الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Projet de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique

Spécialité* : *Automatique des systèmes
Commande et électronique industrielle

THEME

Réglage des paramètre d`un contrôleur PID par les technique Bio-inspirées : BFO

Présenté par :

- DELLACHI fadhila
- BENADDA djamel

Encadré par :

- TAMI youcef

Année Universitaire **2016-2017**

Dédicace

Je dédie ce travail en signe de respect et de reconnaissance :

A celle qui a tout donné, tout sacrifié, à la femme qui règne sur mon cœur, " ma mère ".

A celui qui m'a toujours dirigé, guidé, aidé et encouragé afin de me voir affronter la vie avec sérénité et courage, à l'homme qui a toujours souhaité me voir à la hauteur, " mon père ".

et toute la famille et à tous mes amis.

A mes très chers collègues et toute la promotion 2017.

DJAMEL

Dédicace

Je dédie Ce Travail à:

*- Mon **PERE** qui ne cesse pas de M'encourager.*

*- Ma **MERE** pour Sa Tendresse profonde.*

*- Mes **chers Frères** et **Sœurs**.*

- Mes filles, Mes frères surtouts Abd El Rezek, Lkatakite Mahdi et Imad

*- Mes **camarades de promo** du Département de Génie Electrique*

« A tout ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité et tous les amis ».

FADHILA

Remercieme

nt

Tout d'abord nous remercions Dieu pour nous avoir guidés vers le chemin de la lumière et du savoir, pour nous avoir donné le courage et la volonté afin de pouvoir réaliser ce travail, puis nos parents pour leurs soutiens et leurs sacrifices.

Nous tenons à remercier vivement tous ceux qui nous ont aidés à élaborer Ce mémoire et en particulier notre Encadreur Mr. TAMI Youcef pour son aide et ses orientations précieuses.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, pour l'honneur Qu'ils nous ont accordé, en acceptant de juger notre travail.

Nous remercions aussi l'ensemble des enseignants de l'institut de Génie Électrique qui ont contribué à notre formation.

Que tous ceux et celles qui nous ont apporté leur soutien et qui nous ont Aidé de près ou de loin pour l'achèvement de ce projet trouvent ici l'expression De notre vive et sincère reconnaissance, en particulier nos familles et nos amis

ملخص :

في الآونة الأخيرة ظهرت عدة طرق حديثة ،الطريقة الأمثل والتي تسمى (بحث البكتيريا عن أغذية) (BFO)

وهي مستوحات من تغذية البكتيريا وجعلت الاستفادة في مناطق مختلفة ونحن نحاول تطبيق خوارزمية BFO لتحديد أفضل معايير (Kp,ki ,kd) من وحدة التحكم PID أثناء عرض وظيفة لدينا الهدف منها هو التقليل من الخطأ بين إشارة المدخل وإشارة المخرج للمقارنة من الطريقة الكلاسيكية زيغلر نيكولز و كوهن كوون كانت الطريقة المقترحة أكثر مرونة وكفاءة من حيث الأداء الديناميكي مثل خفض الحد الأقصى لتجاوز زمن الارتفاع ،زمن الاستجابة وثابت الخطأ.

الكلمات المفتاحية :

المصحح الكلاسيكي ، زيغلر نيكولز ، كوهن كوون.

Résumé:

Plus récemment, une méthode d'optimisation nommée «travail sur les nourriture bactirienne », soit en anglais «optimisation par recherche nourriture bactérienne » (BFO), inspirée d`optimisation par recherche nourriture bactérienne. Cette méthode est caractérisée par une interaction coopérative dans le comportement de la fourmi.

Dans le cadre de ce travail, nous essayons d'appliquer l'algorithme d'BFO pour déterminer les paramètres (Kp,Ki,Kd) optimums du régulateur PID tout en visualisant notre fonction objective dont on cherche à minimiser l'erreur entre le signal d'entrée et le signal de sortie.

Comparer avec la méthode classique de Ziegler-Nichols, la méthode classique de cohen coon et la méthode proposée était plus robuste, flexible et efficace en termes de performances dynamiques comme la réduction du dépassement maximal, le temps de montée, le temps de réponse et l'erreur statique.

Mot clé :

Régulateur PID, (BFO) optimisation par la recherche bacteriene, méthode de Ziegler-Nichols , méthode de cohen coon

Summary:

More recently, a method of optimization named « Bacterial Foraging Optimization » (BFO), inspired by the bacterial foraging optimization This method is churched a nourriture bacterienne .

Within the framework of this work, we try to apply the algorithm of BFO to determine the optimal parameters (Kp, Ki, Kd) of regulators PID while visualizing our objective function which we try to minimize the error between the input signal and the output signal. To compare with the classic method of Ziegler-Nichols and method of Cohen Coon the proposed method was more robust, flexible and effective in terms of dynamic performances as the reduction of the over shoot, the rise time, the settling time and steady state error.

Keyword:

Regulator PID, (BFO) the bacterial foraging optimization, Ziegler-Nichols, Method. Cohen Coon method

Table des matières

Liste des Figures IV

Liste des tableaux VI

Liste des Acronymes VII

INTRODUCTION GENERALE…… 1

CHAPITRE I: REGULATEUR PID ET SYSTEME ASSERVIE

I .1. Introduction 2

I .2. Généralité sur les systèmes asservis 2

I .2.1. Définitions 2
I .2.2. Régulation ou Asservissement 3
I .2.3. Principe de fonctionnement 3
I .2.4. Fonctionnement en boucle ouverte 4
I .2.5. Fonctionnement en boucle fermée 4
I.2.6.Schéma fonctionnel 4
I .2.7. L'influence des perturbations 6

I .3. Caractéristiques statique et dynamiques d'un procédé 7

I .3.1. Stabilité 7
I .3.1.1. Procédés naturellement stables 7
I .3.1.2. Procédés naturellement instables : 7
I .3.1.3. Procédés intégrateurs : 7
I .3.2. Caractéristiques statiques d'un procédé 8
I .3.2.1. Courbe caractéristique 8
I .3.2.2. Gain statique 8
I. 3.2.3. Erreur statique 8
I .3.2.4. Linéarité 9
I .3.3. Caractéristiques dynamiques d'un procédé 9
I .3.3.1. Temps de réponse 9
I .3.3.2. Temps de montée 9
I .3.3.3. Dépassement 10

I .4. Régulateur PID (proportionnelle, intégrale, dérivée) 10

I .4.1. Définition 10
I .4.2. Action Proportionnelle 11
I .4.3. Action Intégrale 12
I .4.4. Action Dérivée 12

I .5. Type de régulateurs 12

I .5.1. Régulateur à action proportionnelle (P) 12
I .5.2. Régulateurs à action proportionnelle-intégrale (PI). 13
I .5.3. Régulateur à action proportionnelle-dérivée (PD). 13
I .5.4. Régulateur à action Proportionnel-Intégral-Dérivée (PID). 14
I .5.4.1. Principe général 14
I .5.4.2. Différente structures du régulateur PID 15
I .5.4.3. Réglage d'un PID 17

I .6. Méthodes Industrielles De Synthèse D'un régulateur PID : 17

I .6.1. Méthodes empiriques 18
I .6.1.1. Méthode de Ziegler Nichols 18
I .6.1.2. Méthode de Chien-Hrones-Reswick 20
I .6.2.Réglages après identification du procédé 21
I .6.2.1. Modèle non évolutif 21
I .6.2.2. Modèle évolutif 21
I .7. Conclusion *22*

CHAPITRE II : OPTIMISATION PAR RECHERCHE DE NOURRITURE BACTERIENNE

II.1. Introduction 23

II .2. Recherche de nourriture bactérienne par E. coli 23

II .3. Natation et Culbute 24

II .4. Optimisation par la recherche de nourriture bactérienne : 26

II .4.1. Chemotaxis: 26
II .4.2- Essaimage: 27
II .4.3- Reproduction: 27
II .4.4- Elimination et dispersion: 28

II .5. Choix d'une méthode d'optimisation 29

II.6. Conclusion 30

CHAPITRE III : SIMULATION ET RESULTAT

III.1 Introduction : 31

III.2 La Mise en Œuvre du Projet sur logiciel Matlab: 31

III.2.1 LTI VIEWER 31

III.2.2 Fonction de transfert 31
III.2.3 Fonctions de transfert d'un procédé en boucle fermé avec un régulateur PID-BFO.....33
III.2.4 L'organigramme de la méthode BFO.....34
III.2.5. Concept de la fonction objective 34
III.3. EXEMPLES D'APPLICATIONS : 36
III.7 Conclusion :.....61
Conclusion générale.....62
Bibliographie.....63

LISTE DES FIGURES

Figure (I .1): *Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.* *3*

Figure (I .2): *Le système en boucle ouverte.* 4

Figure (I .3):*Le système en boucle fermée.* 4

Figure (I .4): *Ligne de parcours d'une grandeur physique.* 5

Figure (I .5): *Bloc gain.* 5

Figure (I .6): *Sommateur et soustracteur* 5

Figure (I .7):*Boucle de régulation.* 5

Figure (I.8): *Schéma bloc d'un asservissement avec une perturbation* 6

Figure(I.9) : *Le système naturellement stable.* 7

Figure(I.10):*Le système naturellement instable.* 7

Figure(I.11) : *Le procède intégrateur.* 8

Figure(I.12): *Caractéristique statique d'un procédé* 8

Figure(I.13): *Temps de réponse.* 9

Figure(I.14): *Temps de montée.* 10

Figure(I.15) : *Dépassement*. 10

Figure (I.16) : *Régulateur PID.* 11

Figure(I.17): *Schéma fonctionnel du régulateur P.* 13

Figure(I.18): *Schéma fonctionnel du régulateur PI.* 13

Figure(I.19): *Schéma fonctionnel du régulateur PD.* 14

Figure(I.20): *Régulation à structure parallèle.* 15

Figure(I.21): *Régulateur à structure série.* 16

Figure(I.22) : *Régulateur à structure mixte (classique).* 16

Figure(I.23) : *Régulateur à structure mixte (variante).* 17

Figure(I.24) : *Identification en boucle ouverte par Ziegler-Nichols* 19

Figure(I.25) : *Comparaison des correcteurs de Ziegler Nichols.* 20

Figure (II.1): *Escherichia coli.* 24

Figure (II.2) : *différentes techniques de déplacement de la bactérie E. coli* 25

Figure(III.3) :*Organigramme de l'algorithme BFO.* 28

Figure III.1 : *La réponse à une entrée échelon du système obtenu à l'aide de LTI VIEWER* .33

Figure III.2 : *Schéma block de contrôleur BFO-PID* 33

Figure III.3: *L'organigramme de la méthode BFO.* 34

Figure III.4 : *Réponse en boucle fermée d'un procédé.* 35

Figure III.5 : *Circuit équivalent d'un moteur à courant continu* 37

Figure III.6 : *Diagramme de Bloc du modèle de MCC.* 38

Figure III. 7 : *Réponse de la fonction de transfert d'un système de premier ordre amortie avec retard* 41

Figure III.8: *Organigramme de la méthode BFO* 44

Figure III.9 : *La réponse du MCC-PID par la méthode Z-N et C-C.* 45

Figure III.10 : *Les paramètres de la réponse du MCC-PID par la méthode Z-N.* 45

Figure III.11 : *Les paramètres de la réponse du MCC-PID par la méthode C-C.* 46

Figure III.12 : *Les résultats en varient le nombre de bactérie.* 50

Figure III.13: *La réponse du MCC-PID par les méthodes BFO, C-C et Z-N.* 51

Figure III.14: *Système de contrôle de niveau de trois réservoirs* 53

Figure III.15. : *La réponse du système par la méthode Z-N et C-C.* 56

Figure III.16 : *Les paramètres de la réponse du MCC-PID par la méthode Z-N.* 56

Figure III.17 : *Les paramètres de la réponse du système par la méthode C-C.* 57

Figure III.18 : *Les résultats en varient le nombre de bactérie.* 59

Figure III.19 : *La réponse du système par les méthodes BFO, C-C et Z-N.* 60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: *Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BO.* 18

Tableau I.2: *Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BF*..... 19

Tableau I.3 : *Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon la méthode de Chien-Hrones-Reswick.* 20

Table I.4 : *Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon le modèle non évolutif*..... 21

Tableau I.5 : *Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon le modèle évolutif.* 22

Tableau III.1.*Les paramètres du MCC.* 39

Table III.2 : *Les paramètres de la réponse du MCC.* 40

Tableau III.3 : *méthode de Ziegler Nichols (Z-N)* 42

Tableau III.4 : *méthode de Cohen Coon (C-C).* 42

Tableau III.5 : *valeurs de Kp, Kiet Kd selon la méthode Z-N et C-C*..... 43

Tableau III.6. *Les paramètres de l'algorithme BFO* 43

Tableau .III.7: *Valeur de F.Object en fonction du Nbre.de bactéries.* 46

Tableau III.8 : Les valeurs de$\boldsymbol{T_r}$,$\boldsymbol{T_s}$,$\boldsymbol{E_{ss}}$ et $\boldsymbol{M_p}$ de chaque nombre de bactérie. 46

Tableau III.9 : *Les performances de la réponse du MCC-PID par les méthodes BFO, C-C et Z-N.* 52

Tableau III.10: *méthode de Ziegler Nichols*. 54

Tableau III.11: *Méthode de Cohen Coon* 55

Tableau III.12 : *les valeurs des paramètres du régulateur PID*..... 55

Tableau III.14 : *Valeur de F.Object en fonction du Nbre.de bactéries.* 57

Tableau III.12 : *Les valeurs de* $\boldsymbol{tr}$, $\boldsymbol{ts}$, $\boldsymbol{Ess}$ *et Peak time de chaque itération*..... 59

Tableau III.13 : *Les performances de la réponse du système par les méthodes BFO, C-C et Z-N* 60

LISTE DES ACRONYMES

PID : **P**ropositionnel, **I**ntégrale et **D**érivateur

Z(P) : la perturbation

Y (P) : la sortie de système

X(P) : la consigne

C(P) : la fonction de transfert de régulateur

H(P) :la fonction de transfert de système

Δy : la variation de la grandeur de sortie

Δx : la variation de la grandeur d'entrée

ε_s : l'erreur statique

T_i : constante de temps d'action intégrale

u_0 : valeur initiale de Y

T_d : constante de temps d'action dérivée

U : le signal de commande

BO : **B**oucle **O**uvert

BF : **B**oucle **F**ermée

K_{rc} : le Gain Critique

T_{ocs} : les périodes des oscillations de pompage

τ : la constante de temps du premier ordre

BFO : Optimisation par recherche de nourriture bactérienne

PID_BFO : **P**ropositionnel, **I**ntégrale et **D**érivateur optimisé par l'**O**ptimisation par recherche de **N**ourriture **B**actérienne.

PID_Z-N : **P**ropositionnel, **I**ntégrale et **D**érivateur optimisé par **Z**iegler _ **N**ichols

P ID_C-C : **P**ropositionnel, **I**ntégrale et **D**érivateur optimisé par **C**ohen_**C**oon.

t_r : Le Temps de Montée (Rise Time),

t_s : Le Temps de Réponse ou d'établissement (Settling Time)

M_p: La réponse mesurée relativement à l'unité (dépassement)

Introduction générale:

Dans le domaine de la commande, plusieurs techniques ont été établies pour assurer un réglage désiré. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques [1]. Les techniques de commande classique de type PI ou PID couvrent une large gamme dans les applications industrielles. Ce sont des techniques de commande linéaires et présentent l'intérêt de la simplicité de mise en oeuvre et la facilité de la synthèse. Au cours de temps, ses applications seront non efficaces, notamment si les processus à commander ont des structures complexes et non-linéaires. De plus, l'application de ces techniques exige la connaissance des différents paramètres du modèle de la machine. Cela peut influer sur le fonctionnement du processus et peut entraîner une robustesse médiocre face à la variation de ces paramètres et des dépassements importants lors des régimes transitoires [1,4]. Il y a dès lors plusieurs raisons qui poussent à développer des méthodes d'optimisation intelligente pour le réglage de contrôleurs PID.

Le correcteur PID est la technique la plus utilisée dans la commande des processus industriels pour des décennies. Les raisons majeures de sa large acceptation en industrie sont sa capacité de commander la majorité des processus, ces actions sont bien comprises et son implémentation est très simple. La conception et le réglage du correcteur PID a été un sujet de recherche depuis le jour où Ziegler Nichols ont présenté leur méthode de réglage en 1942. Bien que toutes les techniques existantes pour le réglage des paramètres du correcteur PID, un travail de recherche continu et intensif est encore en cours pour le rehaussement de la qualité et l'amélioration des performances de la commande.

Malheureusement, il a été très difficile de régler le gain de régulateur PID correctement parce que beaucoup d'installations industrielles sont souvent accablés par des problèmes tels que l'ordre supérieur, les retards et les non-linéarités. Il est difficile de déterminer le paramètre PID optimale ou presque optimale avec les méthodes de réglages classique. Pour toutes ces raisons, il est très souhaitable d'augmenter les capacités du contrôleur PID en ajoutant de nouvelles caractéristiques. Plusieurs approches ont été documentées dans la littérature pour déterminer les paramètres du PID, d'abord trouvés par Ziegler Nichols (ZN) réglage. Réseau de neurones, l'approche floue, algorithme génétique ne sont que quelques uns parmi de nombreuses œuvres.

Il y a dès lors plusieurs raisons qui poussent à développer des méthodes d'optimisation intelligente pour le réglage de contrôleurs PID.L'Algorithme d'optimisation par recherche de nourriture bactérien (BFO) est une excellente méthode pour résoudre les paramètres optimaux du régulateur PID. Par conséquent, cette étude développe le contrôleur BFO- PID à la recherche paramètres optimaux du PID. [2]

Pour atteindre cet objectif nous avons divisé notre travail comme suivant :

- Le **premier chapitre**, présente tout les les définissions et les notions de la régulation, ainsi que présente quelque méthodes classiques de réglage des boucles de régulations comme la methode de Ziegler-Nichols,et la methode de Cohen- Coon

- Le **deuxième chapitre** on a présente la méthode d'optimisation par la nourriture bactérienne (BFO).

- Le **troisième chapitre** on essayer deux exemple par la methode BFO et comparer par deux autre methode classique (zeigler nichols et cohen coon)
  1) D'application : moteur à courant continu à excitation séparée.
  2) Modélisation d'un système de contrôle de nivaux de trois réservoirs

Chapitre I

Régulateur PID et système asservie

I .1. Introduction

Les régulateurs PID répondent à plus du 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs Installés dans une usine pétrolière, par exemple, se compte par milliers. Malheureusement, malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies pour les paramètres P, I et D ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler.

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

Au début des années 1990 et dans le but de fournir des règles d'ajustement simples mais plus performantes que celles de Ziegler-Nichols, Åström et ses collaborateurs ont analysé le comportement dynamique d'un grand nombre de processus. Cette analyse a conduit à l'établissement de tableaux servant aux calculs des paramètres P, I et D à partir de mesures simples. [3]

I .2. Généralité sur les systèmes asservis

I .2.1. Définitions

- **La régulation** regroupe l'ensemble des techniques utilisées visant à contrôler une grandeur physique. Par exemples: Pression, température, débit, niveau etc.
- **La grandeur réglée** est la grandeur physique que l'on désire contrôler. Elle donne son nom à la régulation. Par exemple : une régulation de température.
- **La consigne** est la valeur que doit prendre la grandeur réglée.
- **La grandeur réglant** est la grandeur physique qui a été choisie pour contrôler la grandeur réglée. Elle n'est pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.
- **Les grandeurs perturbatrices** sont les grandeurs physiques qui influencent la grandeur réglée. Elles ne sont pas généralement de la même nature que la grandeur réglée.
- **L'organe de réglage** est l'élément qui agit sur la grandeur réglant. [3]

I .2.2. Régulation ou Asservissement

- Dans une régulation, on s'attachera à maintenir constante la grandeur réglée d'un système soumis à des perturbations.
- Dans un asservissement, la grandeur réglée devra suivre rapidement les variations de la consigne.

I .2.3. Principe de fonctionnement

Pour réguler un système physique, il faut [3]:

• **Mesurer** la grandeur réglée avec un capteur.

• **Réfléchir** sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.

• **Agir** sur la grandeur réglant par l'intermédiaire d'un organe de réglage. On peut représenter une régulation de la manière suivante dans la figure (I .1).

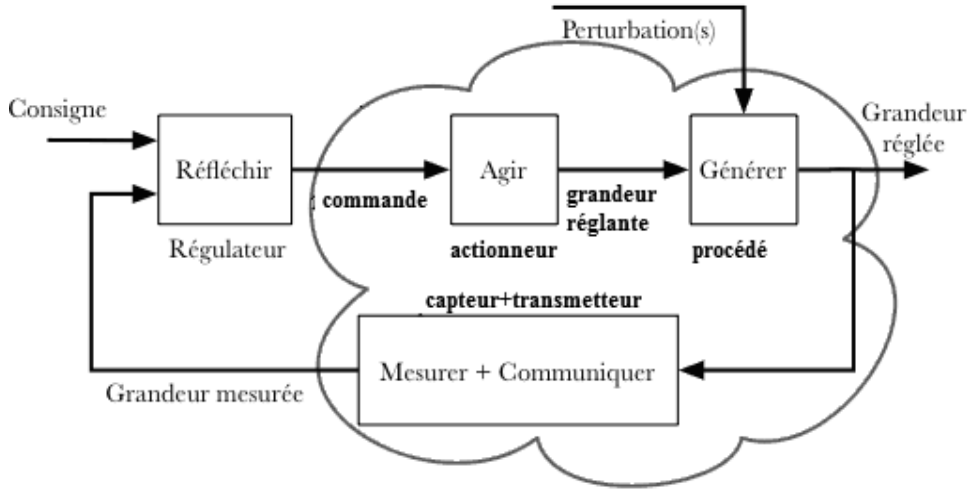


Figure (I .1): Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.

I .2.4. Fonctionnement en boucle ouverte

On parle de fonctionnement en boucle ouverte figure **(I.** 2), quand c'est l'opérateur qui contrôle l'organe de réglage [3].

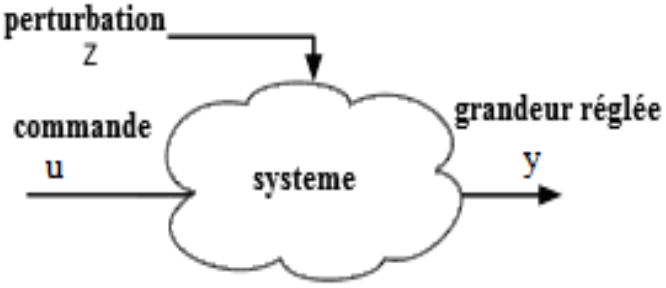


Figure (I .2): Le système en boucle ouverte.

I .2.5. Fonctionnement en boucle fermée

C'est le fonctionnement normal d'une régulation. Le régulateur compare la mesure de la grandeur réglée et la consigne et agit en conséquence pour s'en rapprocher (figure **I** .3) [3].

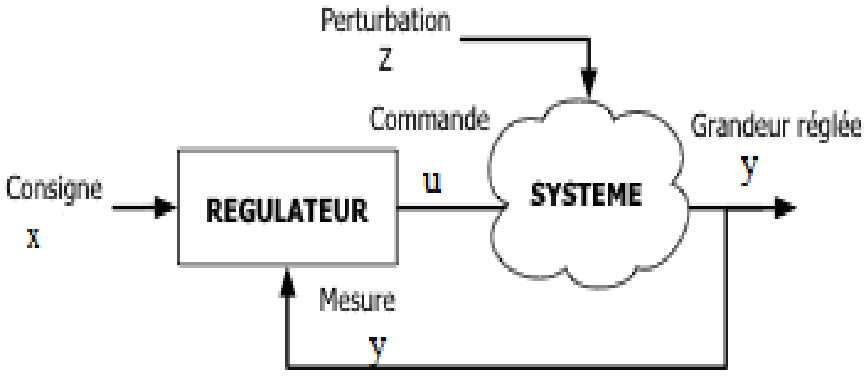


Figure (I .3): Le système en boucle fermée.

I.2.6.Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel tente de représenter les relations entre les différentes grandeurs physiques des boucles de régulation. Il sera composé uniquement des éléments suivants [3]:

- Ligne de parcours d'une grandeur physique (figure I. 4), Cette ligne représente le parcours d'une même grandeur physique de la boucle de régulation.

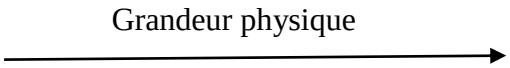


Figure (I .4): Ligne de parcours d'une grandeur physique.

• Bloc gain (figure I.5) : Le bloc représente la relation entre deux grandeurs physiques, relation réalisé par un élément de la boucle de régulation :

$$Y(P) = H(P) \times X(P) \qquad \text{I.1}$$



Figure (I .5): Bloc gain.

• Sommateur et soustracteur (figure I .6) : Ce bloc représente l'addition ou la soustraction de grandeurs physique de même nature.

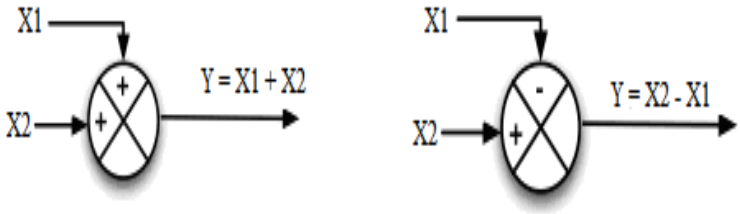


Figure (I .6): Sommateur et soustracteur

La figure (I .7) résume les différentes fonctionnalités dans une boucle de régulation [3].

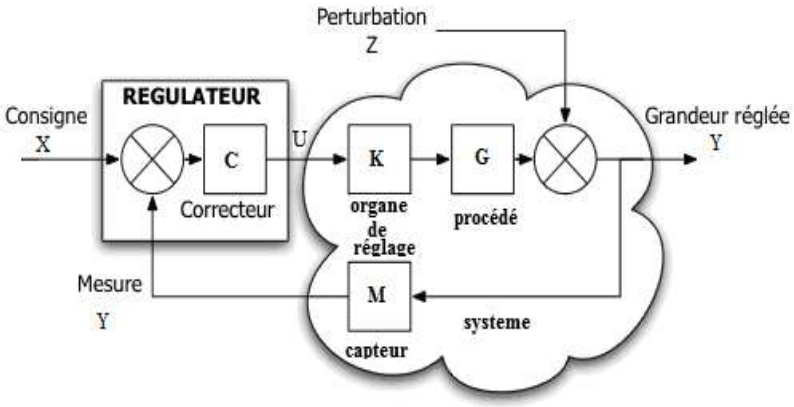


Figure (I .7): Boucle de régulation.

I .2.7. L'influence des perturbations

Une perturbation est une entrée supplémentaire au système qu'on ne peut pas contrôler ou maitriser. Ces perturbations ont une influence sur l'asservissement des systèmes (figure I.8).

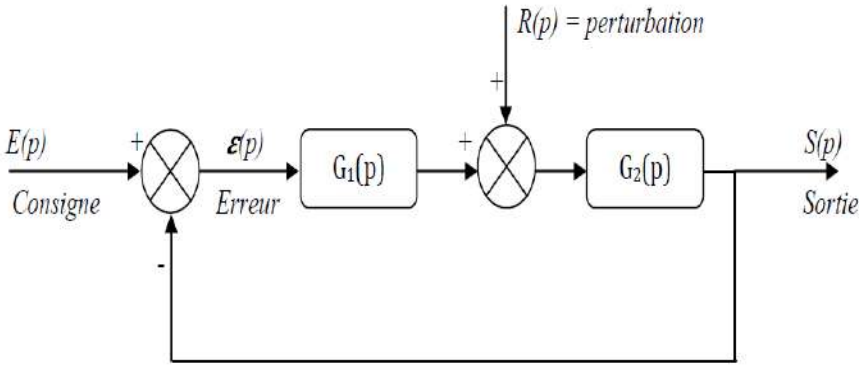


Figure (I.8): Schéma bloc d'un asservissement avec une perturbation.

La fonction de transfert du bloc d'asservissement est représentée comme suit :

Calculons *Y(p)* en fonction de *Z(p)*, (En posant *X(p) = 0*) :

Calculons *Y(p)* en fonction de *X(p)*, (En posant *Z(p) = 0*) :

$$Y_E(\mathrm{p}) = \frac{\mathrm{G_1(p).G_2(p)}}{1+\mathrm{G_1(p).G_2(p)}}\,\mathrm{X\,(p).} \qquad \text{I.2}$$

$$Y_R(\mathrm{p}) = \frac{\mathrm{G_2(p)}}{1+\mathrm{G_1(p).G_2(p)}}\,\mathrm{Z(p)} \qquad \text{I.3}$$

La sortie totale est :

$$Y(p) = \frac{\mathrm{G_2(p)}}{1+\mathrm{G_1(p).G_2(p)}}\,.\mathrm{Z(p)} + \frac{\mathrm{G_1(p).G_2(p)}}{1+\mathrm{G_1(p).G_2(p)}}\,.\mathrm{X(p)} \qquad \text{I.4}$$

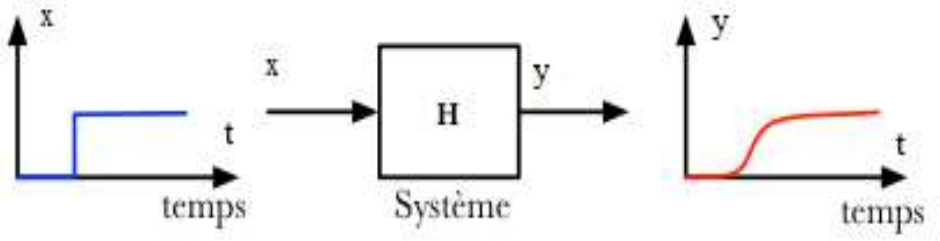
Une manière pratique de caractériser une perturbation sera d'utiliser l'intégrale de la valeur absolue de l'erreur due à une perturbation de charge sous la forme d'un échelon unitaire appliqué à l'entrée du système.

I .3. Caractéristiques statique et dynamiques d'un procédé

I .3.1. Stabilité

I .3.1.1. Procédés naturellement stables

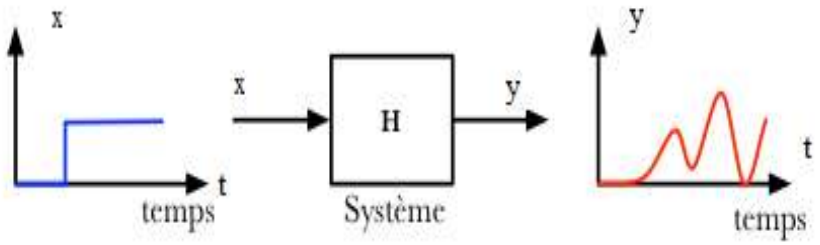
Un procédé est dit naturellement stable (figure I.9) si à une variation finie de la grandeur réglant X correspond une variation finie de la grandeur réglée Y [3].



Figure(I.9) : Le système naturellement stable.

I .3.1.2. Procédés naturellement instables :

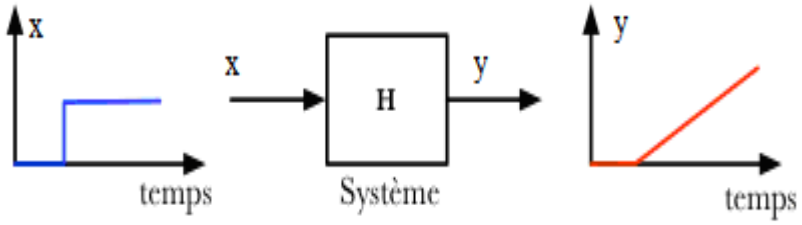
Un procédé est dit naturellement instable (figure I.10) si à une variation finie de la grandeur réglant X correspond une variation continue de la grandeur réglée Y [3].



Figure(I.10):Le système naturellement instable.

I .3.1.3. Procédés intégrateurs :

On dit qu'un procédé est intégrateur (figure I. 11), si pour une entrée X constante, la sortie Y est une droite croissante [3].

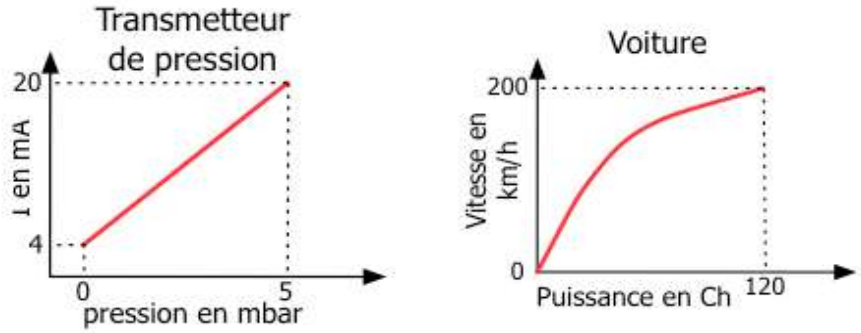


Figure(I.11) : Le procède intégrateur.

I .3.2. Caractéristiques statiques d'un procédé

I .3.2.1. Courbe caractéristique

La caractéristique statique est la courbe représentative de la grandeur de sortie Y en fonction de la grandeur d'entrée X (figure I.12).



Figure(I.12): Caractéristique statique d'un procédé

I .3.2.2. Gain statique

Le gain statique Gs est le rapport entre la variation de la grandeur de sortie Δy et la variation de la grandeur d'entrée Δx [3].

$$G_s = \frac{\Delta_y}{\Delta_x} \qquad \text{I.5}$$

I. 3.2.3. Erreur statique

L'erreur statique ε (*P*) est la différence entre la consigne *X*(*P*) et la mesure *Y*(*P*) en régime statique [3].

$$\varepsilon(P)=X(P)-Y(P) \qquad \text{I.6}$$

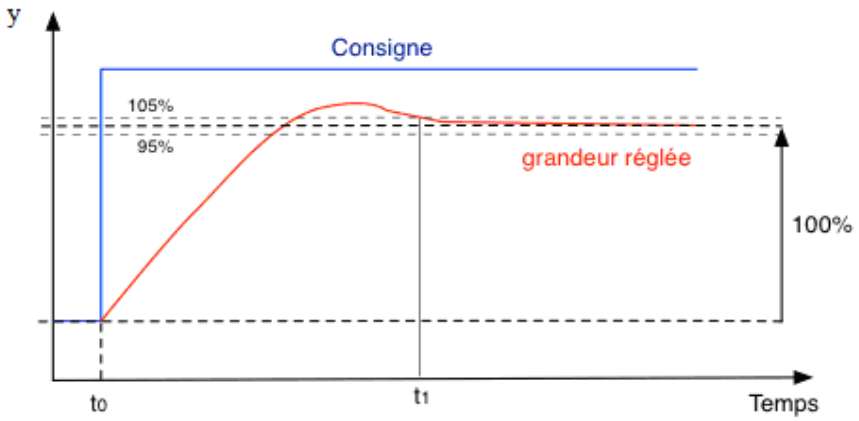
I .3.2.4. Linéarité

Un système linéaire obéit au principe de superposition. L'effet de la somme d'excitations est égal à la somme des effets de chaque excitation. [3]

I .3.3. Caractéristiques dynamiques d'un procédé

I .3.3.1. Temps de réponse

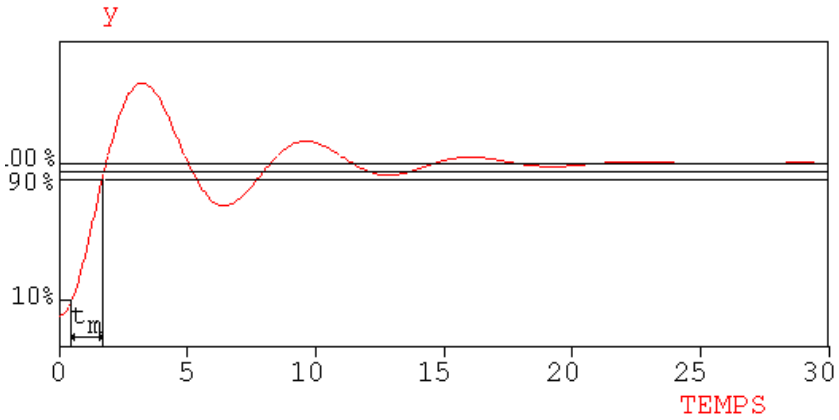
C'est l'aptitude du procédé à suivre les variations de la consigne. Dans le cas d'un échelon de la consigne, la croissance de la grandeur réglée définit les différents temps de réponse. Dans l'exemple ci-dessous de la figure (I.13), on mesure le temps de réponse à ±5% qui est égal à $t_1 - t_0$. [3]



Figure(I.13): Temps de réponse.

I .3.3.2. Temps de montée

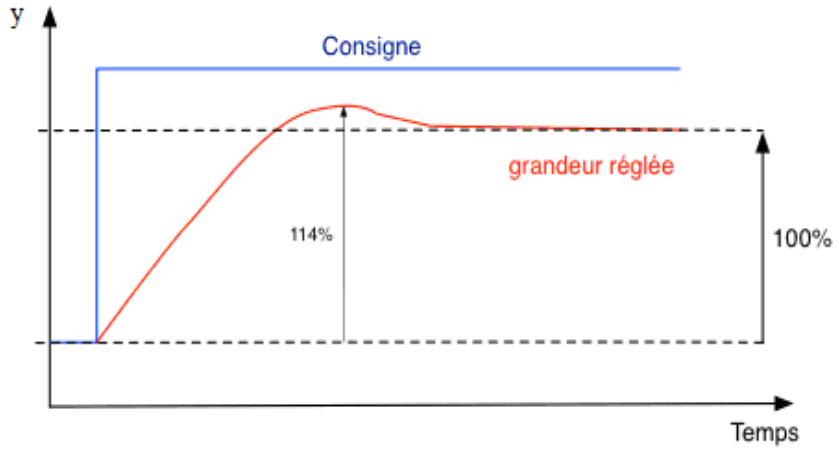
Le temps de montée (figure I.14) est l'intervalle de temps séparant les instants auxquels la réponse indicielle vaut 10% et 90% de la valeur finale. [3]



Figure(I.14): Temps de montée.

I .3.3.3. Dépassement

Le premier dépassement permet de qualifier la stabilité d'un système. Plus celui-ci sera important, plus le système sera proche de l'instabilité. Dans certaines régulations, aucun dépassement n'est toléré, dans d'autre un dépassement inférieur à 15 % est considéré comme acceptable. Dans la réponse indicielle ci-dessous (figure I.15), le premier dépassement est de 14%. [3]



Figure(I.15) : Dépassement.

I .4. Régulateur PID (proportionnelle, intégrale, dérivée)

I .4.1. Définition

Régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) C'est un système d'auto régulation (boucle fermée), qui cherche à réduire l'erreur entre la consigne et la mesure [1].

e= consigne - mesure

Le but de la régulation est de maintenir à une valeur désirée (*Grandeur De Reference*), une grandeur physique (*Grandeur Reglee*) comme la température, l'humidité relative, la pression... soumise à des perturbations en mesurant sa valeur. Après comparaison entre grandeur réglée et grandeur de référence, il en résulte un écart de réglage. En fonction de cet écart, le régulateur forme un signal de commande (*Grandeur De Reglage*) qui va faire varier la puissance de réglage par l'intermédiaire d'un actionneur (*Organe De Reglage*).

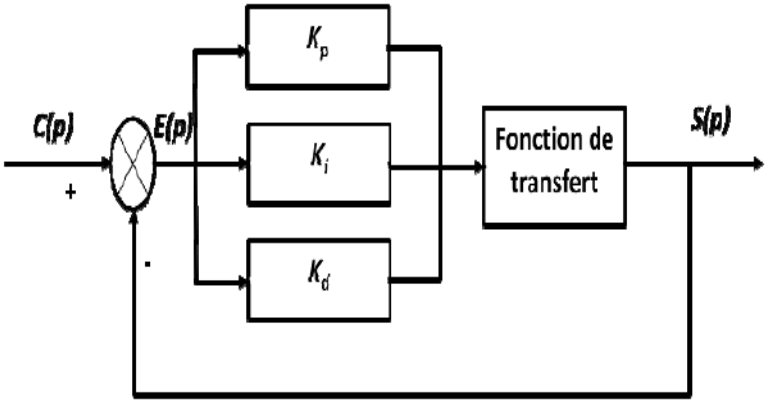


Figure (I.16). Régulateur PID.

Un régulateur PID est obtenu par l'association de ces trois actions et il remplit essentiellement les trois fonctions suivantes :

- Il fournit un signal de commande en tenant compte de l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.
- Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
- Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

I .4.2. Action Proportionnelle

L'action est dite proportionnelle lorsque le signal de commande est proportionnel au signal d'erreur. Elle corrige de manière instantanée, donc rapide, tout écart de la grandeur à régler, elle permet de vaincre les grandes inerties du système. Afin de diminuer l'écart de réglage et

rendre le système plus rapide, on augmente le gain mais, on est limité par la stabilité du système. Le correcteur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante. [2]

I .4.3. Action Intégrale

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 régime permanent.

Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale mais, ce qui provoque l'instabilité en état fermé. L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent, une précision parfaite, en outre, elle permet de filtrer la variable à régler d'où l'utilité pour le réglage des variables bruitées [2].

I .4.4. Action Dérivée

L'action est dite dérivée lorsque le signal de commande est proportionnel à la dérivée du signal d'erreur. L'action Dérivée, en compensant les inerties dues au temps mort, accélère la réponse du système et améliore la stabilité de la boucle, en permettant notamment un amortissement rapide des oscillations dues à l'apparition d'une perturbation ou à une variation subite de la consigne.

L'action D est utilisée dans l'industrie pour le réglage des variables lentes, elle n'est pas recommandée pour le réglage d'une variable bruitée ou trop dynamique. En dérivant un bruit, son amplitude risque de devenir plus importante que celle du signal utile. [2]

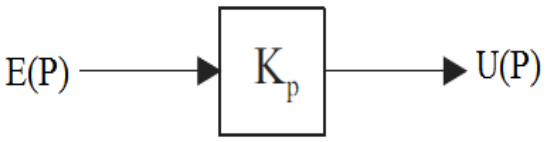
I .5. Type de régulateurs

I .5.1. Régulateur à action proportionnelle (P)

Le régulateur à action proportionnelle, ou régulateur P est une action simple et puisqu'il construit une commande u(t) proportionnelle à l'erreur e(t). [6]

Cette action s'apparente à un effet de ressort (ressort de rappel).

- Loi de commande du régulateur P : $u(t)=k_p.e(t)$ I.7
- Fonction de transfert du régulateur P : $G_c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K_P.$ I.8
- Schéma fonctionnel du régulateur P :



Figure(I.17): Schéma fonctionnel du régulateur P.

I .5.2. Régulateurs à action proportionnelle-intégrale (PI). [3]

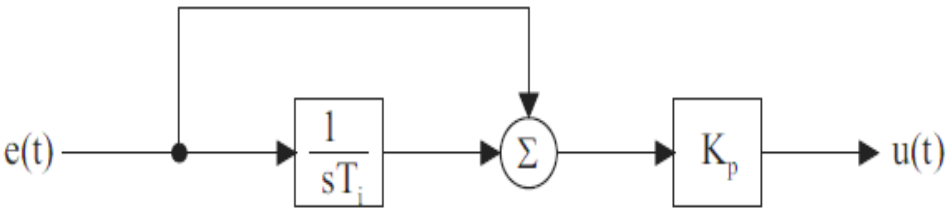
- Fonction de transfert du régulateur PI :

$$c(p) = K_p.\frac{1+T_iP}{T_iP} \qquad \text{I.9}$$

- Equation temporelle :

$$u(t) = \mathrm{K_p}(\varepsilon(t).\frac{1}{\mathrm{T_i}}\int_0^t \varepsilon(t)dt \qquad \text{I.10}$$

- Schéma fonctionnel du régulateur PI :



Figure(I.18): Schéma fonctionnel du régulateur PI.

I .5.3. Régulateur à action proportionnelle-dérivée (PD). [3]

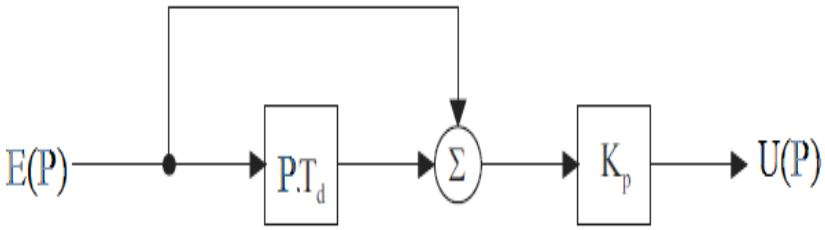
- Fonction de transfert du régulateur PD :

$$c(p) = \frac{\mathrm{U(p)}}{\mathrm{E(p)}} = K_p(1+T_d\mathrm{p}). \qquad \text{I.11}$$

• Equation temporelle :

$$u(t) = \mathrm{K_p}\left(\mathrm{e(t)} + \mathrm{T_d}.\frac{\mathrm{de(t)}}{\mathrm{dt}}\right). \qquad \text{I.12}$$

• Schéma fonctionnel du régulateur PD :



Figure(I.19): Schéma fonctionnel du régulateur PD.

I .5.4. Régulateur à action Proportionnel-Intégral-Dérivée (PID). [3]

Le régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivée) est la combinaison des trois actions de base P, I et D. Grâce aux termes P et I, ils permettent l'annulation d'une erreur statique tout en autorisant grâce à l'action D des performances de rapidité supérieures à celles d'un régulateur PI. Le régulateur PID est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un système industriel. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, et il permet de contrôler un grand nombre de procédés.

I .5.4.1. Principe général :

Le PID est une correction dite "série", c'est-à-dire qu'elle agit à la sortie du comparateur, sur l'erreur. [3]

L'erreur est la différence entre la consigne et la mesure.

Le correcteur PID agit de 3 manières :

- **Action Proportionnelle (P)** : Elle assure la rapidité. L'erreur est multipliée par un gain Kp. Sur la plupart des régulateurs, on règle la Bande Proportionnelle au lieu de régler le gain du régulateur.

$$BP(\%) = \frac{100}{\mathrm{K_p}} \qquad \text{I.13}$$

- **Action Intégrale (I) :** Elle annule l'erreur statique. L'erreur est intégrée et divisée par un gain T_i,
- **Action Dérivée (D)** : Elle améliore la stabilité. L'erreur est dérivée et multipliée par un gain T_d.

I .5.4.2. Différente structures du régulateur PID

Les actions élémentaires d'un régulateur peuvent être associées de plusieurs façons. On parle de la structure d'algorithme du régulateur. Les valeurs des paramètres PID ne donnent pas le même comportement du procédé selon que la structure est parallèle ou mixte. C'est pourquoi il est primordial que l'automaticien connaisse la structure existante du régulateur. La structure est imposé par le fabriquant du régulateur. [5]

a. Structure parallèle

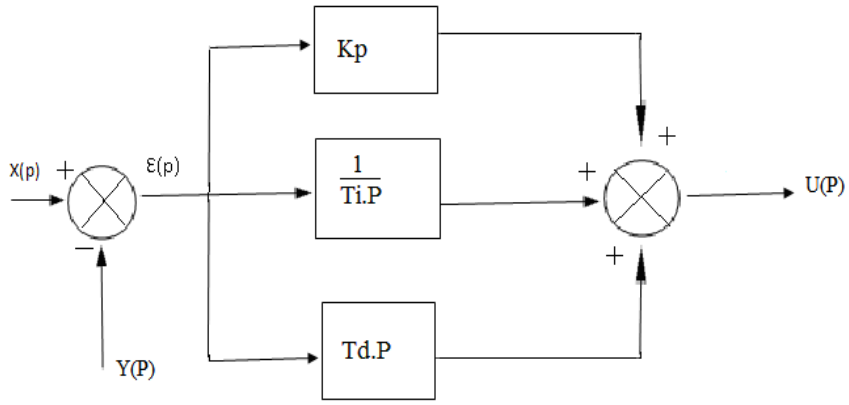
C'est la structure présentée dans la (figure I.20).

- Équation temporelle :

$$u(t) = K_p.\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i}\int_0^t \varepsilon(t).d(t) + T_d\frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \qquad \text{I.14}$$

- Équation de transfert :

$$C(p) = \frac{y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p + \frac{1}{T_i p} + T_d p \qquad \text{I.15}$$



Figure(I.20): Régulation à structure parallèle.

b. Structure série

C'est la structure présentée dans la (figure I.21).

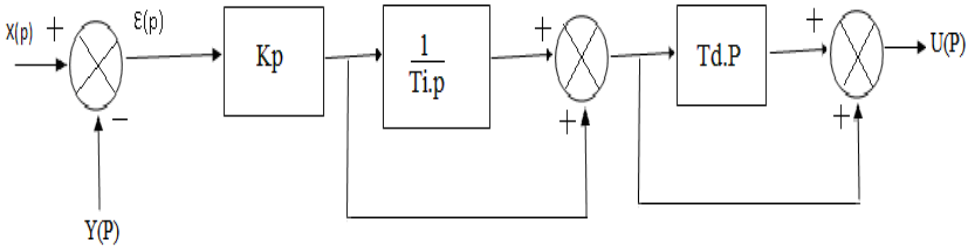
• Équation temporelle :

$$u(t) = \alpha . K_p . \varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) . d(t) + K_p . T_d . \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \qquad \text{I.16}$$

Où $\alpha = \frac{T_i + T_d}{T_i}$ est le coefficient théorique d'interaction entre action intégrale et action dérivée.

• Équation de transfert :

$$C(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p . (1 + \frac{1}{T_i p})(1 + T_p p) \qquad \text{I.17}$$



Figure(I.21): Régulateur à structure série.

c. Structure mixte

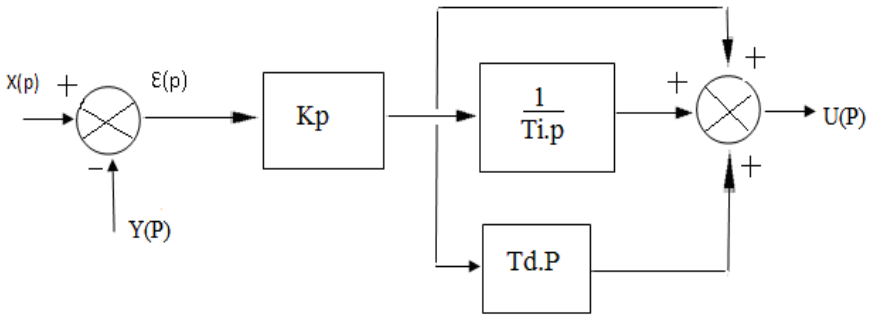
C'est la structure présentée dans la (figure I.22). Elle est la plus utilisé actuellement par les constructeurs. [3]

• Équation temporelle :

$$u(t) = K_p.\varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t \varepsilon(t)d(t) + K_p.T_d.\frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \qquad \text{I.18}$$

• Équation de transfert :

$$C(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p.\left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) \qquad \text{I.19}$$



Figure(I.22) : Régulateur à structure mixte (classique).

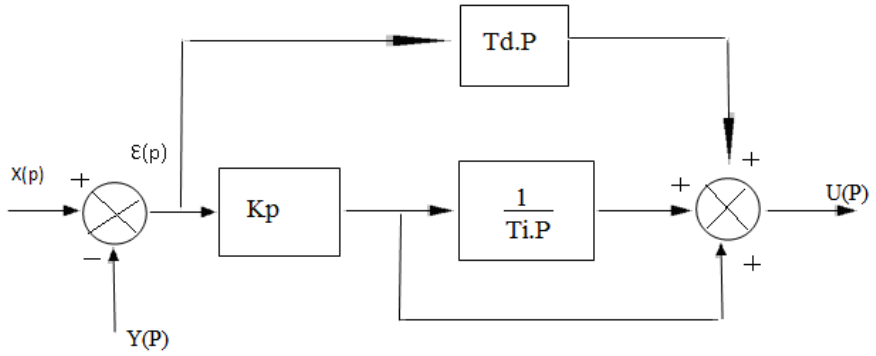
D'autres structures mixtes existent aussi comme par exemple (figure I.23) :

• Equation temporale :

$$u(t) = K_p\varepsilon(t) + \frac{K_p}{T_i}\int_0^t \varepsilon(t)dt + T_d\frac{d\varepsilon(t)}{dt} + u_0 \qquad \text{I.20}$$

• Fonction de transfert :

$$C(p) = \frac{Y(p)}{\varepsilon(p)} = K_p\left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) + T_d p \qquad \text{I.21}$$



Figure(I.23) : Régulateur à structure mixte (variante).

I .5.4.3. Réglage d'un PID :

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients K_p, T_d et T_i afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. L'objectif est d'être robuste, rapide et précise. Il faut pour cela limiter les éventuels dépassements. [3]

- La robustesse est sans doute le paramètre le plus important et délicat. On dit qu'un système est robuste si la régulation fonctionne toujours même si le modèle change un peu. Par exemple, les fonctions de transfert de certains procédés peuvent varier en fonction de la température ambiante. Un régulateur doit être capable d'assurer sa tâche même avec ces changements afin de s'adapter à des usages non prévus (dérive de production, vieillissement mécanique,...).
- La rapidité du régulateur dépend du temps de montée et du temps d'établissement du régime dynamique.

I .6. Méthodes Industrielles De Synthèse D'un régulateur PID :

Le problème de synthèse d'un régulateur PID n'est plus alors qu'un problème de réglage des actions proportionnelle, intégrale et dérivée. Comme les méthodes doivent être utilisées en milieu industrielle, elles doivent d'être rapides et simples à mettre en œuvre, tout en étant le plus précises et efficaces possible. Il existe deux types de méthodes : empiriques et analytiques. [7]

I .6.1. Méthodes empiriques

I .6.1.1. Méthode de Ziegler Nichols

C'est une méthode empirique qui permet d'ajuster les paramètres d'un régulateur PID. Pour commander un processus à partir des mesures sur sa réponse indicielle.

a. Mesure sur la réponse en boucle ouverte

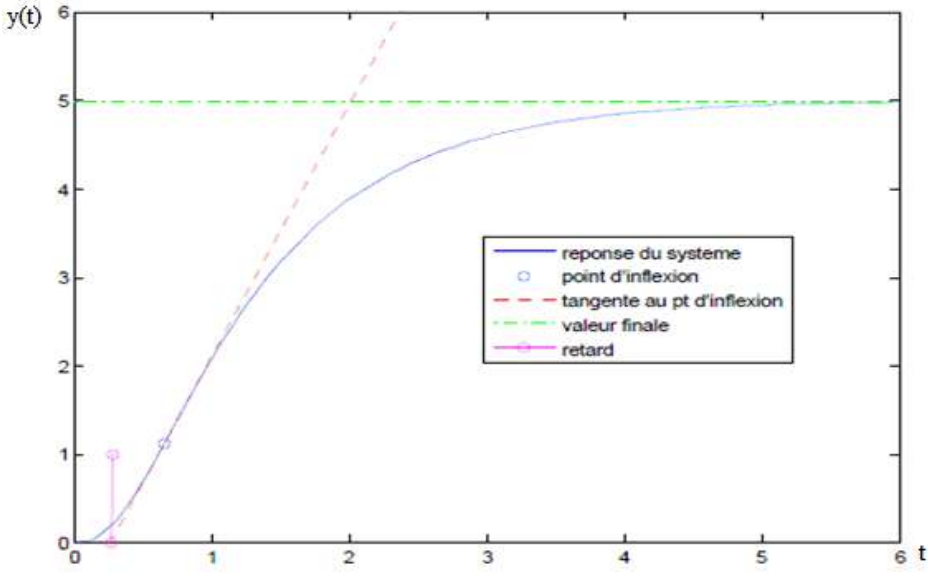
La réponse à un échelon d'amplitude Eo, sans oscillations, sera assimilée à celle d'un premier ordre avec retard. On devra mesurer la pente de la tangente au point d'inflexion à, la valeur finale M et le retard r (figure I.24). La tangente au point d'inflexion est assimilée à la tangente à l'origine du système du premier ordre sans retard. Si τ est la constante de temps du premier ordre, on a **a=M/**τ .

Ziegler & Nichols proposent des réglages des correcteurs P, PI ou PID pour avoir une réponse en boucle ouverte (BO) satisfaisante. Le critère utilisé pour savoir si une réponse est satisfaisante ou non est que le rapport entre les deux premiers dépassements (positifs) est de 0,25. Un correcteur PID a comme fonction de transfert :

$$c(p) = K_p.\left(1 + \frac{1}{T_i p} + T_d p\right) \qquad \text{I.22}$$

Tableau I.1: Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BO.

Action	K_p	T_i	T_d
PI	Ta/Tu		
PD	0.9 Ta/Tu	3.3 Tu	
PID	1.2 Ta/Tu	2.0 Tu	0.5 Tu



Figure(I.24) : Identification en boucle ouverte par Ziegler-Nichols

b. Mesure sur la réponse en boucle fermée

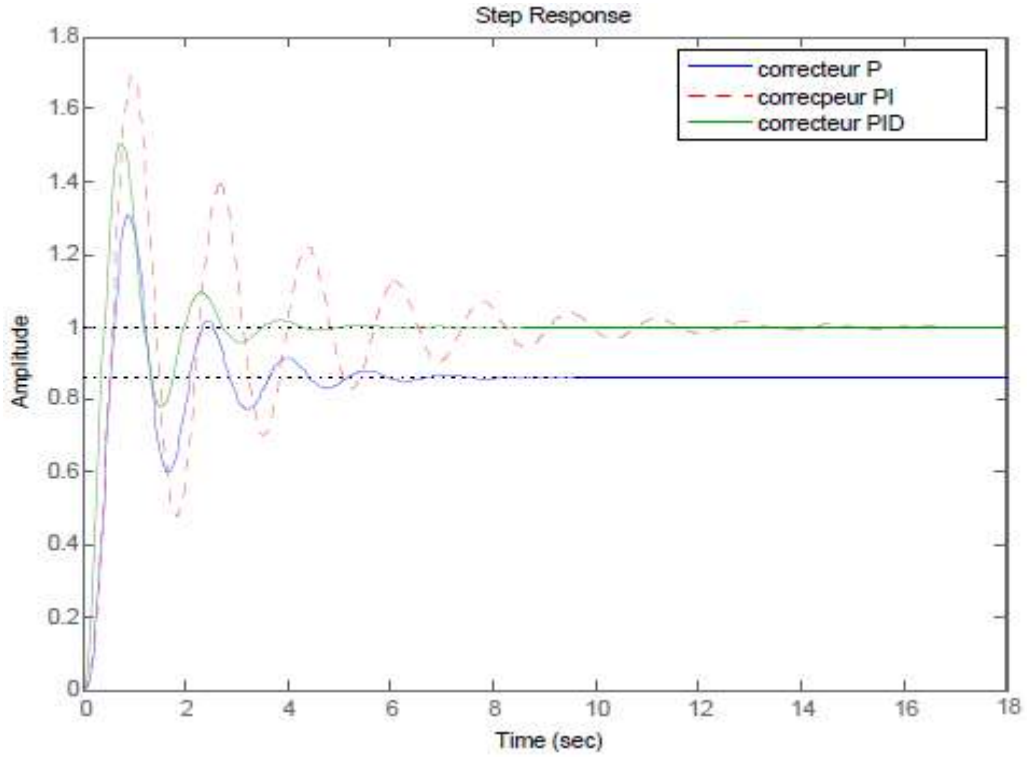
Dans le cas où il est impossible d'ouvrir la boucle de régulation pour obtenir la réponse indicielle, une seconde méthode de Ziegler-Nichols permet de régler un correcteur à partir d'un essai en limite de pompage. Pour obtenir la limite de pompage, on place un correcteur proportionnel dans la boucle fermée et on augmente doucement le gain de ce correcteur jusqu'à obtenir des oscillations entretenues (phénomène de pompage).

On note le gain K_{cr} qui a amené le système en limite de stabilité et on mesure la période T_{ocs} des oscillations obtenues. Les paramètres de régulation pour que la réponse du système soit satisfaisante sont donnes par le tableau suivant:

Tableau I.2: Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon Ziegler Nichols en BF.

Type de régulateur	**Gain K_p**	**T_i**	**T_d**
PI	$0,5.K_{cr}$		
PD	$0,45.K_{cr}$	$0,83.T_{ocs}$	
PID	$0,6.K_{cr}$	$0,5.T_{ocs}$	$0.125T_{ocs}$

La figure (I.25) présente les réponses corrigées selon la méthode de Ziegler Nichols. Dans cet exemple, on peut noter que le correcteur proportionnel laisse une erreur statique, tandis que le correcteur PI est sans erreur statique, mais, il est plus long à stabiliser. Le correcteur PID rend le système relativement stable et sans erreur statique.



Figure(I.25) : Comparaison des correcteurs de Ziegler Nichols.

I .6.1.2. Méthode de Chien-Hrones-Reswick

Cette méthode s'appuie sur un modèle de processus de type. [3]

$$F(s) = \frac{K.e^{-T.s}}{1+\tau.s} \qquad \text{I.23}$$

Le réglage (Table I.3) se fait à partir d'un essai en boucle ouverte et permet de régler le correcteur selon que le système bouclé travaille en régulation ou en poursuite.

Tableau I.3 : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon la méthode de Chien-Hrones-Reswick.

Régulateur	***Réglage en régulation***	***Réglage en poursuite***
PI	$K_p = 0.3\tau/T$	$K_p = 0.3\tau/T$
PD	$K_p = \frac{0.6\tau}{T}, \quad T_i = 4T$	$K_p = \frac{0.6\tau}{T}, \quad T_i = 1.2\tau$
PID	$K_p = \frac{0.95\tau}{T}, T_i = 2.4T, T_d = 0.4T$	$K_p = \frac{0.6\tau}{T}, T_i = \tau, T_d = 0.5T$

I .6.2.Réglages après identification du procédé

Dans le but d'améliorer la précision des méthodes précédentes, on identifie dans un premier temps le système à commander.

I .6.2.1. Modèle non évolutif:

Le modèle choisi étant de Broïda :

$$F(p) = K.\frac{e^{-T.P}}{1+\tau P} \qquad \text{I.24}$$

Les réglages se font selon la structure du régulateur PID de la manière suivante :

Table I.4 : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon le modèle non évolutif.

Action	**P**	**PI série**	**PI parallèle**	**PID série**	**PID parallèle**	**PID mixte**
K_p	0.8τ / KT	0.8τ / KT	0.8τ / KT	0.8τ / KT	0.8τ / KT	0.8τ / KT
T_i	Max	τ	Kτ /0.8	τ	Kτ /0.75	τ + 0.4T
T_d	0	0	0	0.4τ	0.35τ /K	Tτ /(T + 2.5τ)

I .6.2.2. Modèle évolutif :

L'identification est faite en boucle fermée. On relève le gain critique K_{cr} et les périodes des oscillations de pompage T_{ocs}. Le modèle choisi étant plus simple.

$$F(p) = \frac{K.e^{-T.P}}{S} \qquad \text{I.25}$$

On obtient alors les paramètres *K* et *T*, qui s'écrivent $K = \frac{K_{cr}}{6.28T_{acs}}$ et $T = \frac{T_{ocs}}{4}$.

Les réglages se font selon la structure du régulateur PID de la manière suivante :

Tableau I.5 : Réglage d'un correcteur P, PI ou PID selon le modèle évolutif.

Action	**P**	**PI série**	**PI parallèle**	**PID série**	**PID parallèle**	**PID mixte**
K_p	0.8τ / *KT*	0.8τ / *KT*	0.8τ / *KT*	0.8τ / *KT*	0.8τ / *KT*	0.8τ / *KT*
T_i	Max	5T	KT^2 /0.15	4.8T	KT^2 /0.15	5.2*T*
T_d	0	0	0	0.4T	0.35/*K*	0.4*T*

I .7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une idée générale sur les systèmes asservis et la régulation PID. L'action associée au régulateur 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. Ce type de correcteur est le plus utilisé en milieu industriel.

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. Il existe de nombreuses méthodes utilisées pour optimiser les paramètres du régulateur PID.
Dans le prochain chapitre, nous allons présenter une méthode d'optimisation basée sur La recherche de nourriture bactérienne BFO pour le réglage optimale des paramètres des régulateurs PID.

Chapitre II

Optimisation par recherche de nourriture bactérienne

II.1. Introduction

La sélection naturelle tend à éliminer les animaux avec des ‘stratégies de recherche de nourriture’ pauvres (méthodes de localisation, manipulation, et ingestion de la nourriture) et favorise la propagation des gènes de ces animaux qui ont des stratégies de recherche de nourriture réussies car ils sont plus susceptibles de profiter de la réussite de la reproduction (ils obtiennent assez d’aliments afin de leur permettre de se reproduire). Après nombreuses générations, les stratégies de recherche de nourriture pauvres sont éliminées ou transformées en des stratégies bonnes. Ces principes évolutionnistes ont conduit les scientifiques à émettre l'hypothèse qu'il convient de modéliser l'activité de recherche de nourriture comme un processus d'optimisation.

Dans cette section, nous expliquons tout d’abord la biologie et la physique régissant le comportement chimiotactique (recherche de nourriture) de la bactérie **E. coli**. Ensuite, nous introduisons un modèle d'optimisation algorithmique inspiré du comportement de la bactérie **E. coli** lorsque cette dernière recherche sa nourriture. Finalement, nous montrons que cet algorithme peut effectuer une optimisation pour un problème de minimisation d’une fonction objective. [8]

II .2. Recherche de nourriture bactérienne par E. coli

La bactérie Escherichia coli (**E. coli**) a une membrane plasmique, une paroi cellulaire, et une capsule qui contient le cytoplasme et le nucléoide. Il utilise jusqu'à six flagelles pour la locomotion. La cellule est d'environ 2 μm de longueur et pèse environ 1 picogramme. Lorsque **E. coli** se développe, elle se divise au milieu en deux ‘filles’. Suffisamment de nourriture donnée et maintenu à la température de l'intestin humain (un endroit où il vive) qui est de 37 °C, **E. coli** peut synthétiser et reproduire tout ce qu'il faut pour faire une copie de lui même en environ 20 min. Des mutations dans **E. coli** se produisent à un taux d'environ 10^{-7} par gène, par génération. [8]

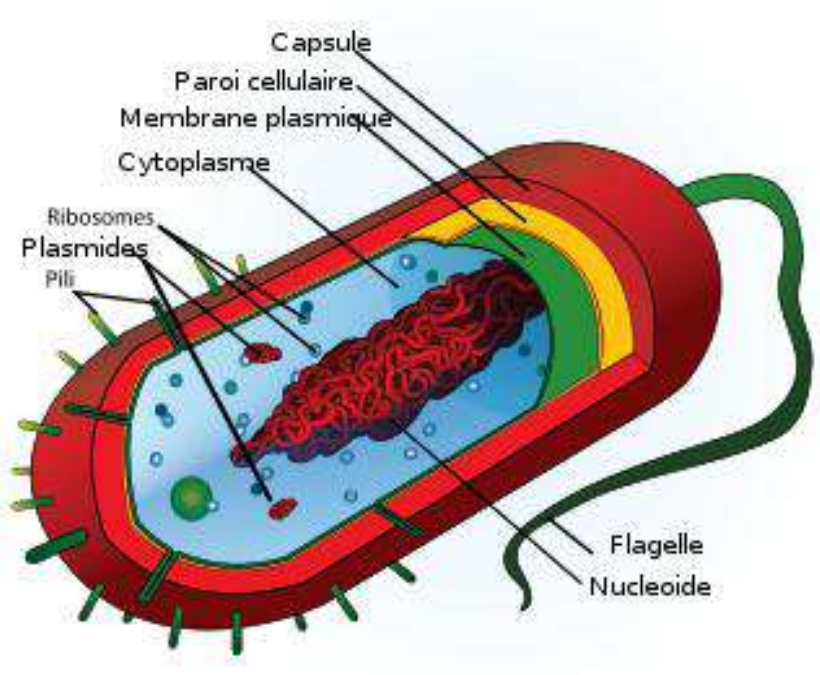


Figure (II.1): Escherichia coli.

II .3. Natation et Culbute

Le déplacement de E. coli est réalisé par l'intermédiaire d'un ensemble de flagelles relativement rigides, qui lui permettent de 'nager', chacune d'elles tournant dans la même direction à environ 100 à 200 tours par seconde. Chaque flagelle est configurer de sorte que la base du flagelle (c'est à dire, où elle est connectée à la cellule) tourne dans le sens anti horloger, comme il est vu à partir de l'extrémité libre du flagelle regardant vers la cellule, il produit une force contre la bactérie, de sorte qu'il pousse la cellule. Si un flagelle tourne dans le sens horloger, il va tirer la cellule. En outre, le mécanisme qui crée des forces de rotation pour faire tourner le flagelle dans les deux sens est décrit par les biologistes comme étant un 'moteur' biologique.

Une bactérie E. coli peut se déplacer de deux manières différentes: elle peut 'nager' (nage pour une période de temps) ou elle peut 'culbute', et elle alterne entre ces deux modes de fonctionnement toute sa vie (c'est à dire, il est rare que les flagelles s'arrête de tourner).

Tout d'abord, nous expliquons chacun de ces deux modes de fonctionnement. Par la suite, nous allons expliquer comment il décide combien de temps à nager avant qu'il culbute.

Si les flagelles tournent dans le sens horloger, chaque flagelle tire sur la cellule et l'effet net est que chaque flagelle fonctionne relativement indépendant des autres et ainsi la bactérie

'culbute' sur elle-même (c'est à dire, la bactérie n'a pas de sens de mouvement et il y a peu de déplacement). Voir la Figure. II.2(a). Pour culbuter après un parcoure, la cellule ralentit ou s'arrête en premier. Etant donné que les bactéries sont si petites qu'elles ne subissent pratiquement aucune inertie, seule la viscosité, de sorte que lorsqu'une bactérie s'arrête de nager, il s'arrête à l'intérieur du diamètre d'un proton. L'intervalle de temps pendant lequel une culbute se produit est appelé 'intervalle de culbute'.

Sous certaines conditions expérimentales (milieu isotrope, milieu homogène et sans nutriment ou gradients de substances nocives) pour une cellule de 'type sauvage', l'intervalle de culbute moyen est d'environ 0,14 ± 0,19 s. Après une chute, la cellule sera généralement orienter vers une direction aléatoire, néanmoins la direction de son dernier voyage avant la dégringolade est la plus favorisée.

Si les flagelles se déplacent dans le sens anti-horloger, leurs effets s'accumulent en formant un faisceau, et par conséquent, ils font essentiellement un "propulseur composite" et poussent la bactérie de telle sorte qu'ellenage dans une direction (voir Figure .II.2 (a)). Sur un parcoure, les bactéries nagent à une vitesse d'environ 10-20 μm/s, mais dans un milieu riche elles peuvent nager encore plus vite. L'intervalle de temps au cours de laquelle un parcoure se produit est appelé "intervalle de parcoure". Sous certaines conditions expérimentales (citées précédemment) pour une cellule de type sauvage, l'intervalle de parcoure moyen terme est d'environ 0,86 ± 1,18 s. Les mouvements ne sont pas parfaitement droits puisque la cellule est soumise à un mouvement brownien qui l'oblige à se dévier d'environ 30 degrés dans 1 sec. [9]

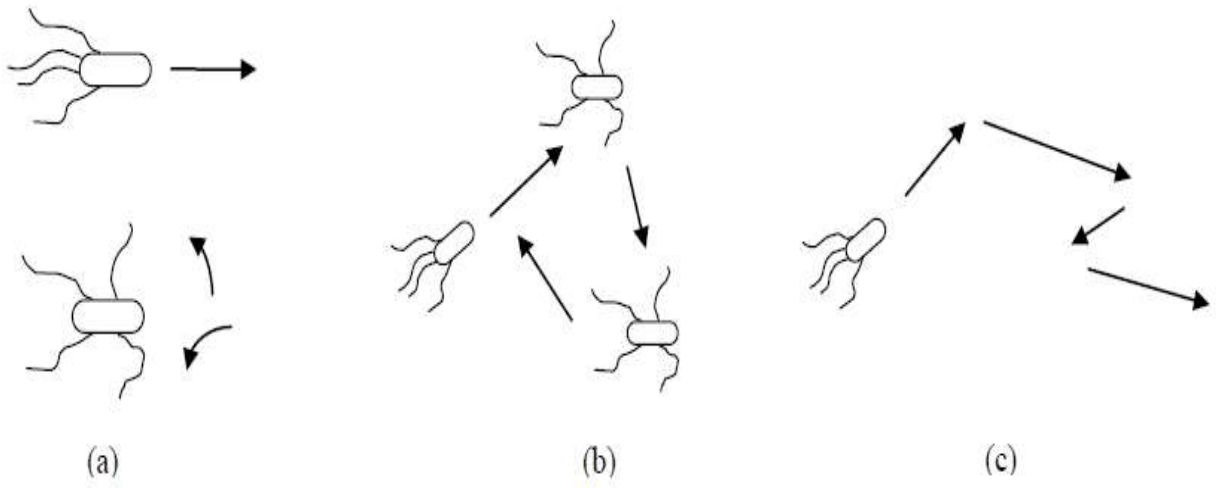


Figure (II.2) différentes techniques de déplacement de la bactérie E. coli

II .4. Optimisation par la recherche de nourriture bactérienne :

Optimisation par la recherche de nourriture bactérienne (BFO) est une nouvelle technique de calcul évolutif qui a été proposée par Passino [10]. Elle est inspirée à partir du comportement bactérien. Les bactéries ont tendance à se rassembler dans les zones riches en éléments nutritifs par une activité appelée chimiotactisme. Il est connu que les bactéries nagent en tournant un fouet comme des flagelles entraînés par un moteur réversible, incorporé dans la paroi cellulaire. E. coli a de 8-10 flagelles placés aléatoirement sur un corps de cellule.

Quand tous les flagelles tournent au sens anti-horloger, ils forment un compact, propulsant de manière hélicoïdale la cellule le long d'une trajectoire, qui est appelé parcoure. Lorsque les flagelles tournent vers la droite, ils tirent sur les bactéries dans des directions différentes et faites dégringoler les bactéries. Le système de recherche de nourriture bactérienne se compose principalement de quatre mécanismes séquentiels à savoir **chimiotactisme**, **l'essaimage**, **la reproduction** et **l'élimination-dispersion**.

Un bref aperçu de chacun de ces processus est donné dans cette section.

II .4.1. Chemotaxis:

Une bactérie E. coli peut se déplacer de deux manières différentes:
Elle peut nager pendant une période de temps ou elle peut culbuter, et s'alterne entre ces deux modes de fonctionnement durant tout ca vie. Dans le BFO, une unité de marche avec direction aléatoire représente une culbute et une unité de marche dans la même direction représente un déplacement. Dans le calcul chimiotactisme, le mouvement de la ième bactérie après un pas est représenté en tant que :

$$\theta^i\left(j+1,k,l\right)=\theta^i\left(j,k,l\right)+C\left(i\right)+\varphi\left(j\right) \qquad \text{(II.1)}$$

Où $\theta^i\left(j,k,l\right)$ dénote l'emplacement de l'i^{ème} bactérie au $J^{ème}$ chimiotactique, $k^{ème}$ reproduction et l^{ème} étape d'élimination et de dispersion. C(i) est la longueur de l'unité de marche, qui est une constante dans l'algorithme de base du BFO et $\varphi\left(j\right)$ est l'angle de direction de la j^{ème} étape.

Lorsque l'activité est exécutée, $\varphi\left(j\right)$ e st l a même que $\varphi\left(j-1\right)$ sinon, $\varphi\left(j\right)$ est un angle aléatoire réalisé dans un intervalle de $[0,2\pi]$. Si le coût à $\theta^i\left(j+1,k,l\right)$ est meilleur que le coût à $\theta^i\left(j,k,l\right)$, la bactérie prend une nouvelle étape de taille C(i) dans cette direction sinon elle est

autorisée à culbuter. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que le nombre d'étapes prises soit supérieur au nombre de boucles chimiotactique Nc. [11]

II .4.2- Essaimage:

Les bactéries en période de stress libèrent des attractifs pour signaler aux autres bactéries pour essaimer ensemble. Chaque bactérie libère également un répulsif pour signaler aux autres à se trouver à une distance minimale de celle-ci. Ainsi, tous auront une cellule à l'attraction de la cellule par l'intermédiaire d'attractif et une cellule à la répulsion via répulsif. La cellule de signalisation cellulaire dans **E. coli** essaim peut être mathématiquement représentée comme :

$$J_{cc}\left(\theta,P\left(j,i,l\right)\right)=\sum_{i=1}^{N}J_{cc}\left(\theta,\theta^{i}\left(j,i,l\right)\right) \qquad \text{II.2}$$

$$J_{cc}\left(\theta,P\left(j,i,l\right)\right)=\sum_{i=1}^{N}\left[-d_a\exp\left(-w_a\sum_{m=1}^{P}\left(\theta_m-\theta_m^i\right)^2\right)\right]+\sum_{i=1}^{N}\left[-h_r\exp\left(-w_r\sum_{m=1}^{P}\left(\theta_m-\theta_m^i\right)^2\right)\right] \qquad \text{II.3}$$

Où $J_{cc}\left(\theta,P\left(j,i,l\right)\right)$ représente la valeur de la fonction objective à ajouter à la fonction objective réelle, N est le nombre total de bactéries, p est le nombre de variables à optimiser et $\theta=\left[\theta_1,\theta_2,\ldots,\theta_p\right]^T$ est un point dans le domaine de recherche de dimension p,d_a,w_a,h_r et w_r sont des coefficients qui doivent être choisis correctement. [11]

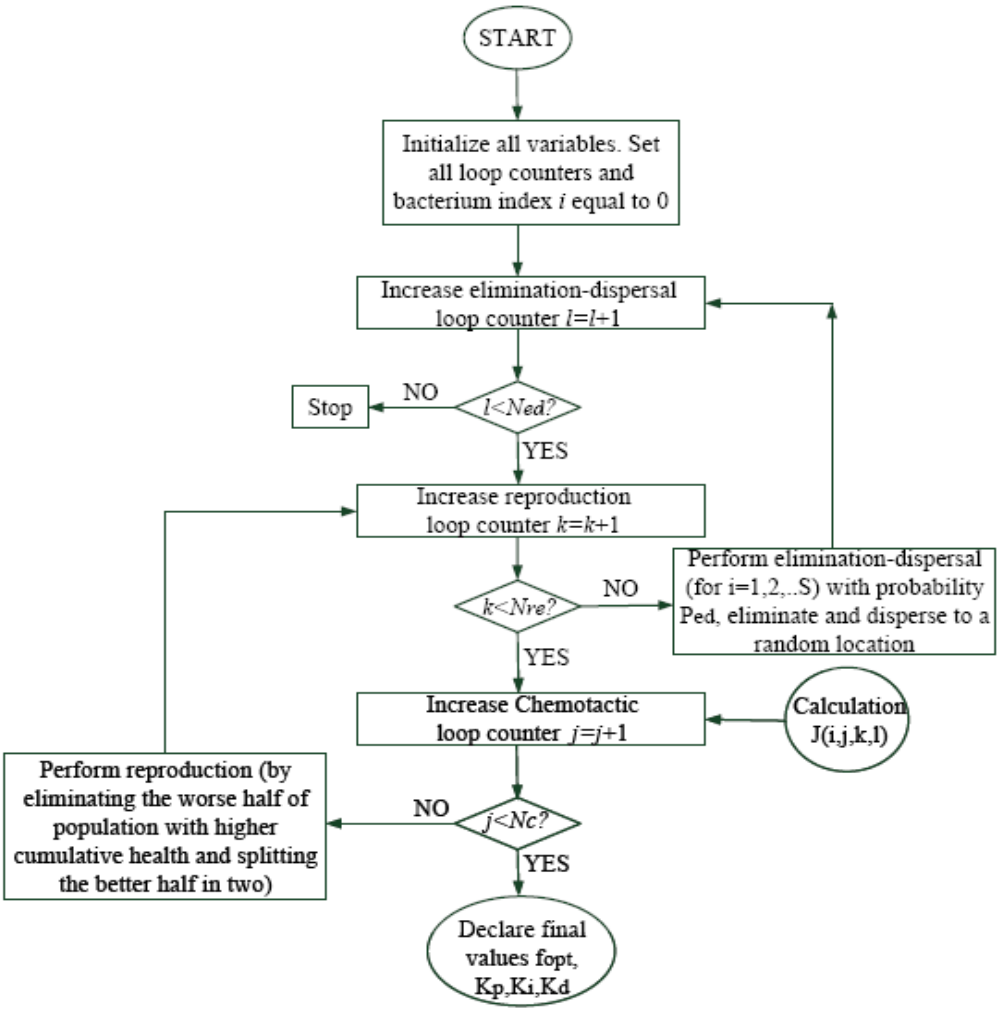
II .4.3- Reproduction:

Après que toutes les étapes de chimiotactiques Nc ont été achevées, une étape de reproduction a eu lieu. Les valeurs d'adaptation des bactéries sont triées dans l'ordre croissant. La moitié inférieure des bactéries ayant une valeur de fitness supérieur meurent et le reste (N_r =N/2) des bactéries peuvent se diviser en deux bactéries identiques. Ainsi, la taille de la population après la reproduction est maintenue constante. [8]

II .4.4- Elimination et dispersion:

Comme les bactéries peuvent se coincer autour des positions optimales initiales ou locales, il est nécessaire de diversifier les bactéries graduellement ou brusquement de sorte que la possibilité d'être piégées dans un minimum local est éliminé. L'opération de dispersion a lieu après un certain nombre de processus de reproduction.

Une bactérie est choisie, selon une probabilité prédéterminée **P**, à être disperser et déplacé à une autre position à l'intérieur de l'environnement. Ces événements peuvent aider à empêcher les minima locaux d'être piégés efficacement, mais perturbent de façon inattendue le processus d'optimisation. [8]



Figure(III.3) : Organigramme de l'algorithme BFO.

P : Dimension de l'espace de recherche,

N : nombre de bactéries dans la population,

Nc : étapes chimiotactiques,

Nre : nombre d'étapes de reproduction,

Ned : nombre d'événements élimination-dispersion,

Ped : élimination-dispersion avec une probabilité

C (i) : taille de l'étape prise dans la direction aléatoire spécifiée par la Culbute.

II .5. Choix d'une méthode d'optimisation : [8]

On peut se demander quelle est la meilleure méthode ou technique d'optimisation, autrement dits quelle est la méthode qui convient à un tel problème. A notre avis quand un utilisateur est confronté à un problème d'optimisation globale, la première chose à faire est de bien cerner le problème, à savoir :

- Les suppositions sur la fonction à optimiser,
- les hypothèses sur le domaine de recherche,
- le coût d'évaluation de la fonction tel que le temps CPU, le nombre de sous programmes nécessaire, etc…
- la facilité de l'évaluation,
- la précision dont on dispose sur le problème,

Donc, on voit bien que connaissant les détails du problème étudié peut faciliter la tâche à l'utilisateur et le guider dans son choix ; ce qui lui permet de fixer ses objectifs en conséquence. Malheureusement, aucune méthode d'optimisation n'est capable de traiter efficacement tous les cas. En effet, **Wolpert** et **Macready** ont montré que si l'on considère l'ensemble de tous les problèmes d'optimisation possibles, alors aucun algorithme n'est meilleur qu'un autre. Donc le choix d'un algorithme ou autre ne doit pas se faire par comparaison sur des cas de tests généraux. La comparaison entre les algorithmes d'optimisation ne peut avoir lieu qu'une fois on a précisé le problème à traiter, autrement dit la fonction objectif. Selon l'optimisation est non seulement une théorie mathématique mais aussi une sorte de cuisine algorithmique où c'est principalement l'expérience qui guide l'utilisateur dans le choix de l'algorithme à implanter. Pour choisir la méthode la plus adaptée à un problème bien précis, les caractéristiques principales prises en compte sont :

- La capacité à éviter les minima locaux,

- la robustesse d'un optimum,
- la capacité à traiter des problèmes mono ou multi-objectif,
- la rapidité de convergence.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode d'optimisation qui s'appuie sur les caractéristiques principales des systèmes et phénomènes naturels : la recherche de nourriture bactérienne (BFO). Cette méthode est très efficace pour les problèmes d'optimisation complexes sans avoir besoin de modifier la structure de base de ces algorithmes. Elle est devenue très populaires grâce à sa simplicité d'emploi dans différents domaines.

Ce chapitre à été consacrée à la présentation d'une nouvelle technique d'optimisation plus évolutive et facile, elle simule le comportement des bactéries lors de la recherche de la nourriture, ce modèle d'optimisation reproduit le comportement chimiotactique de la bactérie **E. coli**. Cette technique a donné de bons résultats dans différentes domaines de recherche, ce qui nous a encouragés à l'appliquer dans l'optimisation des paramètres des régulateurs PID. Par la suite nous avons présenté les caractéristiques principales qui peuvent aider au choix de la méthode la plus adaptée à un problème d'optimisation.

Dans le chapitre prochain nous appliquons l'algorithme BFO-PID sur des procédés industriels pour tester la robustesse de cet algorithme.

Chapitre III

Simulation et Résultat

III.1 Introduction :

Les régulateurs PID sont les plus populaires dans les milieux industriels de production et les plus utilisés dans le processus industriel car ils permettent de régler à l'aide de ses trois paramètres des performances (dépassement, temps de monté, temps de réponse). L'idée de cet organe de régulation est de modifier intentionnellement la valeur de l'erreur qui subsiste entre la consigne et la mesure effectuée [3].

Le but de ce chapitre est la synthèse du régulateur PID-BFO. Selon les performances du système (annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, le temps de réponse et le temps de monté), on détermine les paramètres optimales (K_p, K_i, K_d) du régulateur PID en utilisant la méthode d'optimisation par recherche de nourriture bactérienne (BFO), afin d'obtenir un système précis, rapide, stable et robuste.

Pour montrer l'efficacité du l'algorithme BFO- PID dans lequel le régulateur résulte d'un processus d'optimisation, nous avons comparé ses performances à celles d'un autre régulateur PID. Ce dernier est un PID dont les coefficients ont été réglés par la méthode empirique de « Ziegler & Nichols » et « Cohen Coon », en utilisant une boucle de réaction pour la mise en auto-oscillation.

Nous avons appliqué le régulateur BFO-PID sur des systèmes d'ordre différents définis dans à savoir un moteur à courant continu à excitation séparée et un procédé de control de niveau de trois réservoirs.

III.2 La Mise en Œuvre du Projet sur logiciel Matlab:

III.2.1 LTI VIEWER :

LTI VIEWER (LTI : linear time invariant) est un environnement qui permet de visualiser le comportement des systèmes linéaires : réponse à échelon et à l'impulsion, diagramme de BODE, lieu de NYQUIST et de black, plan de Laplace etc. [12].

III.2.2 Fonction de transfert :

Pour représenter une fonction de transfert d'un système et manipuler ces différents paramètres, ils doivent être codés dans un format approprié dans MATLAB.

Une fonction « tf » est utilisée pour cela, prenons un exemple : La fonction de transfert d'un procédé est comme suit :

$$G(s) = \frac{0.04}{0.01s^2 + 0.23s + 1.202} \qquad \text{(III.1)}$$

Peut être représenté par G = tf ([0.04], [0.01 0.23 1.202])

Les performances du système peuvent être obtenues comme suit :

S=Stepinfo (G, 'Rise Time limits', [0.1, 0.9])

La commande ci-dessus renvoie :

S=

- RiseTime: 0.3290
- SettlingTime: 0.5818
- SettlingMin: 0.0301
- SettlingMax: 0.0333
- Overshoot: 0
- Undershoot: 0
- Peak: 0.0333
- PeakTime: 1.5706

La réponse à une entrée échelon unité du système obtenu à l'aide de la commande LTI VIEWER est donnée par la figure (III.1).

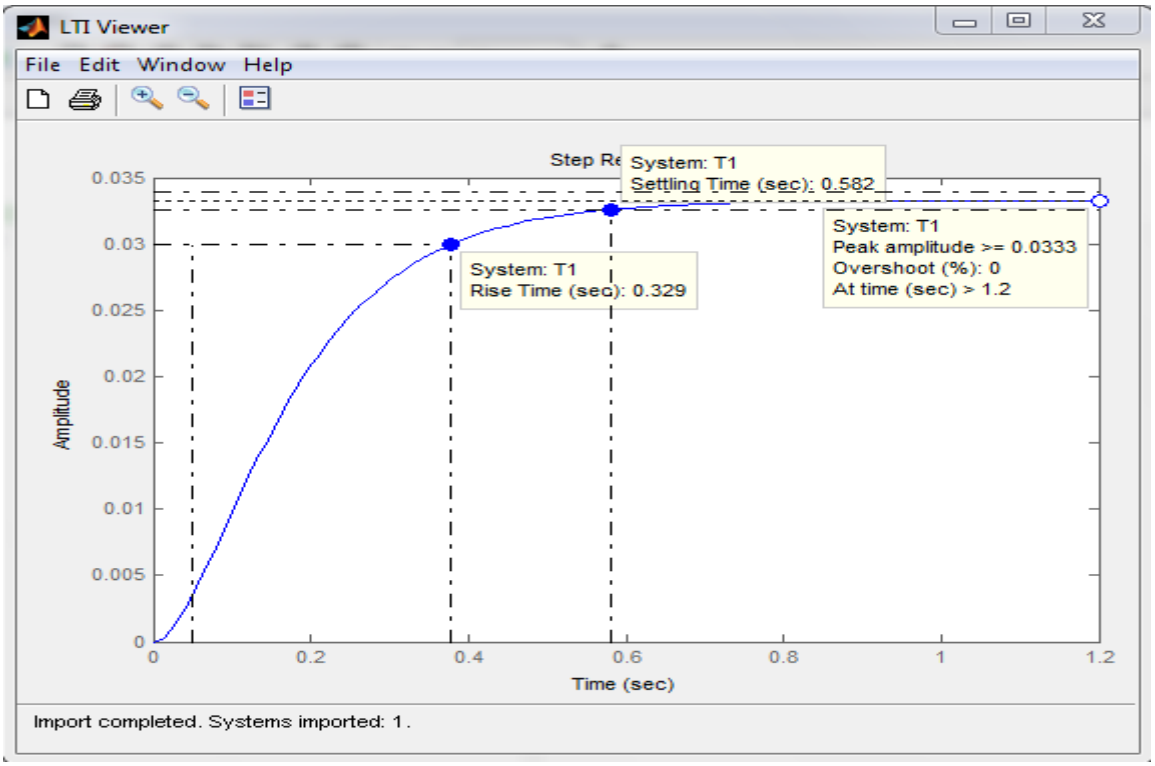


Figure III.1. La réponse à une entrée échelon du système obtenu à l'aide de LTI VIEWER

III.2.3 Fonctions de transfert d'un procédé en boucle fermé avec un régulateur PID-BFO

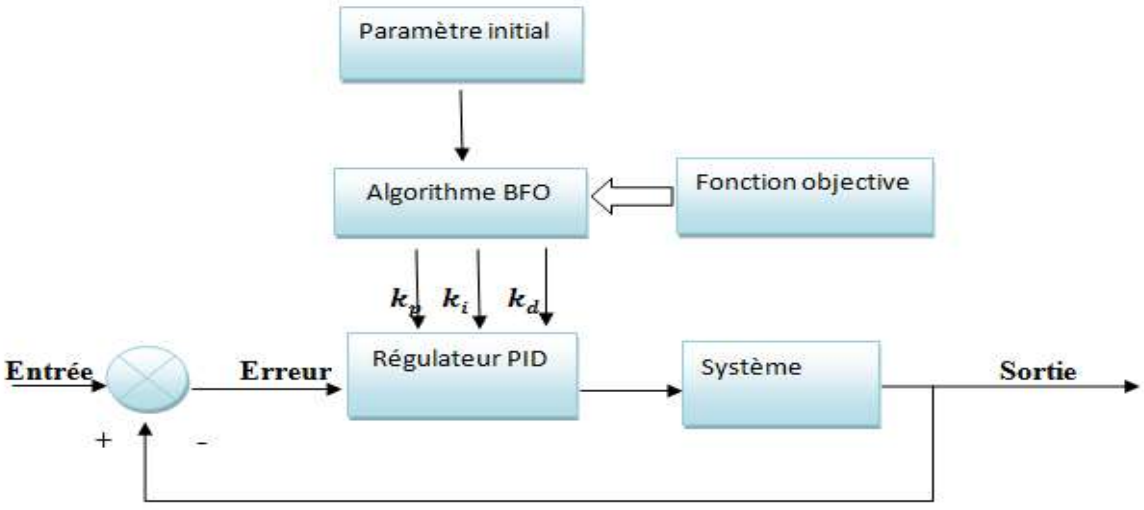


Figure III.2. Schéma block de contrôleur BFO-PID

Fonction de transfère du régulateur PID :

$$PID(s) = \frac{1}{s}\left(K_p s + K_i + K_d s^2\right) \qquad \text{III.2}$$

Ainsi, la fonction du transfert globale du procédé avec correcteur PID :

$$G_c(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{PID(s) * G(s)}{1 + PID(s) * G(s)} \qquad \text{III.3}$$

$$G_c(s) = \frac{0.04k_d s^2 + 0.04k_p s + 0.04k_i}{0.01s^3 + \left(0.01 + 0.04k_d\right)s + 1.202 + 0.04k_i} \qquad \text{III.4}$$

III.2.4 L'organigramme de la méthode BFO [8].

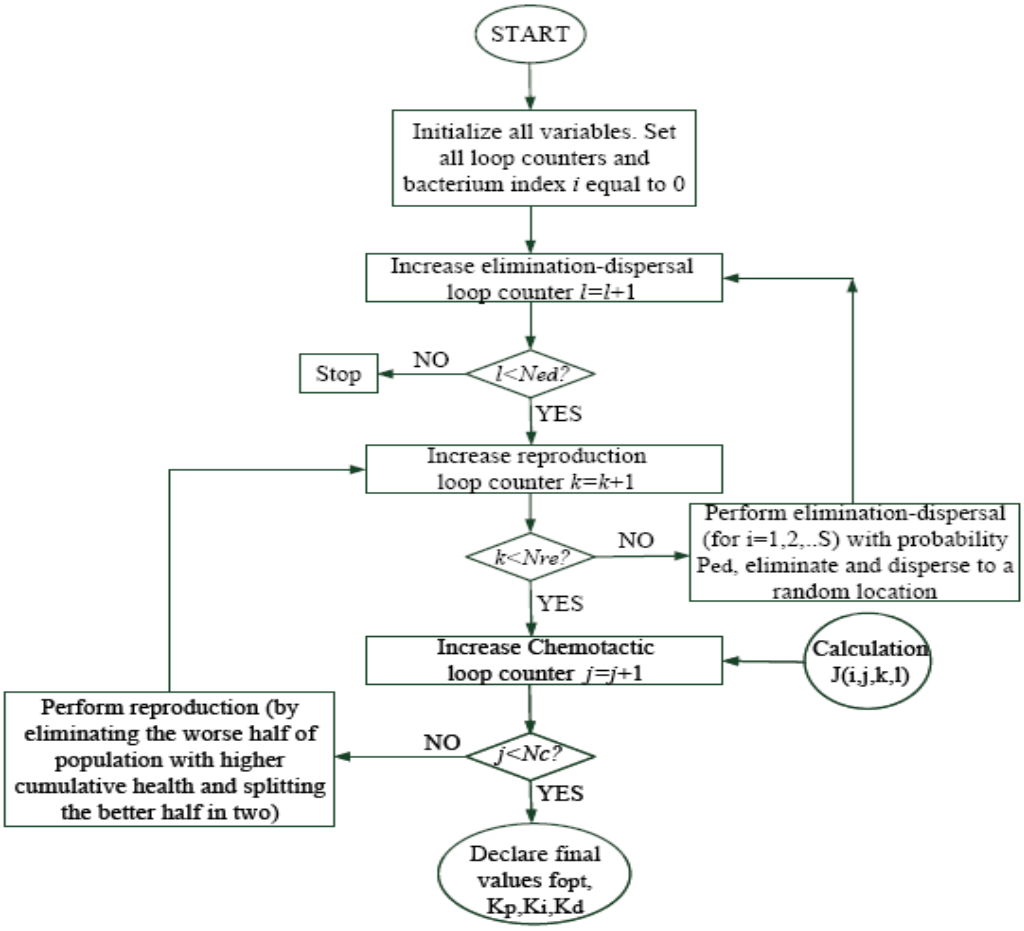


Figure III.3: L'organigramme de la méthode BFO.

III.2.5. Concept de la fonction objective :

Dans notre cas de conception, nous avons ajouté les trois paramètres du régulateur PID de telle sorte qu'ils donnent les meilleurs résultats de sortie, ou en d'autres termes, nous devons optimiser tous les paramètres du régulateur PID pour obtenir les meilleurs résultats **[13]**.

Nous définissons ici un espace de recherche tridimensionnel dans lequel les trois dimensions représentent, les trois différents paramètres du PID.

Chaque point particulier de l'espace de recherche représente une combinaison particulière de $\left[K_p\ K_i\ K_d\right]$ pour le quelle on obtient une réponse particulière.

La performance du point ou la combinaison des paramètres PID est déterminée par une fonction objective où fonction du coût, cette fonction objective est composée de plusieurs paramètres qui sont l'indice de performance des systèmes. Le point dans l'espace de recherche est le meilleur point pour lequel la fonction objective atteint une valeur optimale.

Pour le cas de notre modèle, nous avons combinées les quatre paramètres de performance du système pour définir la fonction objective.

La fonction objective est fonction de l'erreur statique (E_{ss} : stady state error), du dépassement maximum (M_p : Overshoot), du temps de réponse ou d'établissement (t_s : Settling Time) et du temps de montée (t_r : Rise Time), figure III.4.

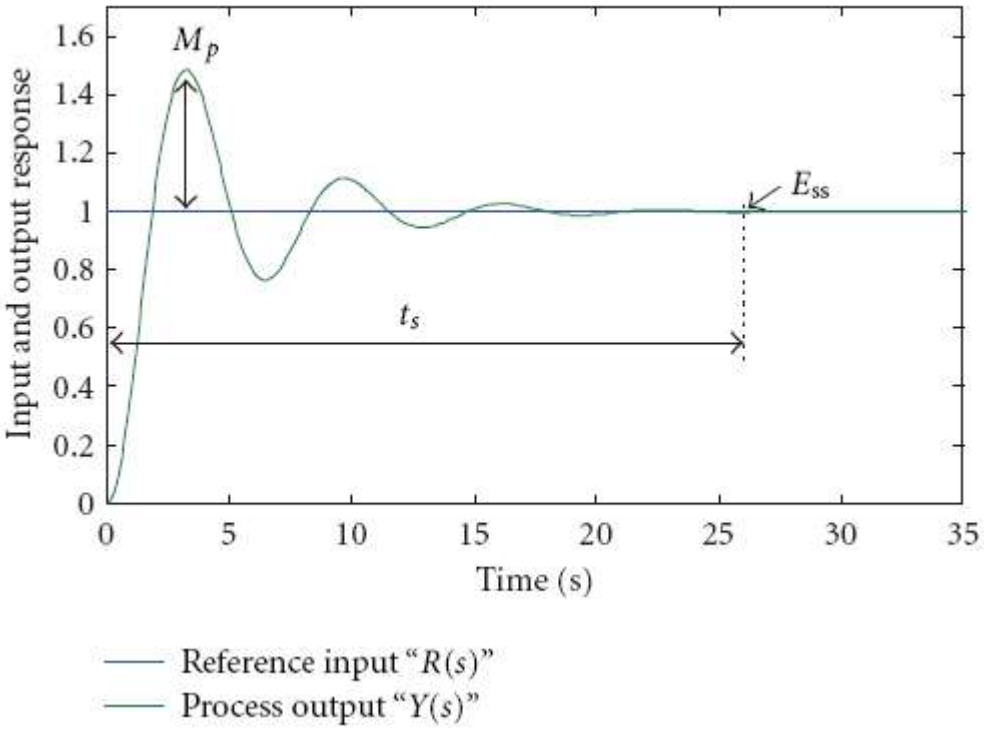


Figure III.4 : Réponse en boucle fermée d'un procédé.

Cependant, la contribution de ces paramètres dans la fonction objective est déterminée par un facteur de pondération qui dépend du choix du concepteur .pour notre conception, le meilleur point est le point ou la fonction objective à la valeur minimale [13].

La fonction objective choisie est [9].

$$F = \left(1 - e^{-\beta}\left(Mp + ESS\right)\right) + e^{-\beta}\left(t_S - t_r\right) \qquad \text{III.5}$$

Avec :

F : fonctions objective

M_p : Dépassement maximum (Overshoot),

t_S : Temps de réponse ou d'établissement (Settling Time),

t_r : Temps de montée (Rise Time),

β: Facteur de pondération (depend du concepteur).

Dans la bibliothèque de Matlab, nous avons défini une fonction objective (de coût) qui contient les paramètres PID en tant que valeurs d'entrée et il renvoie la valeur de la fonction objective du modèle commandé par un régulateur PID en tant que sortie.

Elle a le format: Function [F] = fonction_objective (K_d ,K_p,K_i).

La fonction objective sur Matlab :

```
Function  F= fonction_objective (kd, kp, ki)
Gc= tf ([0.04Kd  0.04Kp  0.04Ki ], [0.01   (0.01 + 0.04Kd)  (0.23 + 0.04Kp)  (1.202 + 0.04Ki)]);
S= stepinfo (Gc, 'RiseTimeLimits', [0.1   0.9]);
tr = S.RiseTime;
ts = S.SettlingTime;
Mp = S.Overshoot;
Ess = 1/ (1+dcgain (Gc));
F= (1-exp (-0.5))*(Mp+Ess) +exp (-0.5)*(ts-tr);
```

Nous avons utilisé cette fonction objective pour l'évaluation de la performance de différentes combinaisons de paramètres PID reflétée par les points dans les trois dimensions d'espace de recherche de l'algorithme BFO.

III.3. EXEMPLES D'APPLICATIONS :

- ✓ **1er exemple d'application : moteur à courant continu à excitation séparée.**

Le modèle équivalent d'un moteur à courant continu. [14]

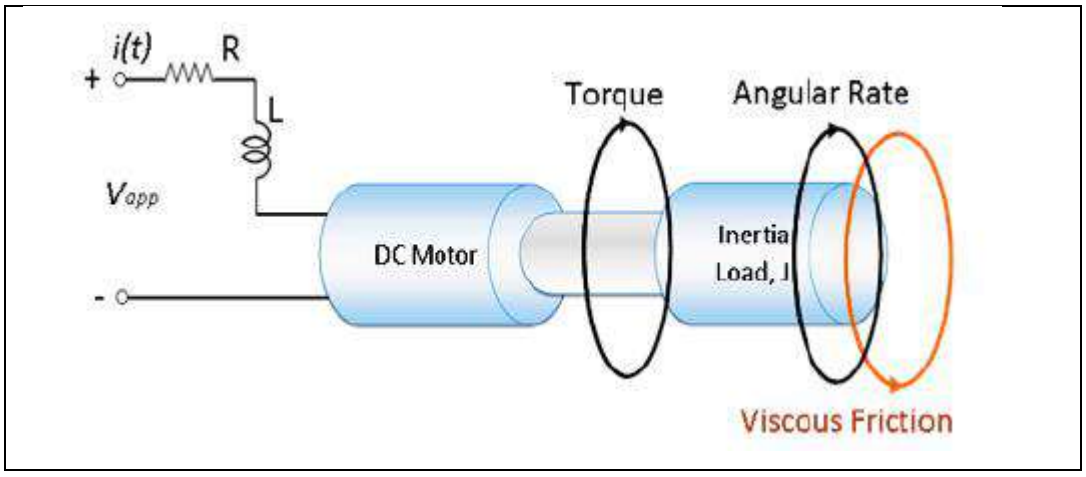


Figure III.5. Circuit équivalent d'un moteur à courant continu.

Quelques relations utiles :

$$v_{app}(t) = r_a i\ (t) + L\ \frac{di}{dt} + E_b(t) \qquad \text{III.6}$$

$$E_b(t) = K_b w(t) \qquad \text{III.7}$$

$$T_m(t) = K_t i\ (t) \qquad \text{III.8}$$

$$T_m(t) - T_d(t) = J_m B_m(t) \qquad \text{III.9}$$

Où :

v_{app} : Tension d'excitation,

r_a : Résistance d'excitation,

L : Inductance d'excitation,

i : Courant d'excitation,

w = Vitesse angulaire (rad/s),

T_m : Couple moteur (N.m)

T_d : Couple de charge (N.m)

J_m : Moment d'inertie (kg.m^2)

B_m : Coefficient de frottement (Nms/rad),

K_t : Constante du couple (N.m/A)

K_b : Constante de la f.cem (V.s/rad)

- Commande de la vitesse du moteur à courant continu :

Remplacer (III.6) dans (III.7) et (III.8) dans (III.9), on obtient

$$v_{app}(t) = r_a i\ (t) + L\ \frac{di\ (t)}{dt} + K_b w(t) \qquad \text{III.10}$$

$$K_t i\ (t) = J_m \frac{dw\ (t)}{dt} + B_m w\ (t) \qquad \text{III.11}$$

Si on prend la transformée de Laplace des équations III.10 et III.11, on obtient :

$$V_{app}(s) = r_a i\ (s) + s\ L\ I\ (s) + K_b w\ (s) \qquad \text{III.12}$$

$$K_t I\ (s) = s\ J_m w\ (s) + B_m w\ (s) \qquad \text{III.13}$$

- Quand $T_d = 0$:

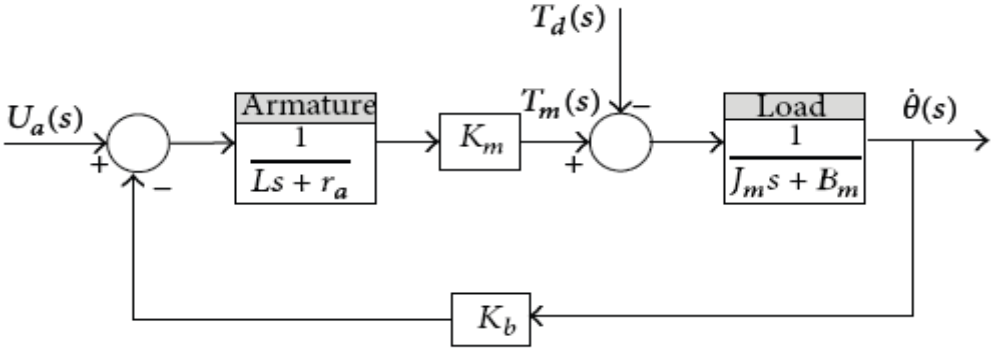


Figure III.6 : Diagramme de Bloc du modèle de MCC (avec $T_L = 0$).

Ainsi, la relation entre la vitesse du moteur et la tension appliquée est donnée par la fonction de transfert suivante :

$$\frac{w\ (s)}{V_{app}(s)} = \frac{K_t}{L\ J_m\ s^2 + (r_a J_m + L\ B_m)s + (r_a B_m + K_b K_t)} \qquad \text{III.14}$$

Les paramètres du moteur à courant continu sont entés dans le tableau III.1 [15].

Tableau III.1.Les paramètres du MCC.

Paramètre du moteur	**Valeurs**
K_m	0.023N.m /A
K_t	0.023N.m /A
r_a	1.0Ω
L	0.5H
J_M	0.01Kg.m^2/rad
B_M	0.00003N.m

La réponse en boucle ouverte du MCC est donnée par la figure III.8 et les valeurs de la réponse de sortie sont données dans le tableau III.2 :

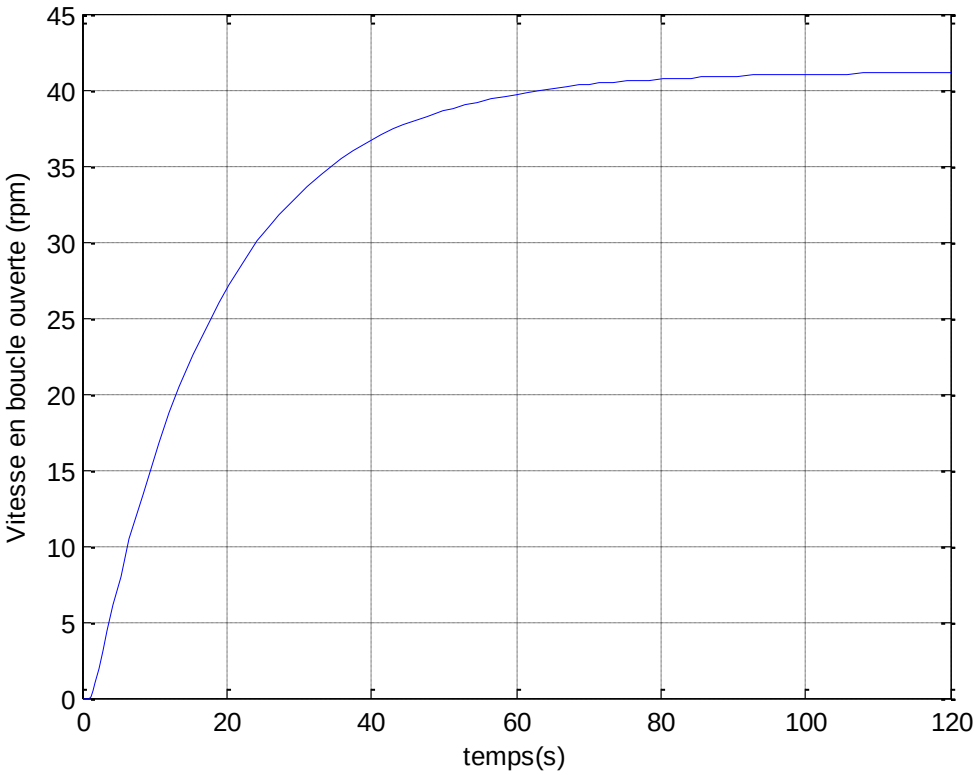


Figure III.7: Réponse en boucle ouverte du moteur à courant continu **[11]**..

D'après la figure III.8, on remarque que la réponse du MCC à une entrée échelon unité à l'allure d'une fonction du 1er ordre amortie avec retard.

Table III.2 : Les paramètres de la réponse du MCC.

Réponses	**Valeurs**
Setting time, $\mathbf{t_s}$	68.6029
Rise time, $\mathbf{t_r}$	38.2458
Maximum percent overshoot , $\mathbf{M_p}$	0
Steady state error, $\mathbf{e_{ss}}$	0.0237

- ✓ **Méthodes classiques de réglage des paramètres PID** : **[15]**.

La réponse du MCC avec un régulateur PID est obtenue par les méthodes de Ziegler Nichols (Z-N) et Cohen Coon (C-C) pour le réglage des paramètres du régulateur PID.

Cette méthode suppose implicitement que le procédé peut être adéquatement approché par une fonction de transfert de premier ordre amortie avec retard sous la forme :

$$G_p = \frac{K\, e^{-\theta s}}{T\, s + 1} \qquad \text{III.15}$$

Avec **K** est le gain, **θ** est le temps de retard, et **T** est la constante de temps de procédé en boucle ouverte. Une fois que nous avons enregistré les données d'entrée / sortie en boucle ouverte, puis mesuré les temps T etθ, les paramètres du régulateur PID peuvent être obtenus directement à partir des tableaux donnés pour différentes méthodes classiques.

À partir de la réponse en boucle ouverte du système, on peut trouver les points suivant (t_a, y_a) et(t_b, y_b). Le premier point correspond à une valeur de 35,3% et le second point correspond à une valeur de 85,3% de la réponse à un échelon d'unité. [15]

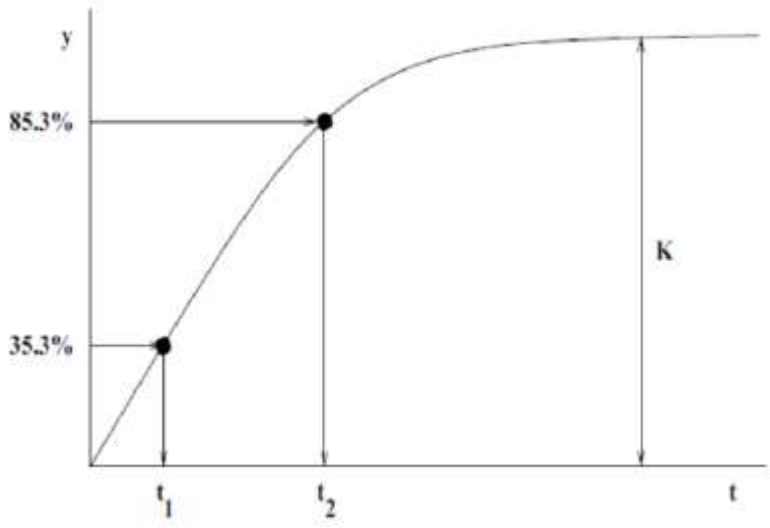


Figure III. 8 : Réponse de la fonction de transfert d'un système de premier ordre amortie avec retard **[15]**.

En utilisant cette méthode, nous obtenons les valeurs de réponse en boucle ouverte du moteur à courant continu qui sont données comme suit: **[11]**.

$$\begin{aligned} t_1 &= 8\,\text{sec}, \qquad y_1 = 14.52 \\ t_2 &= 37.7\,\text{sec}, \qquad y_2 = 35.09 \end{aligned} \tag{III.16}$$

Et le gain est :

$$K = 41.1449\,. \tag{III.17}$$

Après avoir calculé les temps t_1 ett_2, on calcule temps de retard (θ) et la constante de temps (T) à partir des équations suivantes:

$$\begin{aligned} \theta &= 1.3 * t_1 - 0.29 * t_2 \\ T &= 0.67\left(t_2 - t_1\right) \end{aligned} \tag{III.18}$$

A partir des tableaux proposés par les méthodes de Ziegler et Nichols (Z-N) et Cohen Coon (C-C), on peut calculer les paramètres du régulateur PID :

Tableau III.3 : méthode de Ziegler Nichols (Z-N)

Régulateur		K_p	T_i	T_d
Méthode de Ziegler Nichols (Z_N)	**P**	$T/K\theta$	–	–
	PI	$0.9T/K\theta$	$\theta/0.3$	–
	PID	$1.2T/K\theta$	2θ	0.5θ

Tableau III.4 : méthode de Cohen Coon (C-C).

Régulateur		K_p	T_i	T_d
Méthode de Cohen Conn (C-C) (Boucle ouverte)	**P**	$\frac{T}{K\theta}(1+\frac{\theta}{3T})$	–	–
	PI	$\frac{T}{K\theta}(0.9+\frac{\theta}{12T})$	$\theta(\frac{30+3\theta/T}{9+20\theta/T})$	–
	PID	$\frac{T}{K\theta}(\frac{4}{3}+\frac{\theta}{4T}$	$\theta(\frac{32+6\theta/T}{13+8\theta/T})$	$\theta(\frac{4}{11+2\theta/T})$

A partir des tableaux III.3 et III.4, on calcul les paramètres du régulateur PID :

Tableau III.5 : les valeurs de Kp, Ki et Kd selon la méthode Z-N et C-C

Méthodes	K_p	K_i	K_d
Ziegler Nichols (Z-N)	0.8000	0.6380	0.2508
Cohen Coon (C-C)	0.3522	0.2317	0.0798

- ✓ **Calcul des paramètres PID par l'algorithme BFO** :

Les paramètres de l'algorithme BFO sont présentés par le tableau III.6 :

Tableau III.6. Les paramètres de l'algorithme BFO

Paramètres BFO	**Valeurs**
Nombre de bactéries dans la population **(s)**	10
La longueur de la nage **(Ns)**	2
Nombre d'étapes de reproduction **(Nre)**	4
Nombre d'étapes de chimotactique **(Nc)**	10
Nombre d'évènement d'élimination/dispersion **(Ned)**	2
Nombre de bactérie se divisé par génération **(Sr)**	s /2
Probabilité d'occurrence de dispersion **(Ped)**	0.3
Hauteur de l'effet répulsif **(Hrep)**	0.1
Largeur de l'effet répulsif **(Wrep)**	10
Largeur de l'effet répulsif attractif **(Wattr)**	0.2
Largeur de l'effet répulsif attractif **(Dattr)**	0.1

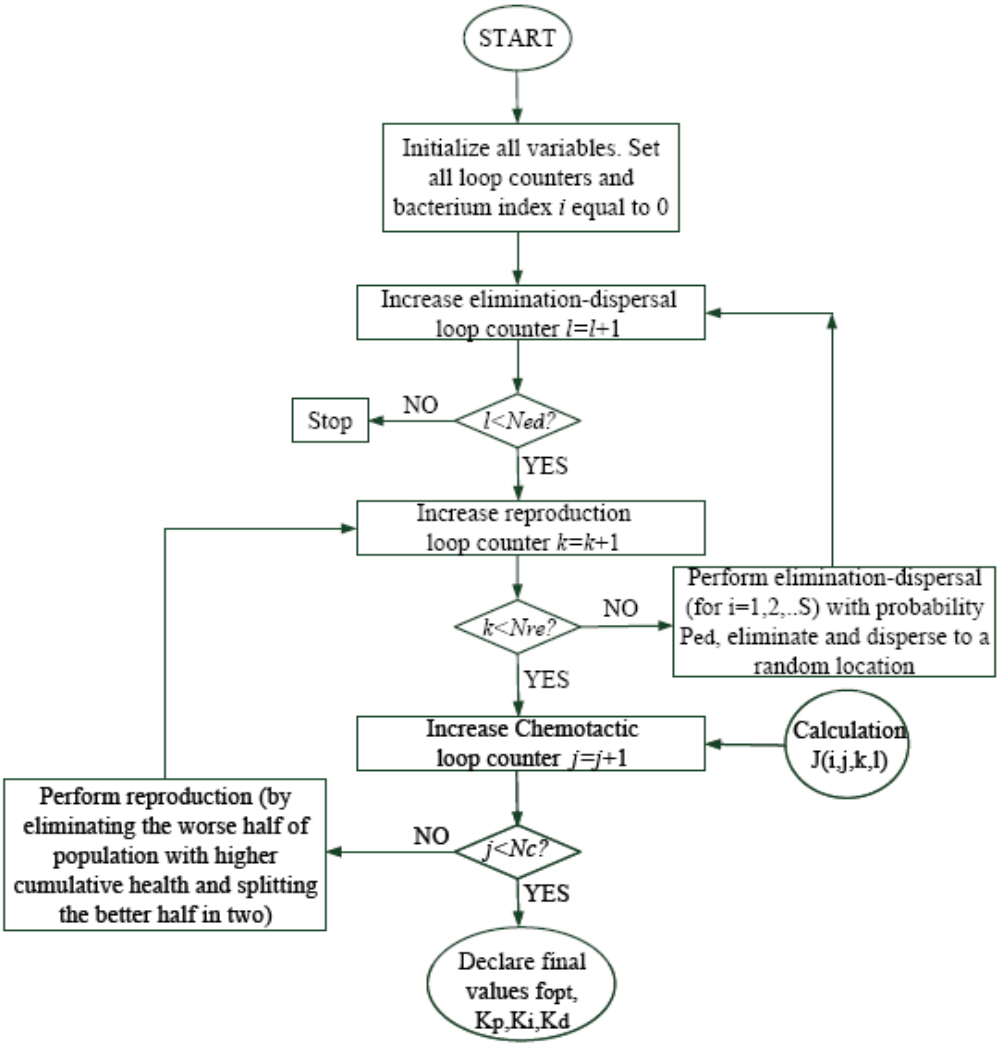


Figure III.10 : Organigramme de la méthode BFO

- ✓ **Résultats et Discutions :**

Les résultats de simulations du MCC avec un régulateur PID selon les méthodes Z-N et C-C avec une valeur de la fonction objective de : **F (Z-N) = 14.9775** et **F (C-C) = 21.5208**.

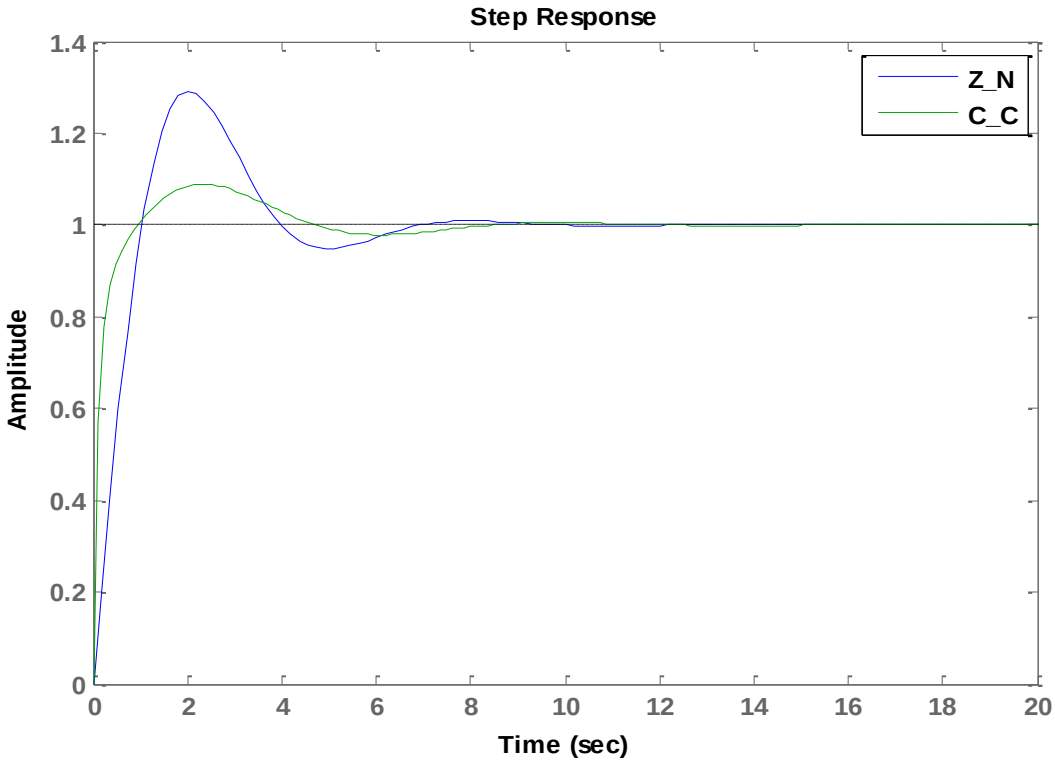


Figure III.9 : La réponse du MCC-PID par la méthode Z-N et C-C.

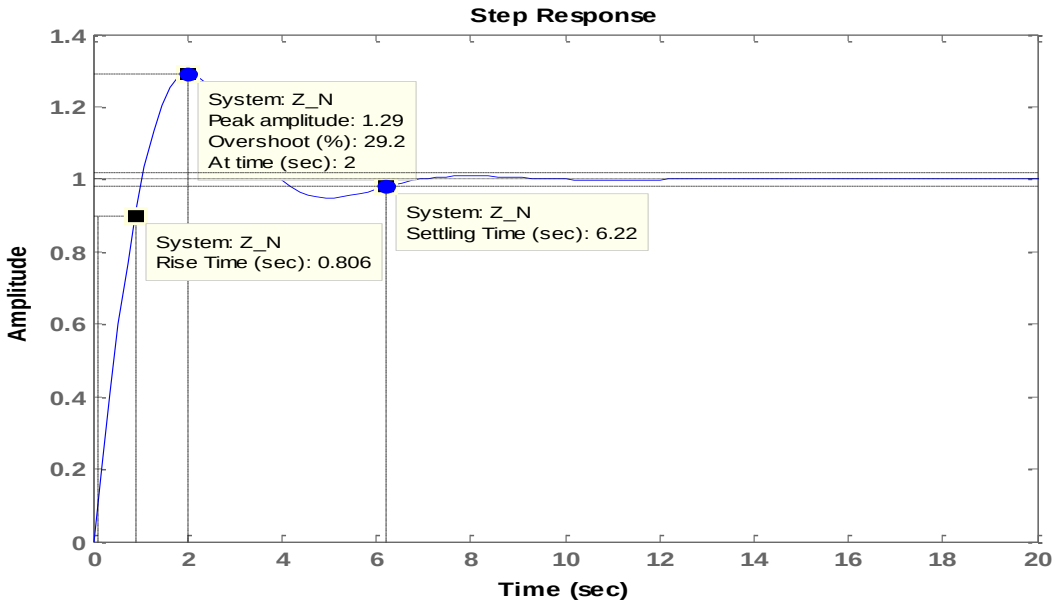


Figure III.10 : Les paramètres de la réponse du MCC-PID par la méthode Z-N.

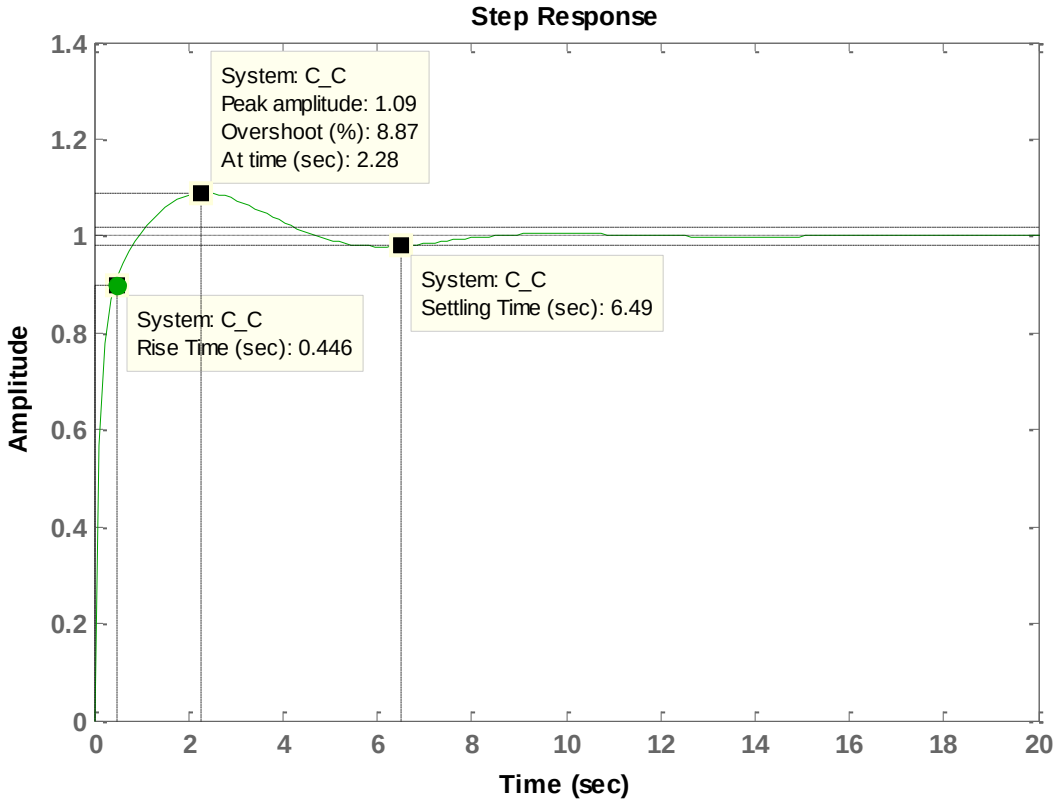
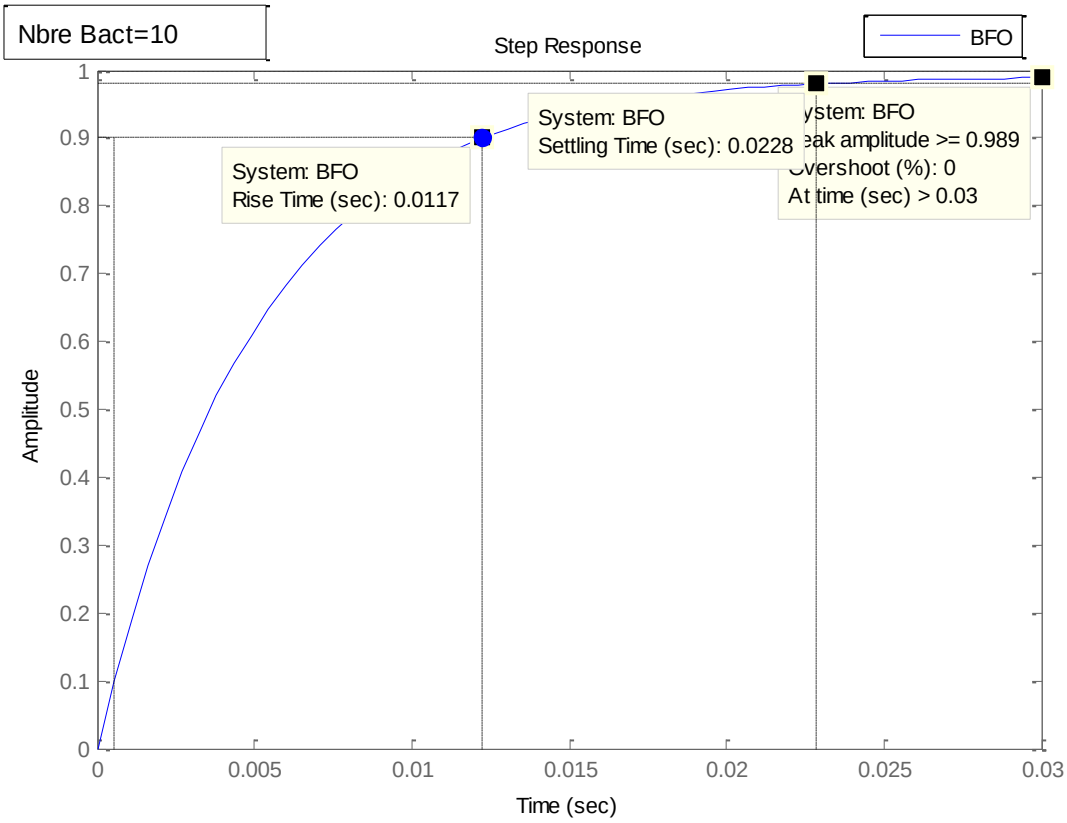


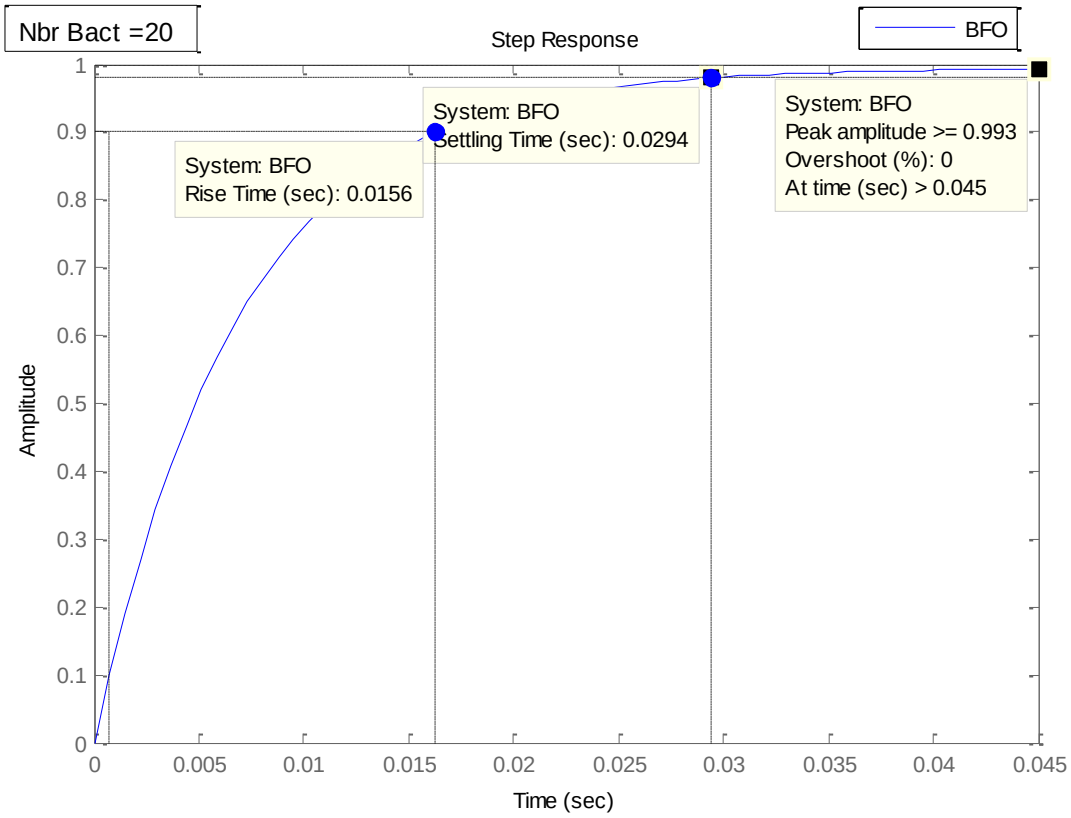
Figure III.11 : Les paramètres de la réponse du MCC-PID par la méthode C-C.

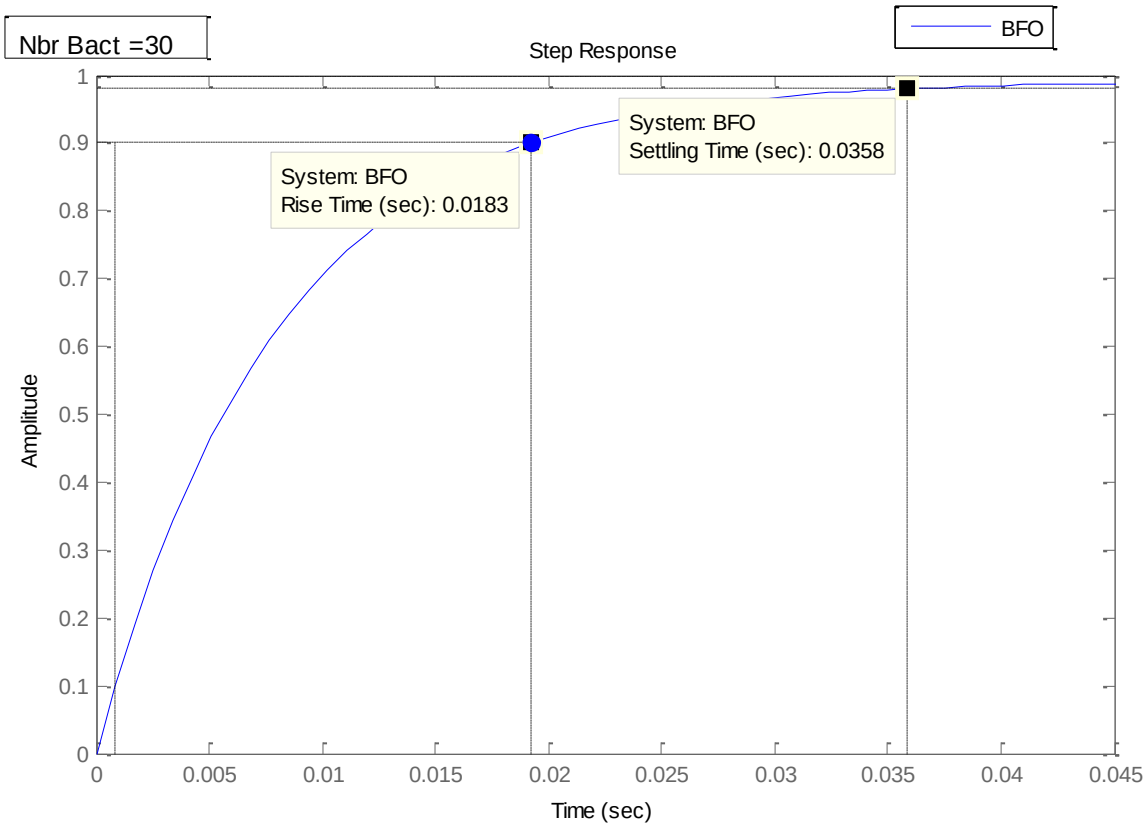
On appliquant l'algorithme BFO avec variation des nombres de bactérien pour obtenir une fonction objective F minimale (tableau III.7).

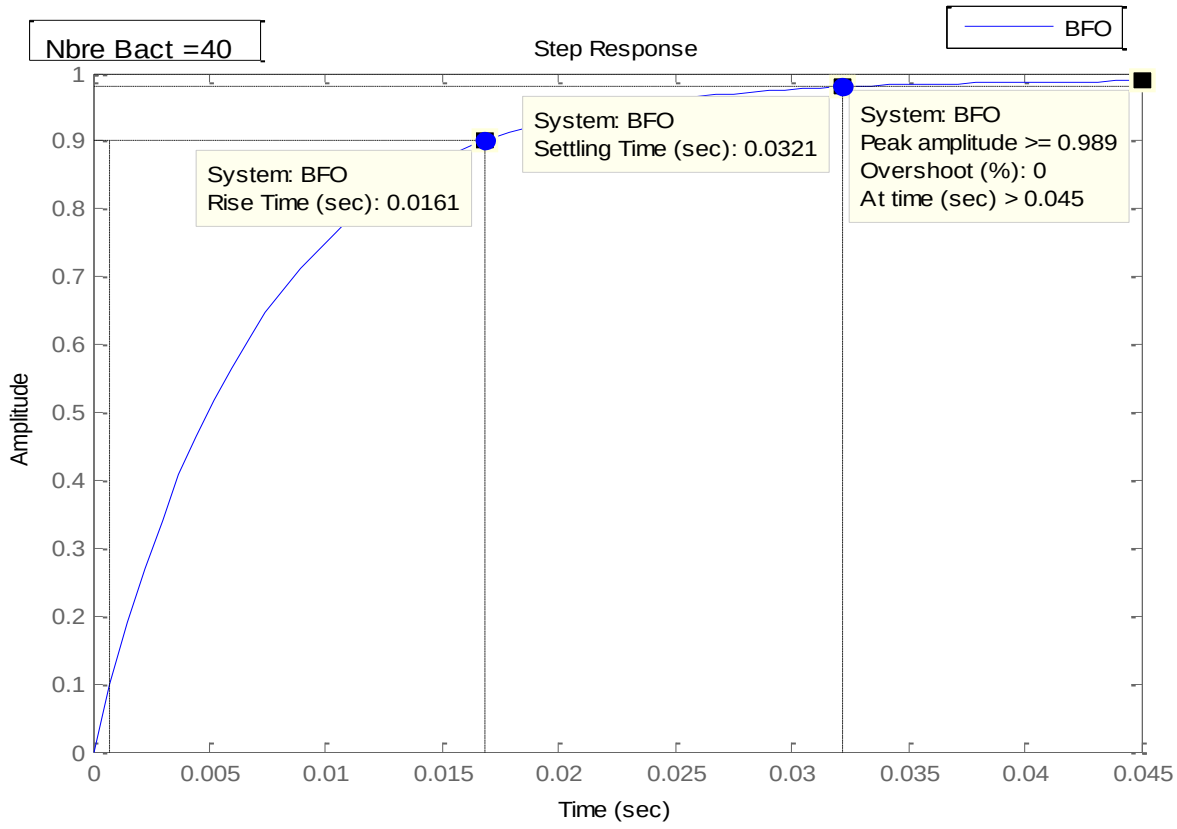
Tableau .III.7: Valeur de F.Object en fonction du Nbre.de bactéries.

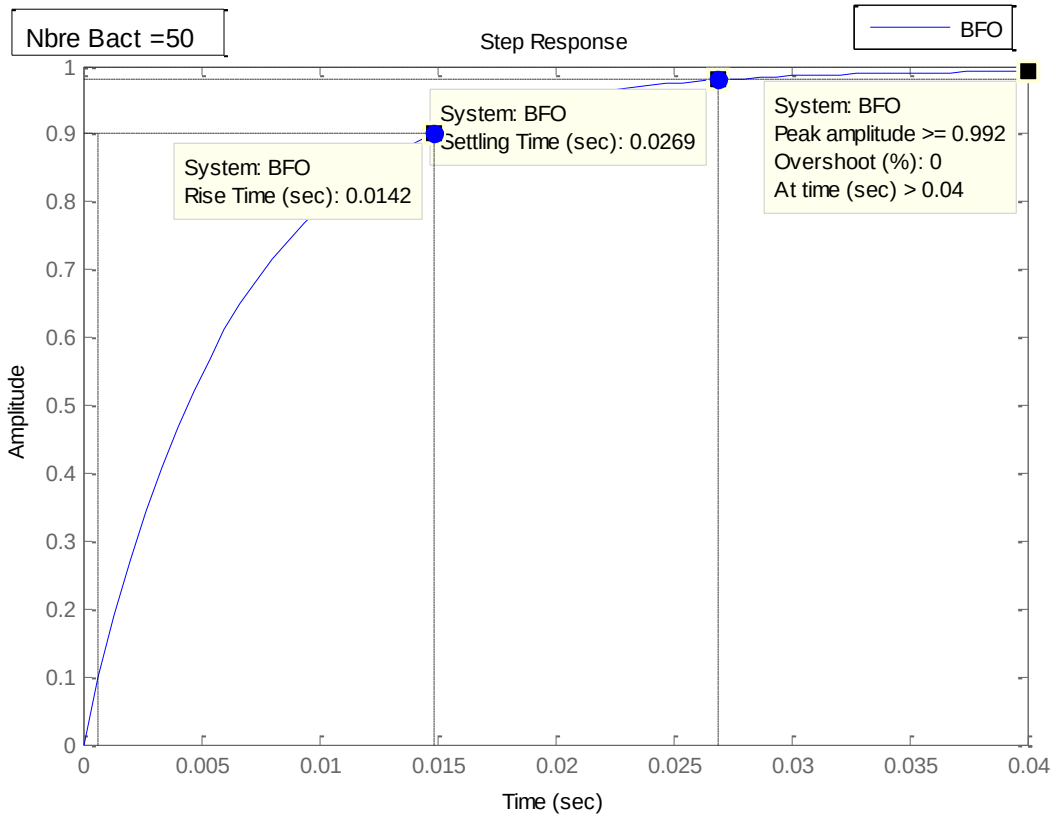
Nombre de bactéries(s)	**Fonct. Object.**	**Kd**	**Kp**	**Ki**
10	F=0.2115	20.8799	19.3321	15.3973
20	F=0.2051	31.28.06	34.9008	30.0854
30	F=0.2073	26.7724	24.7734	20.4847
40	F=0.2065	30.6780	17.7151	13.6137
50	F=0.2046	34.2836	34.2382	34.8555
60	F=0.2040	35.48.18	38.6361	33.3911
70	F=0.2054	30.4982	34.0616	32.9510
80	F=0.2036	37.6308	37.7349	37.4392

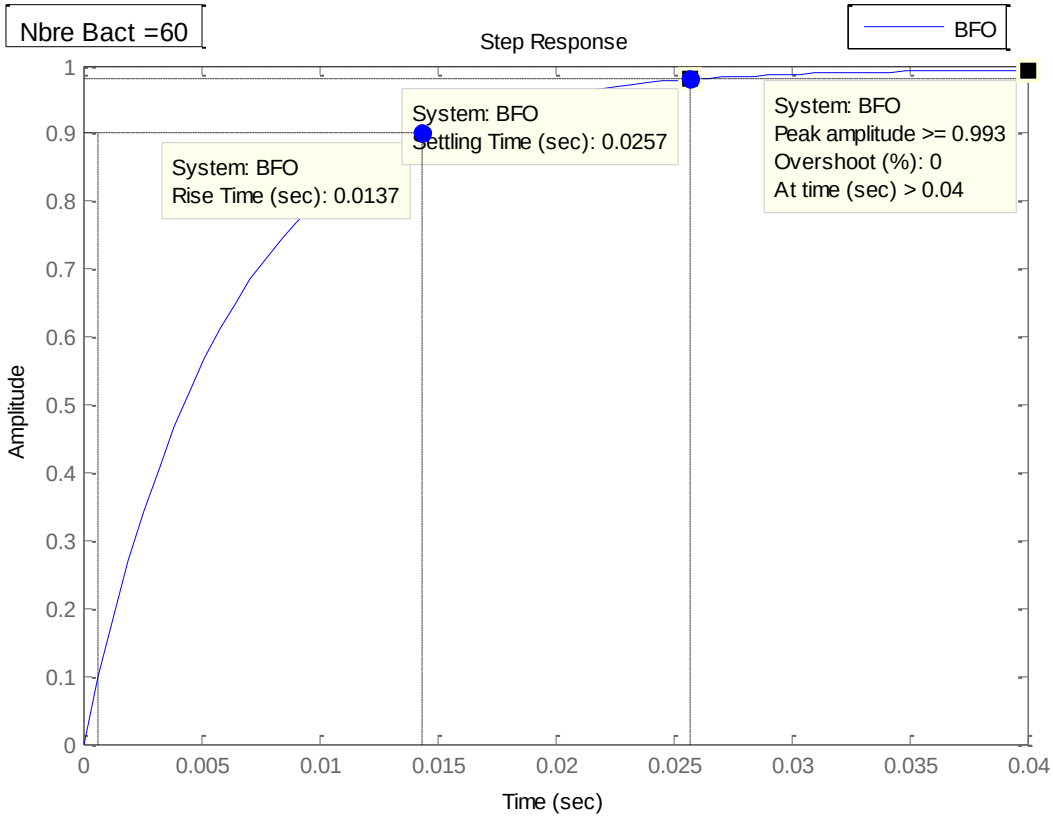

Nbre Bact=10
Step Response
BFO
System: BFO
Rise Time (sec): 0.0117
System: BFO
Settling Time (sec): 0.0228
ystem: BFO
eak amplitude >= 0.989
Overshoot (%): 0
At time (sec) > 0.03
Amplitude
Time (sec)


Nbr Bact =20
Step Response
BFO
System: BFO
Rise Time (sec): 0.0156
System: BFO
Settling Time (sec): 0.0294
System: BFO
Peak amplitude >= 0.993
Overshoot (%): 0
At time (sec) > 0.045
Amplitude
Time (sec)


Nbr Bact =30
Step Response
BFO
System: BFO
Settling Time (sec): 0.0358
System: BFO
Rise Time (sec): 0.0183
Amplitude
Time (sec)
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0.005
0.01
0.015
0.02
0.025
0.03
0.035
0.04
0.045


Nbre Bact =40
Step Response
BFO
System: BFO
Settling Time (sec): 0.0321
System: BFO
Peak amplitude >= 0.989
Overshoot (%): 0
At time (sec) > 0.045
System: BFO
Rise Time (sec): 0.0161
Amplitude
Time (sec)
0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
0.9
1
0.005
0.01
0.015
0.02
0.025
0.03
0.035
0.04
0.045


Nbre Bact =50
Step Response
BFO
System: BFO
Rise Time (sec): 0.0142
System: BFO
Settling Time (sec): 0.0269
System: BFO
Peak amplitude >= 0.992
Overshoot (%): 0
At time (sec) > 0.04
Amplitude
Time (sec)


Nbre Bact =60
Step Response
BFO
System: BFO
Rise Time (sec): 0.0137
System: BFO
Settling Time (sec): 0.0257
System: BFO
Peak amplitude >= 0.993
Overshoot (%): 0
At time (sec) > 0.04
Amplitude
Time (sec)

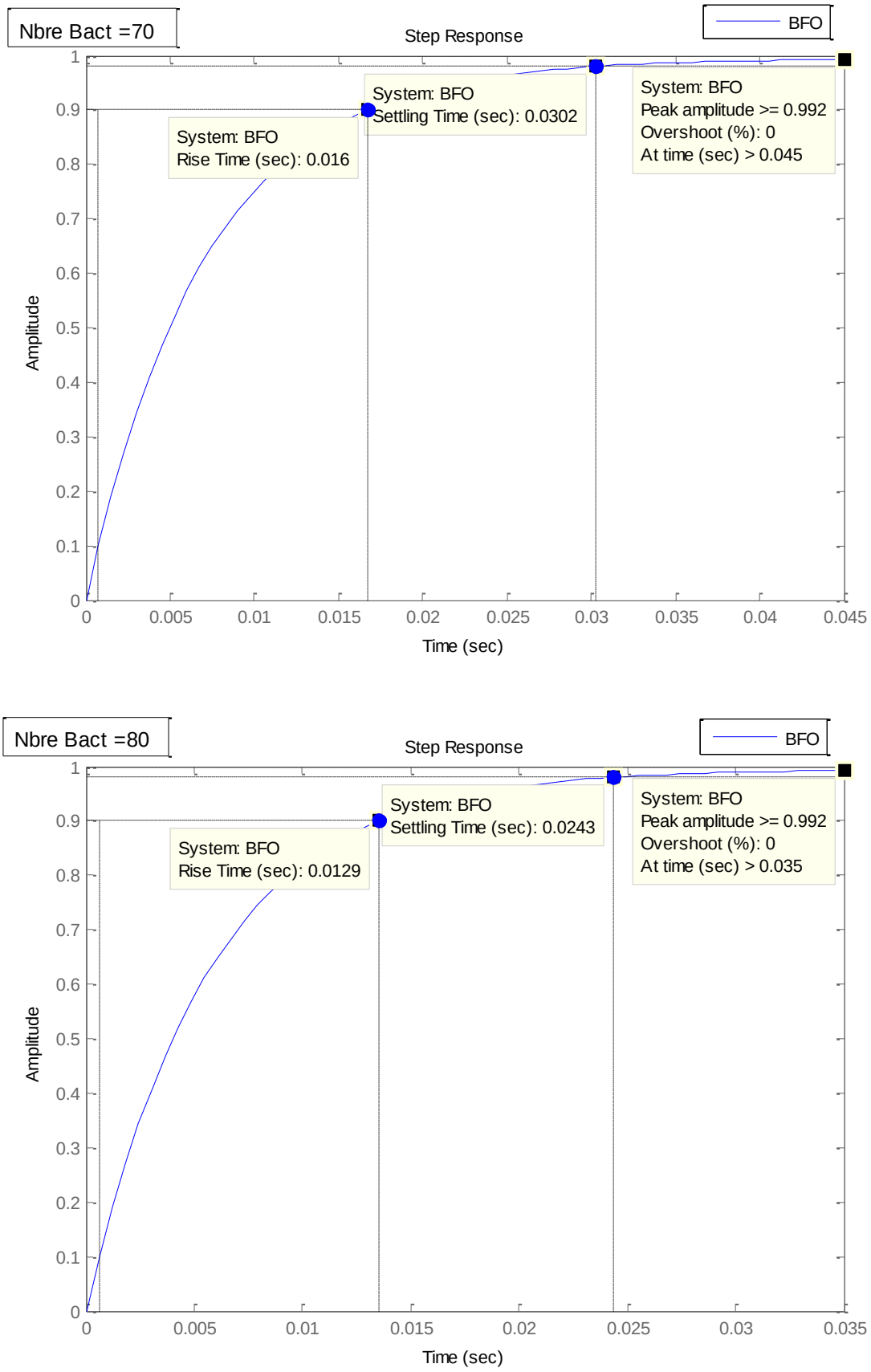


Figure III.12 : Les résultats en varient le nombre de bactérie.

Tableau III.8 : Les valeurs deT_r,T_s,E_{ss} et M_p de chaque nombre de bactérie.

Nbre.de bactérie	**Fonct. Obje.** F	t_r **(sec) (Rise Time)**	t_s **(sec) (SettlingTime)**	M_p **(%) (Overshoot)**	E_{ss} **(Steady State Error)**
10	0.2115	0.0237	0.0480	0	0.500
20	0.2051	0.0156	0.0294	0	0.500
30	0.2073	0.0183	0.0358	0	0.500
40	0.2065	0.0161	0.0321	0	0.500
50	0.2046	0.0142	0.0269	0	0.500
60	0.2040	0.0132	0.0257	0	0.500
70	0.2054	0.0160	0.0302	0	0.500
80	0.2036	0.0129	0.0243	0	0.500

D'après les valeurs des différents paramètres du tableau III.8, on remarque que les performances de nombre bactérie 80 sont les plus petits.

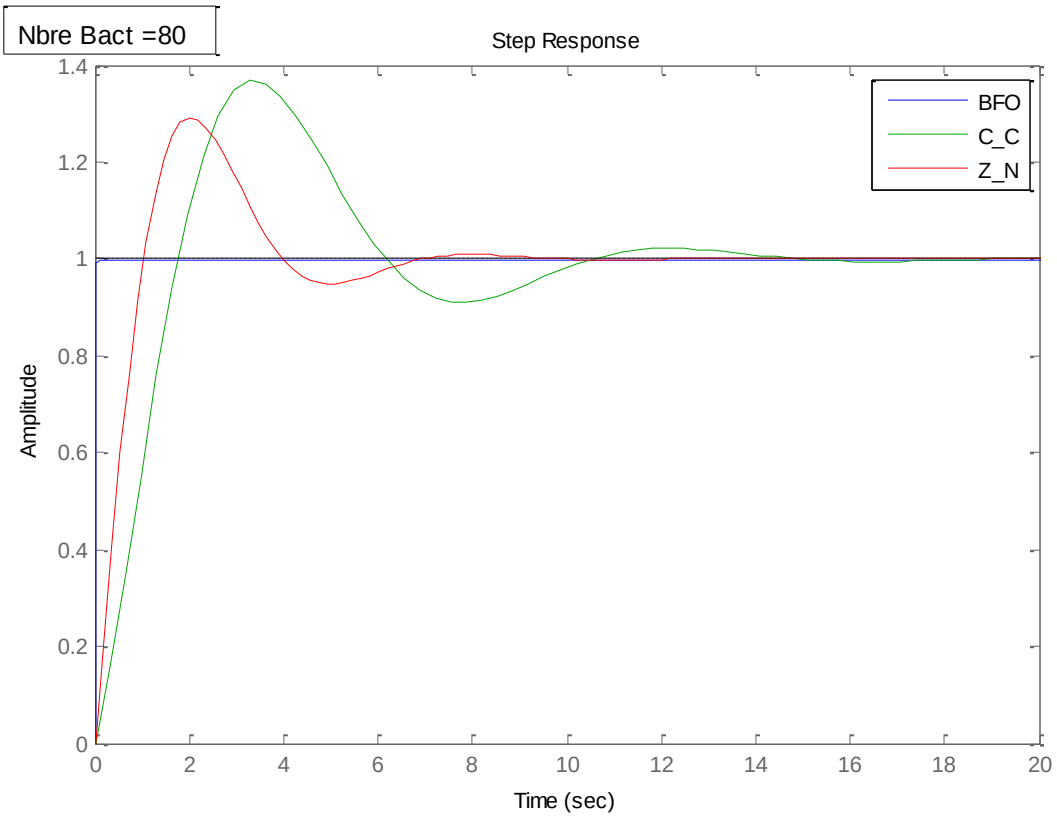


Figure III.13 : La réponse du MCC-PID par les méthodes BFO, C-C et Z-N.

Tableau III.9 : Les performances de la réponse du MCC-PID par les méthodes BFO, C-C et Z-N.

Méthodes	**Fonct. Obje.** F	t_r **(sec) (Rise Time)**	t_s **(sec) (SettlingTime)**	M_p **(%) (Overshoot)**	E_{ss} **(Steady State Error)**
Z-N	14.9775	0.8063	6.2227	29.2157	0.5000
C-C	21.5208	1.3539	12.6592	36.7680	0.5000
BFO (Nbre de bactérie=80)	0.2036	0.0129	0.0243	0	0.5000

D'après le tableau III.9, on voit que le pic maximal de la réponse mesurée relativement à l'unité (dépassement M_p **)** est nul par la méthode BFO, tandis que pour sa valeur est considérable par les deux autres méthodes classiques.

On remarque que, concernent le temps de montée (Rise Time), le temps nécessaire à la réponse pour évoluer de 10 à 90%, de sa valeur finale est très petit par la méthode BFO en comparaison avec les deux autres méthodes classiques Z-N et C-C.

Même remarque concernant le *temps de réponse ou d'établissement (Settling Time,*t_s *),* qui est le temps requis pour que la courbe de sortie atteigne et reste à l'intérieur d'une bande, ce temps est très grand par les méthodes classiques Z-N et C-C, contrairement à la méthode BFO, ce temps est très petit.

Sur la base des résultats obtenus précédemment, on peut tirer quelques conclusions suivantes :

Le problème de réglage des paramètres du régulateur PID pourrait être résolu en utilisant des techniques d'optimisations nouvelles qui apportent une amélioration considérable en termes de t_s **,** t_r et M_p comme le montrent les tableaux III.9.

En utilisant des techniques métaheuristique (BFO), t_s à diminuer de 99.6 %, t_r à diminuer de 98.4 % et M_p de 100 % par rapport à la méthode Z-N. En outre, la diminution des valeurst_s **,** t_r et M_p était de 99,8 %, 99.04 % et 100 %, respectivement, par rapport à la méthode C-C.

Donc l'objectif de minimiser t_s , t_r et M_p est mieux réalisé grâce à des algorithmes métaheuristique, qui valident les capacités de ces algorithmes des meilleurs algorithmes d'optimisation pour des problèmes complexes comme le réglage du régulateur PID.

Par conséquent, cette technique d'optimisation (BFO) est bien meilleures que les techniques classiques (Z-N et C-C) pour le problème de réglage des paramètres des régulateurs PID.

- ✓ **2eme exemple d'application :**

Modélisation d'un système de contrôle de nivaux de trois réservoirs . [13]

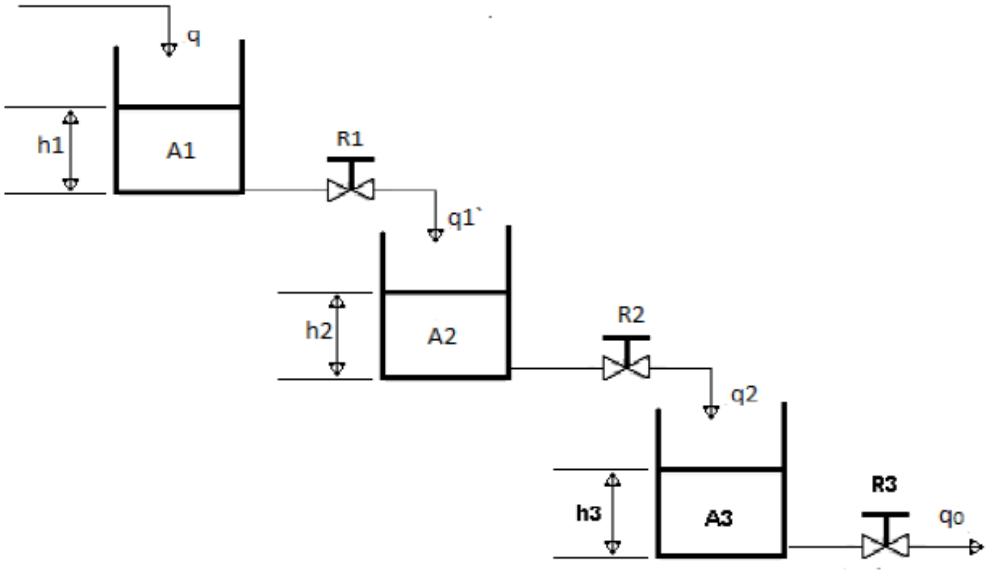


Figure III.14: Système de contrôle de niveau de trois réservoirs

q(t) : Quantité de Liquide d`entrée dans le 1er réservoir

q_o(t) : Quantité de Liquide de sortie dans le troisième réservoir

h_1, h_2 and h_3 : le niveau de Liquide dans les trois réservoirs

A_1, A_2 et A_3 : la surface (m^2) de liquide dans les trois réservoirs (1, 2,3)

- Pour 1er réservoir: $q - q_1 = A_1 (dh_1/dt)$
- pour 2eme réservoir: $q_1 - q_2 = A_2 (dh_2/dt)$
- pour 3eme réservoir: $q_2 - q_0 = A_3 (dh_3/dt)$

Avec :

$q_1 = h_1/R_1$; $q_2 = h_2/R_2$; $q_0 = h_3/R_3$ et $T_1 = A_1.R_1$; $T_2 = A_2.R_2$; $T_3 = A_3.R_3$

La fonction de transfert des trois réservoirs est ;

$G(s) = Q_0(s) / Q(s) = 1 / (1+ T_1s) (1+ T_2s) (1+ T_3s)$

En concéderons $T_1 = 1$ sec, $T_2 = 0.5$sec. Et $T_3 = 0.33$ sec,

La fonction de transfert de ce système est ;

$$G(s) = 6/(s+1)(s+2)(s+3) = \frac{6}{S^3+6S^2+11S+6}$$

- ✓ la fonction de transfert d'un régulateur PID

$$G_C(s) = P + I/s + D\,s = K_C (1 + 1/ T_I\,S + T_D\,S)$$

Avec $P = K_C$, $I = K_C/ T_I$ et $D = K_C.T_D$ les paramètres d'un régulateur PID

- ✓ **Méthodes classiques de réglage des paramètres PID** :

La réponse du système avec un régulateur PID est obtenue par les méthodes de Ziegler Nichols (Z-N) et Cohen Coon (C-C) pour le réglage des paramètres du régulateur PID.

Tableau III.10: méthode de Ziegler Nichols.

controller	**K_c**	**T_I**	**K_D**
P	Ku/2	---	---
PI	Ku/2.2	P_u/1.2	---
PID	Ku/1.7	P_u/2	Pu/8

Tableau III.11: Méthode de Cohen Coon

LES METHODE	K_C	K_I	K_d
P	$T/ K_{p.}T_d(1+T_d/3T)$	---	---
PI	$T/ K_{p.}T_d(90/10+T_d/12T)$	$T_d(30+3T_d/T)/(9+20T_d/T)$	---
PID	$T/ K_{p.}T_d(4/3+T_d/4T)$	$T_d(32+6T_d/T)/(13+8T_d/T)$	$4T_d(11+2T_d/T)$

Tableau III.12 : les valeurs des paramètres du régulateur PID

LES METHODE	KP	KI	KD
ZEIGLER NICHOLS	6.00	6.33	1.42
COHEN COON	7.20	7.33	1.09

- ✓ **Résultats et Discutions :**

Les résultats de simulations du système avec un régulateur PID selon les méthodes Z-N et C-C avec une valeur de la fonction objective de : F (Z-N) = 55.4152 et F (C-C) = 69.4552

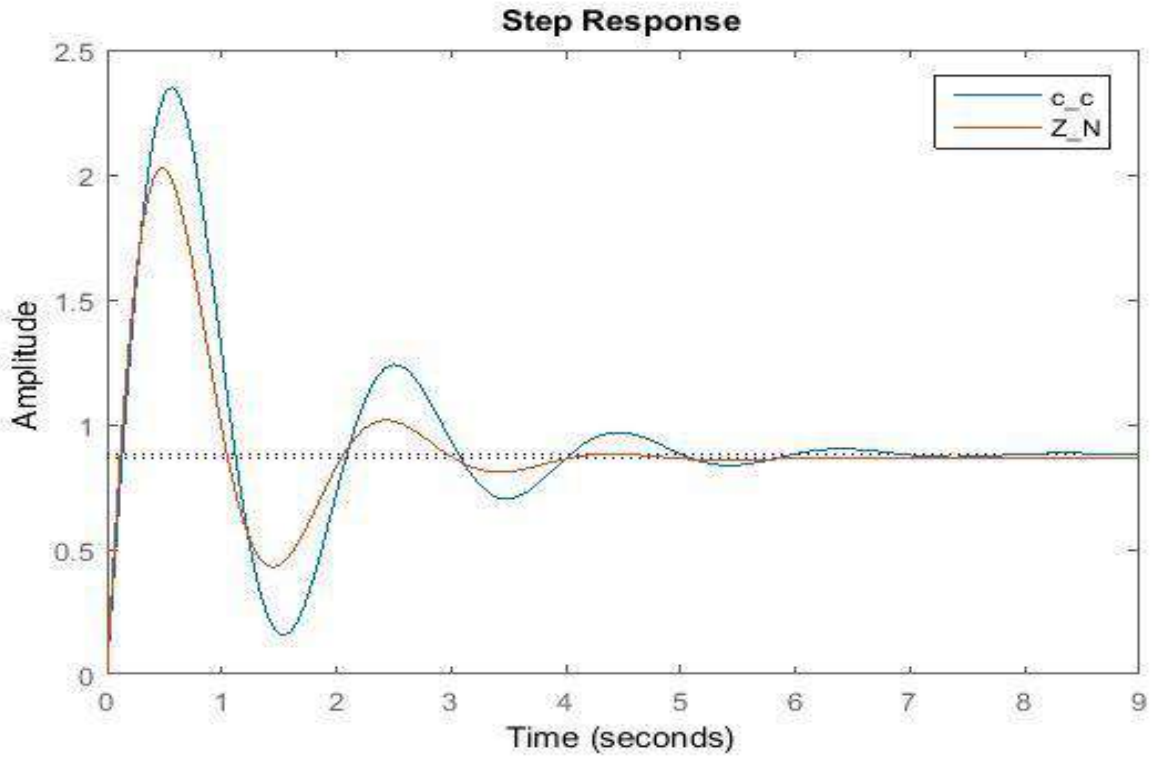


Figure III.15. : La réponse du système par la méthode Z-N et C-C.

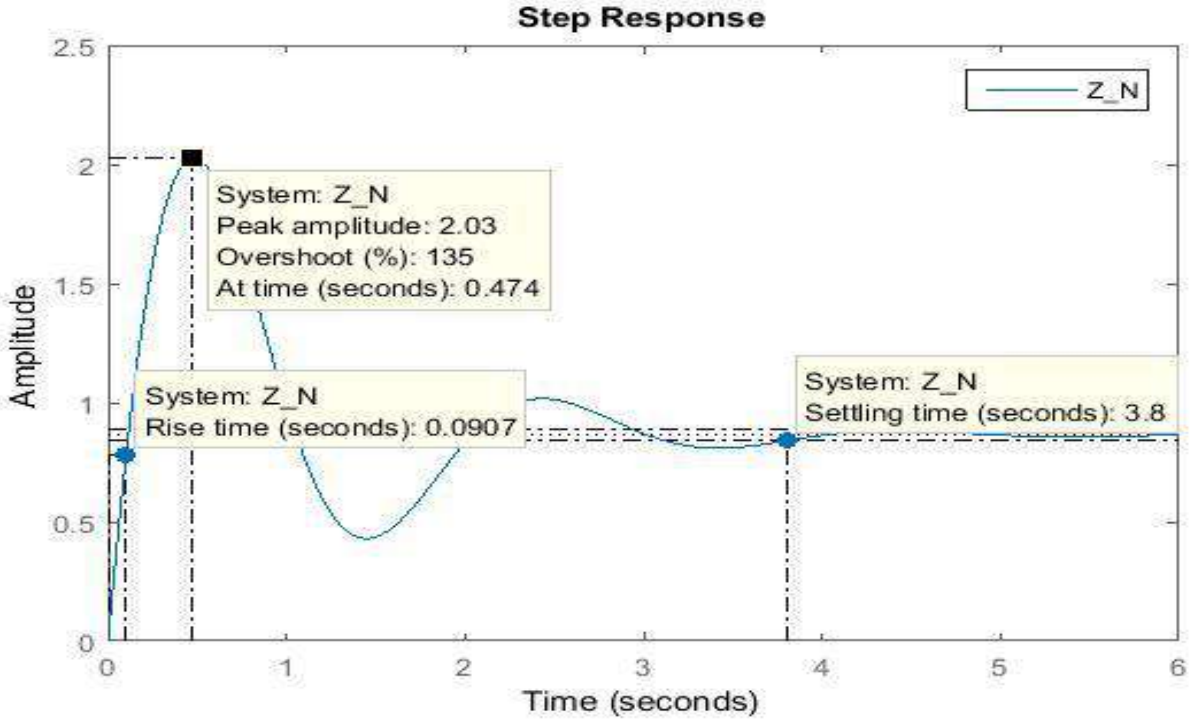


Figure III.16 : Les paramètres de la réponse du MCC-PID par la méthode Z-N.

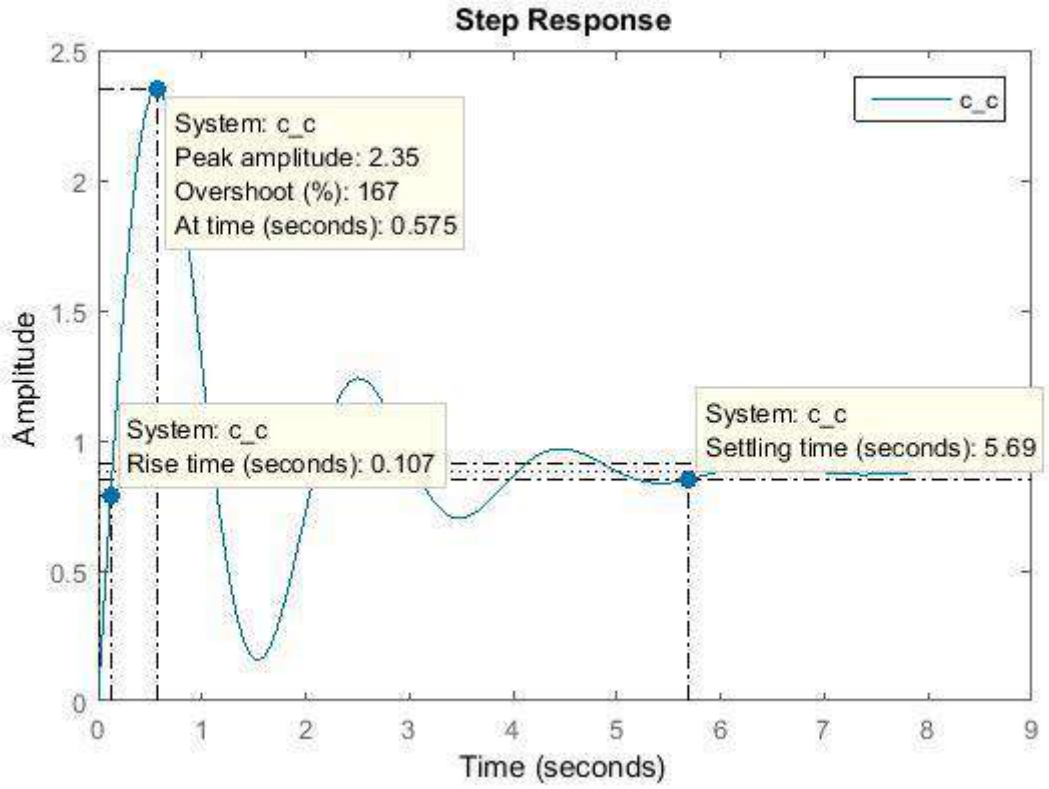
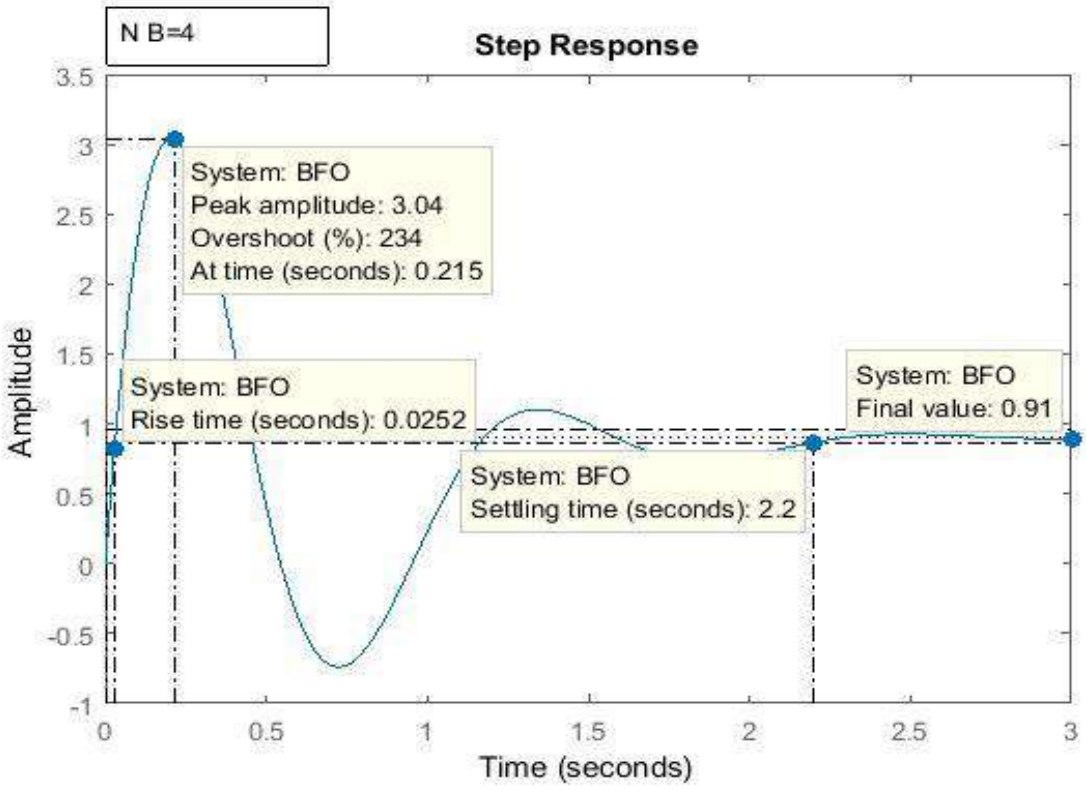


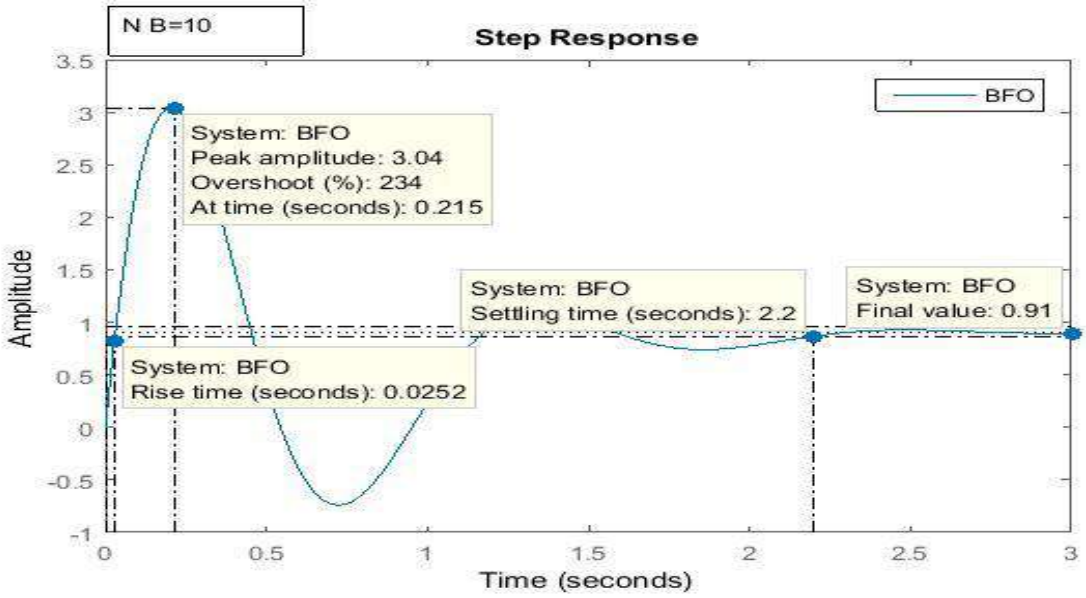
Figure III.17 : Les paramètres de la réponse du système par la méthode C-C.

On appliquant l'algorithme BFO, et on variant le nombre de bactéries pour obtenir une fonction objective F minimale

Tableau III.14 : Valeur de F.Object en fonction du Nbre.de bactéries.

Nbre. Des bactéries.	Fonct. Object.	K_d	K_p	K_i
04	F = 187.3967	8.5915	21.7048	9.8764
10	F = 122.2898	7.7857	21.3354	19.5447
20	F = 26.3076	5.2614	4.5265	10.1398


N B=4
Step Response
System: BFO
Peak amplitude: 3.04
Overshoot (%): 234
At time (seconds): 0.215
System: BFO
Rise time (seconds): 0.0252
System: BFO
Settling time (seconds): 2.2
System: BFO
Final value: 0.91
Amplitude
Time (seconds)


N B=10
Step Response
BFO
System: BFO
Peak amplitude: 3.04
Overshoot (%): 234
At time (seconds): 0.215
System: BFO
Settling time (seconds): 2.2
System: BFO
Final value: 0.91
System: BFO
Rise time (seconds): 0.0252
Amplitude
Time (seconds)

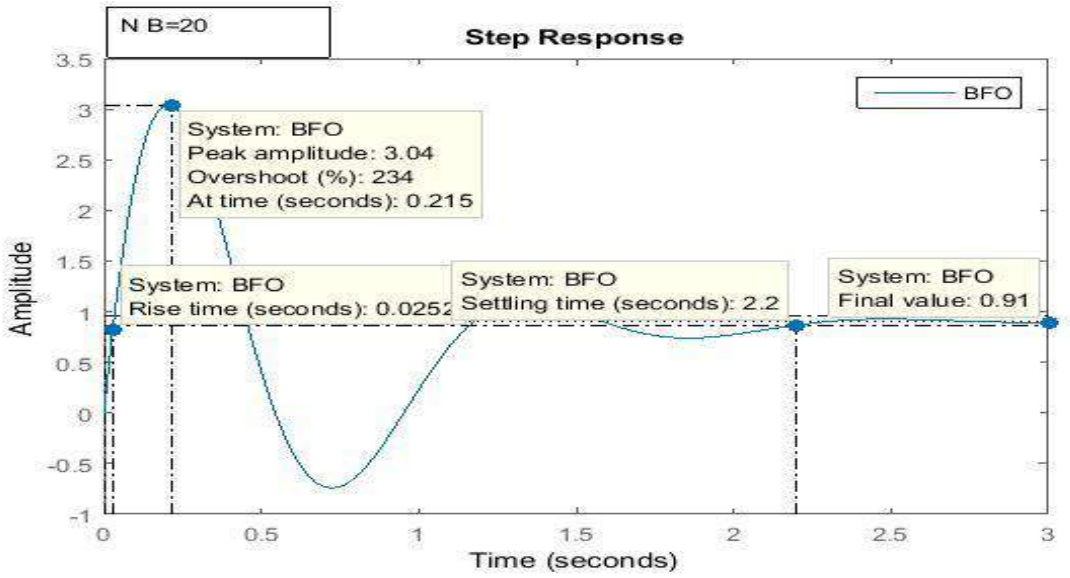


Figure III.18 : Les résultats en varient le nombre de bactérie.

Tableau III.12 : Les valeurs de t_r, t_s, E_{ss} et Peak time de chaque itération

Nbre. De bactéries	**Fonct. Obje.** F	t_r **(sec) (Rise Time)**	t_S **(sec) (SettlingTime)**	E_{SS} **(Steady State Error)**	**Peak time**
04	187.3967	0.0146	2.0241	0.5241	0.1897
10	122.2898	0.0171	2.5239	0.5125	0.2116
20	26.3076	0.0252	2.1991	0.5235	0.2153

D'après les valeurs des différents paramètres du tableau III.12, on remarque que les performances de bactéries 20 sont les meilleurs.

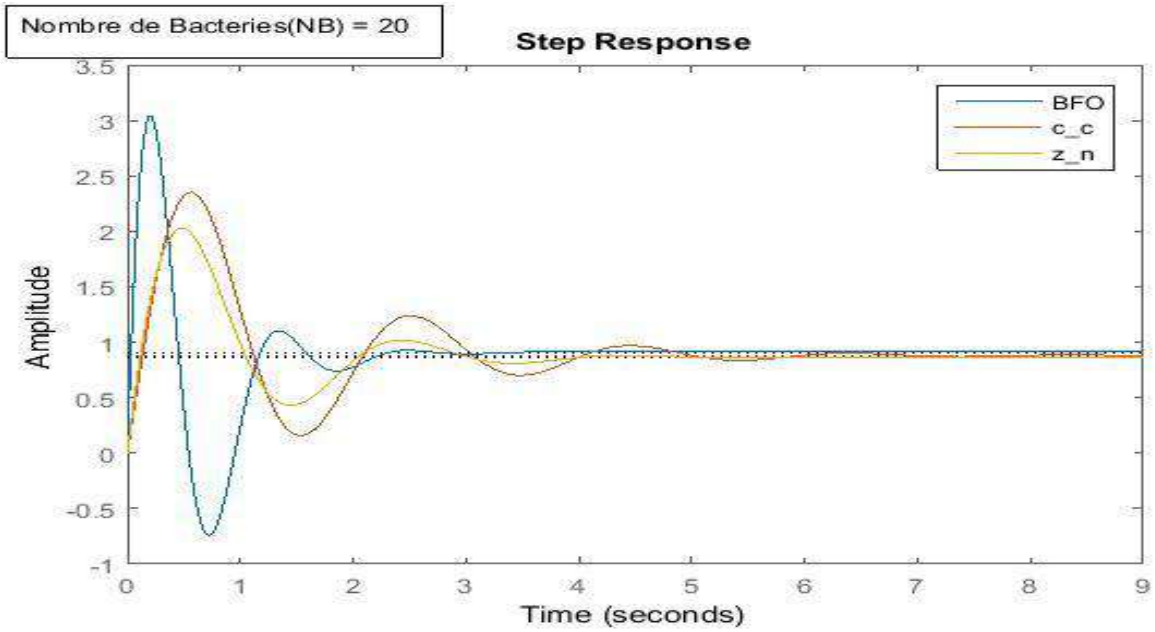


Figure III.19 : La réponse du système par les méthodes BFO, C-C et Z-N.

Tableau III.13 : Les performances de la réponse du système par les méthodes BFO, C-C et Z-N.

Méthodes	**Fonct. Obje.** F	t_r **(sec) (Rise Time)**	t_s **(sec) (SettlingTime)**	E_{ss} **(Steady State Error)**
Z-N	55.4152	0.0907	3.8023	0.5366
C-C	59.4552	0.1075	5.6942	0.5319
BFO (NB=20)	26.3076	0.0252	2.1991	0.5235

D'après le tableau III.13, on voit que la valeur de la fonction objective a diminuer de façon considérable (50 %).

On remarque aussi que, concernent le temps de montée (Rise Time), le temps nécessaire à la réponse pour évoluer de 10 à 90%, de sa valeur finale est très petit par la méthode BFO en comparaison avec les deux autres méthodes classiques Z-N et C-C.

Même remarque concernant le *temps de réponse ou d'établissement (Settling Time,t_s)*, qui est le temps requis pour que la courbe de sortie atteigne et reste à l'intérieur d'une bande, ce temps est très grand par les méthodes classiques Z-N et C-C, contrairement à la méthode BFO, ce temps est très petit.

Sur la base des résultats obtenus précédemment, on peut tirer quelques conclusions suivantes :

Le problème de réglage des paramètres du régulateur PID pourrait être résolu en utilisant des techniques d'optimisations nouvelles qui apportent une amélioration considérable en termes de t_s , t_r et M_p comme le montrent les tableaux 13.

En utilisant des techniques métaheuristique (BFO), t_s à diminuer de 42.1 %, t_r à diminuer de 72.2 % par rapport à la méthode Z-N.

En outre, la diminution des valeurs t_s , t_r était de 38.61 %, 76.55%, respectivement, par rapport à la méthode C-C.

1. III.7 Conclusion :

A partir des tableaux de trois modèles étudier et ces graphes on a fait dans ce chapitre une brève comparaison entre les méthode de SC (sans contrôleur), CC(Cohen Coon) ,

Z-N(zeigler nichols), BFO(Bacterial Foraging Optimization) pour s'avoir que la méthode étudier (BFO) est la meilleur dans l'ensemble des méthodes présidentes on a distingue sa à partir des déférents valeurs optimale de chaque position avec une variation de vitesse pour l'obtention d'un système optimal sans amortissement dans des conditions bien détermine donc nous avons constate que la méthode BFO est une méthode réversible pour une étude de bonne précision dans n'importe système a d'efférents ordre donc c'est la meilleur dans l'ensemble des méthodes classique présidents .

Conclusion générale

Le premier chapitre de ce mémoire a présente les différents régulateurs PID et les notions de bases sur la régulation dans les systèmes asservis, ainsi que les méthodes classiques de réglage des boucles de régulations tel que la méthode de Ziegler-Nichols et Cohen Coon.

Le deuxième chapitre à été consacrée à la présentation d'une nouvelle technique d'optimisation plus évolutive et facile, elle simule le comportement des bactéries lors de la recherche de la nourriture, ce modèle d'optimisation reproduit le comportement chimiotactique de la bactérie **E. coli**. Cette technique a donné de bons résultats dans différentes domaines de recherche, ce qui nous a encouragés à l'appliquer dans l'optimisation des paramètres des régulateurs PID. Par la suite nous avons présenté les caractéristiques principales qui peuvent aider au choix de la méthode la plus adaptée à un problème d'optimisation.

Le troisième chapitre a cité les différents indices de performances utilisés pour l'évaluation d'une fonction objective. Comparer avec les méthodes classiques de Ziegler-Nichols et Cohen Coon. Les résultats des simulations montrent que l'algorithme proposée BFO-PID était plus robuste, flexible et efficace en termes de performances dynamiques comme la réduction du

Peak time et dépassement maximal (Mp), le temps de montée (tr), le temps de réponse (ts) et l'erreur statique (Ess).

Afin d'avoir une technique de BFO «optimisation par recherche nourriture bactérienne » , nous avons développé une technique basée sur la méthode BFO avec des méthodes d'optimisation (GA, PSO).

BIBLIOGRAPHIE

[1] DOUADI FADILA, «Méthodologie d'optimisation par les techniques intelligentes d'un contrôleur PID pour un système CSTR » universite ferhat abbas –setif 2014

[2] BOUDJLLABA Kamel , GUENANE Lounas «simulation des correcteurs classiques(PID) sous PSpice et Matlab (simulink) » UNIVERSITE A/MIRA DE BEJAIA 2009 /2010.

[3] Benabdi Sofiane , Saoudi Abd Erraouf « optimisation d'un régulateur PID par les colonies de fourmis artificielles (ACO) » université mohamed khider biskra 2011 / 2012

[4] Régulation automatique (*Prof. Michel ETIQUE, mars 2007,Yverdon-les-Bains*), *Haute Ecole d'Ingéniérie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD)* , p164 ,172 ,179-180.

[5] livre :Automatique (contrôle et régulation : *patrick prouvost*)

[6] http://btscira.perso.sfr.fr/page1/page64/page64.html

[7] http://www.scribd.com/doc/35039799/112/a-Methode-de-Ziegler-Nichols

[8] Mounir AMIR, «Améliorations des performances des antennes imprimées basée sur des méthodes de modélisation et d'optimisation sophistiquées, Université de Batna.

[9] V. Losada, R. R. Boix, and M. Horno, 'Resonant modes of circular microstrip patches in multilayered substrates', IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 47, (4), pp. 488-498, 1999.

[10] S. Benkouda, S. Bedra, I. Benacer, and T. Fortaki, 'Modeling and design of rectangular

microstrip patch antenna with iso/anisopropic substrate using Neuro-spectral

Computation approach', Proceedings of International Conference on Nanoelectronics, Communications and Renewable Energy,pp. 264-269, 2013.

[11] MirzaMuhammad Sabir1 and Junaid Ali Khan2 « Optimal Design of PID Controller for the Speed Control of DC Motor by Using Metaheuristic Techniques Hindawi Publishing Corporation Advances in Artificial Neural Systems Volume 2014, Article ID 126317, 8 pages.

[12] A. Desbiens et É. Poulin, utilisation de matlab/simulink pour l'étude des systèmes dynamiques, 17 décembre 2014

[13] K.Vijaya Lakshmi and P.Srinivas, Optimal Tuning of PID Controller using Particle Swarm Optimization, Department of Electronics and Instrumentation EngineeringV. R. Siddhartha Engineering College Vijayawada, India. International Conference on Electrical ,Electronics ,Signals,Communications and Optimization (EESCO)-201

[14] Nitish Katal, Sanjay Kr. Singh, Optimal Tuning of PID Controller for DC Motor using Bio-Inspired Algorithms, *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 56– No.2, October 2012*

[15] Akhilesh Kumar Mishra*and Anirudha Narain, Speed Control Of Dc Motor Using Particle Swarm Optimization Technique , International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 6, June – 2013,pp 1943,1949.