des systèmes forcés.

On parle alors de stabilité globale comme la figure I.5 et figure I.6

1 : consigne.

2 : système stable

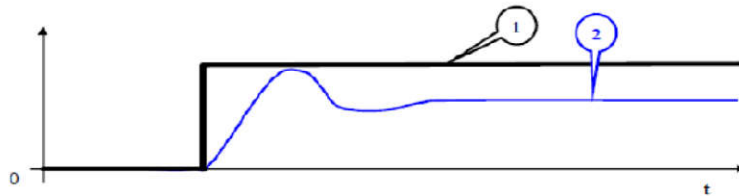


Figure I.5. Système stable

1 : consigne.

2 : système instable

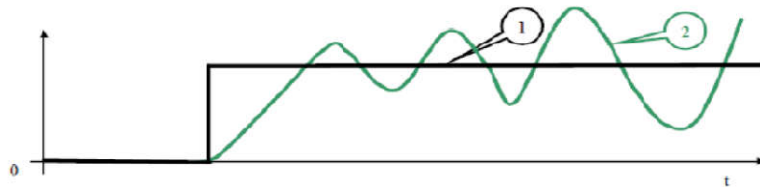


Figure I.6. Système instable

### Propriété (Stabilité d'un système) :

Un équilibre globalement stable est unique. On dit alors que le système est stable.

Si le système avait deux équilibres globaux, vers lequel irait-il si on le déplaçait de l'un des points d'équilibre. [6]

### Critère Mathématique de stabilité :

Système du 1<sup>o</sup> ordre :

$H(p)$  est stable si  $\tau > 0$

$$H(p) = \frac{H(p)}{1 - \tau p}$$

I. 1

## CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

Un système physique du 1<sup>o</sup> ordre sera toujours stable car il possède, en principe, une constante de temps  $\tau$  strictement positive

$$H(p) = \frac{H_0}{1 + \frac{2m}{\omega_0}p + \left(\frac{p}{\omega_0}\right)^2} \quad \text{I. 2}$$

$H(p)$  est stable si :

$$\omega_0 > 0$$

$$m > 0$$

Un système physique du 2<sup>o</sup> ordre sera toujours stable car il possède, en principe, des constantes  $m$  et  $\omega_0$  strictement positives. Par contre, le système pourra tendre vers l'instabilité lorsque  $m$  se rapproche de zéro. La réponse du système sera du type " oscillations peu amorties " mais amorties quand même.

Un système caractérisé par  $m = 0$  est un oscillateur et sa sortie sera de forme sinusoïdale.

### I.1.1.3. Rapidité

La sortie doit atteindre la valeur de consigne le plus rapidement possible. Le temps de réponse doit être le plus petit possible. Le temps de réponse à 5% d'un système est le temps mis pour que sa sortie atteigne et reste dans l'intervalle [95% ; 105%] de la valeur finale stabilisée [4]

**Exemple :** Dans l'exemple illustré ci-dessous on a deux systèmes oscillatoires, le système 1 est plus rapide que le système 2 comme la figure I.6.

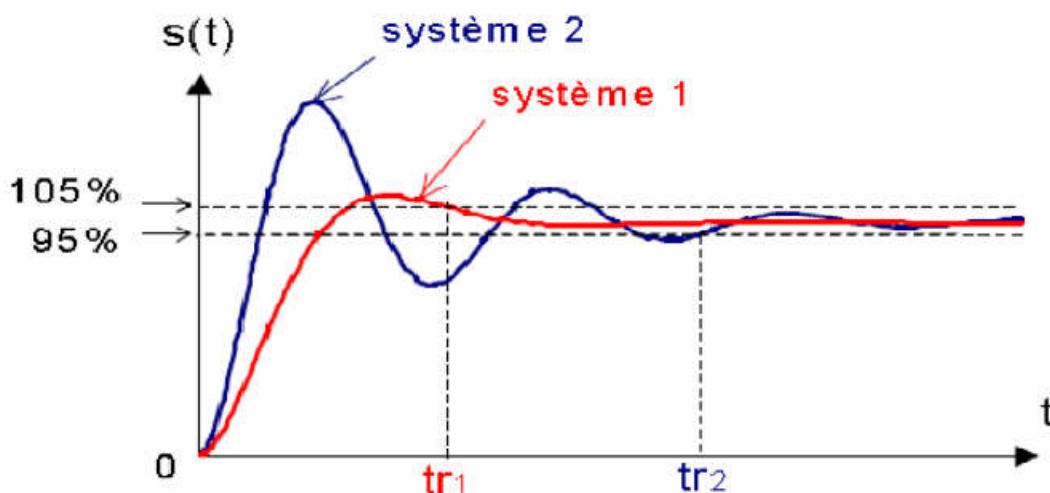


Figure I.7. Rapidité de deux systèmes oscillatoire

# CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

## I.1.1.4. Précision :

C'est la capacité du système à se rapprocher le plus possible de la valeur de consigne.[6]

**Exemple :** on a deux systèmes apériodiques, le système 1 est plus précis que le système 2 comme la figure

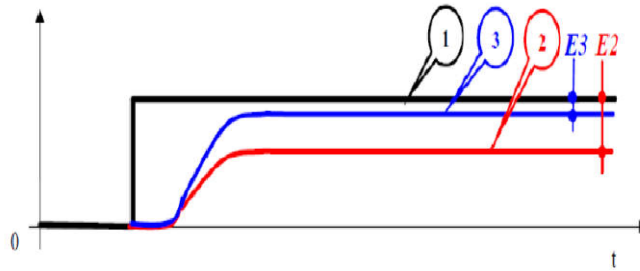


Figure I.8. Précision de deux Systèmes apériodiques

1 : Consigne

2 : Système peu précis.

3 : Système précis.

$E_2$  : erreur statique liée à la courbe 2.

$E_3$  : erreur statique liée à la courbe 3.

## I.1.2.structures de commande :[7] [10]

### I.1.2.1.Commande en boucle ouverte :

Un système de commande est en boucle ouverte lorsqu' aucune mesure de sortie  $s(t)$  n'est utilisée (ne comporte pas de contre-réaction) pour élaborer la commande  $u(t)$

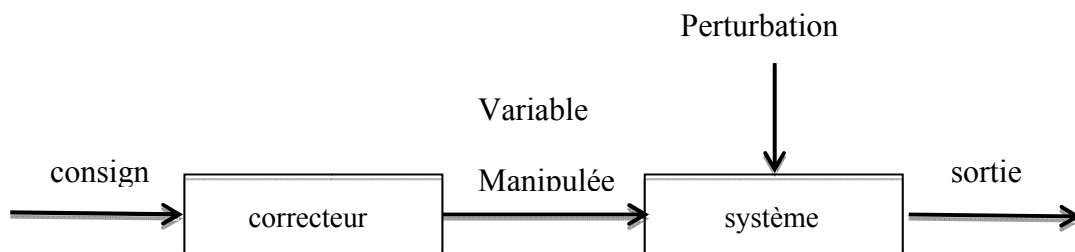


Figure I.9 .Commande en boucle ouverte.

La boucle ouverte possède quelques inconvénients, le système peut être déstabilisé à tout moment:



# CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

sortie pour une commande  $u_2(t)$ , soit  $y_3(t)$  la trajectoire de la sortie pour une commande

$u_3(t) = \lambda u_1(t)$  et soit  $y_4(t)$  la trajectoire de la sortie pour une commande

$u_4(t) = u_1(t) + u_2(t)$ . Les conditions de linéarité sont :

$$y_3(t) = \lambda y_1(t) \quad \text{I. 3}$$

$$y_4(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad \text{I. 4}$$

## I.1.3.2. Système du premier ordre : [8]

- ❖ Soit un système du premier ordre régi par une équation différentielle de la forme

$$\tau \dot{y}(t) + y(t) = Ku(t) \quad \text{I. 5}$$

- ❖ La forme standard d'une fonction de transfert d'un système du premier ordre

$$F(p) = \frac{K}{1+\tau p} \quad \text{I. 6}$$

La réponse indicielle d'un système représente l'évolution de sa sortie lorsque l'entrée est un échelon unitaire. L'expression de la réponse indicielle du système du premier ordre est :

$$y(t) = K \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad \text{I. 7}$$

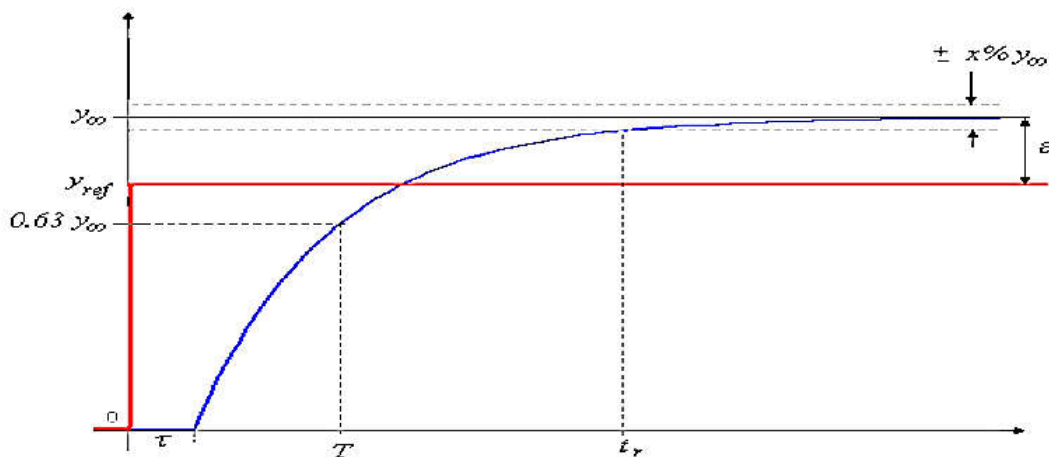


Figure I.11. Réponse indicielle d'un système du premier ordre

## I.1.3.3. Système du 2ème ordre

Soit un système du deuxième ordre régi par une équation différentielle de la forme :

$$\ddot{y}(t) + 2\xi\omega_0\dot{y}(t) + \omega^2 y(t) = \omega^2 Ku(t) \quad \text{I. 8}$$

## CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

la forme générale de la fonction de transfert des systèmes du deuxième ordre :

$$G(p) = \frac{K \omega_0^2}{p^2 + 2\xi \omega_0 p + \omega_0^2} \quad \text{I. 9}$$

- ❖ La forme et l'expression de  $y(t)$  dépendent alors des pôles de la fonction de transfert, donc des racines de son équation caractéristique

$$p^2 + 2\xi \omega_0 p + \omega_0^2 = 0 \quad \text{I. 10}$$

Qui dépend du signe de son discriminant :

$$\Delta = \omega_0^2(\xi^2 - 1) \quad \text{I. 11}$$

- **Cas d'un système apériodique critique ( $\xi = 1$ )**

Lorsque l'entrée est un échelon unitaire, l'expression de sa sortie est dans ce cas donnée par :

$$y(t) = k(1 - e^{-\omega_0 t} - \omega_0 t e^{-\omega_0 t}) \quad \text{I. 12}$$

- **Cas d'un système sinusoïdal amorti ( $\xi < 1$ )**

l'équation caractéristique possède deux racines complexes conjuguées :

$$r_1 = -\xi \omega_0 + \sqrt{\xi^2 - 1} \omega_0 \quad \text{I. 13}$$

$$r_2 = -\xi \omega_0 - \sqrt{\xi^2 - 1} \omega_0 \quad \text{I. 14}$$

l'expression de sa sortie est dans ce cas donnée par :

$$y(t) = K \left( 1 + \frac{e^{-\xi \omega_0 t}}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} t + \varphi) \right) \quad \text{I. 15}$$

$$\text{Ou : } \varphi = \arctg\left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi}\right)$$

Donc La réponse indicielle du système du second ordre est donc une fonction constante égale à  $K$  autour de laquelle oscille une fonction sinus contenue dans une enveloppe constituée par la fonction exponentielle.[8]

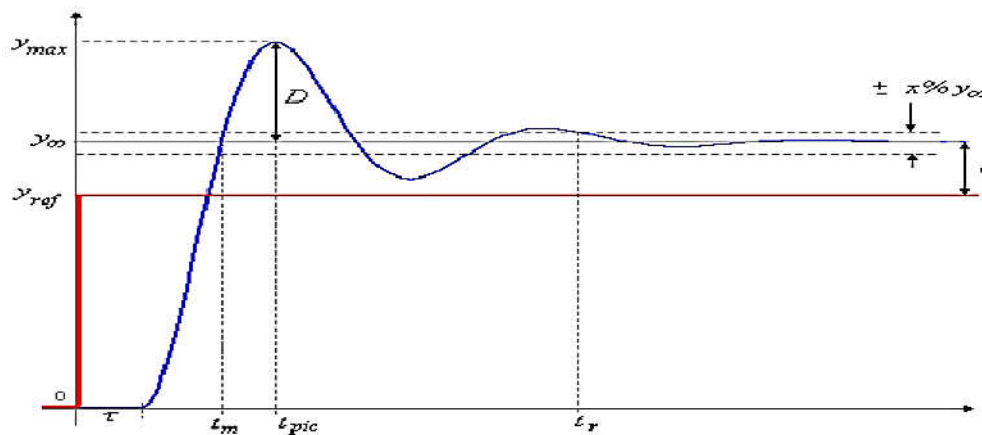


Figure I.12. Réponse indicielle d'un système du second ordre où  $z < 1$

### I .2. Les asservissements :

Un système asservi est un système qui prend en compte, durant son fonctionnement, l'évolution de ses sorties pour les modifier et les maintenir conforme à une consigne.

Cette branche de l'automatique se décompose en deux autres sous branches (séparées artificiellement par l'usage) :

*Régulation*: maintenir une grandeur à une valeur choisie (consigne) indépendamment des variations d'autre grandeur (perturbation).

*Systèmes asservis*: faire varier une grandeur déterminée suivant une loi imposée par un élément de comparaison.[9]

#### I .2.1. Principe et structure général d'un asservissement :

Un asservissement a pour but de désensibiliser un système à une perturbation de sortie. Le principe repose sur un système dont on reboucle la sortie vers l'entrée avec une conversion de signal, on parle alors de système bouclé.

Le principe de base d'un asservissement est de mesurer l'écart entre la valeur réelle de la grandeur physique à asservir et la valeur de consigne que l'on désire atteindre, et ensuite de calculer la commande appropriée à appliquer aux actionneurs de façon à réduire cet écart.

L'inconvénient est que les actionneurs étant pilotés en fonction de l'écart, ainsi le système ne peut agir que lorsque cet écart est concret, c'est-à-dire avec un certain retard, d'où les différents techniques d'asservissement.[10]

## CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

Les asservissements (systèmes commandés en BF) sont constitués dans la majorité des cas de la figure

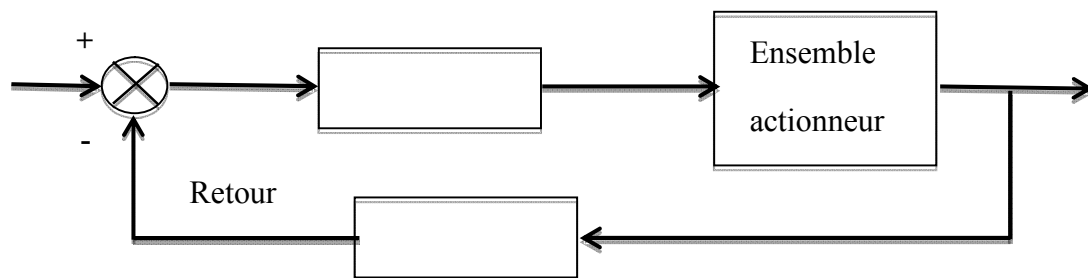


Figure I.13. structure générale d'un asservissement.

### I .2.2.Caractéristiques des asservissement [10]

Un asservissement agit sur plusieurs caractéristiques de la grandeur asservie comme : La position et La vitesse

Certains systèmes complexes optimisent plusieurs de ces caractéristiques pour obtenir des réponses à la fois rapides et précises. Pour des systèmes non mécaniques, on peut également asservir d'autres types de grandeur : tension, phase... La contrainte principale étant de pouvoir les mesurer et d'agir sur elles par une commande efficace.

Le premier problème quand on intègre un système physique dans une boucle fermée, c'est de savoir si l'ensemble va fonctionner de façon stable. Une fois la stabilité est assurée et satisfaisante, c'est-à-dire assez robuste pour résister aux éventuelles fluctuations du système, il est alors réalisable d'améliorer certains aspects de la réponse du système bouclé, notamment la rapidité et précision.

### I .3.La régulation :

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

## **CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation**

---

production : c'est donc un point non négligeable de la chaîne de valeurs d'une installation [11].

### **I .3.1.Objectif de la régulateur :**

Chaque procédé possède ses exigences propres, chaque appareil possède ses propres conditions de fonctionnement. Il est donc indispensable que la régulation soit conçue pour satisfaire aux besoins particuliers liés à la sécurité, aux impératifs de production et aux matériels. La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir. [12]

Cependant, l'objectif de la régulation peut se résumer par ces trois mots clefs : **mesurer, comparer, corriger.**

### **I .3.2.Principe général du règlement :**

Pour réguler un système physique, il faut :

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

### **I .3.3.Structure de principe d'un régulateur :**

- Le régulateur compare la mesure et la consigne pour générer le signal de commande.
- Le signal de mesure est l'image de la grandeur réglée, provenant d'un capteur et transmetteur et transmise sous forme d'un signal électrique ou pneumatique.
- La consigne peut-être interne (fournie en local par l'opérateur) ou externe (via une supervision).
- L'affichage de la commande se fait en % et généralement en unités physiques pour la consigne et la mesure.

### **I .3.4.Eléments constitutifs d'une boucle de régulation:**

### I.3.4. 1. Boucles de régulations :

Une boucle de régulation est un élément d'un système asservis qui lui permet d'atteindre un état associé à une valeur de consigne et de s'y maintenir. Plus simplement, un mécanisme de régulation cherche à réduire l'écart entre la valeur de consigne et une grandeur physique mesurée par un ou plusieurs capteurs dont ce système est équipé.

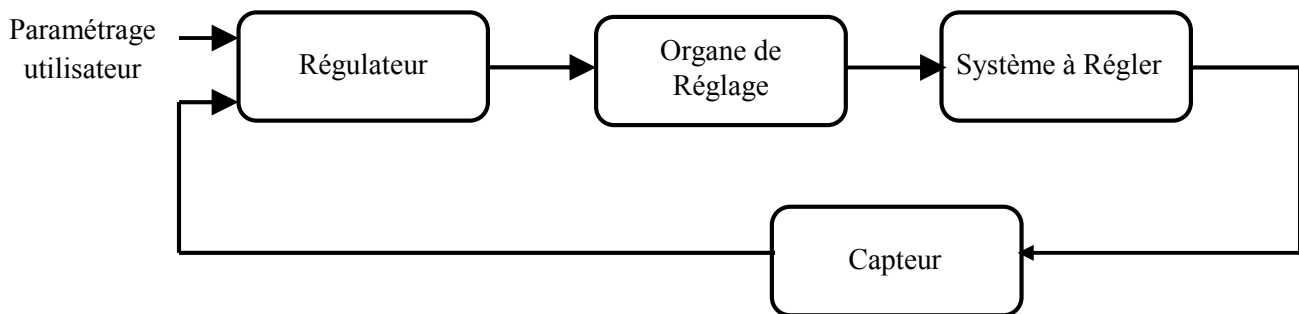


Figure I.14. Schéma de principe d'une boucle de régulation.

**Exemple :** lorsqu'une voiture veut rouler à 100 km/h (consigne), la voiture accélère beaucoup puis plus elle se rapproche de 100 plus elle réduit l'accélération jusqu'à atteindre les 100 (régulation).

Pour chaque système il faut trouver la bonne boucle de régulation. Elle doit déterminer l'erreur puis la corriger, et elle doit respecter les impératifs du système (par exemple pour un robot chirurgical il ne faut que des mouvements très précis).

### I.3.4.2 .Les types de boucles

Après analyse complète du système, il reste à déterminer le type de boucle à mettre en place. Il en existe deux:

- \*la boucle fermée,
- \*la boucle ouverte,

#### A. Régulation à chaîne ouverte :

La boucle ouverte : la variable perturbatrice agit sur la variable réglant. Cette boucle n'est pas à proprement parler une boucle de régulation, mais un complément à la boucle fermée. Elle s'utilise principalement pour anticiper l'évolution d'une perturbation en agissant directement sur l'organe de réglage. Cette boucle est rapide, mais relativement peu précis

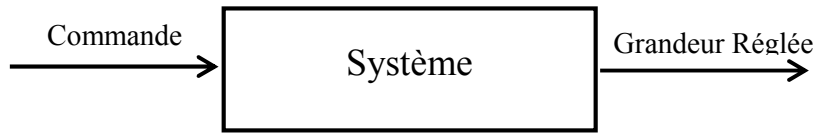


Figure I.15. Boucle ouverte.

## B. Régulation à chaîne fermée :

La boucle fermée : la grandeur réglant agit (par l'intermédiaire du procédé) sur la grandeur réglée. C'est la boucle de régulation de base par excellence. Elle se reconnaît à la présence d'une consigne. Elle peut agir seule ou être agrémentée d'une boucle ouverte et/ou d'asservissement. Cette boucle est précise, mais relativement lente. Quand la consigne est constante, on parle de boucle de régulation, quand elle est constamment variable, on parle de boucle d'asservissement.

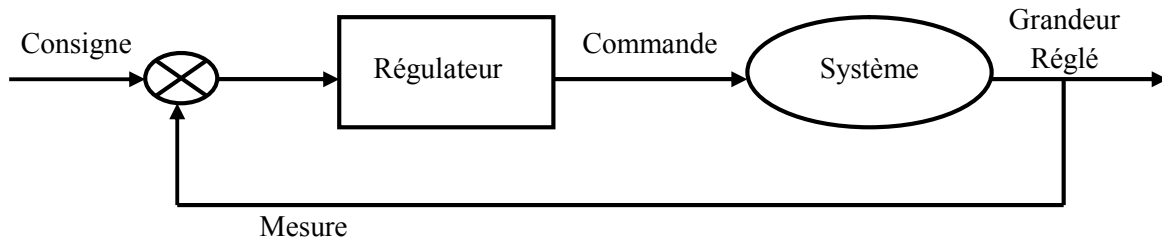


Figure I.16. Boucle fermée.

### I.3.5. Différence entre asservir et réguler

- *Asservissement* : poursuite par la sortie d'une consigne variable dans le temps,
- *Régulation*: la consigne est constante, le système compense les perturbations

### I.5. Le régulateur PID : [13]

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

$$U(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad \text{I. 16}$$

avec l'écart défini comme suit :

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad \text{I. 17}$$

Sa fonction de transfert :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad \text{I. 18}$$

## CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

Le schéma fonctionnel d'un processus réglé à l'aide d'un tel régulateur est donné à la Figure I.16. En plus des signaux déris plus haut, on y trouve la perturbation  $v(t)$ , le bruit de mesure  $n(t)$  et le signal de sortie non bruité  $x(t)$ , consigne  $e(t)$ , .

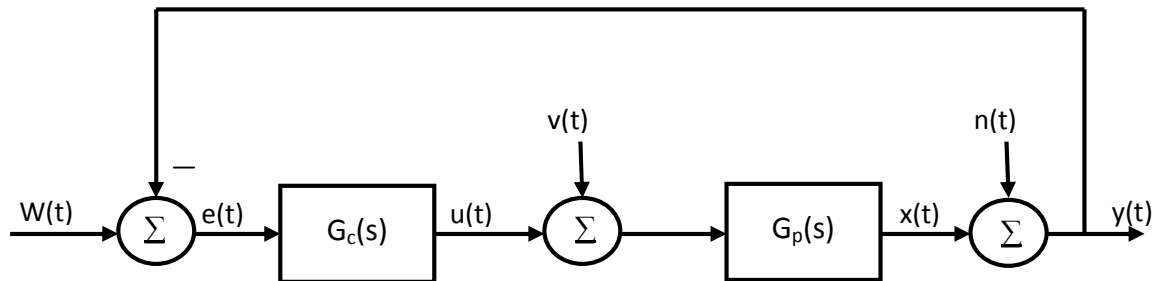


Figure I.17. Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique

### I.5. 1. Types de contrôleurs PID : [14]

Les régulateurs standards les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de la famille *PID* (proportionnel, intégral, dérivé), car ils permettent de régler à l'aide de ces trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse, dépassement...) d'une régulation d'un processus modélisé du premier ordre et du deuxième ordre.

La plupart des régulateurs comportent un algorithme identique à celui désigné par un "*PID*".

- P** : Action proportionnelle.
- I** : Action intégrale.
- D** : Action dérivée

L'adaptation du régulateur à différents systèmes est obtenue en ajustant Les coefficients (paramètres) de l'algorithme.

- Paramètre pour le réglage de l'action proportionnelle.  $K_p$
- Paramètre pour le réglage de l'action intégrale.  $K_i$
- Paramètre pour le réglage de l'action dérivée.  $K_d$

#### I.5. 1.1. Régulateur proportionnel (P)

Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système asservi, il permet donc d'améliorer notablement la précision. Dans le

## CHAPITRE I Généralités sur le système asservi et la régulation

cas d'un correcteur proportionnel, la loi de commande corrigée  $U(t)$  est proportionnelle à l'écart  $e(t)$  Correcteur élémentaire et de base.

- Agit principalement sur le gain du système asservi.
- Permet d'améliorer la rapidité, la précision et la stabilité.

La loi de commande  $s(t)$  est proportionnelle à l'écart entre la consigne  $w(t)$  et la mesure  $y(t)$ :

$$U(t) = K_p e(t) = K_p (w(t) - y(t)) \quad \text{I. 19}$$

$$u(p) = \frac{U(p)}{E(p)} \quad \text{I. 20}$$

La fonction de transfert du correcteur proportionnel est:

$$P = K_p \varepsilon(p) \quad \text{I. 21}$$

Bande Proportionnelle :  $BP\% = 100 \times \frac{1}{K_p}$

Les figures suivantes présentent les réponses d'un système en boucle fermée où le régulateur est de type P de gain K. Elles permettent d'illustrer qualitativement le comportement transitoire et permanent en fonction du choix de K, Faible gain  $K_p$  on a une réponse lente alors on a une grande erreur statique.

Fort gain  $K_p$  on a une action énergique et rapide mais avec risque de dépassement et d'oscillation. Par contre, l'erreur statique est plus faible[11].

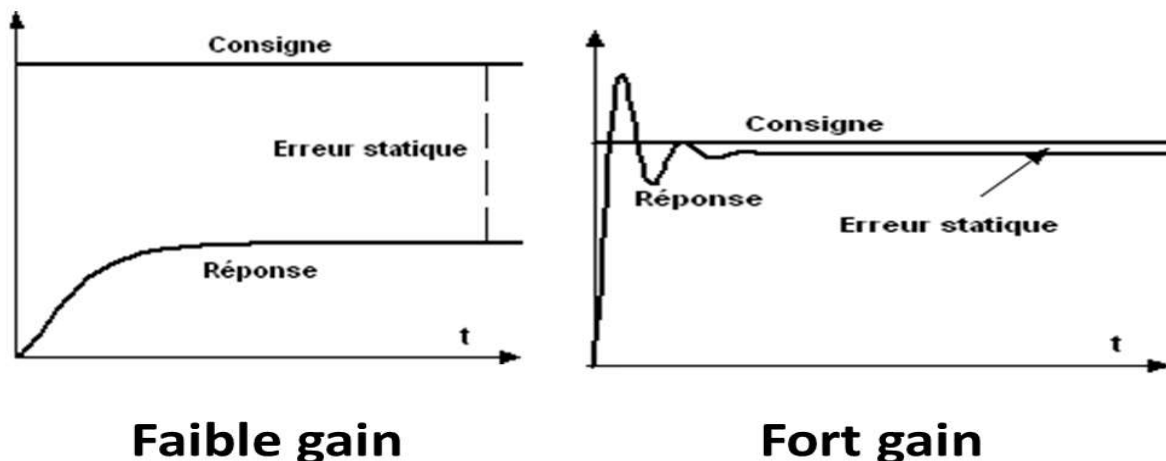


Figure I.18 .les réponses d'un système en boucle fermée où le régulateur est de type

P

## I.5.1.2. Régulateur intégral (I) :

L'action est dite intégrale lorsque le signal de commande est proportionnel à l'intégrale du signal d'erreur. Elle complète l'action proportionnelle et permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique, on diminue l'action intégrale mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage ce qui provoque l'instabilité en état fermé.

✓ Pour un intégrateur pur, la loi de commande  $s(t)$  est de la forme :

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad \text{I. 22}$$

$$u(p) = \frac{1}{pT_i} e(p) \quad \text{I. 23}$$

La fonction de transfert du correcteur dérivé est:

$$I = K_p \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad \text{I. 24}$$

- $T_i$  est appelée la constante de temps d'intégration exprimée souvent en unité de temps. la présence d'une intégration dans la fonction de transfert en boucle ouverte, améliore la précision permanente.
- L'intégration introduit un déphasage de  $-90^\circ$  et risque de rendre le système instable (diminution des marges de stabilité).
- Le coefficient  $1/T_i$  agit comme un gain et sa valeur affecte le comportement transitoire de la boucle fermée[15].

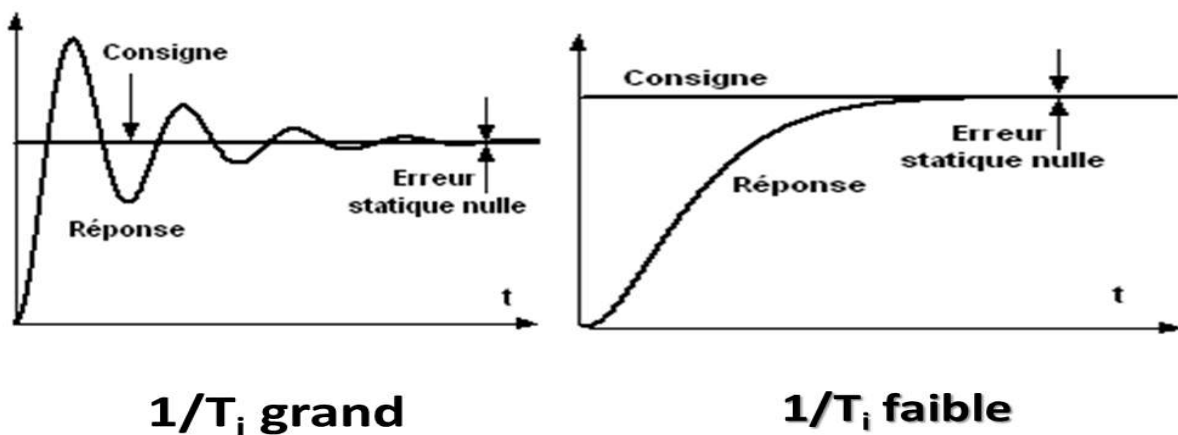


Figure I.19.les réponses d'un système en boucle fermée où le régulateur est de type

## I.5. 1.3. Régulateur dérivatif (D) :

Lorsque le signal de commande est proportionnel à la dérivée du signal, l'action est appelée la dérivée erreur. Action dérivée, qui accélère la réponse en compensant l'inertie due au temps mort et améliore la stabilité de la boucle, notamment en permettant un amortissement rapide. Oscillation due à des perturbations ou à des changements brusques des valeurs de consigne.

La loi de commande est de la forme :

$$u(t) = T_d \frac{u(t)}{E(t)} \quad \text{I. 25}$$

$$u(p) = T_d p E(t) \quad \text{I. 26}$$

La fonction de transfert du correcteur dérivé est:

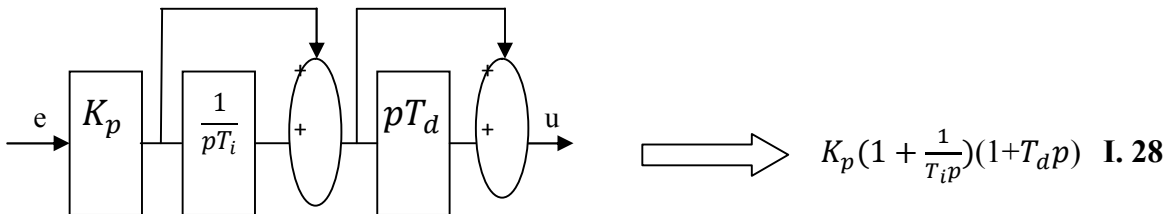
$$D = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad \text{I. 27}$$

## I.5. 2. Structure du régulateur proportionnelle intégrale dérivée PID:

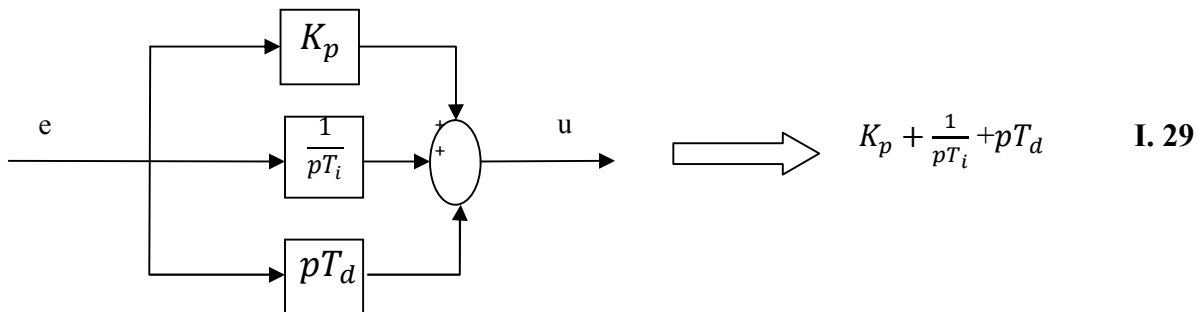
Dans un régulateur PID, il existe plusieurs façons d'associer les paramètres P, I et D.

En effet, le correcteur PID peut avoir une structure série, parallèle ou mixte [12]

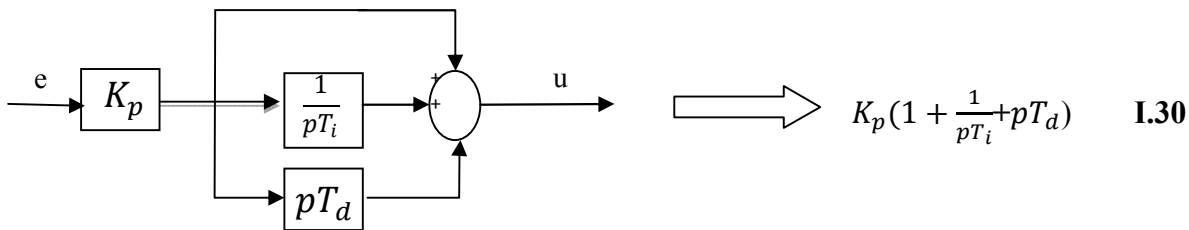
### A. Structure Série :



### B. Structure Parallèle :



## C. Structure mixte :



### I.5.3. Avantages et Inconvénients du régulateur PID

L'action conjuguée PID permet une régulation optimale en associant les avantages de Chaque action : la composante P réagit à l'apparition d'un écart de réglage, la Composante D s'oppose aux variations de la grandeur réglée et stabilise la boucle de Régulation et la composante I élimine l'erreur statique. Et c'est pour cela que ce type De correcteur est le plus utilisé en milieu industriel.

Malgré son utilisation sur le niveau l'industriel, cependant que le régulateur PID a quelques avantages et inconvénients [16]

Correcteurs	Avantages	inconvénients
P	Simplicité, meilleur précision	Risque d'une instabilité si $kc \gg 1$
PI	Simplicité Erreur statique nulle	Système parfois lent en BF
PID	Très utilisé en industrie Action PI+PID	Réglage des paramètres plus difficile

**Tableau I.1. Avantages et inconvénients d'un régulateur PID**

## Conclusion :

Ce chapitre est consacré à étudier la notion de système et leur performance et ses type , notion de régulation et asservissement ainsi que les différents types des régulateurs (P ,I ,D , PID ) L'organisation PID a été étudiée de manière détaillée et ses structures, avantages et inconvénients ont été discutés..

## Introduction :

La production de l'énergie électrique et sa transformation en énergie mécanique sont la base de la structure industrielle. Cette transformation est possible grâce aux moteurs électriques à courant alternatif et à courant continu.

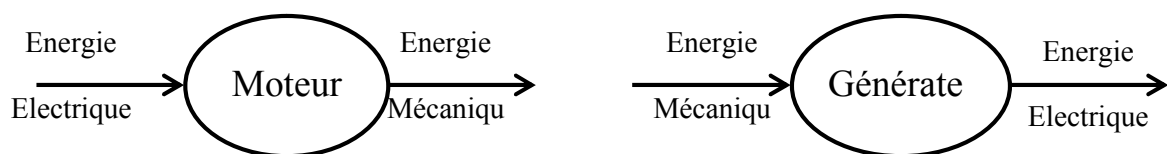
Les moteurs à courant continu sont utilisés dans des applications exigeant une variation de vitesse entre de grandes limites et dans des applications de précision.

Dans ce chapitre, on sait ce qu'est le moteur à courant continu et ses Constitution ainsi que les types d'excitation et le modélisation MCC excitation indépendante est étudiée de ce moteur .

### II.1. Description de la machine à courant continue MCC :

Le moteur à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un adaptateur électromécanique qui permet une conversion de puissance bidirectionnelle entre une installation électrique couverte par un courant continu et un dispositif mécanique, à travers lequel l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique.[18]

La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique est appelée moteur et la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est appelée générateur .



### II.2. Constitution de la machine à courant continu MCC :

La machine à courant continu est constituée de trois parties principales, l'inducteur (stator), l'induit (rotor) et le dispositif collecteur/ balais, :

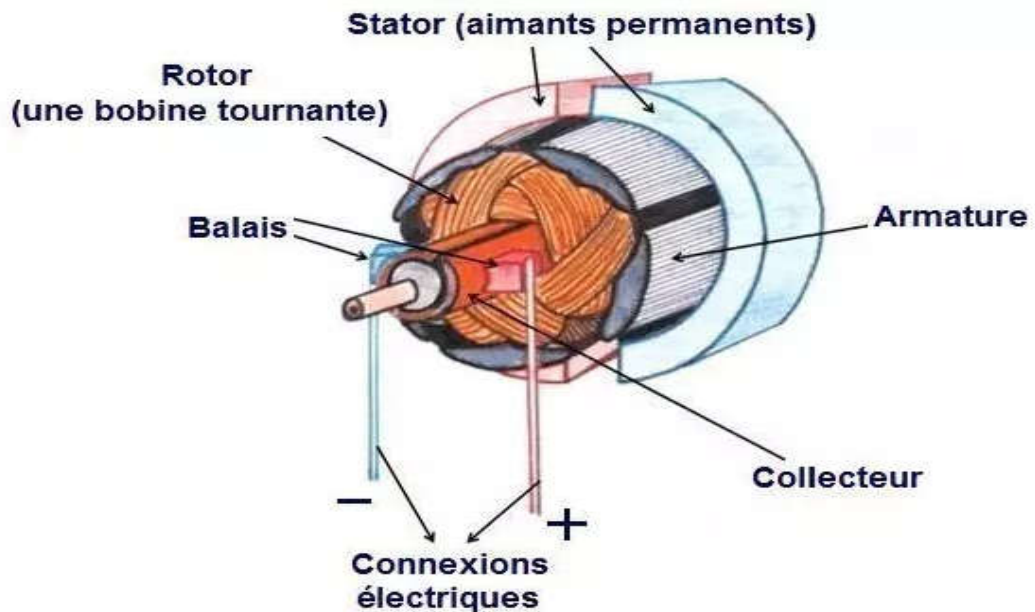


Figure II.1. Structure interne de la machine à courant continu (MCC).

### II.2.1. L'inducteur (Stator) :

Est une partie fixe destinée surtout à créer le flux magnétique (circuit d'excitation) soit par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents. Et il est canalisé dans la machine par des matériaux ferromagnétiques (parties hachurées). Il est aussi appelé "Stator" en référence au fonctionnement en génératrice de cette machine.

Lorsque la bobine passe un flux continu, elle génère un champ magnétique (champ inducteur) dans le rotor.

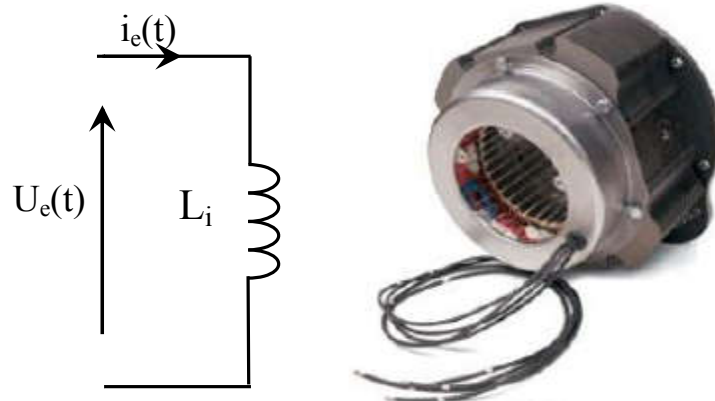


Figure II.2 . Schéma électrique de l'inducteur.

$U_e(t)$  : tension aux bornes de l'inducteur.

$L_i$  : inductance de l'inducteur du MCC.

$i_e(t)$  : Courant d'excitation

### II.2.2. L'induit (Rotor) :

C'est la partie mobile appelée rotor (partie tournante de la machine) où l'énergie mécanique se transforme en énergie électrique (génératrice) ou vice versa (moteur), il est le siège des forces nécessaires à son entraînement. Il est composé de spires placées dans des encoches situées à la périphérie d'un empilement de tôles cylindriques. Les extrémités des spires sont reliées sur les lames du collecteur.

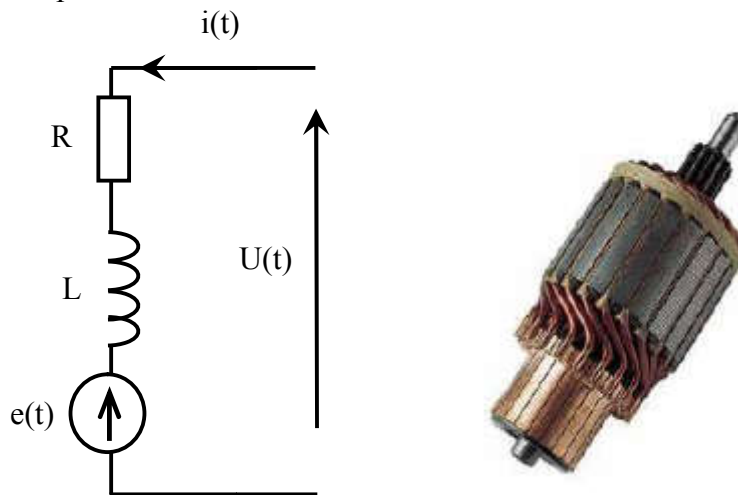


Figure II.3 . Schéma l'induit d'un MCC .

$U(t)$  : tension aux bornes de l'induit.

$R$  : résistance de l'induit du MCC.

$L$  : inductance de l'induit du MCC.

$e(t)$  : force électromotrice.

$i(t)$  : Intensité traversant le moteur

II.2.3. Le dispositif collecteur/ balais :

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit.

- ✓ Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.
- ✓ Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.

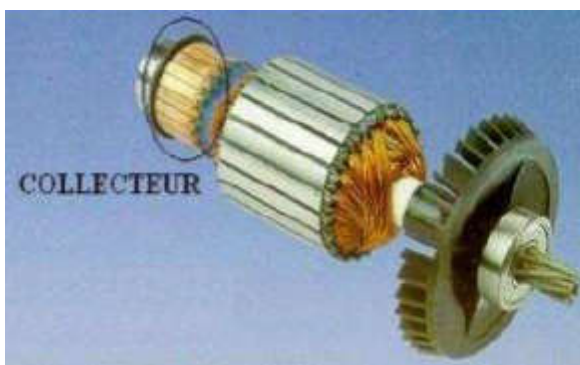
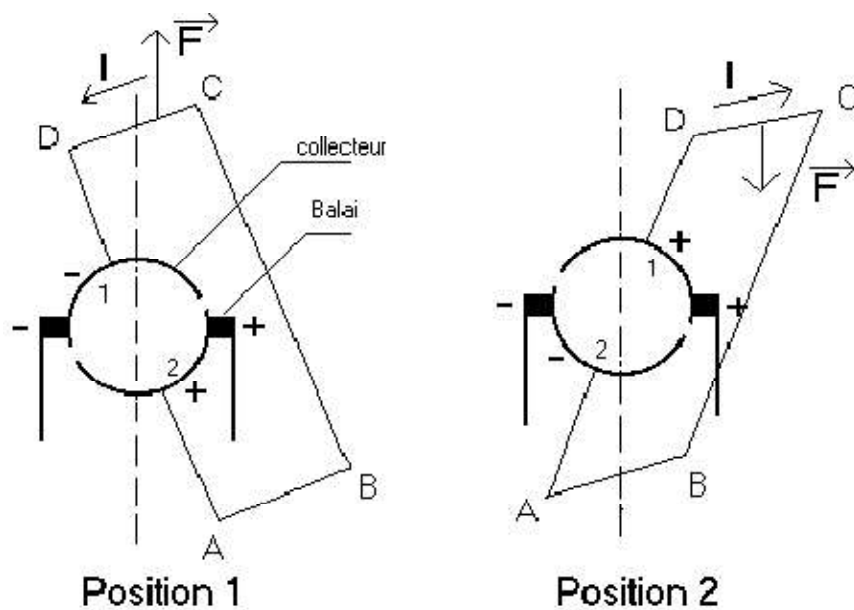


Figure II.4 : Collecteur d'un MCC

Figure II.5 : Balais d'un MCC

II.3. Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu :



Si l'inducteur parcouru par un courant  $I$ , est placé dans un champ magnétique  $B$  (flux magnétique  $\Phi$ ), il est soumis à des forces de Laplace  $F = B.l.I$ .

Ces forces créent un couple de rotation qui fait tourner l'induit. Quand la spire a fait un demi-tour, il faut inverser la polarité pour inverser le sens des forces et continuer le mouvement. Ce sera le rôle du collecteur.

dans la position 1, le courant parcourt la spire dans le sens ABCD et dans le sens contraire pour la position 2, grâce au système de balai collecteur.

**II.4. Différents modes d'excitation d'un MCC :**

Il existe plusieurs moyens d'effectuer l'excitation du moteur :

**II.4.1. Excitation série :**

Excitation en série moi quand l'inducteur est en série avec l'induit et une seule source d'énergie est suffisante. Le sens de rotation est modifié par la commutation des liaisons de bras et de catalyseur. l'inducteur possède une résistance plus faible que celle des autres types de machines

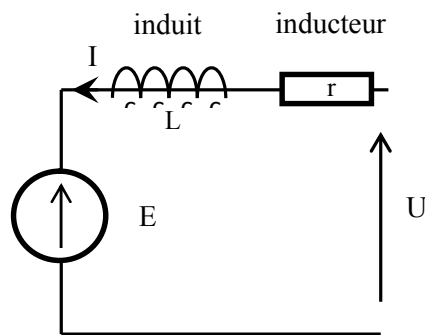


Figure II.6 : Schéma électrique du MCC a excitation série

**II.4.2. Excitation shunt (en dérivation):**

Excitation en shunt moi quand l'inducteur est en parallèle avec l'induit , et l'inducteur (stator) alimenté par la tension de sortie de l'induit (rotor) (Figure II.7) en assurant la rotation du l'induit par une vitesse constante donc on n'a pas besoin d'excitation externe pour l'inducteur.

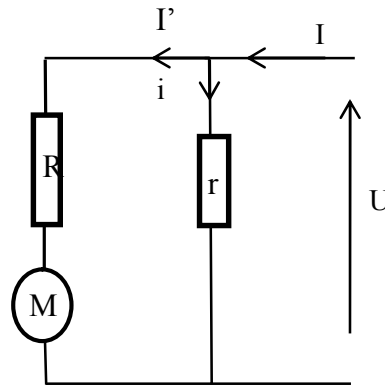


Figure II.7. Schéma électrique du MCC a excitation shunt (en dérivation)

**II.4.3.Excitation compound (composé) :**

Le moteur à excitation composée comporte un inducteur série et un inducteur shunt. Ce genre de moteur peut être branché en longue dérivation ou en courte dérivation

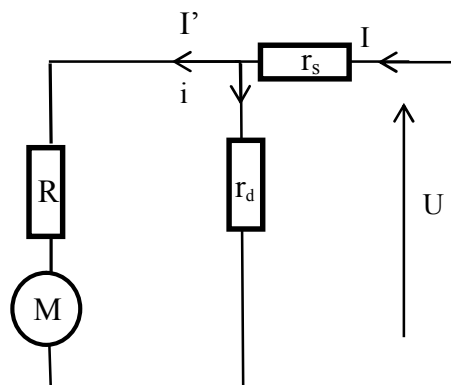


Figure II.8.Schéma électrique du MCC a excitation compound (composé).

**II.4.4.Excitation indépendante (séparé) :**

Dans cette type d'Excitation l'inducteur est séparé on l'induit, et requiert deux sources d'énergie séparées. Le courant de la bobine d'inducteur provient d'une source indépendante de la source principale. La direction de rotation est modifiée par permutation des bornes de l'induit ou de l'inducteur.

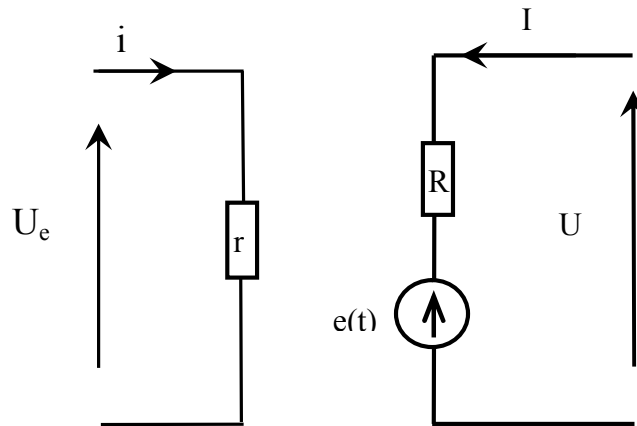


Figure II.9. Modélisation électrique d'un moteur à excitation séparée

### II.5.Modélisation d'un MCC à excitation indépendante

L'utilisateur du moteur s'intéresse avant tout aux caractéristiques mécaniques, qui : donne le couple produit en fonction de la vitesse. Il faut aussi connaître le courant absorbé en fonction du couple demandé : c'est la caractéristique électromécanique que nous utilisons aussi les caractéristiques de vitesse

On peut modéliser le moteur à courant continu par le biais d'équations électrique, électromécanique et mécanique.

Ces trois ensembles d'équations nous permettront de mieux comprendre ce moteur dans son ensemble. Fonctionnement réel. En termes électriques, on peut dire qu'un moteur à courant continu est Défini par le circuit d'induit et le circuit inductif ; l'induit peut être considéré comme résistances et inductances en série avec une source de tension contrôlée et proportionnel à la vitesse

Du coté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie del'induit augmentée de celui de la charge entraînée.Figure (II.10) montre le schéma équivalent du moteur à courant continu [19]

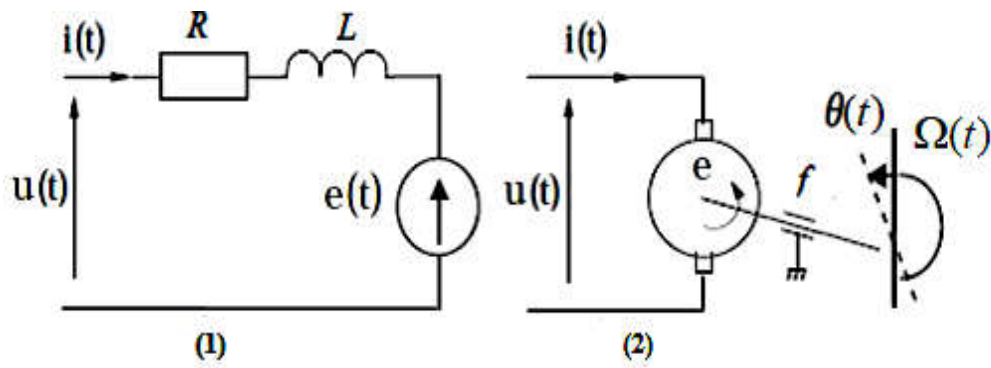


Figure II.10 . Schéma équivalent d'un moteur à courant continu.

D'après l'application des lois de Newton et Kirchhoff on a pu extraire les équations différentielles du premier ordre suivantes :

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad \text{II- 1}$$

Avec :

U(t) : tension aux bornes de l'induit.

R : résistance de l'induit du MCC.

L : inductance de l'induit du MCC.

e(t) : force électromotrice.

i(t) : Intensité traversant le moteur

La vitesse de rotation du rotor est proportionnelle à la force électromotrice, sa formule est :

$$e(t) = k_e \Omega(t) \quad \text{II-2}$$

$k_e$  : la constante électrique du moteur

$\Omega(t)$ : la vitesse de rotation .

D'après les principes de base de la dynamique, on a :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_u - C_r \quad \text{II-3}$$

$$C_u = K_c i(t) - C_p \quad \text{II- 4}$$

$$C_r = f \cdot \Omega(t) \quad \text{II- 5}$$

Avec :

J : Moment d'inertie de l'axe du rotor.      f : Coefficient de frottement visqueux.

C<sub>r</sub> : Couple résistant.      K<sub>p</sub>: Couple de perte

K<sub>c</sub> : Constante de couple.      C<sub>u</sub> : Couple moteur généré

### II.5.1.Fonction de transfert du moteur :

On utilise l'outil mathématique « transforme de Laplace » qui présente l'intérêt de transformer une équation différentielle en équation algébrique.

$$U(p) = R i(p) + Lp i(p) + E \quad \text{II- 6}$$

$$E = K_e \Omega(p) \quad \text{II-7}$$

$$Jp \Omega(p) = C_u - C_r \quad \text{II- 8}$$

On remplace E dans l'équation (II- 9) et C<sub>u</sub> et C<sub>r</sub> par leurs valeurs on obtient:

$$U(p) = R i(p) + Lp i(p) + K_e \Omega(p) \quad \text{II- 10}$$

L'équation (II- 11) devient:

$$Jp \Omega(p) = K_c i(p) - C_p - C_r \quad \text{II- 12}$$

Alor  $\Omega(p)$  :

$$\Omega(p) = \frac{K_c i(p) - C_p}{Jp + f} \quad \text{II- 13}$$

On fait sortir l'expression de i(p):

$$i(p) = \frac{Jp + f}{K_c} \left( \Omega(p) + \frac{C_p}{Jp + f} \right) \quad \text{II- 14}$$

On injecte(p) dans (II- 15) :

$$U(p) = \Omega(p) \left[ \frac{(R+Lp)(Jp+f)}{K_c} + K_e \right] + \frac{R+Lp}{K_c} C_p \quad \text{II-16}$$

Supposant que la perturbation  $C_p$  (moment du couple de perte) est négligeable devant le moment du couple électromagnétique ( $K_c \cdot i(t)$ ), alors on prend  $C_p$  nulle pour simplifier le système

donc :

$$U(p) = \Omega(p) \left[ \frac{(R+Lp)(Jp+f)}{K_c} + K_e \right] \quad \text{II- 17}$$

La fonction de transfert  $H(P)$  du système est le rapport entre la vitesse de rotation  $\Omega(p)$  (qui est la sortie du système) et la tension entrant au ce dernier  $U(p)$ .

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{(R+Lp)(Jp+f)+K_cK_e} \quad \text{II- 18}$$

Pour trouver le gain statique « k », la pulsation propre « $\omega_0$ » et le facteur d'amortissement « $\varepsilon$ » on réécrit la fonction de transfert sous forme canonique :

$$H(p) = \frac{K_c / (Rf + K_c K_e)}{\left( \frac{LJ}{Rf + K_c K_e} \right) p^2 + \left( \frac{RJ + fL}{Rf + K_c K_e} \right) p + 1} \quad \text{II- 19}$$

Cette relation correspond à un système de 2ème ordre avec :

Le gain statique

$$K = K_c / (Rf + K_c K_e) \quad \text{II- 20}$$

La pulsation propre

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{Rf + K_e K_c}{LJ}} \cdot \frac{2\pi}{60} \quad \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad \text{II- 21}$$

Le facteur d'amortissement

$$\varepsilon = \omega_0 \frac{RJ+fL}{2(Rf+K_c K_e)}$$

II- 22

### II.5.2.La plaque signalétique :

Le moteur est fixé avec une plaque signalétique, et la plaque signalétique porte les conditions utilisation et des informations pour nous aider à comprendre ces moteur

Les valeurs numérique du MCC :

Tension nominal	24V
Tension maximale	12V
Résistance aux bornes	R=1.2 $\Omega$
Inductance	L=1.5Mh
Moment d'inertie rapporté au rotor	J=6.10 <sup>-5</sup> kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement visqueux	f=4. 10 <sup>-5</sup> kg.m <sup>2</sup> /s
Constante de couple	k <sub>c</sub> =60. 10 <sup>-3</sup> Nm/A
Constante de vitesse	k <sub>e</sub> =60. 10 <sup>-3</sup> Nm/A
Couple de pertes	c <sub>p</sub> = 10 <sup>-2</sup> Nm

Tableau II .1 :Valeurs numériques d'un moteur à courant continu

### II.5.3.Modèle mathématique de la réponse en vitesse :

On a pu modéliser le moteur sous forme schéma bloc à travers la transformer de Laplace obtenue ,nous obtenons le modèle mathématique de la réponse en vitesse du moteur électriquequi est donné par la figure suivante :

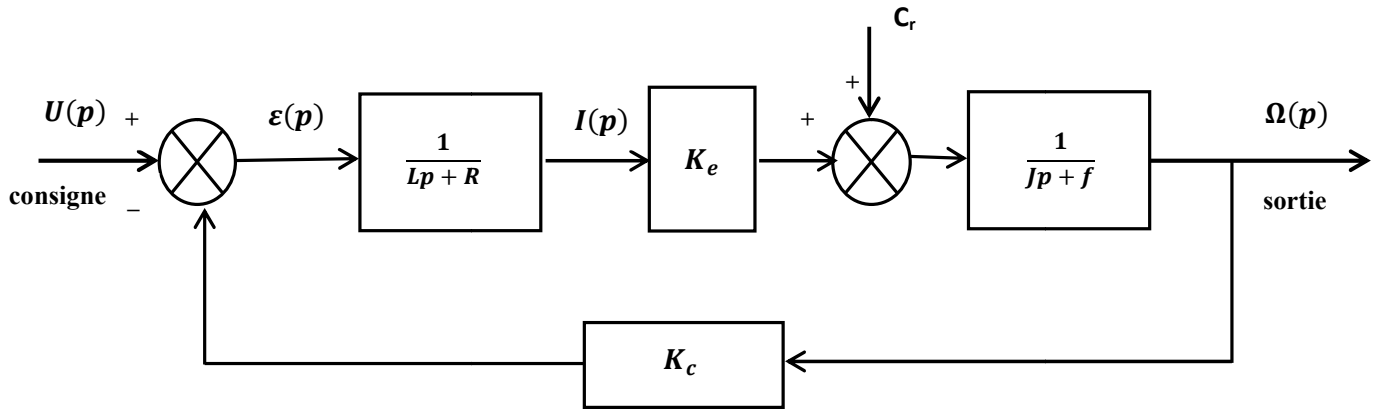


Figure II.11.Schéma bloc du Modèle de moteur électrique en vitesse

Le résultat obtenu est présenté dans la figure suivante :

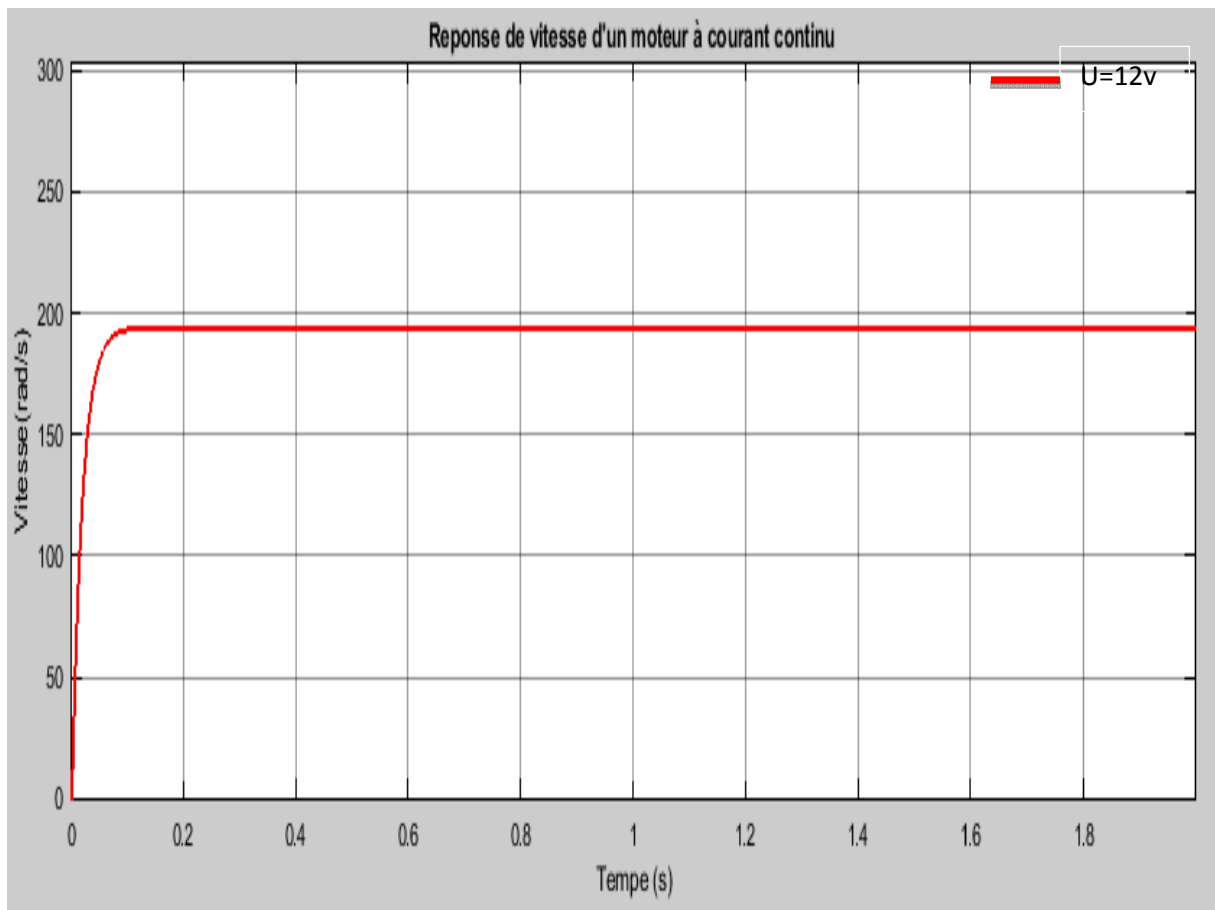


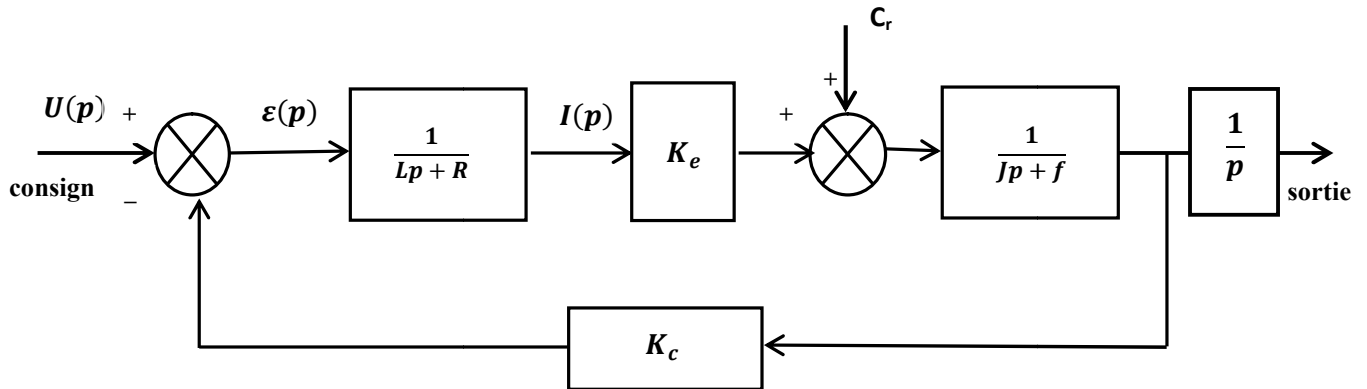
Figure II.12.Modélisation sous MATLAB de la réponse en vitesse

D'après l'équation (II- 23), le système modélisé soit du second ordre, lorsque l'inductance interne est négligeable devant la résistance interne (ce qui est généralement

le cas) il s'apparente à un système du premier ordre. On observe bien sur la figure(II.12) moteur change de vitesse de rotation pour chaque valeur de la tension d'entrée, d'où la vitesse de rotation est proportionnelle à la tension d'entrée

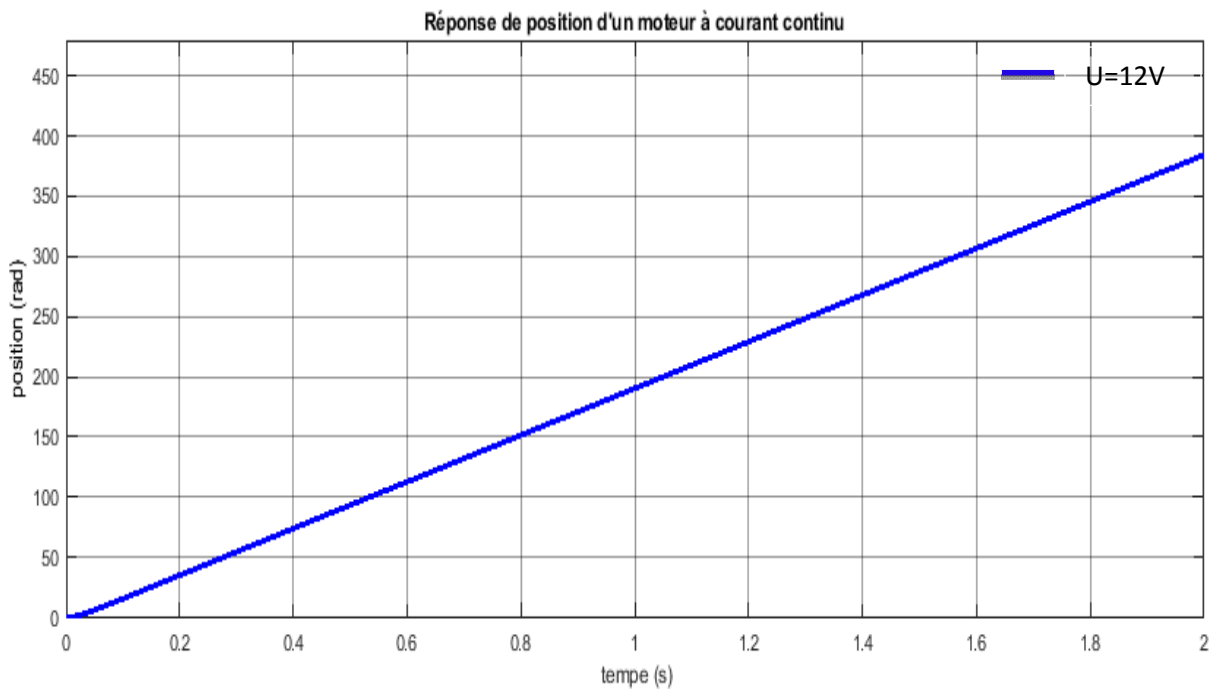
**II.5.4.Modèle mathématique de la réponse en position :**

La figure ci-dessous représente le modèle mathématique de la réponse de position du moteur électrique



**Figure II.13 .Schéma bloc du modèle de moteur électrique en position**

Après la modélisation sous MATLAB on a obtenus les résultats illustrés par la figure suivante :



**Figure II.14.Modélisation sous MATLAB de la réponse en position**

D'après la figure (II.14) en remarque que la réponse en position est un rampe , cela signifie que le système est instable dans l'asservissement en position , d'où il nécessite une régulation pour stabiliser la réponse en position et d'améliorer les performances en vitesse .

## **II.6. Avantages et inconvénients des moteurs à courant continu [20]**

L'avantage principal du moteur à courant continu est la facilité de commande de sa vitesse. On peut citer d'autres avantages :

- Moteur entièrement feuilleté rotor et stator.
- Haute capacité de commutation dans les transitoires de courant.
- Encoches inclinées.
- Temps de réponse rapide ; Rendement élevé.
- Porte balais radiaux à pression constante.

L'inconvénient majeur est lié à la nécessité du système collecteur-balais. Sa présence est la source de problème de la commutation, d'étincelles, elle limite la vitesse de rotation et elle entraîne la nécessité d'une maintenance contraignante. La présence de l'induit au rotor, à l'intérieur du stator, ne facilite pas les échanges thermiques.

Enfin, le prix des moteurs à courant continu est plus élevé que celui de ses concurrents

## **II.7. Domaines d'utilisation des moteurs à courant continu :**

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans [21] :

- L'industrie : Laminoirs, enroulements (aciéries, papeteries), machine de refend age (découpe de tôles pour raccourcir la largeur d'une bobine), machine à tréfilage (réduction de la section d'un fil par traction mécanique).
- Le transport : Moteurs de traction ferroviaires, remontées mécaniques.
- La manutention : Levage (portiques dans la construction navale ou aéronautique, grues), ascenseurs.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre , nous avons fait un choix d'un moteur à courant continu à excitation indépendant pour la modélisation cela est dû à plusieurs raisons le plus utilisé dans l'automatique et la robotique, pour ses dimensions et sa non-influence de la charge sur la vitesse ,ainsi que sa simplicité de polarisation.

Lors de la modélisation sous MATLAB on a constaté que la réponse en position est instable alors que la réponse en vitesse converge vers la stabilité donc elle nécessite une commande pour stabiliser ce système

### Introduction :

Le réglage de paramètre de correcteur PID ( $K_p, T_i, T_d$ ) est un problème essentiel dont l'objectif est de mettre en œuvre des méthodes simples, rapides et suffisamment précises, ce problème a bien sûr débouché sur de nombreuses méthodes.

On présente dans le cadre de ce chapitre l'étude théorique sur la commande PID classique et la commande PSO (Particle Swarm Optimization) intelligente.

### III.1. commande classique :

#### III.1.1. Régulateur PID :

Aujourd'hui, le correcteur PID est la structure de commande la plus utilisée dans les boucles de rétroaction. Plus de 90% des boucles d'asservissement sont des correcteurs PID.

Généralement, le correcteur PID classique est implémenté dans des systèmes de commande à retour unitaire classique [22]

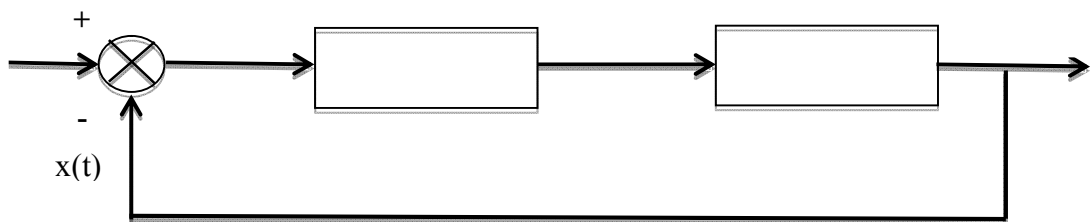


Figure III.1. Système de commande à retour unitaire classique

Où :

$U(t)$  : Le signal de commande

$E(t)$  : l'écart résultant de la différence entre la consigne  $r(t)$  et le signal de retour  $x(t)$

$Y(t)$  : La grandeur à commander

$C(s)$  : La fonction de transfert du correcteur

$G(s)$  : La fonction de transfert de système

#### III.1.2. Méthodes de synthèse du régulateur PID :

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de calculer les paramètres du régulateur PID comme à titre d'exemple on peut citer:

- La méthode de Halman.
- La méthode de Cohen-Coon.
- La méthode de Chien-Hrones-Reswick.
- La méthode Ziegler –Nichols [22]

Dans ce mémoire nous allons utiliser la méthode de Ziegler-Nichols pour la synthèse des paramètres du régulateur PID

### III .1.3.Méthode de Ziegler –Nichols :

En 1942 Ziegler et Nichols ont proposé deux approches expérimentales destinées à fixer rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouvert du système à régler, alors que la deuxième exige d'amener le système en boucle fermée à sa limite de stabilité [23]

#### III .1.3.1.Méthode de la réponse indicielle :

Pour obtenir les paramètres du régulateur PID, il suffit d'enregistrer la réponse indicielle du processus seul (c'est-à-dire sans le régulateur), puis de tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe. On mesure la constante de temps  $T$ , le retard apparent  $L$  correspondant au point d'intersection de la tangente avec l'abscisse et le gain  $K$  [22]

Il s'agit de la méthode Ziegler la plus ancienne, basée sur l'observation de la réponse du processus et la connaissance de la structure du correcteur. Le modèle supposé du système à commander est :

$$G(S) = \frac{K e^{-sL}}{Ts + 1} \quad \text{III.1}$$

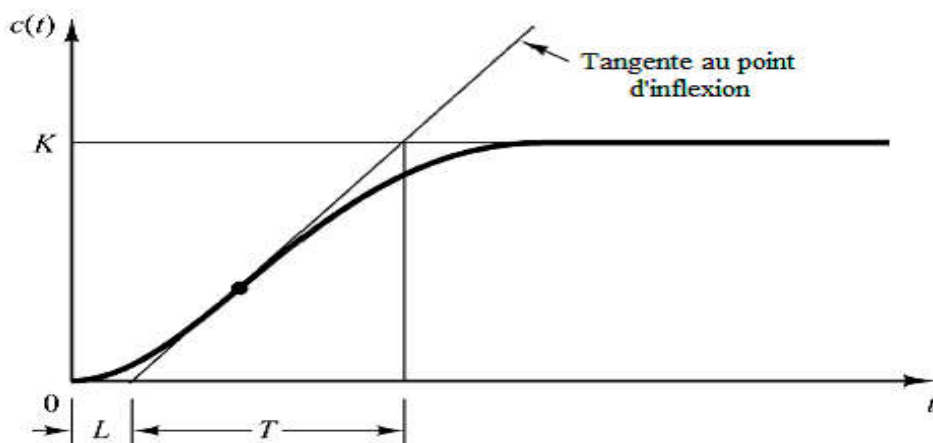


Figure III.2. La sortie d'un système stable et aperiodique à une entrée en échelon

On peut alors calculer les paramètres du régulateur P , PI ou PID à l'aide des recommandations du **tableau 01**

PID type	$K_P$	$T_i=K_P/K_i$	$T_d=K_d/K_P$
<b>P</b>	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
<b>PID</b>	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5 L$

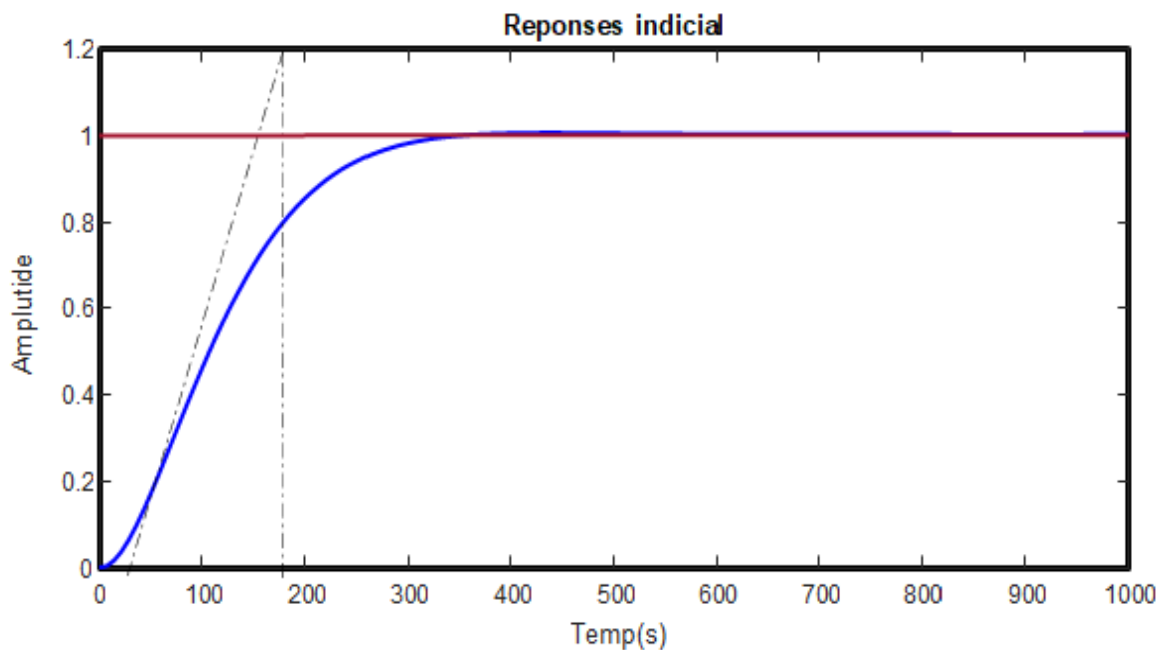
**Tableau III.1. Paramètres PID obtenus à partir de la méthode de la réponse indicielle(ZN) [15]**

**Application :**

Soit la fonction de transfert suivante :

$$G(s) = \frac{1}{6300s^3 + 4775s^2 + 120s + 1} \quad \text{III-1}$$

La réponse indicielle de Y(s) est représentée sur la figure



**Figure III.3 : Réponse indicielle de la fonction de transfert G(s)**

A partir de la **figure (III.3)** on trouve :

$$\left\{ \begin{array}{l} K=1 \\ L=30 \\ T=150 \end{array} \right.$$

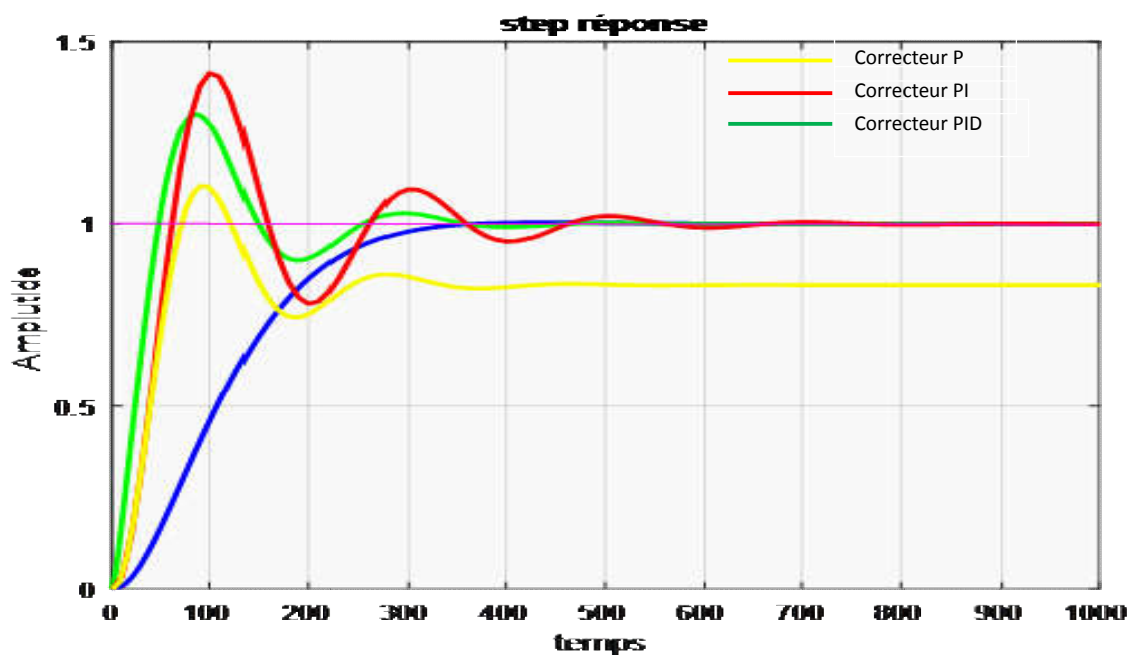
La fonction de transfert est :  $y(s) = \frac{1e^{-30s}}{1+150s}$  III- 2

Donc ,On applique directement les relations de la **table(III.1)**. Le régulateur PID a donc les coefficients suivants :

Type de contrôleur	$K_p$	$T_i=K_p/K_i$	$T_d=K_d/K_p$
<b>P</b>	5	$\infty$	0
<b>PI</b>	4.5	100	0
<b>PID</b>	6	60	15

**Tableau III .2.Les valeurs calculées  $K_p$ ,  $T_i$  et  $T_d$  avec la méthode Ziegler & Nichols**

A partir des paramètres  $K_p$ ,  $T_d$  et  $T_i$ , obtenus on calcule les correcteurs P, PI et PID à introduire. Après simulation du système pour les différents régulateurs, on obtient les réponses présentées par la **figure (III .4)**



**Figure III .4.Réponse corrigée avec les correcteurs P, PI et PID par la méthode Ziegler& Nichols de la fonction de transfert G(s)**

D'après la figure ci-dessus nous avons les caractéristiques suivant :

	Temps de montée (s)	Dépassement(%)	Erreur statique
<b>P</b>	71 .4	10	0.172
<b>PI</b>	61.9	41	0
<b>PID</b>	46 .8	30	0

Tableau III .3 . Les caractéristiques d'un contrôleur P , PI et PID appliqué à G(s)

*Remarque :*

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

**III .1.3.2.Méthode du point critique :**

Cette méthode est basée sur la connaissance du point critique du processus. Expérimentalement, on boucle le processus sur un simple régulateur proportionnel dont on augmente le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente; on se trouve ainsi à la limite de stabilité. Après avoir relevé le gain critique  $K_{PC}$  du régulateur et la période d'oscillation  $T_C$  de la réponse[22]

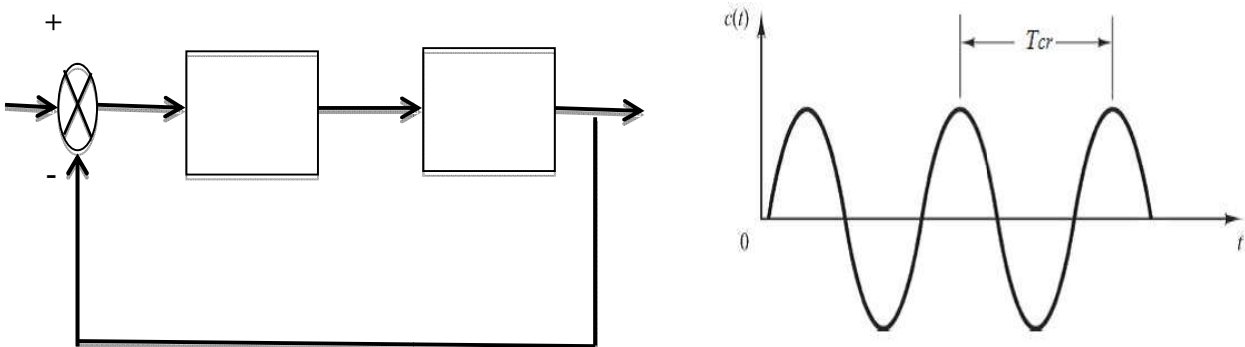


Figure III .5. paramètres Ziegler –Nichols en boucle fermée.

On peut alors calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide des recommandations du **tableau 04**

PID type	$K_P$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_{PC}$	*	*
PI	$0.45 K_{PC}$	$0.83 T_C$	*
PID	$0.6 K_{PC}$	$0.5 T_C$	$0.125 T_C$

Tableau III.4. Paramètres PID obtenus à partir du point critique[15]

### III.2. Commande Intelligente :

Le contrôle intelligent par notre étude est PSO où il est un moyen de calcul pour améliorer le problème en optimisant les solutions candidates, et est basé sur la recherche aléatoire de groupe de particules .Voici une étude théorique détaillée de lui :

#### III.2.1.Optimisation Par Essaims de Particule (PSO )

L'optimisation d'essaim de particules (PSO) est une technique stochastique basée sur la population d'optimisation développée par Dr. Eberhart et Dr. Kennedy en 1995, inspiré par le comportement social des oiseaux s'assemblant ou le banc de poissons [3].



(a)



(b)



(c)

Figure III.6 : Groupe de : (a) oiseaux, (b) poissons ,(c) fourmis .

Depuis sa création, PSO est devenu de plus en plus populaire parmi les chercheurs et les praticiens comme une technique robuste et efficace pour résoudre les problèmes d'optimisation difficiles. Dans le PSO, les différentes particules d'un essaim représentent des solutions potentielles, qui se déplacent par le problème, creusant dans l'espace à la recherche d'une solution optimale, ou plutôt bonne. La vitesse de chaque particule est ajustée en pondérant celle de l'instant précédent, la différence entre la position précédente et sa meilleure position puis la différence entre la position précédente et la meilleure position globale. Comme pour la position, il est simplement mis à jour par l'ajout de la vitesse actuelle et de la position au moment précédent. [24]

PSO réalise de meilleurs résultats plus rapidement, par rapport aux autres méthodes. Une autre raison de l'attrait de l'PSO est qu'il n'y a pas beaucoup de paramètres à ajuster. [25]

### III .2.2.Principe du PSO :[26]

L'essaim de particules est une population d'agents individuels, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, lorsqu'elle a une position (le vecteur de solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines » (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage.

Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, « survole » l'espace de recherche, à la recherche de l'optimum global. Le déplacement d'une particule dépend des trois éléments suivants :

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- Une composante sociale: la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

La Figure III.6 montre la stratégie de déplacement des particules.

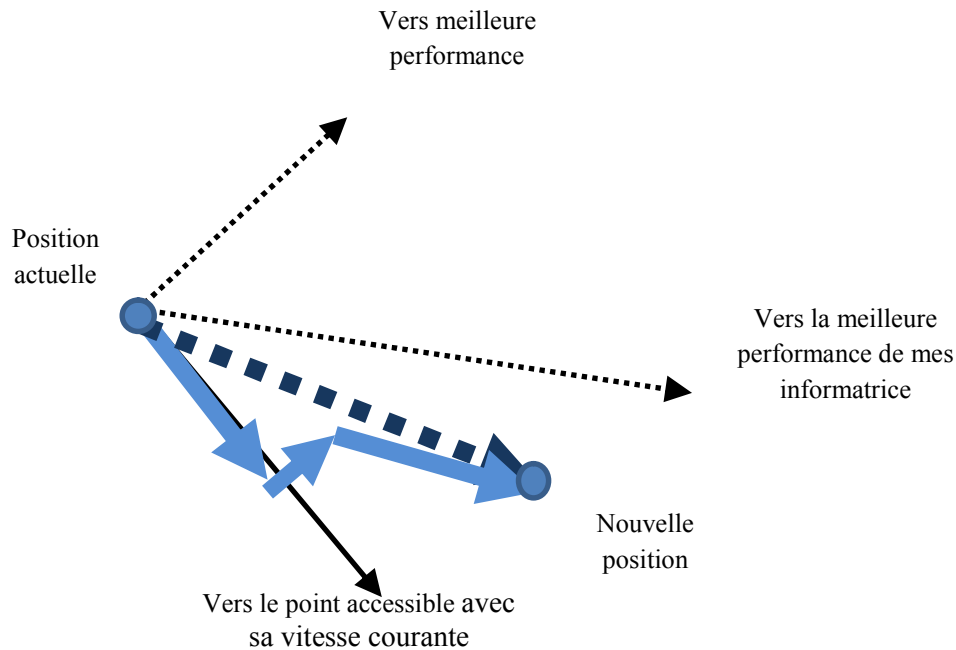


Figure III.6 Schéma de principe du déplacement d'une particule.

### III.2.3. Formulation mathématique de PSO :

Considérons une population (Swarm) composée de  $K$  particules. Les équations de formalisation du mouvement des particules sont fournies par:

$$V_i(t+1) = W \cdot V_i(t) + \varphi_1 \cdot r_1(t) \cdot (P_{bi}(t) - X_i(t)) + \varphi_2 \cdot r_2(t) \cdot (P_g(t) - X_i(t)) \quad \text{III- 3}$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t) \quad \text{III- 4}$$

Chaque particule  $P_i$  ( $i=1,2,\dots,K$ ) dans le Swarm est caractérisé par :

- 1) Sa position courante  $X_i(t) \in \mathcal{R}^d$ , qui réfère à une solution candidate pour le problème

d'optimisation considéré à l'itération  $t$ .

- 2) Sa vitesse  $V_i(t) \in \mathcal{R}^d$ .

- 3) La meilleure position  $P_{bi}(t) \in \mathcal{R}^d$  identifiée durant sa trajectoire antécédente. Soit  $P_g(t) \in \mathcal{R}^d$  la meilleure position globale identifiée dans le processus de recherche pour toutes les particules dans le swarm. La position optimale est mesurée à l'aide d'une fonction de remise en forme définie selon le problème d'optimisation. Lors de l'optimisation, les particules se déplacent conformément à l'équation III.4 et III.5.

4)  $r_1(.)$  et  $r_2(.)$  sont des variables aléatoires générés d'une distribution uniforme dans l'intervalle  $[0, 1]$  afin de fournir un poids stochastique aux différentes composantes participant dans la définition de la vitesse de la particule.

5)  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont deux constantes d'accélération réglant les vitesses relatives en relation avec les meilleures positions locales et globales. On considère que ces paramètres sont des facteurs d'échelle utilisés pour déterminer les mouvements relatifs de la meilleure position de la particule et de la meilleure position générale. Il s'agit de facteurs qui déterminent le degré d'influence des positions passées de la particule elle-même et celles des autres particules dans l'essaim.

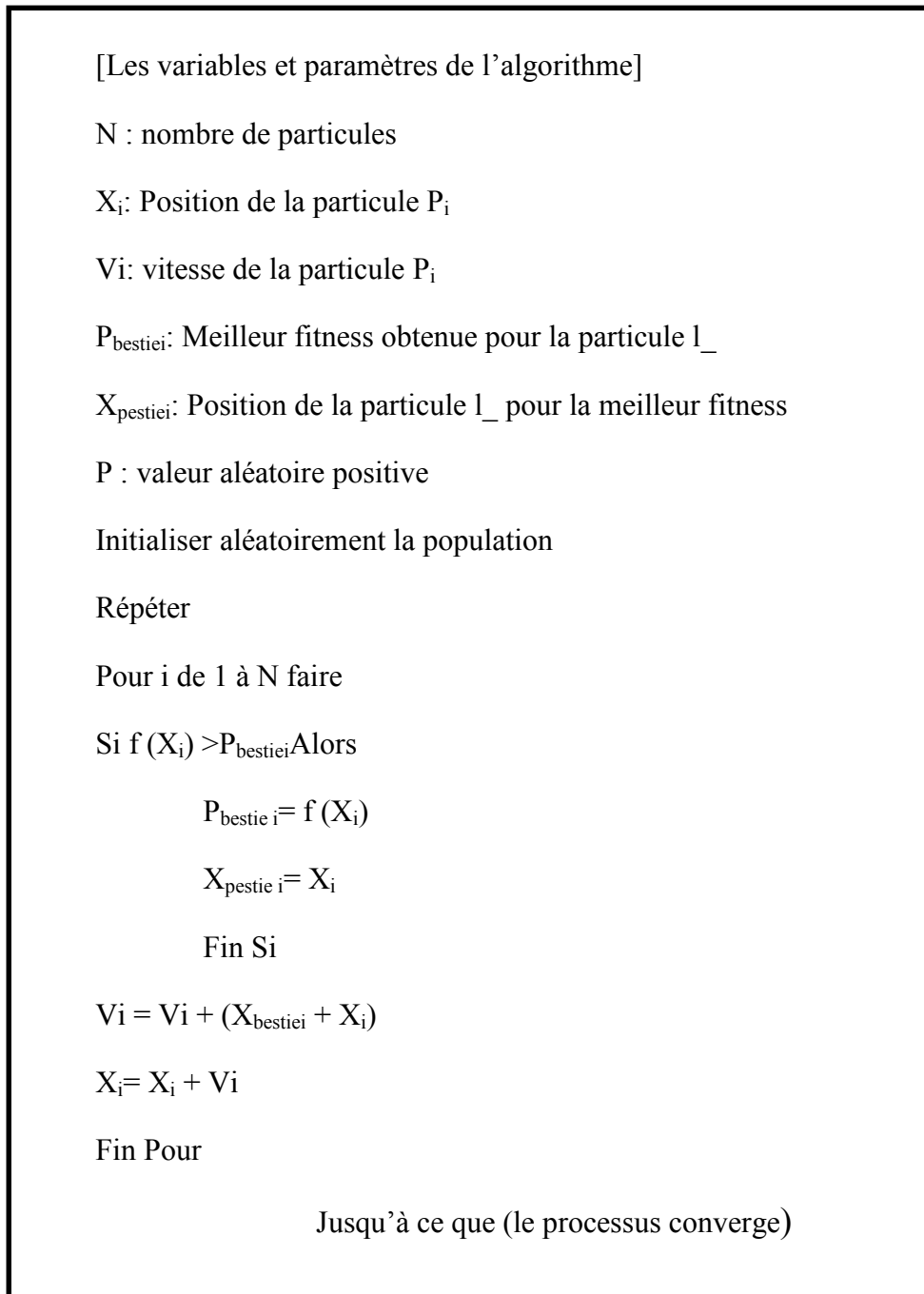
6) L'inertie  $w$  est utilisée comme un compromis entre l'exploration locale et globale du swarm. De hautes valeurs de ce paramètre permettent une bonne exploration globale, tandis que pour des valeurs minimales une recherche fine est effectuée.[3]

#### III.2.4. Algorithme de PSO :[16]

Chaque particule représente une solution potentielle dans l'espace de recherche. La nouvelle position d'une particule est déterminée en fonction de sa propre valeur et celle de ses voisines. Soit  $X_i(t)$  la position de la particule  $P_i$  au temps  $t$ , sa position est modifiée en ajoutant une vitesse  $V_i(t)$  à sa position courante :

$$X_i(t) = X_i(t - 1) + V_i(t) \quad \text{III- 5}$$

Il est le vecteur de vitesse qui oriente le processus de recherche qui reflète la 'sociabilité' des particules. Si l'on considère  $N$  particules et que chaque particule compare sa nouvelle position à sa meilleure position obtenue, cela donne l'algorithme 1,  $f$  étant la fonction de fitness.



**Figure III.8. Algorithme1- Algorithme de base PSO.**

### III.2.5.Principe algorithme PSO :

On dispose d'une fonction objective (une fonction coût) à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de recherche de la fonction objective. Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de recherche afin qu'elles trouvent la solution optimale [28] [29].

Chacune de ces particules est dotée :

- D'une position, c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition.
- D'une vitesse qui permet à la particule de se déplacer. De cette façon, au cours des itérations, chaque particule change de position. Elle évolue en fonction de son meilleur voisin, de sa meilleure position, et de sa position précédente. C'est cette évolution qui permet de tomber sur une particule optimale.
- D'un voisinage, c'est-à-dire un ensemble de particules qui interagissent directement sur la particule, en particulier celle qui a le meilleur critère.[30]

### III.2.6. Organigramme de fonctionnement de PSO :

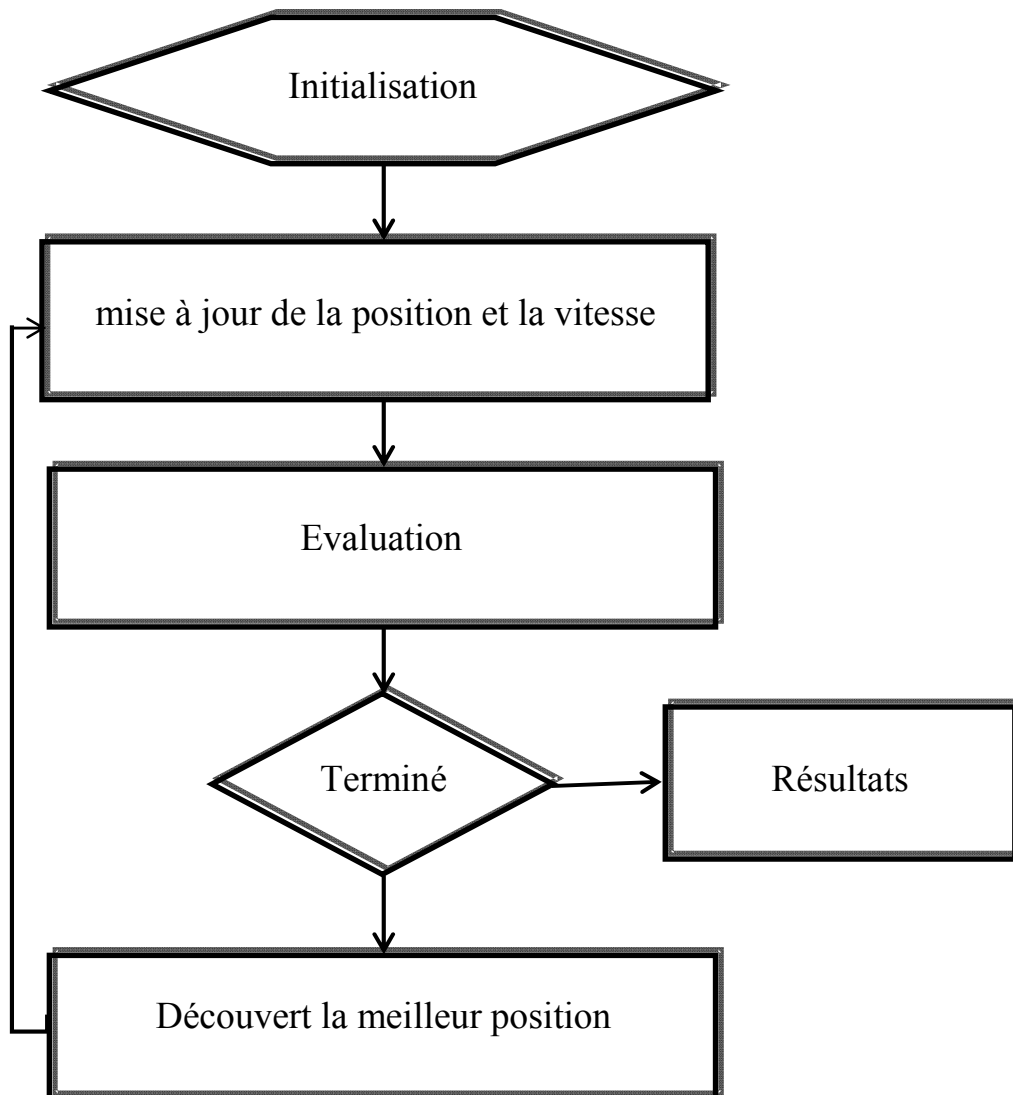


Figure III.9. Organigramme de fonctionnement de PSO[27]

### III.2.7. Avantages et inconvénients :

#### III.2.7.1. Avantages :

- Peut converger rapidement vers des bonnes solutions.
- Implémentations simples, avec peu de paramètres.
- Versatilité : peut résoudre beaucoup de différents problèmes.

#### III.2.7.2. Inconvénients :

- Tendence à une convergence rapide et prématurée en milieu Optimum .
- Convergence lente en phase de recherche détaillée (faible capacité de recherche locale).
- Choix des paramètres d'optimisation, ces derniers sont le plus souvent spécifiques pour chaque type de problème.

### Conclusion :

Dans ce chapitre, deux types de régulateurs ont été introduits : le régulateur classique de PID et le régulateur intelligent PID-PSO .

Dans la première partie de ce chapitre, une méthode classique pour la synthèse du régulateur PID a été présentée nommée par la méthode Ziegler-Nichols la détermination des paramètres de régulateur PID est présentée en détail juste après avoir déterminé le point critique.

Dans la deuxième partie de cet chapitre, l'algorithme PSO a été introduit comme un algorithme d'amélioration aléatoire des valeurs des paramètres du régulateur PID, elle est basée sur la population motivée par le comportement collectif intelligent de certains animaux tels que les essaims d'oiseaux ou les bancs de poissons. Le principe du PSO a été présenté en détail avec sa formulation mathématique, ainsi ces avantages et inconvénients.

### Introduction :

Le but de ce chapitre est de mettre en œuvre le contrôle PID classique et PID-PSO intelligent pour la commande d'un moteur à courant continu à excitation séparée en vitesse et en position, notre objectif est d'éliminer les erreurs statiques, de réduire le dépassement, de réduire le temps de réponse et le temps d'installation, d'obtenir un processus de réponse et une régulation suffisants, et d'avoir une précision, système rapide, stable et puissant.

L'ajustement des coefficients (paramètres) de la régulation PID est basé sur la méthode empirique de "Ziegler & Nichols" présentée dans le chapitre 3 par la suite en utilise la méthode d'optimisation dite PSO pour l'ajustement des paramètres du PID ce qui nous permet d'avoir un contrôleur intelligent. Notre travail comprend aussi une étude comparative du régulateur PID classique et le régulateur PID-PSO en termes de régulation et de performances de différents systèmes

#### IV.1. Asservissement position et vitesse :

Cette partie est destinée à l'analyse d'asservissement analogique, où nous allons étudier les performances de MCC en vitesse et en position

Nous reprenons le modèle de MCC obtenu au chapitre 2, on a :

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{(R+Lp)(Jp+f)+K_cK_e} \quad \text{IV. 1}$$

Il s'agit clairement d'un système du 2<sup>ème</sup> Ordre dont la fonction de transfert du système est :

$$H_{MCC}(p) = \frac{60}{0.00009p^2+0.072p+3.6} \quad \text{IV. 2}$$

Les résultats de simulation obtenus en utilisant Matlab-Simulink sont présentés dans les figures

D'après la simulation avec Matlab-Simulink les résultats obtenu sont présentés comme suit.

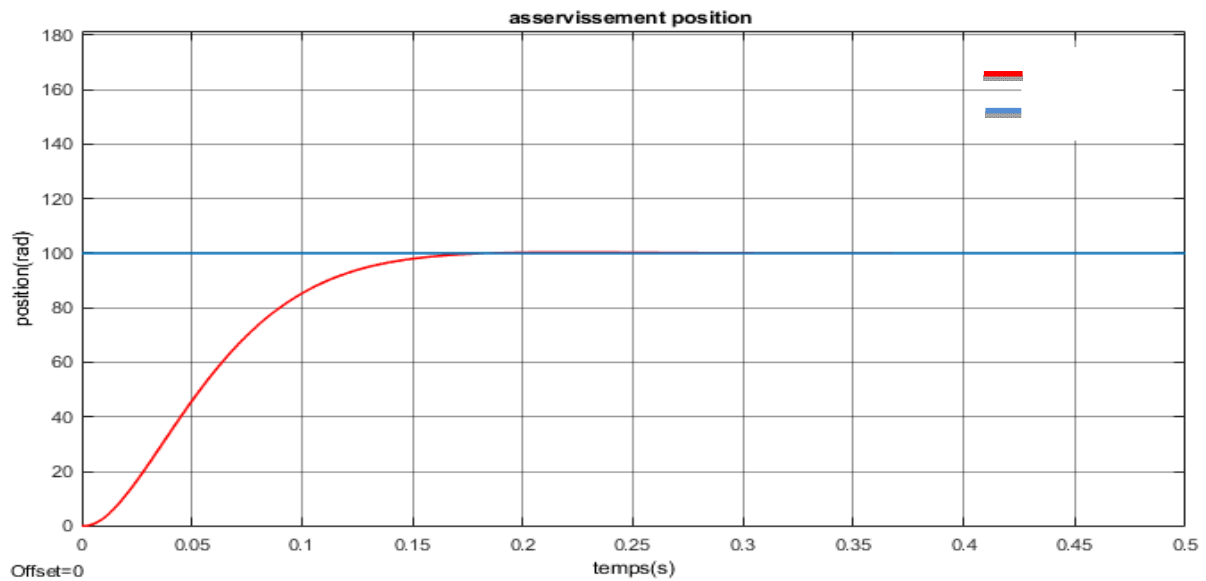


Figure IV.1 : Asservissement en position d'un MCC

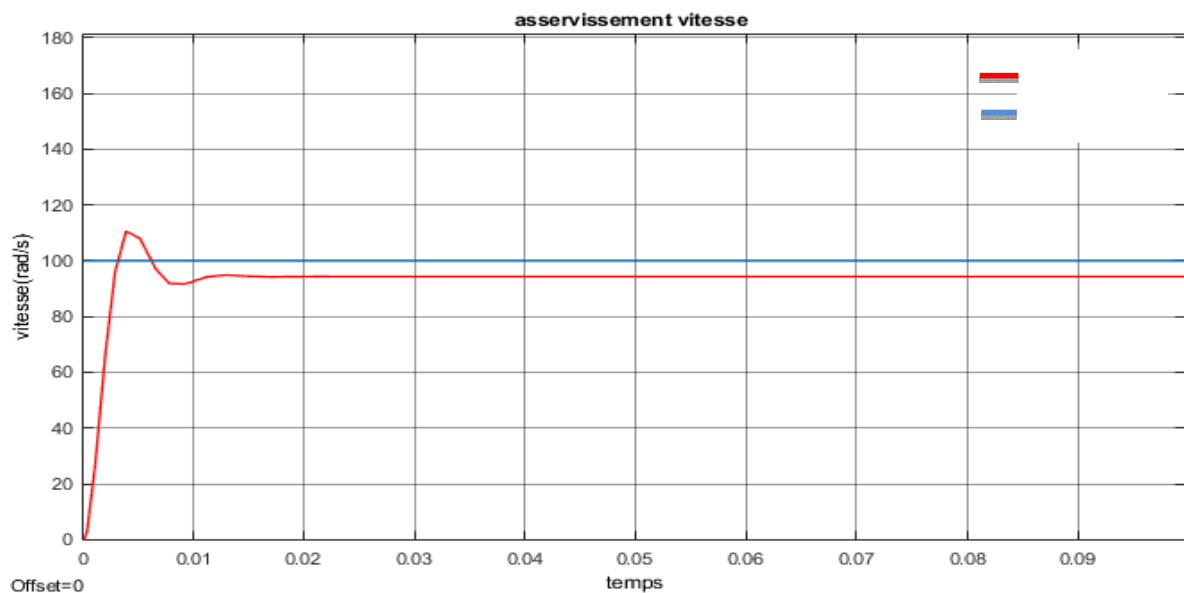


Figure IV.2 Asservissement en vitesse d'un MCC

IV.1. 1. Interprétation :

Sur base la figure (IV.1) et (IV.2) on déduit les remarque suivantes :

	Erreur statique	dépassement	Temps de réponse	Temps monté
position	0	0	0.13(s)	0.06(s)
vitesse	5.7	10%	0.013(s)	0.0031(s)

Tableau IV.1 Performances obtenues en asservissement du MCC.

## IV.2. Application de la commande PID en régulation de vitesse et position

### IV.2.1. Ajustement des paramètres par la méthode de Ziegler & Nichols :

La commande proportionnel-intégral-dérivé (PID) de type standard est insérée dans la chaîne directe de l'asservissement, en série avec le processus.

Dans ce cas, la méthode de Ziegler-Nichols a été appliquée sur un système du 2<sup>ème</sup> ordre représenté par sa fonction de transfert décrite par l'équation (IV. 2)

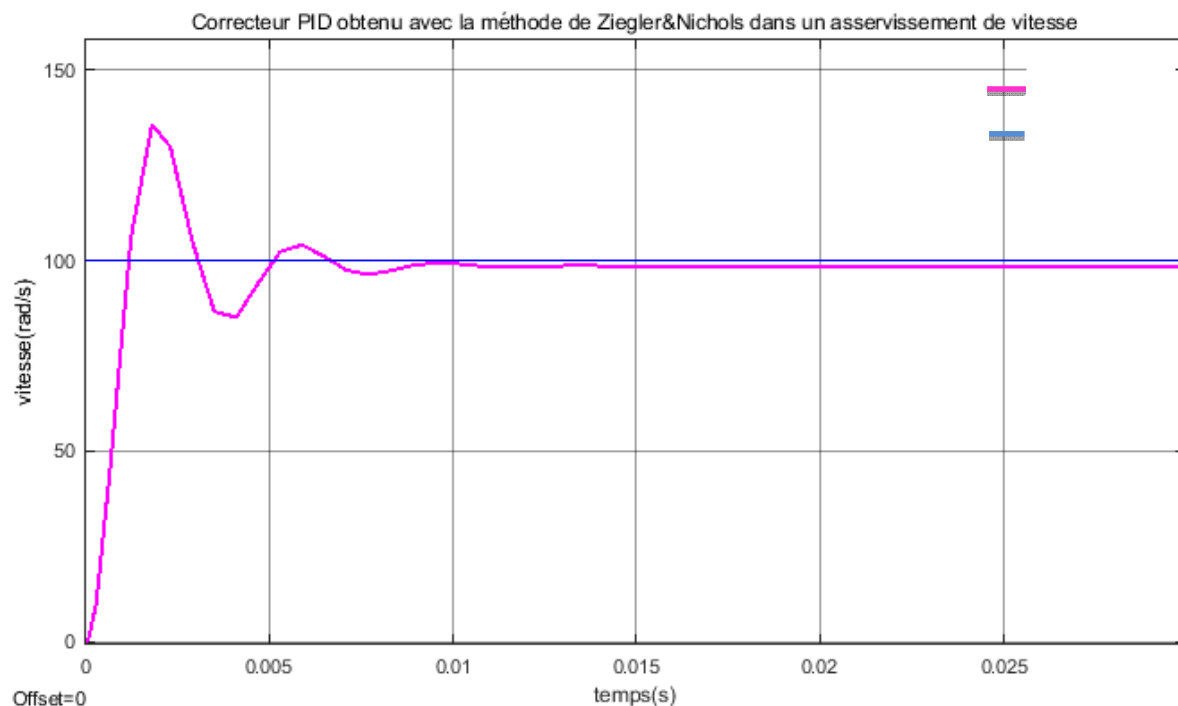
#### a) Régulation en vitesse :

Après avoir relevé le gain critique  $K_{pc}=7$ , et la période d'oscillation  $T_c=0.002$  (s) de la réponse, on peut calculer les paramètres du régulateur PID en utilisant le tableau de Ziegler-Nichols présenté dans **tableau (4)** chapitre 03

On trouve :

$$K_p=4.2 \quad T_i=0.001(s) \quad T_d=2.5 \times 10^{-4}(s)$$

Le résultat de simulation obtenu est présenté sur la figure IV.3:



**Figure IV.3 Régulation en vitesse avec un PID classique basée sur la méthode d'ajustement de Ziegler-Nichols**

## IV.2.1.1. Interprétation :

Sur la base de la figure ci-dessus on déduit les observations suivantes :

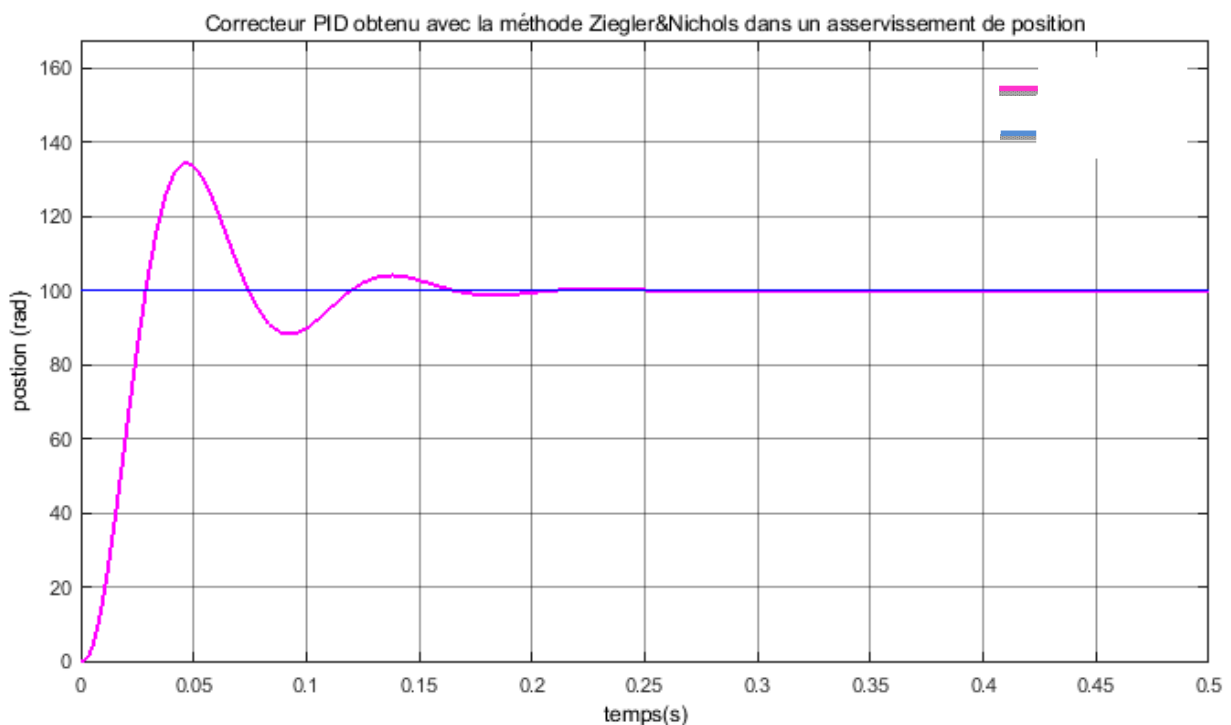
La réponse présente un taux de dépassement  $D = 35\%$  par rapport à la consigne, avec un temps de montée  $t_m = 0.001\text{s}$  et atteint le régime établi en un temps  $t_r = 0.0058\text{s}$  et une erreur statique égale à 1.3

## b) Régulation en position :

Répétant la même procédure pour la régulation PID de vitesse, on a relevé le gain d'oscillation  $K_{pc}=10$  et la période d'oscillation  $T_c= 0.004$  (s) et à l'aide du **tableau (4)** de Ziegler-Nichols, on déduit les valeurs des paramètres :

$$K_p=6 \qquad T_i=0.002 \text{ (s)} \qquad T_d=5 \times 10^{-4} \text{ (s)}$$

- Le résultat obtenu est présenté dans la figure suivante :



**figure IV.4 Régulation en position avec un PID classique basée sur la méthode d'ajustement de Ziegler-Nichols**

## IV.2.1.2. Interprétation :

A partir de la **figure (IV.4.)**, on remarque que :

La réponse présente un taux de dépassement  $D = 34\%$  par rapport à la consigne, avec un temps de montée  $t_m = 0.02\text{s}$  et atteint la position consigne en un temps  $t_r = 0.11$  s.

### IV.2.2. Ajustement des paramètres par la méthode PSO :

Dans ce travail, un contrôleur PID utilisant l'algorithme PSO est développé pour améliorer les résultats du contrôle de la vitesse et la position d'un MCC. L'algorithme PSO est principalement utilisé pour l'ajustement de trois paramètres  $K_p$ ,  $K_i$ , et  $k_d$ , du contrôleur PID de sorte que le système contrôlé pourrait obtenir une réponse souhaitée.

Les résultats obtenus par l'application de la technique PSO sont présentés comme suit:

#### a) Régulation en vitesse :

les trois paramètres ( $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$ ) du régulateur sont représentés sous forme d'une particule capable d'évoluer durant le processus d'optimisation

Les valeurs des paramètres de l'algorithme PSO sont les coefficients d'accélération  $C_1=C_2=1.5$  et le compromis entre l'exploration locale et globale  $w=0.7995$  on déduit les valeurs des paramètres

$$K_p=9, \quad K_i=0.1 \times 10^{-3}, \quad K_d=0.001$$

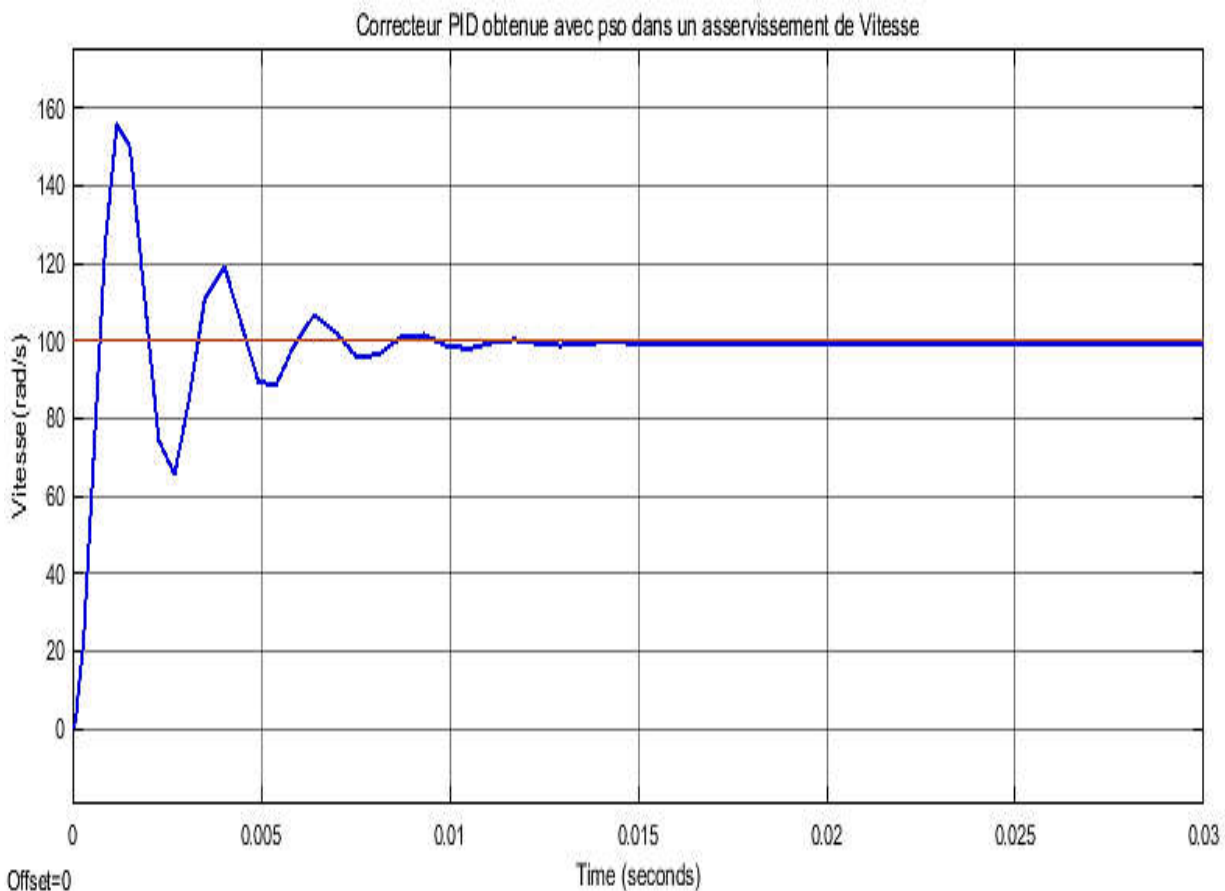


figure IV.5 Régulation en vitesse avec un PID -PSO

### IV.2.2.1. Interprétation :

A partir du figure IV.5 , l'observation suivante est déduite:

La réponse présente un dépassement  $D = 55\%$  par rapport à la consigne, avec un temps de montée  $t_m = 0.0005(s)$  et atteint le régime établi en un temps de réponse  $t_r = 0.0056(s)$  et un erreur statique égale  $0.62$

#### b) Régulation en position :

Pour Les même valeurs des paramètres de l'algorithme PSO on déduit les valeurs des paramètres :  $K_p = 8$  ,  $K_i = 0.01$ ,  $K_d = 0.1$

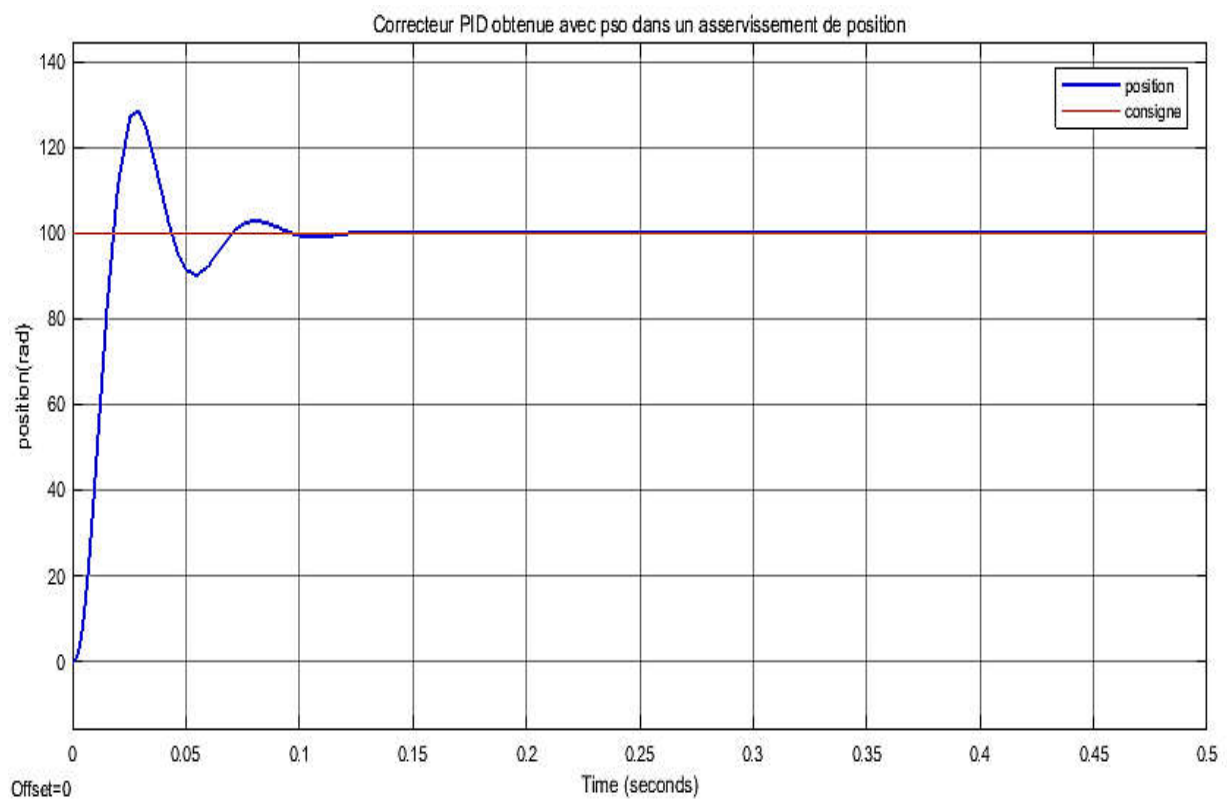


figure IV.6 Régulation en position avec un PID -PSO.

### IV.2.2.2. Interprétation :

A partir du figure IV.5 , l'observation suivante est déduite:

La réponse présente un dépassement  $D = 28\%$  par rapport à la consigne, avec un temps de montée  $t_m = 0.012(s)$  et atteint le régime établi en un temps

$t_r = 0.064(s)$  et un erreur statique nulle

### IV.3.Comparaison entre la méthode Ziegler-Nichols et PSO :

Il est clair que l'avantage principal du contrôleur PID-PSO par rapport au contrôleur ZN-PID qu'il permet une exploration aléatoire de l'espace de solution, les variables de cette fonction sont souvent une contraintes pour évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche.

Pour faire une bonne comparaison entre les deux technique de d'ajustement des paramètres d'un PID nous avons créé les deux tableaux (IV.2 IV.3) qui contiennent les résultats de simulation pour la régulation en vitesse et en position pour un moteur à courant continu.

Type de correcteur	Asservissement sans régulateur	PID	PID_PSO
<b>Erreur statique</b>	5.7	1.3	0.62
<b>Temps de réponse</b>	0.013	0.0058 (s)	0.0056(s)
<b>Temps montée</b>	0.0031	0.001 (s)	0.0005(s)
<b>Dépassement</b>	10%	35%	55%

Tableau IV.2 Comparaison entre, PSO- PID et ZN-PID régulation en vitesse.

Type de correcteur	Asservissement sans régulateur	PID	PID_PSO
<b>Erreur statique</b>	0	0	0
<b>Temps de réponse</b>	0.13	0.11(s)	0.064(s)
<b>Temps montée</b>	0.06	0.02(s)	0.012(s)
<b>Dépassement</b>	0%	34%	28%

Tableau IV. 3 Comparaison entre, PSO- PID et ZN-PID régulation en position

### IV.3.1 Interprétation des résultats

La comparaison du contrôleur PID classique et PID avec PSO robuste proposé montre que:

**a) Pour Vitesse :**

- Un meilleur temps de montée.
- Une réponse rapide Pour la correcteur PID-PSO .
- Un petit dépassement pour correcteur PID.
- Correcteur PSO -PID diminue l'erreur statique.

**b) Pour Position :**

- Un meilleur temps de montée.
- Une réponse rapide
- Un petit dépassement Pour la correcteur PSO- PID

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, application en simulation est faite pour l'ajustement des paramètres d'un contrôleur PID par deux méthodes qui sont la méthode classique de Ziegler-Nichols et méthode intelligente qui est l'algorithme PSO (Particle Swarm Optimization), par la suite une étude comparative entre ces deux méthode d'ajustement a été présenté.

Les performances de la méthode de l'algorithme PSO pour ajuster le contrôleur PID se sont avérées meilleures que la méthode traditionnelle Ziegler-Nichols en termes de temps de réglage du système et de temps de montée. Bien que le dépassement de PSO semble avoir un ratio Z-N plus élevé Pour cela, le PSO rend le système précis, rapide, stable et puissant.

## Conclusion Générales

---

### Conclusion générales :

Dans cette étude nous avons contribué sur la commande d'un moteur à courant continu par deux différents régulateurs, le régulateur PID-ZN classique et le régulateur PID-PSO par la suite une comparaisons entre ces deux commande est effectuée pour déterminer le meilleur des deux, nous avons mis en évidence l'ajustement des paramètres de ces deux régulateurs pour la régulation en vitesse et en position d'un moteur à courant continu.

D'après l'étude effectué nous avons arrivé à réaliser :

- Les défèrent définition de quelques concepts de système, l'asservissement, la régulation et les propriétés des actions Proportionnelles, Intégrateur et Dérivateur (PID)
- Un étude détaillé avec simulation de modélisation en vitesse /position d'un machine à Courant Continue à excitation indépendant
- Une présentation des différentes méthode avec la synthèse d'un régulateur PID :

Pour un régulateur PID classique on a utilisé le structure parallèle connu, l'ajustement de ces paramètres est fait par la méthode Ziegler-Nichols.

Concernant la méthode intelligente l'ajustement des paramètres du PID est assuré par l'utilisation de l'algorithme d'optimisation par essaim particulaires (PSO).. Cet ajustement s'agit de rechercher les paramètres optimaux ( $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$ ) du régulateur PID pour améliorer les performance de notre système.

Les résultats obtenus matérialisés dans l'environnement MATLAB SIMULINK par les courbes de variation de la vitesse et position montrent le comportant du MCC pour chacun de deux méthode de réglage.

D'après les résultats obtenus dans notre simulation , La technique PID-PSO donne une meilleure réponse que le contrôleur PID-ZN.

Enfin, le réglage automatique proposé est une méthode intelligente pour contrôler une entrée non linéaire d'un actionneur et de régler la vitesse et Position du moteur.

## **Conclusion Générales**

---

Comme perspective pour notre étude, ont proposé de faire une comparaison entre les méthodes intelligentes pour l'ajustement des paramètres d'un régulateur PID.

## Annex

### ANNEX :

#### Annex A :

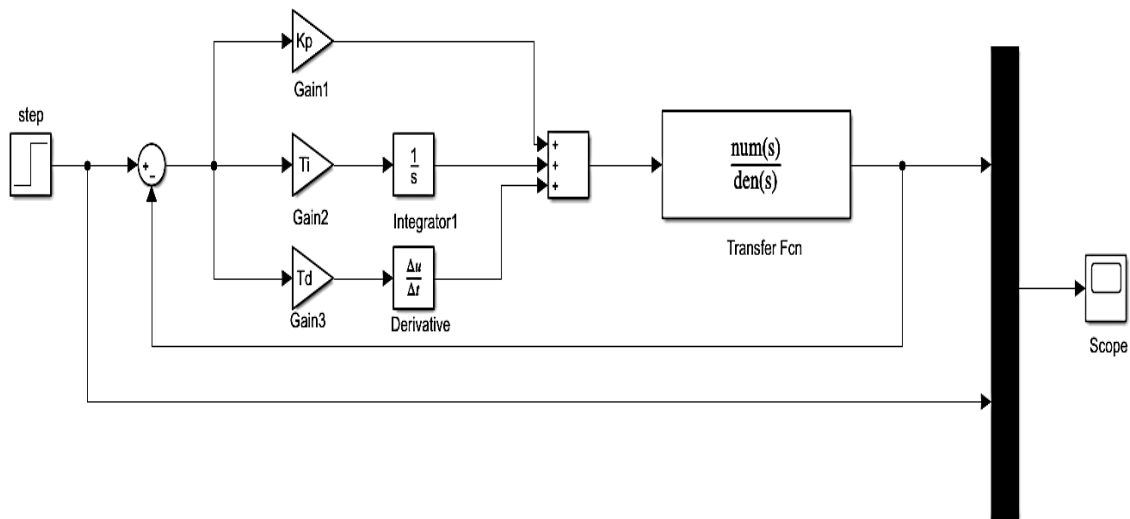


Figure 1 :schéma bloc d'un asservissement de vitesse régulée avec PID\_ZN

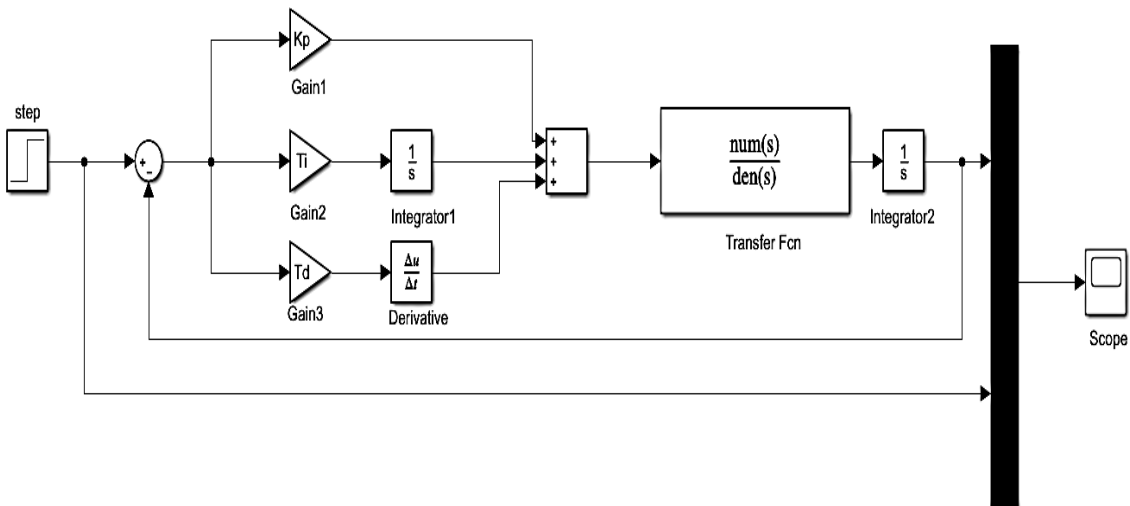


Figure 2:schéma bloc d'un asservissement de position régulée avec PID\_ZN

#### Annex B :Critère de performance:

##### Dépassement:

Le dépassement se produit si la sortie du système sort à certains instants de l'intervalle [valeur initiale, valeur finale], et généralement est donné en pourcentage. L'équation du dépassement est la suivante.

$$\text{dépassement}(\%) = D \times 100/\Delta M$$

## Annex

---

### Temps de réponse:

qui est le temps mis par la mesure pour atteindre sa valeur définitive à  $\pm 5\%$  de sa variation tout en se maintenant dans cette zone des  $\pm 5\%$

### Temps de montée:

Le temps de montée est la mesure du temps écoulé entre l'échelon de consigne et le premier passage de la sortie à  $x\%$  de la valeur finale

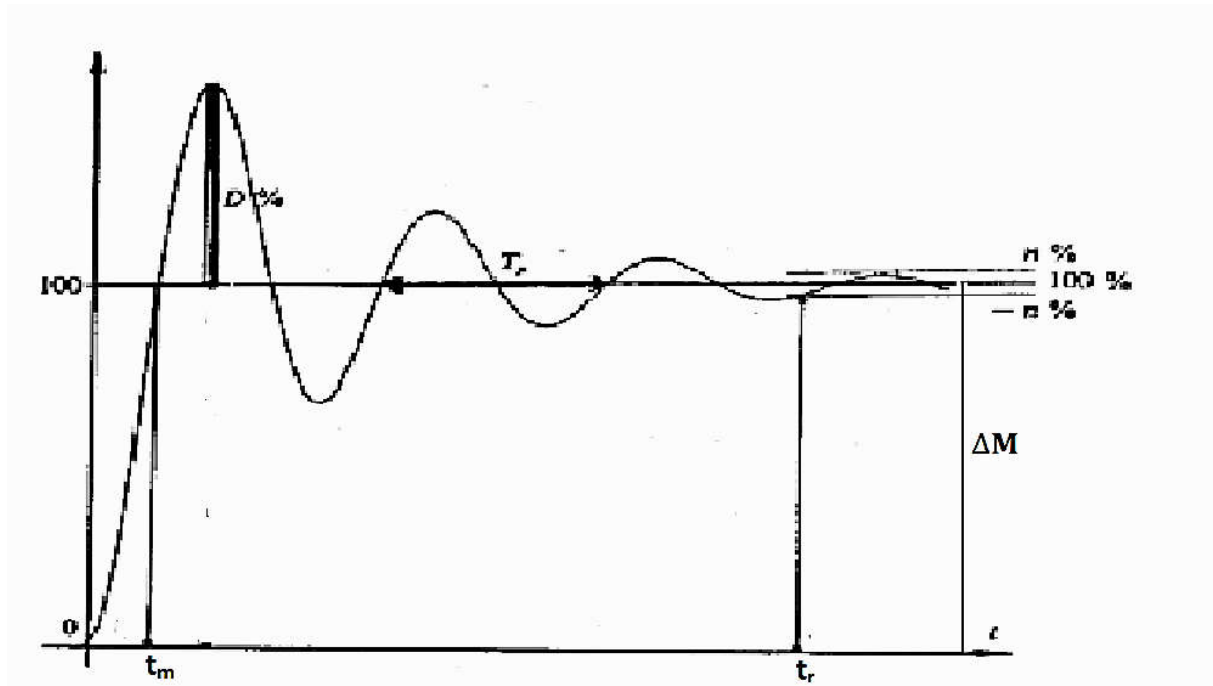


Figure 1 Représentation graphique du Critère de performance

## Références Bibliographiques

---

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1]Mémoire de fin d'étude ' Etude Comparative de la Commande PID classique et la Commande d'ordre fractionnaire : Application à un Moteur à Courant Continu'Université Mohammed Boudiaf - Msila
- [2]tuning of pid controller using particle swarm optimization (ps0) 2011
- [3]Maurice Clerc, M. and Kennedy, J. The Particle Swarm : Explosion, Stability, and Convergence in a Multi-Dimensional Complex Space. In Proceedings of the IEEE Transactions on Evolutionary Computation, (2002).
- [4] T.Nesrine Juillet 2019. Mémoire de fin d'étude 'Etude comparative en simulation entre un régulateur PID et un régulateur flou' Université Mohammed Seddik BENYAHIA - Jijel
- [5]GhaniaBoukerche, ,,Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application ""', Mémoire de Magister Option: Commande des Systèmes industriels, Université de BADJI MOKHTAR 2017
- [6] E. Laroche. 2009/2010. Asservissement des systèmes lineaires `a temps continu. Ecole nationale supérieure de physique de strasbourg. Université de Strasbourg
- [7]Dr. Aggoune Lakhdar Système asservis université Ferhat Abbas Sétif 1
- [8] R. Mansouri .2016.2017 . cours les systèmes asservis linéaires continus .université ' Mouloud Mammeri ' Tizi-Ouzou.
- [9]V.Boitier. 2005. Asservissement linéaires continus. UniversitéPauleSabatier Toulouse
- [10]Mémoire de fin d'étude 'utilisation d'un PID numérique pour la correction de vitesse d'un moteur asynchrone triphasé à CAGE' Université d'Antananarivo école supérieure polytechnique
- [11] E. Vitte, Juin, 2004, "La régulation. Principe de régulation ", Guide technique, Magazine Schneider Electrique de l'enseignement technologique et professionnel.
- [12] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems», Springer, 2005.
- [13] MGE S. Mouadh, 2006/2007, "Régulation Industrielle de Processus", projet de fin d'études, Génie Electrique et automatique, Tunisie, 72p

## Références Bibliographiques

---

- [14] Boukhris M. Regulation de vitesse d'une machine asynchrone, Université de KasdiMerbah OURAGLA, Master en Electrotechnique ( 2014)
- [15] cours master 2 Eléments de Régulation Numérique ,mezaachhatem
- [16] Mémoire de Master Thème Méthodologie d'optimisation par les techniques intelligentes d'un contrôleur PID pour un système CSTR 2014
- [17] G. Gasso, Octobre 2003, "Correction des systèmes linéaires continus asservis", INSA de Rouen.
- [18]M. El Harzali, 2002, " Machine à courant continu : fonctionnement et structure interne ", Cours, Université Abdelmalek Essaadi, Tanger, Maroc, Novembre.
- [19]W. Benzaoui , B. Doufene et A. Medkour, Développement d'un régulateur flou en vue dela commande d'un héliostat, Ghardaïa 2014
- [20]Mémoire de fin d'étude " Commande floue d'un moteur a courant continu(MCC). Comparaisonavec la commande PID " Université Abderrahmane Mira – Bejaia 2017
- [21]Mémoire de fin d'étude « modélisation et simulation de la commande d'un moteur à courant continu » higherschool in applied sciences Tlemcen 2020
- [22] mémoire mastre académique « etude comparative de la commande PID et la commande d'ordre fractionnaire :application à un moteur à courant continu » université Mohammed Boudiaf m'sila 2019
- [23] [Chapitre 03 Synthèse des Régulateurs PID 1. Introduction](#)
- [24] Christian Blum & Daniel Merkle : Swarm Intelligence, Introduction and Applications- Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008.
- [25] Chao Ou&Weixing Lin, Comparison between PSO and GA for Parameters Optimization of PID Controller, China, Proceedings of the 2006 IEEE
- [26] Youcef Bekakra, «Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation», thèse de Doctorat en sciences, université de Biskra ,2014.
- [27] Flux optimal de puissance comprenant un contrôleur UPFC parl'algorithme génétique et l'essaim de particules ,Optimal power flow including a UPFC controller by

## Références Bibliographiques

---

geneticalgorithm and particles swarm, Laboratoire des Systèmes Electromécaniques (LSELM), Université Badji Mokhtar, BP 12, Annaba, 23000, Algérie.

[28] A. Rioland, A. Eudes, «Optimisation par essaim particulaire pour un problème d'ordonnancement et d'affectation de ressources», Rapport de Projet 3ème année Modélisation et Calcul Scientifique, Institut Supérieur d'Informatique de Modélisation et de Leurs Applications Complexe des Cezeaux, Aubiere Cedex, 2007.

[29] Doctorat en sciences , Génie électrique , Etude et Commande Adaptative par les Techniques Intelligentes Des Systèmes Non linéaires Application aux Systèmes Photovoltaïques, Université Mohamed Khider – Biskra, **2017**

[30] Mémoire de master , Contribution à la Commande Robuste d'une Machine Asynchrone par la Technique PSO « Particle Swarm Optimization » , Université de Batna

---

## **Résumé:**

Les travaux de cette thèse visent à présenter une étude comparative des méthode de réglage des paramètres de régulateur PID. par un méthode de commande classique et un méthode de commande intelligent

Nous avons essayé de faire une étude détaillée sur la machine à courant continu et application la technique de commande classique de Ziglre Nichols et la commande intelligent par Optimisation Par Essaims de Particule sur excitation indépendante,

Aux fins de recherche sur les paramètre optimaux ( $K_p, K_i, K_d$ ) du régulateur afin d'améliorer les critères de performances de position et vitesse . la simulation du régulateur cela conçu sera effectué dans l'environnement MATLAB SIMULINK

D'après les résultats obtenu la méthode de l'algorithme PSO pour ajuster le contrôleur PID se sont avérées meilleures que la méthode traditionnelle Ziegler-Nichols en termes de temps de réglage du système et de temps de montée

**Mots Clés:** régulateur PID , commande classique , commande intelligent , les paramètre optimaux