

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université de Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Electronique

Projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme de
Master en Electronique

Option
Electronique des Systèmes Embarqués

Thème

Optimisation du contrôleur PID pour la
Commande des systèmes non linéaires
par l'algorithme de chauve-souris

Présenté par :
Lemize Chahira
Attoum Ines

Encadré par :
Dr. Talbi Nesrine

Promotion : septembre 2021

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : La commande PID	3
I.1 Introduction	3
I.2 Notion de système	4
I.3 Notion de système en Boucle ouverte (BO)et en Boucle fermée (BF)	5
I.3.1 Système en boucle ouverte (BO)	5
I.3.2 Système en boucle fermée (BF)	5
I.4 Système asservi	6
I.4.1 Définition	6
I.4.2 Qualité d'un asservissement et performances d'un système	6
I.4.2.1 Stabilité	6
I.4.2.2 Rapidité	7
I.4.2.3 Précision	7
I.5 Les régulateurs PID	8
I.5.1 Définition	8

I.5.2 Types de contrôleurs	9
I.5.2.1 Correcteur proportionnel (P)	9
I.5.2.2 Correcteur proportionnel – intégrale (PI)	10
I.5.2.3 Correcteur proportionnel – dérivée (PD)	11
I.5.2.4 Correcteur proportionnel - intégrale – dérivée	11
I.6 Les différentes structures du PID	13
I.6.1 La structure série	13
I.6.2 La structure parallèle	13
I.6.3 La structure mixte	14
I.7 Méthodes de synthèse du régulateur PID	14
I.7.1 Méthode de Ziegler -Nichols	14
I.7.2 Avantages et Inconvénients de la méthode Ziegler-Nichols	16
I.7.2.1 Avantages	16
I.7.2.2 Inconvénients	16
I.7.3 Application de la méthode de Ziegler-nichols	17
a. Réponse du système en BF.....	17
b. Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols	17
I.8 Conclusion	19
Chapitre II : Algorithme de Chauve-souris	20
II.1 Introduction	20
II.2 Méthodes d’optimisation	21
II.2.1 Définition	21
II.2.2 Types d’optimisation	21

II.2.3 Méthodes de résolution de problèmes d'optimisation	22
II.2.3.1 Les méthodes exactes	22
II.2.3.2 Les méthodes approchées	23
II.3 Les Méta-heuristiques	24
II.3.1 Définition	24
II.3.2 Principe d'une méta-heuristique	24
II.3.3 Différents types de méta-heuristiques	25
II.3.3.1 Les méta-heuristiques à population	25
II.3.3.2 Les méta-heuristiques à parcours	26
II.4 Avantages et Inconvénients des méta-heuristiques.....	26
II.5 Domaine d'application	27
II.6 L'algorithme de chauve-souris	27
II.6.1 Description	27
II.6.2 Echolocalisation	28
II.6.3 Algorithme de chauve-souris	28
a. Initialisation de l'Algorithme	28
b. Solution, fréquence et vitesse	29
c. Génération de la population initiale	30
d. Fonction d'évaluation	30
e. L'algorithme standard de chauve-souris	30
II.6.4 Critère d'arrêt	31
II.7 Domaine d'application de l'algorithme de chauve-souris	31
II.8 Conclusion	32
Chapitre III : Optimisation des paramètres du PID par la méthode BAT	33

III.1. Introduction	33
III.2 Structure d'optimisation	33
III.3. La fonction d'évaluation	35
III.4. Application de l'algorithme BAT pour l'optimisation des paramètres PID	35
III.4.1. Système du 2ème ordre	36
III.4.2. Système du 3ème ordre	37
III.4.3. Système AVR (Automatic Voltage Regulator)	39
III.4.3.1 Définition du système	39
III.4.3.2 Modèle du système AVR	40
III.4.3.3 Schéma fonctionnel de l'AVR	41
III.4.3.4. Simulation et interprétations	42
a. Commande du système en BF sans régulateur	42
b. Commande PID du système AVR	43
c. Commande PID du système AVR avec modification de la fonction objective..	45
d. Test de robustesse	47
III.5. Conclusion	48
Conclusion Générale	49
Bibliographie	51

Liste des figures

Figure.I.1 :	Modèle général d'un système	4
Figure.I.2 :	Commande en boucle ouverte	5
Figure.I.3 :	Commande en Boucle fermée	5
Figure.I.4 :	Schéma bloc d'un système asservi	6
Figure.I.5 :	Stabilité du système	7
Figure.I.6 :	Rapidité du système.....	7
Figure.I.7 :	Précision du système	8
Figure.I.8 :	Asservissement par un régulateur PI	8
Figure.I.9 :	Commande proportionnelle P	9
Figure.I.10 :	Commande proportionnelle-intégrale PI	10
Figure.I.11 :	Commande proportionnelle-dérivée PD	11
Figure.I.12 :	Commande PID	12
Figure.I.13 :	La structure série	13
Figure.I.14 :	La structure parallèle	14
Figure.I.15 :	La structure mixte	14
Figure.I.16 :	Mise en oscillations juste entretenues d'un système	15
Figure.I.17 :	Réponse du système en boucle fermée	17
Figure.I.18 :	Schéma bloc du système en boucle fermée	18
Figure.I.19 :	Réponses du système en état d'oscillation	18
Figure.I.20 :	Schéma bloc du système en boucle fermée	18
Figure.I.21 :	Réponses du système avec contrôleur PID	19
Figure.II.1 :	Classification des méthodes d'optimisation	23
Figure II.2 :	Principe générale des méta-heuristiques	25
Figure.II.3 :	Exemple d'écholocation	28
Figure II.4 :	Pseudo code de l'algorithme des chauves-souris	31
Figure. III.1:	Structure d'optimisation et de contrôle	34

Figure III.2 : L'évolution de la fonction d'évaluation	36
Figure III.3 : Réponse du système du 2ème ordre par le PID optimisé	37
Figure III.4 : Réponse du système en boucle fermée sans PID	37
Figure III.5 : L'évolution de la fonction d'évaluation	38
Figure III.6 : Réponse du système du 3ème ordre par le PID optimisé	39
Figure III.7 : Principe de fonctionnement du système AVR	40
Figure III.8 : Schéma fonctionnel du système AVR	41
Figure III.9 : Réponse indicielle de la tension de sortie du système AVR sans correcteur	43
Figure III.10 : Schéma fonctionnel du système AVR avec le correcteur PID et les valeurs nominales des paramètres	43
Figure III.11 : L'évolution de la fonction d'évaluation	44
Figure III.12 : Réponse du système AVR par le régulateur PID optimisé	45
Figure III.13 : Evolution de la fonction d'évaluation	46
Figure III.14 : Nouvelle réponse du système AVR par le régulateur PID optimisé	46
Figure III.15 : Test de robustesse via le changement de k_g du générateur	47

Liste des tableaux

Tableau.I.1 : Calcul des paramètres du contrôleur PID à partir de K_0 et T_0	16
Tableau.I.2 : Tableau d'influence des paramètres du PID sur le réglage de la sortie des systèmes	16
Tableau III.1 : Paramètres de l'algorithme de chauve-souris	35
Tableau III.2 : Paramètres PID obtenus par la méthode BAT	36
Tableau III.3 : Paramètres PID et performances du système obtenus par différentes méthodes de réglage	39
Tableau.III.4 : Principaux composants du système AVR	42
Tableau III.5 : Paramètres PID et performances du système obtenus par l'algorithme BAT.....	44
Tableau III.6 : Nouveaux paramètres PID et performances du système obtenus par l'algorithme	47

Introduction Générale

Le correcteur PID est la technique la plus utilisée dans la commande des processus industriels. Les raisons majeures de sa large acceptation en industrie et dues à sa capacité de commander la majorité des processus, à ses actions qui sont bien comprises, et à son implémentation qui est relativement simple. La conception et le réglage du correcteur PID a été un sujet de recherche depuis le jour où Ziegler et Nichols ont présenté leur méthode de réglage en 1942 [1]. Bien qu'il existe plusieurs techniques pour le réglage des paramètres du correcteur PID, un travail de recherche continu est encore en cours pour proposer de nouvelles approches de réglage. Ces techniques sont élaborées afin de rendre le système précis et insensible aux perturbations extérieures et aux variations paramétriques [2]. Ce sont généralement des techniques qui ont donné satisfaction dans la commande des systèmes linéaires.

Au cours de temps, ces méthodes seront moins efficaces, notamment si les processus à commander ont des structures complexes et non-linéaires. Cela peut influencer 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 [3]. Il y a dès lors plusieurs raisons qui poussent à développer des méthodes d'optimisation intelligente pour le réglage de contrôleurs PID. On peut citer la logique floue [4], les réseaux de neurones [5], les algorithmes génétiques (GA) [6] et l'optimisation par l'essaim particulaire (PSO) [7].

Dans ce travail, l'optimisation par l'algorithme de chauve-souris est appliquée pour déterminer les paramètres optimaux du régulateur PID. Les performances de l'approche d'optimisation sont illustrées sur des systèmes de complexité différente.

Le mémoire est organisé en trois chapitres structurés comme suit :

Dans le premier chapitre, la notion de système asservi en boucle ouverte et en boucle fermée est présentée. Après on a donné les critères de qualité d'un asservissement (performance d'un système), Ensuite, le principe de la commande classique conventionnelle, les différents types des régulateurs P, PI, PID, leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et inconvénients sont détaillés. Enfin, les différentes méthodes de synthèse d'un régulateur PID sont citées, et parmi ces méthodes, la méthode de Ziegler –Nichols est expliquée et appliquée pour le réglage du contrôleur PID d'un système de 2^{ème} ordre.

Dans le deuxième chapitre, les différentes méthodes d'optimisation et leur classification sont présentées. Une famille de techniques d'optimisation, appelées "méta-heuristiques", adaptées à la résolution de problèmes difficiles est détaillée. Après, la méthode de chauve-souris est expliquée, en donnant son algorithme de calcul et son principe de fonctionnement.

Le troisième chapitre est consacré pour l'application de l'algorithme de chauve-souris pour l'optimisation des paramètres du régulateur PID afin d'obtenir une bonne régulation en boucle fermée. L'optimisation est appliquée pour trois systèmes d'ordres différents y compris le système de réglage automatique de tension (AVR).

Enfin, le mémoire est clôturé par une conclusion générale.

Chapitre 1

La Commande PID

I.1. Introduction

L'analyse et la commande d'un système consiste à comprendre son bon fonctionnement, c-à-d, son comportement physique. L'obtention des performances exigées pour un système de commande, nécessite à joindre au système commandé des organes extérieurs appelés régulateurs ou contrôleurs. D'autre part, les contrôleurs de type PID se révèlent suffisants pour résoudre un grand nombre de problèmes de contrôle, particulièrement lorsque la dynamique du système est bénigne et que les exigences en termes de performances sont modestes.

A ce propos, une étude de 1993, rapporte que sur plus de 2000 boucles de régulation, 95 % de celles-ci utilisaient des structures de type PID, la majorité de ces dernières étant en fait de type PI. Seulement 20 % de ces boucles de régulation fonctionnèrent correctement. Une des causes majeures de ces faibles performances consistait en un mauvais choix des paramètres du régulateur. Malgré L'emploi étendu du contrôleur PI, il n'existe pas de méthode de design universellement acceptée. Anciennement, les contrôleurs de type PID étaient réglés de manière

empirique, par exemple par les méthodes décrites par Ziegler et Nichols [8]. Ces méthodes étaient basées sur la détermination de quelques caractéristiques de la dynamique du système. Les paramètres du contrôleur étaient alors exprimés en termes de ces caractéristiques par des formules simples.

Ce chapitre va introduire plusieurs notions sur les systèmes, à savoir, la notion d'un système asservi, notion de performances puis explique le principe de la commande classique PID ainsi que les différents types des régulateurs.

I.2. Notion de système :

Un système peut être défini comme un ensemble d'éléments exerçant collectivement une fonction déterminée. Un système communique avec l'extérieur par l'intermédiaire de grandeurs, fonctions du temps, appelées signaux.

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

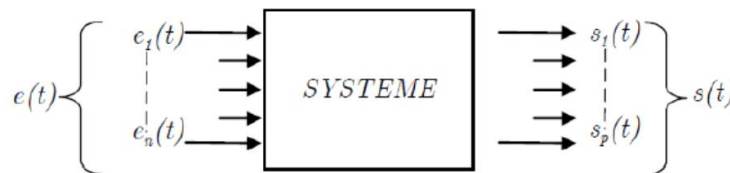


Figure.I.1 : Modèle général d'un système

Où $e(t)$ est un ou plusieurs signaux d'entrée (excitation, cause ou sollicitation) et $s(t)$ est un ou plusieurs signaux de sortie (ou réponses), t étant la variable temps. En général, ces signaux (d'entrée et de sortie) ne sont pas de même nature.

Les grandeurs d'entrée sont les grandeurs qui agissent sur le système. Il en existe deux types

- Commandes : Celles que l'on peut maîtriser.
- Perturbations : Celles que l'on ne peut pas maîtriser.

Les signaux de sortie d'un système sont aussi appelés réponses du système. Pour observer les grandeurs de sortie, on utilise des capteurs. Les informations issues de ces capteurs va permettre d'élaborer la commande du système [9].

I.3. Notion de système en Boucle ouverte (BO) et en Boucle fermée (BF)

L'étude des systèmes est destinée à commander aux mieux les différents processus rencontrés. Il existe deux solutions pour commander un système, selon la relation entre le signal d'entrée et le signal de sortie : système en boucle ouverte et système en boucle fermée.

I.3.1. Système en boucle ouverte (BO)

La commande en **boucle ouverte** consiste à ajuster la commande directement à partir de la consigne sans tenir compte de la sortie. Une commande en boucle ouverte est rarement utilisée en pratique car elle est limitée et ne peut pas maîtriser les perturbations sur le système. Pour résoudre ce problème la commande en boucle fermée est exigée.

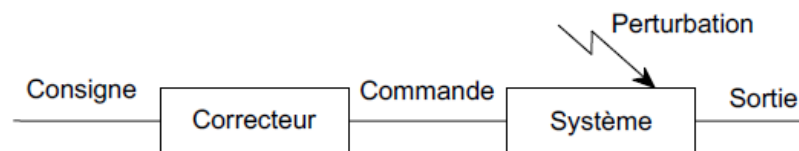


Figure.I.2 : Commande en boucle ouverte

I.3.2. Système en boucle fermée (BF)

Le principe est de mesurer la sortie pour ajuster la commande par un régulateur. Ses objectifs se résument en :

- Rendre le système bouclé robuste aux variations du système
- Rejeter les perturbations.
- Stabiliser les systèmes instables dans la BO.
- Améliorez les performances du système, à savoir : la précision, la rapidité et la stabilité.

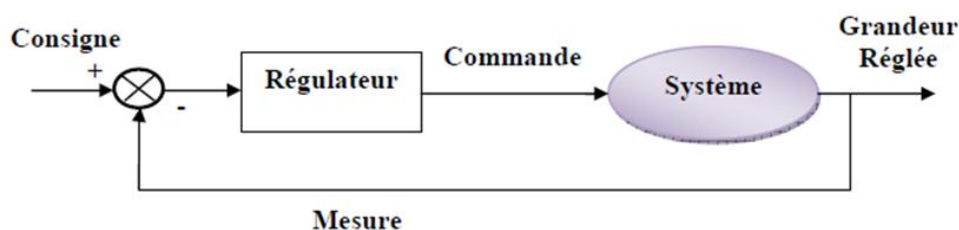


Figure.I.3 : Commande en boucle fermée.

I.4. Système asservi

I.4.1. Définition

Le principe de base d'un asservissement est de mesurer, en permanence, l'écart entre la valeur réelle de la grandeur à asservir et la valeur de consigne que l'on désire atteindre, et de calculer la commande appropriée à appliquer à un (ou des) actionneur(s) de façon à réduire cet écart le plus rapidement possible [10]. Il est caractérisé par la présence de :

- ☞ **Chaîne directe** : Elle comprend des éléments amplificateurs et éventuellement, des convertisseurs de puissance, en liaison avec les sources d'énergie.
- ☞ **Chaîne de retour** : Elle est constituée d'éléments de précision généralement passifs, elles transmettent à l'entrée des informations sur les grandeurs de sortie. Ces informations sont comparées aux signaux d'entrée au moyen de comparateurs. Ces derniers calculent les différences ou écarts entre les signaux d'entrée et les informations issues des signaux de sortie [11].

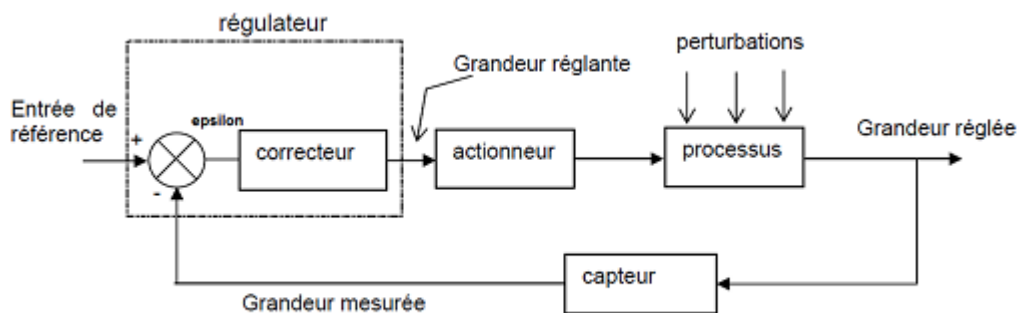


Figure - système bouclé

Figure.I.4 : Schéma bloc d'un système asservi

I.4.2. Qualité d'un asservissement et performances d'un système [12]

Plusieurs paramètres caractérisent les performances d'un asservissement : la *rapidité*, la *stabilité*, le *dépassement* de la consigne et la *précision*,

I.4.2.1. Stabilité

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

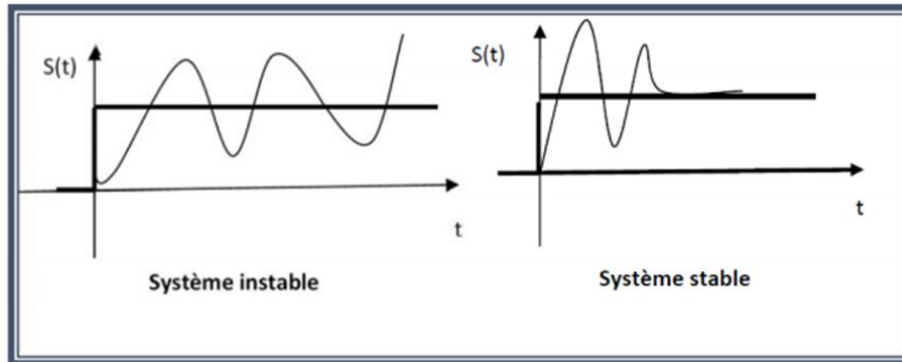


Figure.I.5 : Stabilité du système

I.4.2.2. Rapidité

Elle se définit par la vitesse à laquelle une valeur stable en sortie est atteinte. Cette vitesse se caractérise par le *temps de réponse*. C'est le temps mis par la mesure pour atteindre sa valeur définitive à $\pm 5\%$ de sa variation tout en se maintenant dans cette zone des $\pm 5\%$.

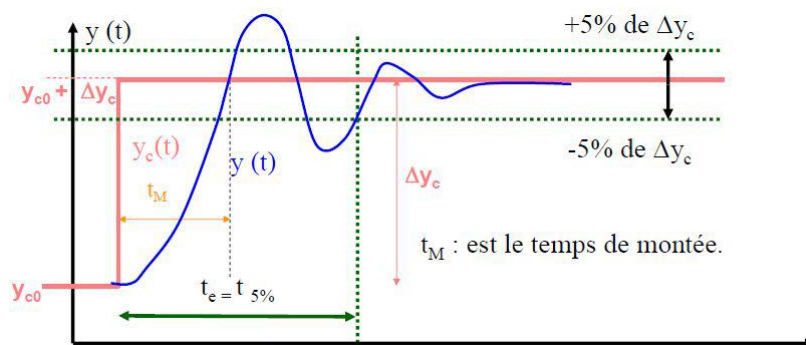


Figure.I.6 : Rapidité du système

I.4.2.3. Précision

Il est naturel d'évaluer la précision d'un système régulé en comparant l'objectif atteint par rapport à celui exigé. La précision d'un système régulé se mesure donc par l'écart entre la consigne demandée et la mesure en régime permanent ; on parle alors de précision statique qui s'effectue en réalisant une variation rapide de consigne en amplitude et en mesurant la variation

d'amplitude. D'une façon générale, la synthèse d'un asservissement résulte d'un compromis stabilité – précision – rapidité

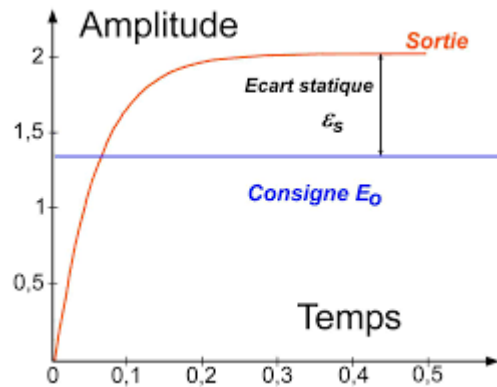


Figure.I.7 : Précision d'un système.

I.5. Les Contrôleurs PID

I.5.1. Définition

Le Contrôleur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) est un système de régulation (boucle fermée), qui calcul la commande en fonction de l'erreur entre la consigne et la sortie [13]. Son rôle est d'assurer que la réponse présente des caractéristiques dynamiques et stationnaires convenables [14].

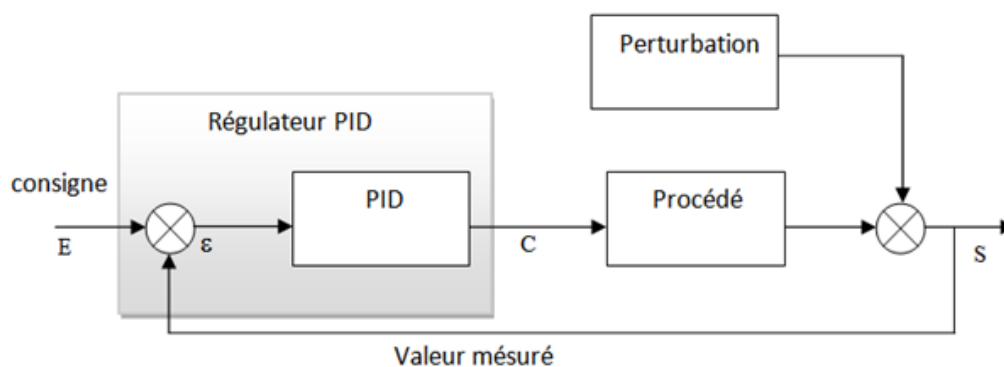


Figure.I.8 : Asservissement par un régulateur PI

On peut juger le contrôleur selon les critères suivants :

- Le contrôleur doit être capable de maintenir la variable commandée à sa consigne.

- Le système en boucle fermée doit être asymptotiquement stable.
- L'influence des perturbations doit être minimale.
- Les réponses à des variations de consigne doivent être rapides et douces.
- Une action de commande excessive doit être évitée.
- Le système de commande doit être robuste : il doit être insensible aux variations du procédé et aux erreurs du modèle du procédé.

I.5.2. Types de contrôleurs PID [15]

Les régulateurs standards les plus utilisés dans l'industrie sont les régulateurs de la famille PID (proportionnel, intégral, dérivé), car ils permettent de régler à l'aide de ses paramètres les performances (précision, rapidité, dépassement...) du système commandé.

L'adaptation d'un régulateur PID aux différents systèmes s'effectue par le réglage de ses paramètres :

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

I.5.2.1. Correcteur proportionnel (P) [15]

Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système asservi, il permet donc d'améliorer notablement la précision. Dans le cas d'un correcteur proportionnel, la loi de commande corrigée $u(t)$ est proportionnelle à l'écart $e(t)$

$$u(t) = K \cdot e(t) \quad (\text{I.1})$$

$$c(p) = \frac{U(p)}{E(p)} = K(p) \quad (\text{I.2})$$

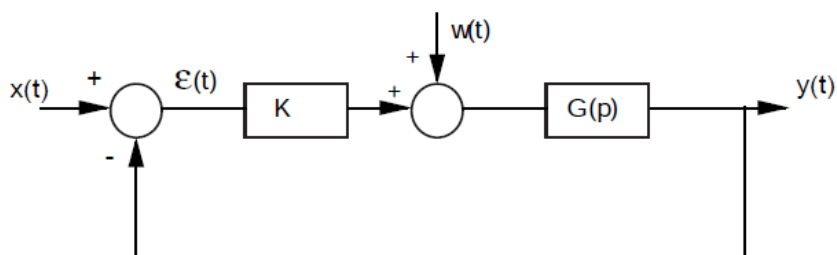


Figure I.9 : Commande proportionnelle P.

L'effet d'une augmentation du gain entraîne une diminution de l'erreur statique, et rend le système plus rapide mais engendre l'instabilité du système.

I.5.2.2 Correcteur proportionnel – intégrale (PI) [15]

L'action proportionnelle est une fonction qui fait varier le signal de sortie du régulateur proportionnellement à l'écart entre la mesure et la consigne. Le correcteur intégral est fréquemment combiné au correcteur proportionnel pour améliorer le régime permanent et le régime transitoire. Cette combinaison est appelée correcteur proportionnel-intégral.

Le coefficient de proportionnalité, appelé gain du régulateur, est obtenu par le réglage du paramètre du régulateur.

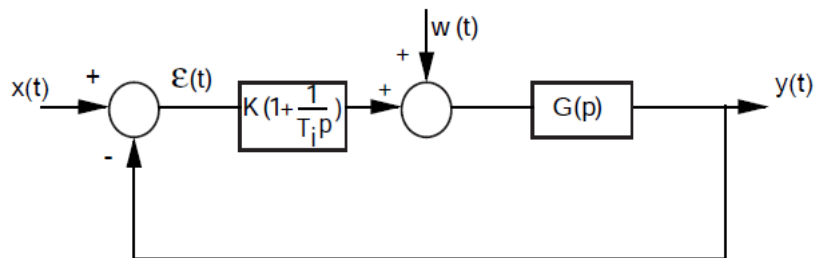


Figure I.10 : Commande proportionnelle-intégrale PI.

L'équation dans le domaine temporel de ce correcteur est écrite par l'expression :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{I.3})$$

Où $e(t)$, $u(t)$, K_p et K_i désignent respectivement l'erreur à l'instant t , la commande générée et les gains du correcteur. La fonction de transfert du contrôleur correspondante est donnée par :

$$C(p) = K_p + \frac{K_i}{p} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) \quad (\text{I.4})$$

$$\text{Avec : } T_i = \frac{K_p}{K_i}$$

L'introduction d'un correcteur PI permet d'améliorer la précision et de rejeter les perturbations de type échelon. Par contre, ce type de correcteur possède certaines limitations sur l'amélioration de la rapidité et peut même introduire une instabilité du système en boucle fermée [16].

I.5.2.3. Correcteur proportionnel – dérivée (PD) [15]

L'inconvénient majeur du correcteur dérivé est son insensibilité aux variations lentes de l'erreur. Pour cette raison, ce type de correcteur n'est jamais utilisé seul. La solution permettant de minimiser cet inconvénient est de le combiner au correcteur proportionnel [17].

Nous représentons le correcteur PD dans le domaine du temps par l'équation suivante :

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (I.5)$$

K_d : Gain de l'action dérivée.

La fonction de transfert correspondante est :

$$C(p) = K_p + K_d p = K_p (1 + T_d p) \quad (I.6)$$

Avec : $T_d = \frac{K_d}{K_p}$

Ce type de correcteur possède la structure suivante :

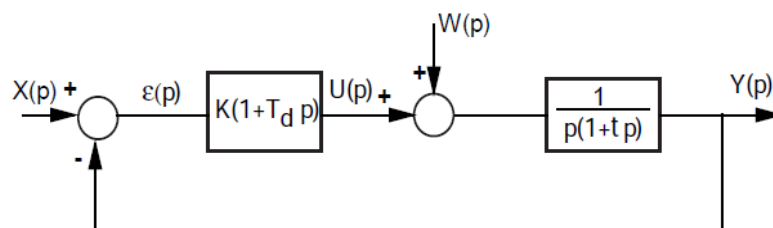


Figure I.11 : Commande proportionnelle-dérivée PD.

Cette action n'a pas d'effet que lorsqu'il y a variation de l'erreur, elle n'a aucun effet sur le fonctionnement en régime permanent. Les correcteurs PD permet donc d'améliorer le régime transitoire [16].

I.5.2.4. Correcteur proportionnel - intégrale – dérivée [15]

Les termes proportionnel et intégral peuvent amener un dépassement de la consigne et des oscillations. Cela implique pour le moteur par exemple des inversions de polarité, ce qui est loin d'être idéal. Pour limiter ce phénomène indésirable, on introduit un troisième élément qui est le terme dérivé. Son action va dépendre du signe et de la vitesse de variation de l'erreur, et sera

opposée à l'action proportionnelle. Elle devient prépondérante aux abords de la valeur demandée lorsque l'erreur devient faible, que l'action du terme proportionnel faiblit et que l'intégrale varie peu : elle freine alors le système, limitant le dépassement et diminuant le temps de stabilisation [18].

Le schéma général de la boucle fermée est donné par :

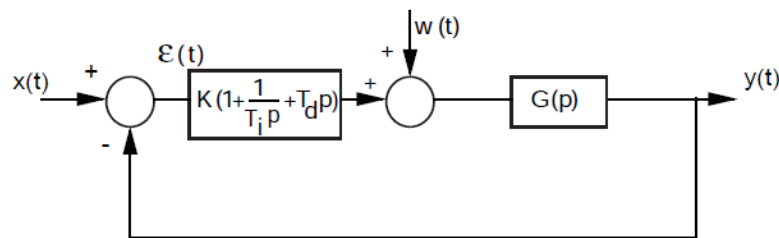


Figure I.12 : La Commande PID

L'intérêt du correcteur PID est d'intégrer les effets positifs des trois correcteurs précédents. La détermination des coefficients K_p , K_i , K_d du correcteur PID permet d'améliorer à la fois la précision (K_p et K_d), la stabilité (K_d) et la rapidité (K_p , K_d).

Le réglage d'un PID est en général assez complexe, des méthodes pratiques de réglages permettent d'obtenir des bons résultats [19]. Il est régi par la relation suivante :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{I.7})$$

Sa fonction de transfert est donnée par :

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

En général, on a les qualités suivantes du correcteur PID

- L'action proportionnelle est souvent utilisée pour la rapidité du système bouclé ;
- L'action intégrale est employée pour améliorer l'erreur en régime permanent ;
- L'action dérivée assure l'amélioration de la stabilité.

I.6. Les différentes structures du PID [19]

Différentes possibilités d'associations des modules P, I et D existent. Ces structures sont fonctionnellement équivalentes, et il est facile de convertir les coefficients utilisés dans l'une Pour obtenir ceux d'une autre. Les trois configurations les plus utilisées sont :

I.6.1. La structure série

La transformée de Laplace de la loi de commande est de la forme :

$$C(p) = e(p) \cdot K_p \cdot \left[K_i \cdot \frac{1}{p} \right] \cdot [K_d \cdot p] \quad (\text{I.9})$$

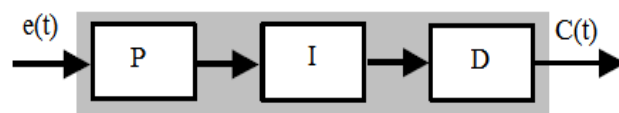


Figure.I.13 : La structure série.

I.6.2. La structure parallèle

La loi de commande est de la forme :

$$C(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{I.10})$$

$$C(p) = K_p e(p) + k_i \cdot \frac{e(p)}{p} + K_d \cdot p \cdot e(p) \quad (\text{I.11})$$

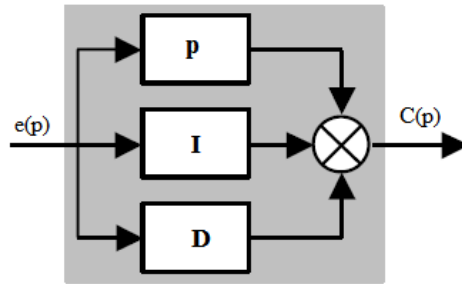


Figure.I.14 : La structure parallèle

I.6.3. La structure mixte

D'après la transformée de Laplace, La loi de commande est de la forme :

$$C(p) = K_p e(p) \cdot \left[K_i \cdot \frac{1}{p} + K_d \cdot p \right] \quad (\text{I.12})$$

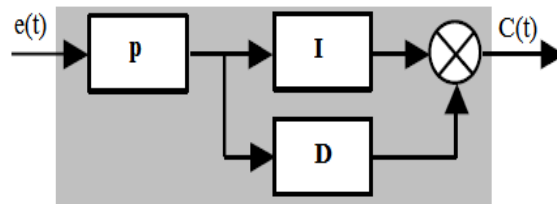


Figure.I.15 : La structure mixte

I.7. Méthodes de synthèse du régulateur PID [20]

Il y a plusieurs de méthodes qui permettent de calculer les paramètres du régulateur PID

Comme :

- Méthode de Halman
- Méthode de Cohen-Coon
- Méthode de Chien-Hrones-Ryswick
- Méthode Ziegler –Nichols

I.7.1. Méthode de Ziegler -Nichols

Plusieurs méthodes expérimentales ont été développées pour déterminer les coefficients d'un correcteur PID. En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches expérimentales

destinées à ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle du système à régler que, tandis-que la deuxième méthode demande d'amener le système en boucle fermée à sa limite de stabilité. Il est important de souligner que ces méthodes ne s'appliquent en général qu'à des systèmes sans comportement oscillant et dont le déphasage en hautes fréquences dépasse -180 degrés. Ces systèmes possèdent souvent un retard pur et/ou plusieurs constantes de temps. On les rencontre surtout dans les processus physico-chimiques tels que les réglages de température, de niveau, de pression, etc. [21].

Cette méthode est basée sur la connaissance du point critique du diagramme de Nyquist du procédé. Les paramètres du régulateur PID en fonction des caractéristiques K_0 et T_0 sont donnés.

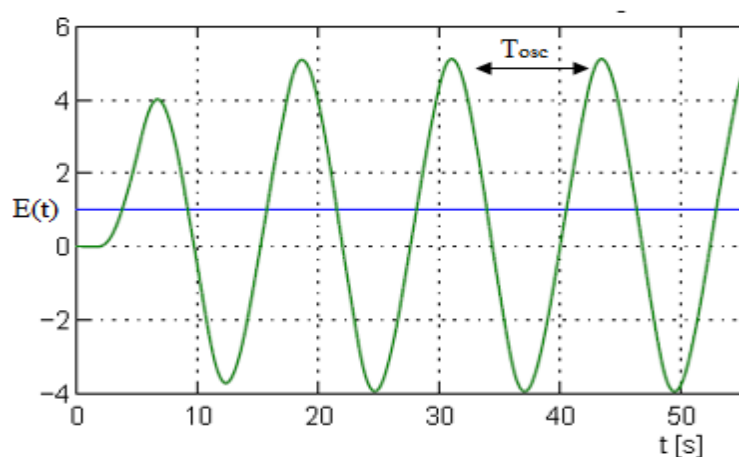


Figure.I.16 : Mise en oscillations juste entretenues d'un système.

Dans le tableau I.2 où K_0 et T_0 sont respectivement le gain qui amène le système en oscillation limite et la période des oscillations. La Méthode de Ziegler –Nichols a été développée à partir de simulation sur un grand nombre de cas. Le critère de synthèse est d'obtenir un rapport de décroissance $d=1/4$, pour le rejet des perturbations, ce qui représente un coefficient d'amortissement z de 0.22. Ces valeurs sont satisfaisantes pour un bon rejet des perturbations, mais elles sont trop faibles pour les réponses aux changements de consigne.

Régulateur	Paramètres		
	K_p	K_i	K_d
P	K_0	–	–
PI	$K_0/2.2$	K_p/T_0	–
PID	$0.6.K_0$	$2 K_p T_0$	$K_p T_0/8$

Tableau.I.2 : Calcul des paramètres du contrôleur PID à partir de K_0 et T_0

I.7.2. Avantages et Inconvénients de la méthode de Ziegler-Nichols [22]

I.7.2.1. Avantages

Parmi les avantages les plus importants, on cite

- Facilité à mettre en œuvre (physiquement et au point de vue Calcul).
- Possibilité de le tester sur le système en production (correspond à la réalité).

I.7.2.2. Inconvénients

Malgré les avantages offerts par le PID, il y a quelques inconvénients qu'il faut les citer, à savoir :

- Le système peut devenir instable ou passer dans des états Dangereux
- Peut prendre beaucoup de temps si le système réagit très Lentement.
- Difficulté du réglage des systèmes multivariables et fortement non linéaire.

Augmentation de	Stabilité	Précision	Rapidité
K_p	Diminue	Augmente	Augmente
K_i	Augmente	Pas d'influence	Diminue
K_d	Augmente	Pas d'influence	Diminue

Tableau.I.3 : Tableau d'influence des paramètres du PID sur le réglage de la sortie des systèmes

I.7.3. Application de la méthode de Ziegler-nichols

La méthode de Ziegler-Nichols a été appliquée sur un système du 2^{ème} ordre représenté par la fonction transfert suivante [23] :

a. Réponse du système en BF

On a pris le système par sa fonction transfert suivante :

$$G(s) = e^{-0.5}/(s + 1)^2 \quad (\text{I. 13})$$

Le système a un pôle double égale à -1 et un retard égal à 0.5s. En utilisant le Simulink de Matlab, la sortie du système en boucle fermée est représentée par la figure suivante :

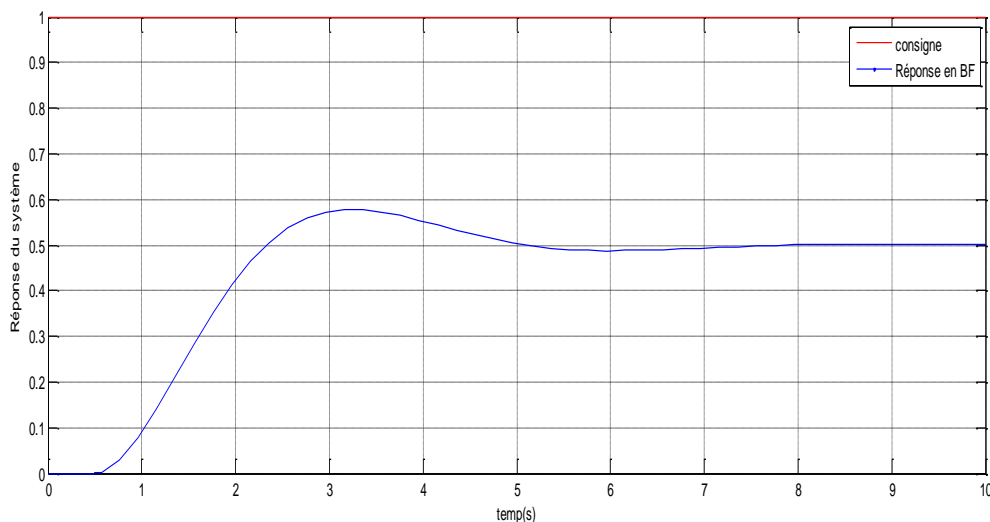


Figure.I.17 : Réponse du système en boucle fermée

D'après la Figure I.17 on remarque que la réponse indicielle du système en boucle fermé présente une erreur statique égale à 0.6 (60%).

b. Réglage par la méthode de Ziegler et Nichols

Pour trouver k_0 et T_0 , on amène le système à un état d'oscillation puis en déduit les valeurs des coefficients (k_p, k_i, k_d) via le tableau I.2.

La figure I.18 donne le modèle réalisé sous Matlab/Simulink pour la simulation du système en boucle fermée en utilisant la méthode de Ziegler-Nickols.

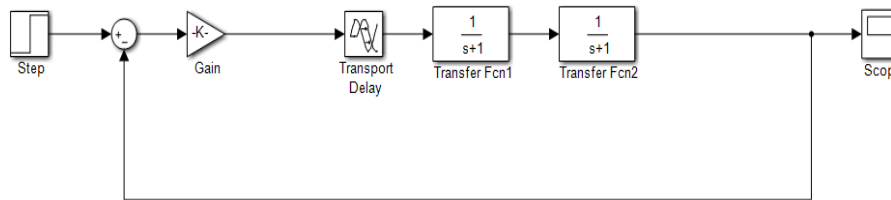


Figure.I.18 : Schéma bloc du système en boucle fermée

Après simulation, on a trouvé le gain d'oscillation $k_0 = 4.85$ et t d'après la figure I.19, la période des oscillations $T_0=3.25$ s.

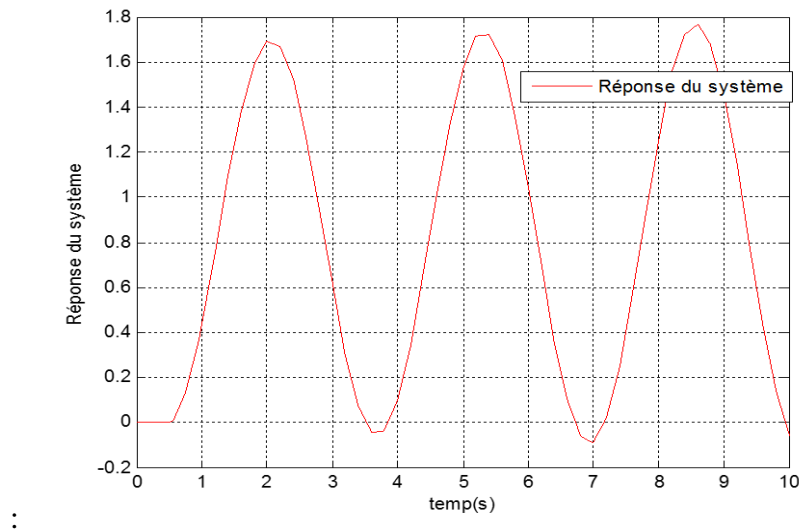


Figure.I.19 : Réponses du système en état d'oscillation

Nous calculons après les paramètres du régulateur à l'aide du tableau I.2, on trouve les résultats suivants : $K_p=2.88$, $K_i=1.772$, $K_d=1.17$.

On introduit le contrôleur PID avec les paramètres calculés dans le schéma bloc, comme le montre la figure I.20.

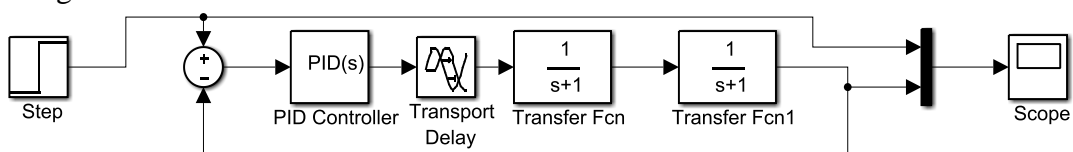


Figure.I.20 : Schéma bloc du système en boucle fermée

Après simulation on a trouvé les résultats suivants :

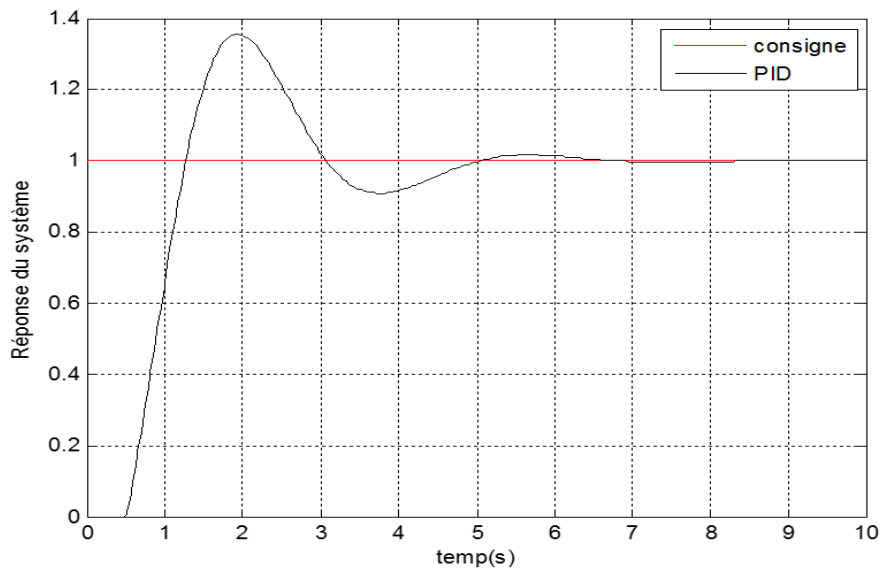


Figure.I.21 : Réponses du système avec le contrôleur PID

On constate que le régulateur PID a pu commander le système en respectant les performances désirées, à savoir la stabilité et la précision ainsi que la rapidité. Concernant le dépassement, si on change légèrement un paramètre la précision diminue, et cela est parmi les inconvénients de la méthode de Ziegler-Nichols. Un autre inconvénient de cette méthode est qu'elle prend beaucoup de temps pour trouver le gain d'oscillation pour un système de 2^{ème} ordre, cette durée va être plus grande proportionnellement avec la complexité du système à commander. Pour cela, on a proposé dans ce projet une autre méthode qui se base sur l'algorithme de chauve-souris pour calculer systématiquement les paramètres du PID.

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini la notion système asservis ainsi que les principaux éléments des systèmes asservis en boucle ouverte et en boucle fermée. Après on a présenté les performances désirées d'un système pour juger la qualité d'un asservissement et on a terminé par la présentation des régulateurs PID avec différentes structures. Il existe de nombreuses méthodes utilisées pour déterminer les paramètres du régulateur PID, la première apparue est celle de Ziegler et Nichols. Cette dernière a été appliquée pour un système de 2^{ème} ordre pour voir ses avantages et ses inconvénients.

Chapitre 2

Algorithme de Chauve-souris

II.1. Introduction

L'optimisation est une discipline en plein essor qui entre en jeu dans beaucoup de domaines, Comme dans la conception de circuits électroniques, la recherche opérationnelle, la biologie, la commande des systèmes [24,5], mais aussi pour répondre aux besoins croissants des secteurs économique et industriel (maximisation des performances, minimisation des coûts) [25].

Parmi les méthodes d'optimisation existantes, on trouve les méta-heuristiques. Ces méthodes sont apparues dans les années 80 et forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace. Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé.

L'un des intérêts majeurs des méta-heuristiques est leur facilité d'utilisation dans des problèmes concrets sans nécessité de connaissances particulières sur le problème d'optimisation à résoudre [26].

Dans ce chapitre, nous aborderons l'une des études les plus importantes qui ont été bien accueillies par les scientifiques dans le domaine d'optimisation, à savoir, l'algorithme de chauve-souris [27]. Résultant des chauves-souris, de leur environnement et de leur mode de vie. La chauve-souris est l'un des mammifères les plus méconnus. Elle a cependant fasciné les plus grands chercheurs et intéresse aujourd'hui encore les scientifiques. Sa capacité de vol actif, unique chez les mammifères, lui permet de voler la nuit en évitant les obstacles, même à grande vitesse, grâce à son système l'écholocation très perfectionné. D'où le nom de l'algorithme de chauve-souris ou *Bat Algorithm* en anglais qui sera notre méthode d'optimisation utilisée dans ce projet.

II.2. Méthodes d'optimisation

II.2.1. Définition

Les problèmes d'optimisation sont actuellement des axes de recherche importants. On les trouve dans plusieurs domaines à savoir, la recherche opérationnelle, le traitement d'image, l'économie, l'électronique, la conception mécanique, les réseaux informatiques, etc.

Un problème d'optimisation est défini par un ensemble de variable, un ensemble de contraintes sur ces variables et une fonction objective que l'on cherche à minimiser ou à maximiser. Chaque problème d'optimisation possède un espace de recherche qui représente l'ensemble de solutions possibles de problèmes. La résolution d'un problème d'optimisation, revient à chercher la ou les meilleures solutions, tous en satisfaisant l'ensemble de contraintes dans un temps d'exécution raisonnable [28].

II.2.2. Types d'optimisation

Plusieurs critères sont employés pour classifier les différents problèmes d'optimisation [29], on cite :

- ☞ Classification basée sur le nombre d'objectifs : dans cette classification, on définit deux catégories de problèmes d'optimisation : ceux à un seul objectif et ceux à

plusieurs objectifs, on parle dans ce cas de problèmes d'optimisation multi-objectif. Il est important de souligner que la majorité des problèmes réels sont multi-objectifs.

- ☞ Classification selon les contraintes : deux catégories sont constatées : problèmes sans contraintes et problèmes avec contraintes.
- ☞ Classification selon l'allure de la fonction objectif qui peut admettre un seul optimum local qui est aussi l'optimum global, dans ce cas on parle d'un problème d'optimisation unimodal, par contre si la fonction objectif admet plusieurs optima on parle d'un problème multimodal.

II.2.3. Méthodes de résolution de problèmes d'optimisation

Plusieurs méthodes de résolution existent dans la littérature pour l'optimisation combinatoire. Ces méthodes font partie de deux groupes de nature différente : les méthodes exactes et les méthodes approchées (ou heuristiques).

II.2.3.1. Les méthodes exactes

Ces méthodes ont permis de chercher des solutions optimales pour des problèmes de taille raisonnable. Malgré les progrès réalisés, le temps de calcul nécessaire pour trouver une solution optimale risque d'augmenter exponentiellement avec la taille du problème, les méthodes exactes rencontrent généralement des difficultés face aux applications de taille importante.

Ces méthodes sont très exigeantes sur la puissance des ordinateurs, Par exemple, pour le problème de voyageur de commerce, la solution exacte d'un problème symétrique, avec 2392 villes a été déterminée sur une vingtaine d'heures sur ordinateur super puissant. Dans cette famille d'algorithmes, nous pouvons citer la programmation linéaire, avec par exemple la méthode du simplexe.

D'autres méthodes exactes reposent sur le principe "diviser-et-régner". Pour ce type de méthodes, on décompose le problème en plus petits sous-problèmes, plus faciles à résoudre, et on combine les résultats jusqu'à arriver à résoudre le problème initial. Les méthodes qui en découlent sont assez nombreuses, on peut par exemple citer la méthode par séparation et évaluation (branch and bound) et ses dérivées (branch and cut & branch and price). L'analyse des propriétés du problème permet d'éviter l'énumération de larges classes de mauvaises

solutions. Dans l'idéal, seules les solutions potentiellement bonnes sont donc énumérées. Enfin, Nous pouvons également citer l'algorithme A*.

II.2.3.2. Les méthodes approchées

Les algorithmes approximatifs (heuristiques) permettent de trouver une solution dont le coût est proche du coût de la solution optimale. Ils ont l'avantage de permettre en un temps raisonnable de trouver une solution. Ils constituent donc une alternative très intéressante pour traiter les problèmes d'optimisation de grande taille si l'optimalité n'est pas primordiale. Les méthodes approchées sont fondées principalement sur diverses heuristiques, souvent spécifiques à un type de problème.

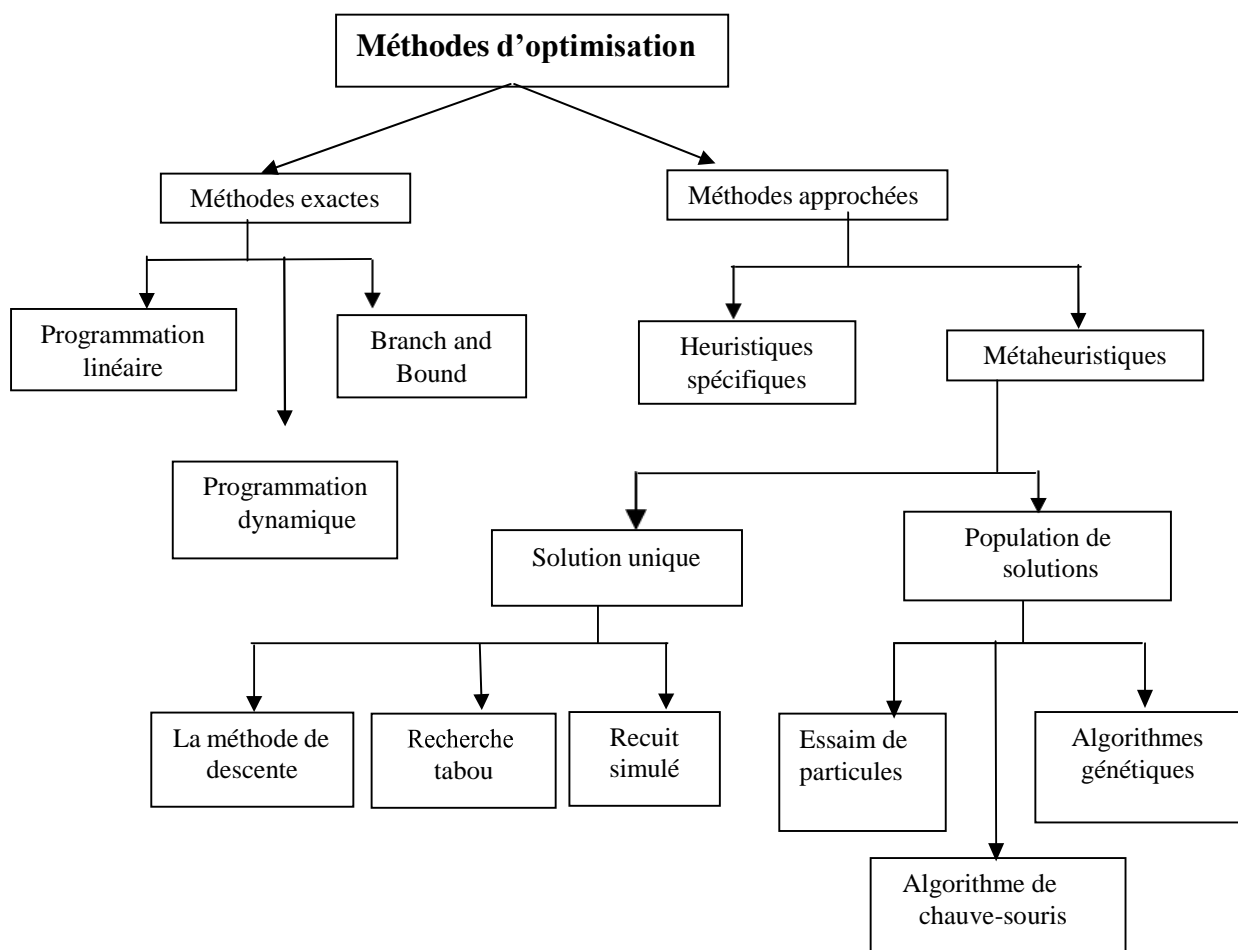


Figure.II.1 : Classification des méthodes d'optimisation

On peut citer des heuristiques très simples comme les algorithmes de gloutons ou les approches par amélioration itérative. Le principe des méthodes gloutonnes est de faire une succession de choix optimaux localement, jusqu'à ce que l'on ne puisse plus améliorer la

solution, et ce, sans retour en arrière possible. Ce principe, assez générique, doit être adapté en fonction de la structure du problème.

Des progrès importants ont été réalisés permettant l'apparition d'une nouvelle génération des algorithmes approchés puissants et généraux, souvent appelés méta-heuristiques, dans cette catégorie on peut citer l'exemple de recuit simulé, la recherche tabou, les algorithmes évolutionnaires, les colonies de fourmis, l'algorithme de chauve-souris, etc.

II.3. Les Méta-heuristiques

II.3.1 Définition [30]

Le mot méta-heuristique est dérivé de la composition de deux mots grecs :

- Heuristique qui vient du verbe *heuriskein* et qui signifie 'trouver'
- Meta qui est un suffixe signifiant 'au-delà', 'dans un niveau supérieur'

Une **méta-heuristique** est un algorithme d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile (souvent issus des domaines de la recherche opérationnelle, de l'ingénierie ou de l'intelligence artificielle) pour lesquels on ne connaît pas de méthode classique plus efficace.

Les méta-heuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction, par échantillonnage d'une fonction objective. Elles se comportent comme des algorithmes de recherche, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution [31].

Il existe un grand nombre de méta-heuristiques différentes, partant d'une recherche locale simple à des algorithmes de recherche globale complexes, ces méthodes utilisent cependant un haut niveau d'abstraction, leur permettent d'être adaptées à une large gamme de problèmes différents.

II.3.2 Principe d'une méta-heuristique [32]

Le but d'utilisation d'une méta-heuristique est de résoudre un problème d'optimisation donné : elle cherche un objet mathématique (une permutation, un vecteur, etc.) minimisant (ou maximisant) une fonction *objectif*, qui décrit la qualité d'une solution du problème.

Les méta-heuristiques manipulent une ou plusieurs solutions, à la recherche de l'optimum, la meilleure solution du problème. Les itérations successives doivent permettre de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt, consistant généralement en l'atteinte du temps d'exécution imparti ou en une précision demandée.

L'ensemble des solutions possibles forme l'espace de recherche. L'espace de recherche est au minimum borné, mais peut être également limité par un ensemble de contraintes.

Dans la Figure. (II.2) les méta-heuristiques (M) tentent de trouver l'optimum global (G) d'un problème d'optimisation ($f(x)$) difficile (avec par exemple des discontinuités (D)), sans être piégé par les optima locaux (L).

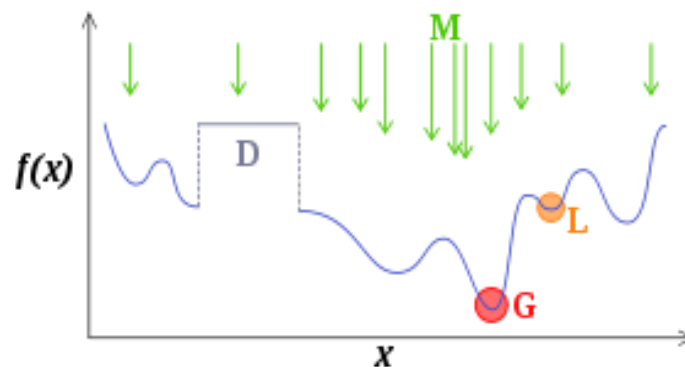


Figure II.2 : Principe générale des méta-heuristiques.

II.3.3 Différents types de méta-heuristiques [33]

Il existe un grand nombre de méta-heuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. Ces méthodes peuvent être adaptées à

une large gamme de problèmes différents. Elles peuvent être regroupées en deux grandes catégories ; les méta-heuristiques à population, et les méta-heuristiques à parcours.

II.3.3.1 Les méta-heuristiques à population

Le principe des méta-heuristiques à population ou encore dite évolutives est de faire évoluer un ensemble de solutions vers l'optimum cherché. Cette évolution se fait à partir de transformations et de coopérations entre les individus qui représentent individuellement une solution de l'espace total du problème. Parmi ces méthodes, nous distinguons essentiellement les algorithmes génétiques, et les colonies de fourmis, l'algorithme de chauve-souris, etc.

II.3.3.2 Les méta-heuristiques à parcours

Les méta-heuristiques à parcours ne travaillent qu'avec une seule solution, cette dernière est modifiée à chaque itération de l'algorithme. L'espace des solutions est visité par la solution, et celle-ci est modifiée pour être améliorée au cours de ce parcours. Les méta-heuristiques à parcours les plus classiques sont : le recuit simulé, la recherche Tabou.

II.4. Avantages et Inconvénients des métaheuristique [34]

- ☞ Les méta-heuristiques étant très généralistes, elles peuvent être adaptées à tout type de problème d'optimisation pouvant se réduire à une « boîte noire ». Elles sont souvent moins puissantes que des méthodes exactes sur certains types de problèmes. Elles ne garantissent pas non plus la découverte de l'optimum global en un temps fini. Cependant, un grand nombre de problèmes réels n'est pas optimisable efficacement par des approches purement mathématiques, les méta-heuristiques peuvent alors être utilisées avec profit.

- ☞ La notion d'efficacité se rapporte généralement à deux objectifs contradictoires : la vitesse et la précision. La vitesse est souvent mesurée en nombre d'évaluations de la fonction *objectif*, qui est la plupart du temps la partie la plus gourmande en temps de calcul. La précision se rapporte à la distance entre l'optimum trouvé par la méta-

heuristique et l'optimum réel, soit du point de vue de la solution, soit de celui de la valeur. Bien souvent, un algorithme rapide est peu précis, et inversement.

- ☞ L'utilisation de méta-heuristiques peut paraître relativement simple, en première approche, mais il est souvent nécessaire d'adapter l'algorithme au problème optimisé. Tout d'abord, principalement dans le cadre de l'optimisation combinatoire, le choix de la représentation des solutions manipulées peut être crucial. Ensuite, la plupart des méta-heuristiques disposent de paramètres dont le réglage n'est pas nécessairement trivial. Enfin, obtenir de bonnes performances passe généralement par une étape d'adaptation des diverses étapes de l'algorithme (initialisation, notamment). En pratique, seul le savoir-faire et l'expérience de l'utilisateur permet de gérer ces problèmes.

II.5. Domaine d'application [35]

Les méta-heuristiques ont été appliquées avec succès pour résoudre de larges gammes de problèmes, tels que :

- Problèmes de tournée de véhicules.
- Optimisation de réseaux mobiles UMTS.
- Gestion du trafic aérien.
- Optimisation de la commande floue des systèmes non linéaires.
- Optimisation des plans de chargement des cœurs de réacteur nucléaires...etc.

II.6. L'algorithme de chauve-souris

II.6.1. Description

Parmi plusieurs méta-heuristiques biologiquement inspirées, l'algorithme de chauve-souris (*Bat Algorithm*) proposé par Xin She Yang [36] a attiré l'attention des chercheurs qui travaillent dans le domaine des algorithmes d'optimisation à inspiration biologique. Cet algorithme est basé sur le comportement de l'écholocation de microchiroptères. L'écholocation est un sonar biologique (à cause de manque de vision) qui permet détecter la distance, et ils ont aussi la capacité de faire la différence entre la nourriture/proie et les obstacles. La méthode s'appuie sur une technique de régulation de fréquence pour augmenter la diversité des solutions dans la population, ainsi il tente d'équilibrer l'exploration et l'exploitation pendant le processus

de recherche, en imitant les variations des taux d'émission d'impulsions et la vitesse des chauve-souris lors de la recherche de proies [37].

L'algorithme standard de chauve-souris présente de nombreux avantages, l'un d'entre eux est qu'il peut obtenir une convergence rapide aux étapes initiales en passant de l'exploration à l'exploitation. Cela en fait un algorithme efficace lorsqu'une solution rapide est nécessaire. Afin d'améliorer les performances, de nombreuses modifications ont été ajoutées pour augmenter la diversité de la solution et pour améliorer les performances de l'algorithme de chauve-souris standard.

II.6.2. Echolocation

L'écholocation consiste à envoyer des sons et à écouter leur écho pour localiser, les éléments d'un environnement. À également été définie comme étant le processus de détection de la position à travers les impulsions.

La chauve-souris émet des ultrasons vers son environnement et écoute ses échos afin d'éviter d'éventuels obstacles et de localiser d'éventuelles proies. Ces ultrasons varient leur fréquence et intensité en se basant sur la distance entre la chauve-souris et sa proie. Plus la chauve-souris s'approche de sa proie, plus l'intensité des ultrasons diminue et plus leur fréquence augmente.

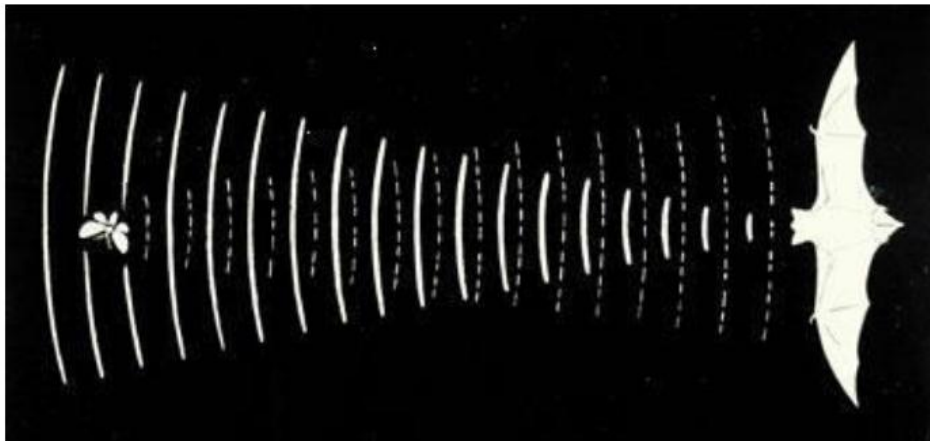


Figure.II.3. Exemple d'écholocation

II.6.3. Algorithme de chauve-souris

a. Initialisation de l'Algorithme

La population initiale est générée de façon aléatoire pour n nombre de chauve-souris. Chaque individu de la population est décrit par un vecteur à valeurs réelles avec une dimension d. L'équation suivante est utilisée pour générer la population initiale

$$X_{ij}=X_{minj} + rand * (X_{maxj} - X_{minj}) \quad (II. 1)$$

Où $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, d$; et X_{maxj} et X_{minj} sont les limites supérieures et inférieures pour la dimension j de X.

b. Solution, fréquence et vitesse

Dans les simulations, nous utilisons des chauves-souris virtuelles. Nous devons définir les règles de mise à jour de leurs positions X_i et les vitesses V_i , dans un espace de recherche bidimensionnel, à chaque itération t. Parmi toutes les solutions, il existe une meilleure *solution* courante X^* . Les règles précédentes peuvent être traduites pour obtenir les nouvelles solutions X_i^t et vitesses V_i^t à l'étape t, par application les équations de mise à jour suivantes :

$$f_i = f_{min} + (f_{max} - f_{min})\beta \quad (II. 2)$$

$$V_i^t = V_i^{t-1} + (X_i^t - X^*)f_i \quad (II. 3)$$

$$X_i^t = X_i^{t-1} + V_i^t \quad (II. 4)$$

Où f_i est la fréquence d'émission de la chauve-souris X_i , et qui appartient à la gamme $[f_{min}, f_{max}]$ correspondant à la gamme de longueurs d'ondes $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$. $\beta \in [0, 1]$ est un vecteur aléatoire issu d'une distribution uniforme. X^* Est la meilleure solution globale courante qui est déterminée en comparant toutes les solutions parmi tous les n chauves-souris. La plage de valeurs de la fréquence f_i diffère d'un problème à un autre en fonction du domaine, de la taille du problème, etc. Initialement, chaque chauve-souris reçoit de manière aléatoire une fréquence qui est dérivée uniformément de $[f_{min}, f_{max}]$.

Lorsqu'une solution est sélectionnée parmi les meilleures solutions courantes, une nouvelle solution pour chaque chauve-souris est générée localement à l'aide d'une transformation intégrant un facteur aléatoire.

$$X_{new} = X_{old} + \varepsilon A^t \quad (I.7)$$

Où $\varepsilon \in [-1,1]$ est un nombre aléatoire, alors que A^t est le volume moyen de toutes les chauves-souris à cette étape de traitement. La mise à jour des vitesses et des positions des chauves-souris est similaire à la procédure d'optimisation standard des essaims de particules [39] [40]. Étant donné que le contrôle de la portée du mouvement des particules envahissantes, l'algorithme de chauve-souris peut être considéré comme étant une combinaison équilibrée de l'optimisation standard des essaims de particules et de la recherche locale intensive, contrôlée par le volume et le taux de pulsation.

c. Génération de la population initiale

Le choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de convergence de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace d'état en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes. Si des informations a priori sur le problème sont disponibles, il est naturel de générer les individus dans un sous domaine particulier afin d'accélérer la convergence.

d. Fonction d'évaluation

La fonction d'évaluation (*coût*) est généralement l'étape dans laquelle on mesure la performance de chaque individu. Pour pouvoir juger la qualité d'un individu et ainsi le comparer aux autres, il faut établir une mesure commune d'évaluation. Aucune règle n'existe pour définir cette fonction, son calcul peut ainsi être quelconque, que ce soit une simple équation ou une fonction affine. La manière la plus simple est de poser la fonction d'adaptation comme la formalisation du critère d'optimisation.

e. L'algorithme standard de chauve-souris

En se basant sur ces règles et ces explications, les étapes basiques de l'algorithme des chauves-souris peuvent être résumées tel qu'il est montré sur la figure suivante :

1. Définir la Fonction objective : $f(x)$, $x = (x_1, \dots, x_d)$
2. Initialiser la position de chauve-souris x_i et la vitesse v_i , $i = 1, 2, \dots, n$
3. Définir la fréquence f_i de chaque position x_i
4. Initialiser le taux de pulsation r_i et l'intensité A_i
5. Tant que ($t < \text{nombre maximum d'itérations}$)
 - Générer de nouvelles solutions en ajustant la fréquence et en actualisant les vitesses et les positions / solutions. (Équations II.2, II.3 et II. 4).
 - Si ($\text{rand} > r_i$)
 - Sélectionnez une solution parmi les meilleures solutions
 - Générer une solution locale autour de la meilleure solution sélectionnée x^* (équation II.5)
 - Fin si
 - Générer une nouvelle solution en volant aléatoirement
 - Si ($\text{rand} < A_i$ et $f(x_i) < f(x^*)$)
 - Accepter de nouvelles solutions
 - Incrémenter r_i et réduire A_i
 - Fin si
 - Classer les chauves-souris et trouver la meilleure solution x^*
6. Fin tant que
7. Afficher les résultats donnés par la meilleure solution x^*

Figure II.4. Pseudo code de l'algorithme des chauves-souris

II.6.4. Critère d'arrêt

Le cycle de génération et de sélection de population est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait ; ce critère peut être notamment un nombre maximum de générations, un temps maximal de calcul, une valeur de fitness minimale, ou/et une convergence vers une solution satisfaisante.

II.7. Domaine d'application de l'algorithme de chauve-souris

L'algorithme de chauve-souris standard et ses nombreuses variantes signifient que les applications sont également très diversifiées. En fait, depuis que l'algorithme original de chauve-souris a été développé, les algorithmes de chauve-souris ont été appliqués dans presque tous les domaines d'optimisation, de classification, segmentation et Traitement d'image, sélection de fonctionnalités, planification, exploration de données et autres.

L'algorithme des chauves-souris est utilisé pour l'optimisation du mouvement du robot et la génération désangles de rotation automatiquement.

II.8 Conclusion

Les méta-heuristiques sont souvent employées pour leur facilité de programmation et de manipulation. Elles sont en effet facilement adaptables à tout type de problème d'optimisation. Toutefois, elles sont le plus judicieusement employées sur des problèmes d'optimisation difficiles, ou des méthodes d'optimisation plus classiques montrent leurs limites.

Les méta-heuristiques, comprenant notamment la méthode de chauve-souris, est un des algorithmes d'optimisation de type stochastiques qui progressant vers un optimum par échantillonnage d'une fonction coût dont le but est la résolution de problèmes d'optimisation difficile. Pour cela, Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'algorithme des chauves-souris et à son application au problème d'optimisation.

Grâce à la simplicité et la souplesse de leurs principes, ils peuvent être un outil d'optimisation et de conception des systèmes de contrôle des processus complexes dont la dynamique n'est pas encore maîtrisée.

Chapitre 3

Optimisation des paramètres du PID Par la méthode BAT

III.1. Introduction

Le manque de méthodes exactes pour la synthèse des régulateurs PID, a guidé les chercheurs à s'orienter vers l'utilisation des algorithmes évolutionnaires et l'intelligence distribuée (*swarm intelligence*) à cause de leurs caractéristiques d'exploration globale dans un environnement complexe. Dans ce chapitre, nous utilisons l'algorithme de chauve-souris (*BAT algorithm*) pour l'optimisation des paramètres d'un régulateur PID, appliqué à la commande de quelques systèmes dynamiques.

III.2. Structure d'optimisation

Le diagramme de la commande en boucle fermée est schématisé par la figure III.1. Il consiste en quatre blocs principaux :

- Bloc structurel représenté par le contrôleur PID.
- Bloc du système à commander.
- Bloc d'optimisation caractérisé par un algorithme de chauve-souris.
- Bloc décisionnel caractérisé par le critère de performances désirées.

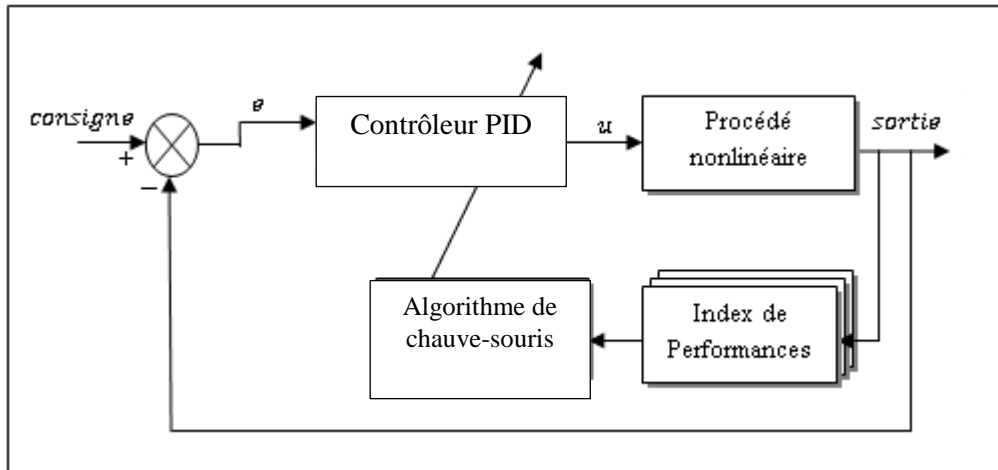


Figure. III.1: Structure d'optimisation et de contrôle

L'interaction mutuelle entre les différents blocs de la structure de la figure III.1 est illustrée par la procédure suivante :

1. Génération d'une population initiale des chauves-souris caractérisant les paramètres du contrôleur.
2. Pour tous les chauves-souris :
 - Evaluer la fonction objective.
 - Classifier les chauves-souris selon leur fonction objective.
 - Construction d'une nouvelle population par la mise à jours des positions et des vitesses des chauves-souris.

L'étape 2 est répétée jusqu'à ce qu'un nombre maximum de générations soit effectué. Après le processus d'évolution, la génération finale de l'algorithme se compose des chauves-souris qui fournissent des solutions 'optimales' ou proches.

Le rôle de l'algorithme de chauve-souris est de calculer les paramètres optimaux du régulateur PID. Les trois paramètres $\{K_p, K_i \text{ et } K_d\}$ du régulateur PID sont représentés sous forme d'une chauve-souris capable d'évoluer durant le processus d'optimisation. Donc chaque

chauve-souris est une solution représentée par un vecteur composé de trois paramètres du contrôleur PID.

III.3. La fonction d'évaluation

La fonction d'évaluation ou fonction objective est le critère que l'algorithme d'optimisation Bat va devoir optimiser pour améliorer les performances de la boucle de régulation telles que la précision, le dépassement, le temps de réponses, etc.

Le critère le plus utilisé en automatique pour caractériser les performances d'une régulation PID est le critère d'intégrale de la valeur absolue de l'erreur pondérée par le temps (ITAE) qui donne lieu à une régulation très précise en régime permanent donné par :

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|.dt \quad (III.1)$$

Avec $e(t)$ est l'erreur entre la consigne ou et la sortie du système commandé.

III.4. Application de l'algorithme BAT pour l'optimisation des paramètres PID

Dans cette section, nous allons présenter les résultats de simulations de la commande PID (optimisée par la méthode de chauve-souris) de systèmes dynamiques d'ordres différents en la comparant avec des méthodes de réglages du PID de la littérature technique.

L'ensemble des simulations est réalisé sous MATLAB. Les valeurs des paramètres de l'algorithme BAT sont donnés par le tableau (III.1) :

Paramètres	Désignation	Valeur
n	Taille de Population	20
ng	Nombre de générations	100
A	Intensité	0.5
r	Taux de pulsation	0.5
f_{min}	Fréquence minimale	0
f_{max}	Fréquence maximale	1

Tableau III.1 : paramètres de l'algorithme de chauve-souris.

III.4.1. Système du 2^{ème} ordre

Le système est représenté sa fonction transfert donné par la relation (III.2) :

$$G(s) = 1/(s + 1)^2 \quad (\text{III.2})$$

La figure III.2 montre l'évolution de la fonction objective à travers les générations. On constate une forte décroissance durant les premières itérations avant de converger vers la valeur optimale. A la fin d'exécution la fonction d'évaluation ITAE = $9.9 \cdot 10^{-3}$ donc une bonne précision du système commandé.

Les paramètres du contrôleur PID optimisé par l'algorithme de chauve-souris utilisé sont donné par le tableau III.2. On trouve aussi la valeur du temps de réponse et le dépassement qui peuvent juger le contrôleur. La figure III.3 donne la sortie du système commandé. La sortie du système est stable, précise et rapide.

D'après les résultats, on constate que le régulateur optimisé par la méthode BAT a atteint les performances désirées.

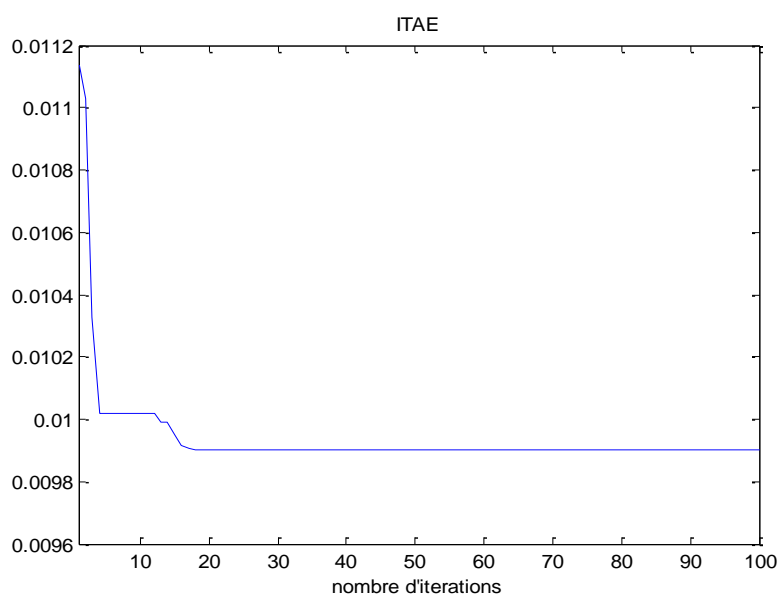


Figure III.2 : L'évolution de la fonction d'évaluation

La méthode de réglage	Kp	Ki	Kd	Temps de réponse (ts)	Dépassement (D%)
BAT	44.09	19.68	12.21	1s	4.8

Tableau III.2 : paramètres PID obtenus par la méthode BAT

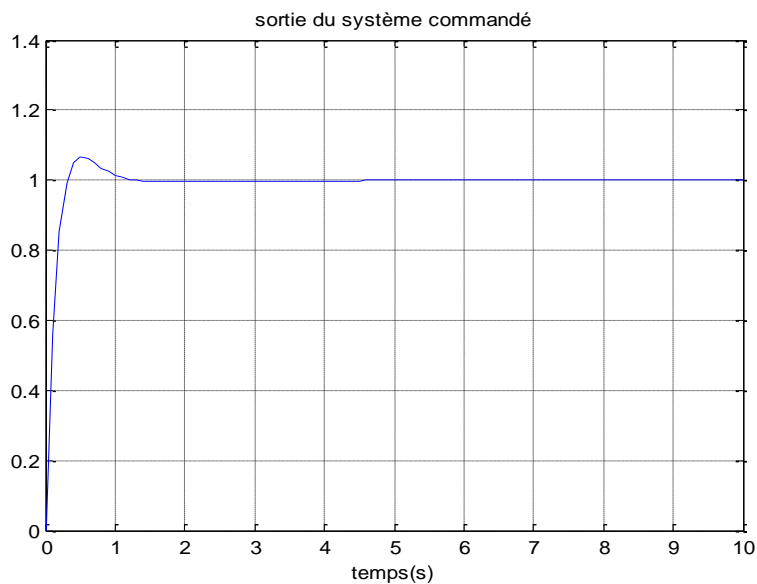


Figure III.3 : Réponse du système du 2^{ème} ordre par le PID optimisé

III.4.2. Système du 3^{ème} ordre

Le système est représenté sa fonction transfert donné par la relation (III.3) :

$$G(p) = \frac{4.228}{(p + 0.5)(p^2 + 1.64p + 8.456)} \quad (\text{III.3})$$

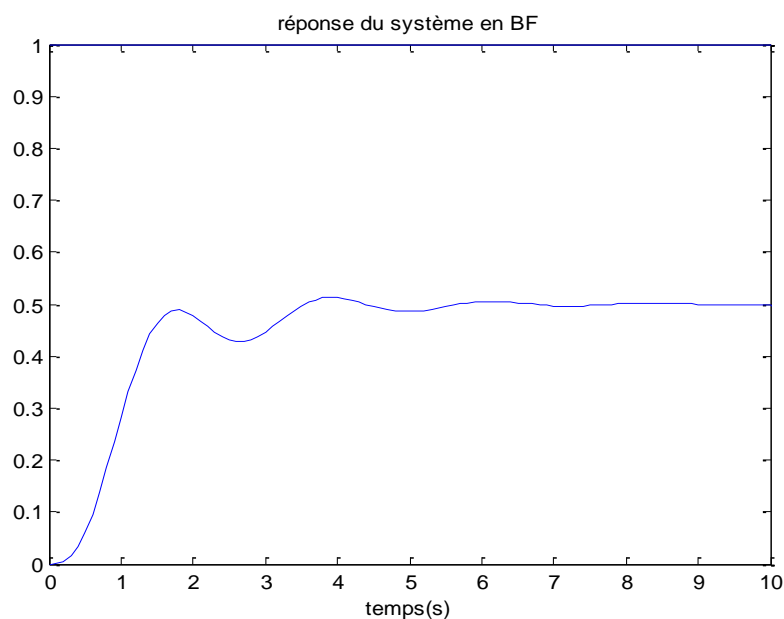


Figure III.4 : Réponse du système en boucle fermée sans PID.

Sa réponse en boucle fermée est donnée par la figure III.4. On constate une erreur statique égale à 0.5 (50%) du signal de consigne en régime permanent.

On implante le régulateur PID pour commander ce système. La figure III.5 montre l'évolution de la fonction objective à travers les générations. On constate une forte décroissance durant les premières itérations avant de converger vers la valeur optimale. A la fin d'exécution la fonction d'évaluation $ITAE = 9.5 \cdot 10^{-3}$ donc une bonne précision du système commandé.

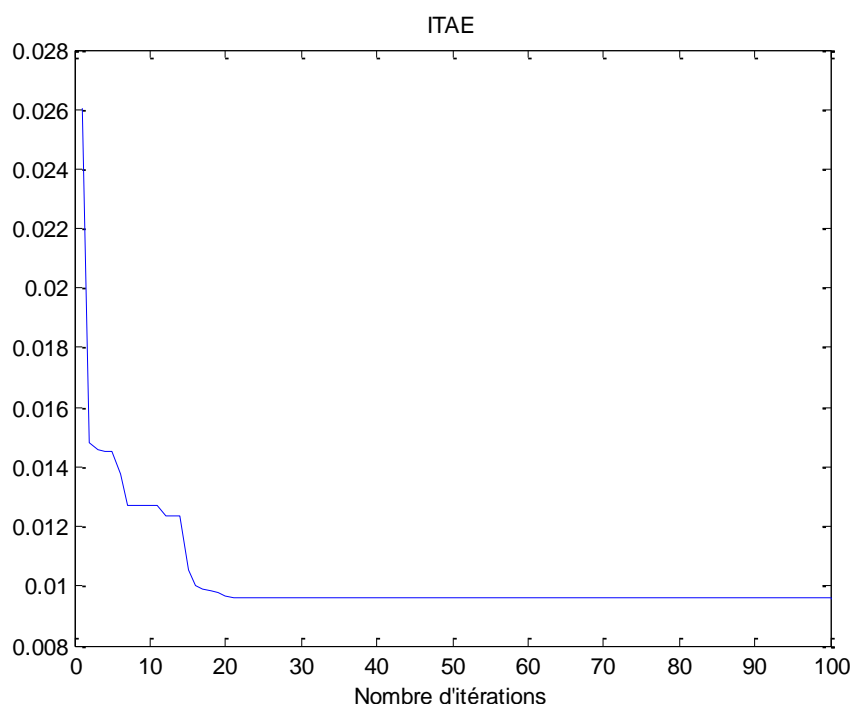


Figure III.5 : L'évolution de la fonction d'évaluation.

Les paramètres du contrôleur PID optimisé par l'algorithme de chauve-souris utilisé sont donné par le tableau III.3. On trouve dans le même tableau les paramètres PID obtenus par différentes méthodes de réglage ainsi que les performances obtenues de ce système.

La figure III.6 donne la réponse indicielle du système commandé. Cette réponse est stable, précise et rapide. D'après les résultats, on constate que le régulateur optimisé par la méthode BAT a atteint les performances désirées et il est relativement plus performant que les autres méthodes de la littérature technique.

La méthode de réglage	Kp	Ki	Kd	Temps de réponse (ts)	Dépassement (D%)
Chauve-souris (BAT)	1.79	1.23	0.7	5.2s	5.8
Ziegler-Nickols [21]	2.19	2.12	0.56	6.6s	16.46
Algorithme génétique (GA) [22]	1.63	0.96	0.38	5.97s	3
Colonie de fourmis (ACO) [23]	2.51	2.21	1.15	6.51	16

Tableau III.3 : paramètres PID et performances du système obtenus par différentes méthodes de réglage

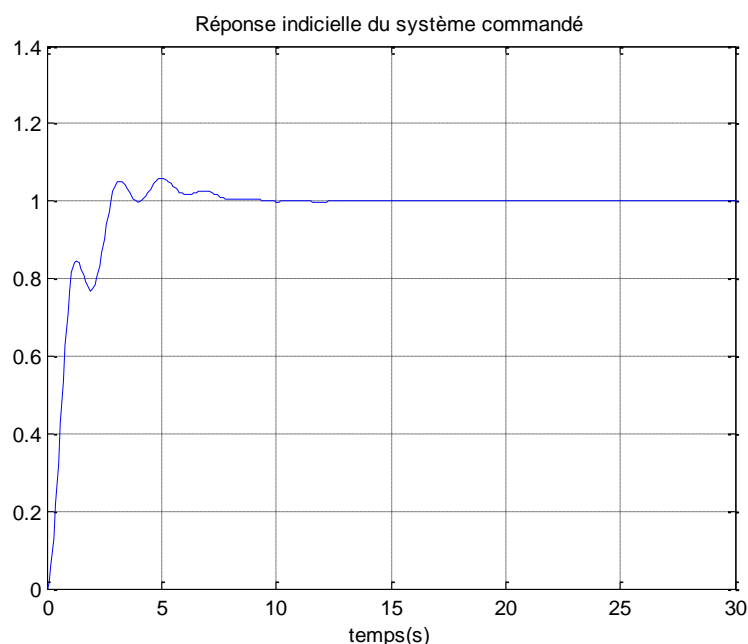


Figure III.6 : Réponse du système du 3^{ème} ordre par le PID optimisé

III.4.3. Système AVR (Automatic Voltage Regulator)

III.4.3.1 Définition du système

La stabilité et la constance du niveau de tension nominale dans un réseau de l'énergie électrique sont les principaux problèmes dans la commande du système d'alimentation électrique, puisque tous les équipements connectés à ce réseau électrique sont conçu pour un certain niveau de tension appelée tension nominale. Si la tension de fonctionnement est différente de la tension

nominale, les performances des équipements électriques seront affectées et leur espérance de vie diminue. De plus, l'autre raison importante pour contrôler la valeur nominale de tension est la perte de ligne réelle. Il est possible de minimiser les pertes de ligne réelles en contrôlant le niveau de tension nominale.

Pour résoudre ces problèmes de commande, un système de régulation automatique de tension (AVR) est appliqué aux unités de production d'énergie [24].

Malgré le potentiel des techniques de commande moderne, le correcteur PID classique est encore largement utilisé dans la commande du système AVR parce qu'il offre une performance robuste pour une large gamme de conditions de fonctionnement et une implémentation facile.

Différentes approches de réglage du correcteur PID du système AVR ont été proposées dans la littérature. Dans les dernières décennies, les techniques d'optimisation telles que les réseaux de neurones, la logique floue, les algorithmes génétiques (GA), les algorithmes d'optimisation par essais particuliers (PSO) ainsi que les algorithmes d'optimisation par colonie d'abeilles (BCO) et colonie de fourmis (ACO) ont été largement utilisées dans le réglage des paramètres du correcteur PID du système AVR [25]-[28].

Dans cette section, on va commander le système AVR par le contrôleur PID optimisé par l'algorithme de chauve-souris (BAT).

III.4.3.2 Modèle du système AVR

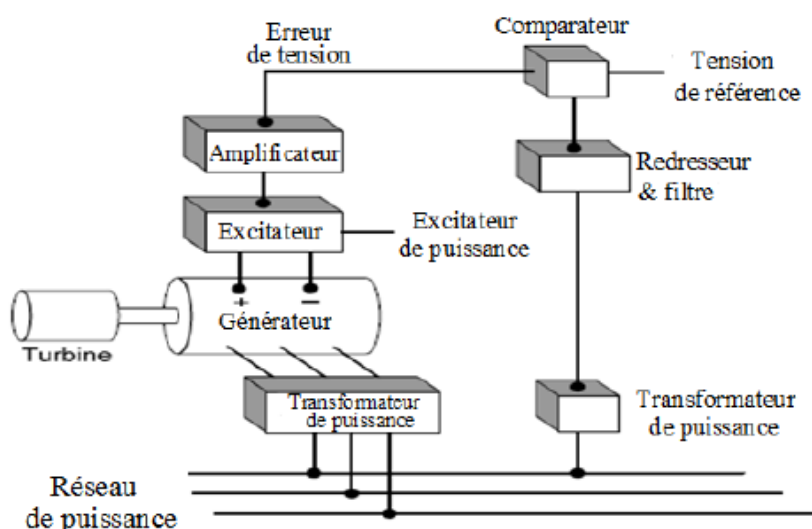


Figure III.7 : Principe de fonctionnement du système AVR

La boucle du système AVR fournit la constance et la stabilité de la tension de sortie dans un système d'alimentation électrique. Le système AVR est représenté dans la figure III.7.

La variation de charges dans le réseau électrique peut provoquer des oscillations de la force électromotrice d'un générateur électrique. En effet, le système AVR est un dispositif qui peut réguler automatiquement la tension d'excitation du générateur dans le réseau électrique afin qu'il puisse garantir une stabilité et une constance du niveau de tension du régime nominale du réseau de l'énergie électrique. Le principe de fonctionnement de l'AVR est donné dans la figure (III.7).

La tension de sortie du générateur vers le réseau électrique est continuellement surveillée par un capteur de niveau de tension. Cette dernière est rectifiée et lissée afin d'être comparée au signal de référence DC. L'erreur entre les tensions DC de référence et du réseau électrique obtenue à la sortie du comparateur est amplifiée pour générer la tension d'excitation adéquate du générateur pour son bon fonctionnement

III.4.3.3 Schéma fonctionnel de l'AVR

Le système AVR comprend quatre composantes : l'amplificateur, l'excitateur, le générateur et le capteur. Le modèle mathématique du système AVR utilisé dans ce travail est un modèle linéaire qui prend en compte les principales constantes de temps et ignore la saturation et d'autres non-linéarités. Le schéma fonctionnel du modèle du système AVR avec les fonctions de transfert de ses différentes composantes est donné dans la figure (III.8).

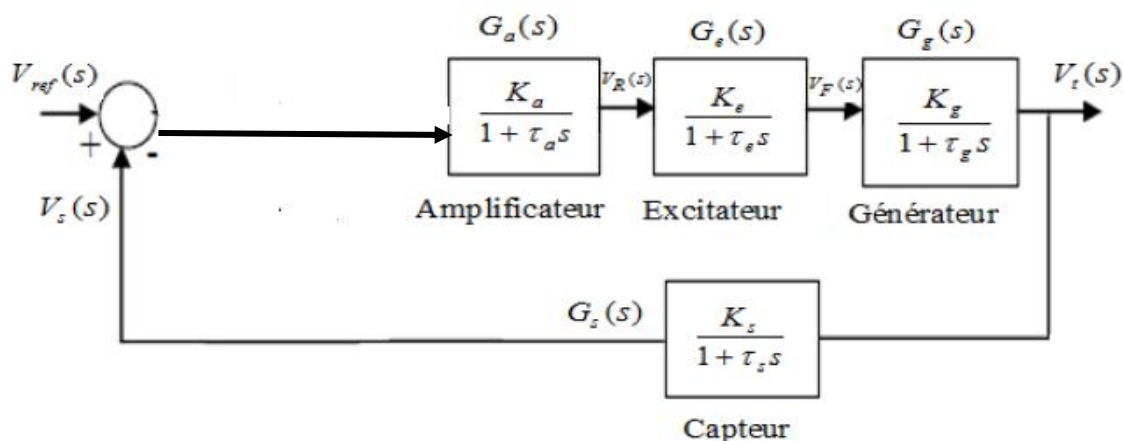


Figure III.8 : Schéma fonctionnel du système AVR

Les fonctions de transfert des composantes du modèle du système AVR ainsi que les limites des valeurs numériques de leurs paramètres sont données par le tableau suivant :

Composant	Fonction de transfert	Plages de variation du gain	Plages de variations du temps	Valeurs nominales des Gains et des constantes du temps
Amplificateur	$\frac{K_a}{1 + T_a p}$	$10 \leq K_a \leq 40$	$0.02 \leq T_a \leq 0.1$	$K_a = 10$ $T_a = 0.1$
Excitateur	$\frac{K_e}{1 + T_e p}$	$1 \leq K_e \leq 10$	$0.4 \leq T_e \leq 1$	$K_e = 1$ $T_e = 0.4$
Générateur	$\frac{K_g}{1 + T_g p}$	$0.7 \leq K_g \leq 1$	$1 \leq T_g \leq 2$	$K_g = 1$ $T_g = 1$
Capteur	$\frac{K_s}{1 + T_s p}$	$0.7 \leq K_s \leq 1$	$0.001 \leq T_s \leq 0.06$	$K_s = 1$ $T_s = 0.01$

Tableau.III.4 : Principaux composants du système AVR.

III.4.3.4. Simulation et interprétations

a. Commande du système en BF sans régulateur

Avant d'appliquer l'algorithme d'optimisation, il est important de voir le comportement du système en boucle fermée sans régulateur PID. Les exigences des performances dynamiques du système AVR sont :

- Un minimum temps de réponse t_s .
- Un petit ou absence de dépassement D (%)

La figure (III.9) présente la réponse indicielle en boucle fermée du système AVR sans correcteur. On note que cette réponse est oscillatoire, admet un grand dépassement d'environ 50

% et un long temps de réponse. Alors pour répondre aux exigences de performance dynamique du système AVR du dessus on a besoin d'un correcteur.

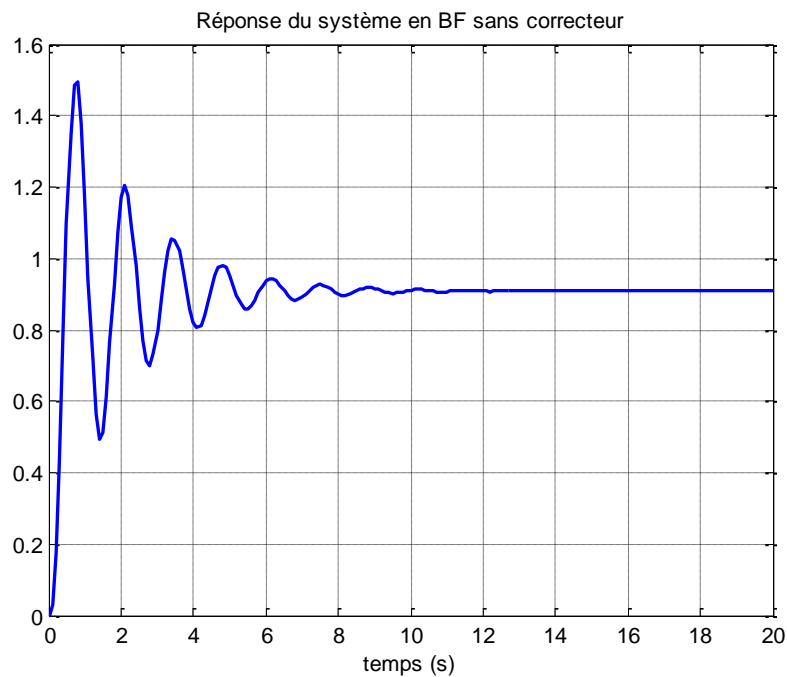


Figure III.9 : Réponse indicielle de la tension de sortie du système AVR sans correcteur

b. Commande PID du système AVR

La figure III.10 montre la méthodologie commande du système AVR à l'aide du régulateur PID optimisé par l'algorithme de chauve-souris (BAT) pour obtenir une réponse et une stabilité plus rapides.

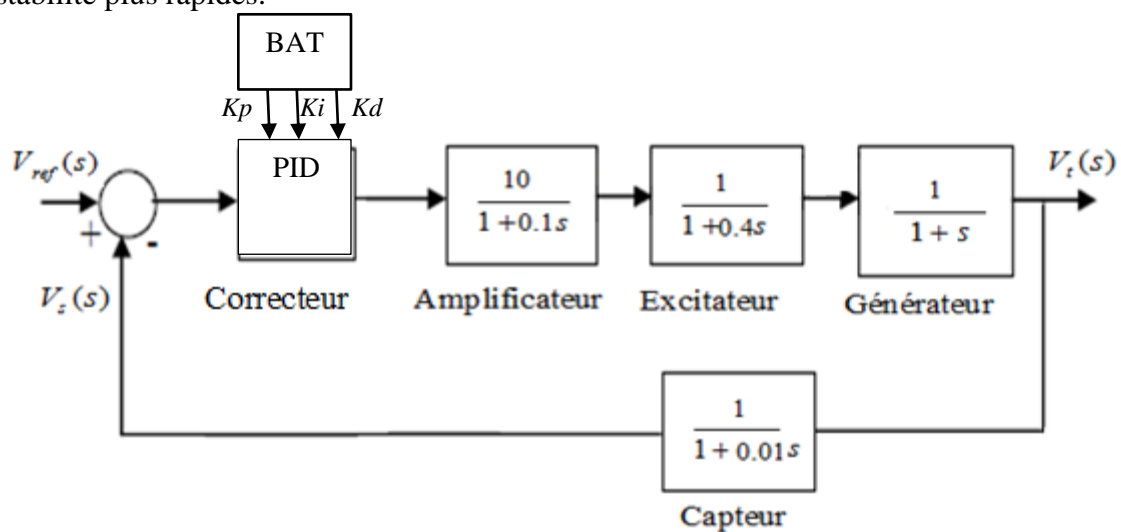


Figure III.10 : Schéma fonctionnel du système AVR avec le correcteur PID et les valeurs nominales des paramètres

La figure III.11 montre l'évolution de la fonction objective à travers les générations. La fonction d'évaluation est toujours *le critère d'intégrale de la valeur absolue de l'erreur pondérée par le temps (ITAE)*. On constate une forte décroissance durant les premières itérations avant de converger vers la valeur optimale. A la fin d'exécution la fonction d'évaluation $ITAE = 0.31$ donc une bonne précision du système commandé.

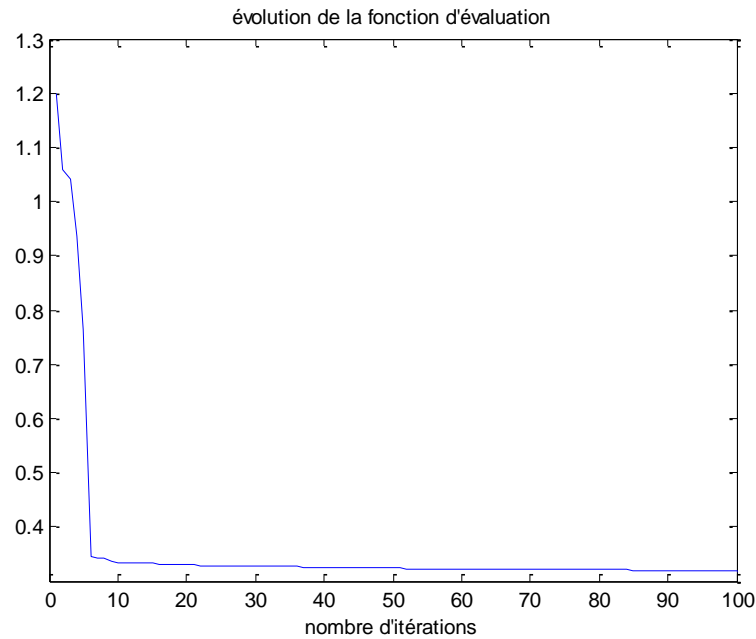


Figure III.11 : L'évolution de la fonction d'évaluation.

Les paramètres du contrôleur PID obtenus par l'algorithme de chauve-souris utilisé sont donné par le tableau III.5. La figure III.12 donne la sortie du système AVR commandé. La sortie du système est stable, précise et rapide mais on note un petit dépassement de 10.3% qu'on va l'éliminer dans la section suivante.

La méthode de réglage	Kp	Ki	Kd	Temps de réponse (ts)	Dépassement (D%)
Chauve-souris (BAT)	0.9657	0.6742	0.2963	0.3s	10.3

Tableau III.5 : paramètres PID et performances du système obtenus par l'algorithme BAT

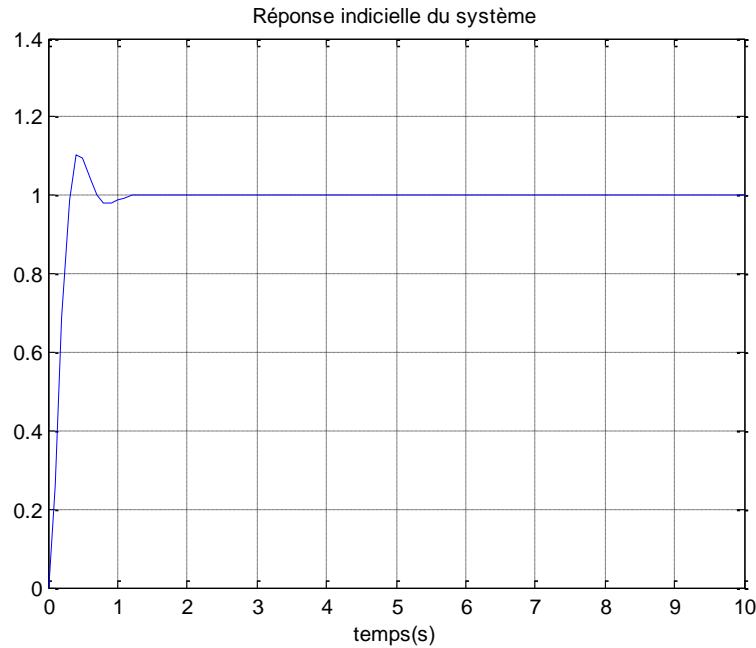


Figure III.12 : Réponse du système AVR par le régulateur PID optimisé.

c. Commande PID du système AVR avec modification de la fonction objective

Dans le but d'éliminer le dépassement de la réponse du système AVR commandé par le PID optimisé, on a modifié la fonction objective comme étant une combinaison linéaire de l'ITAE et du dépassement :

$$fitness = \alpha_1 \cdot ITAE + \alpha_2 \cdot D \quad (III.4)$$

Avec α_1 et α_2 sont des coefficients de pondération, D est le dépassement.

Il à noter qu'il est possible de favoriser un objectif par apport à un autre en agissant uniquement sur les valeurs numériques des deux coefficients de pondérations. A titre d'exemple, si α_2 est très grand devant α_1 , cela signifie que l'optimisation du dépassement est plus importante que l'optimisation du critère ITAE. Après plusieurs tests, on a abouti à $\alpha_1 = 0.85$ et $\alpha_2 = 20$.

La figure III.13 montre l'évolution de la nouvelle fonction objective à travers les générations. On constate une forte décroissance durant les premières itérations avant de converger vers la valeur optimale. A la fin d'exécution la fonction d'évaluation $fitness = 0.42$ donc une bonne précision du système commandé.

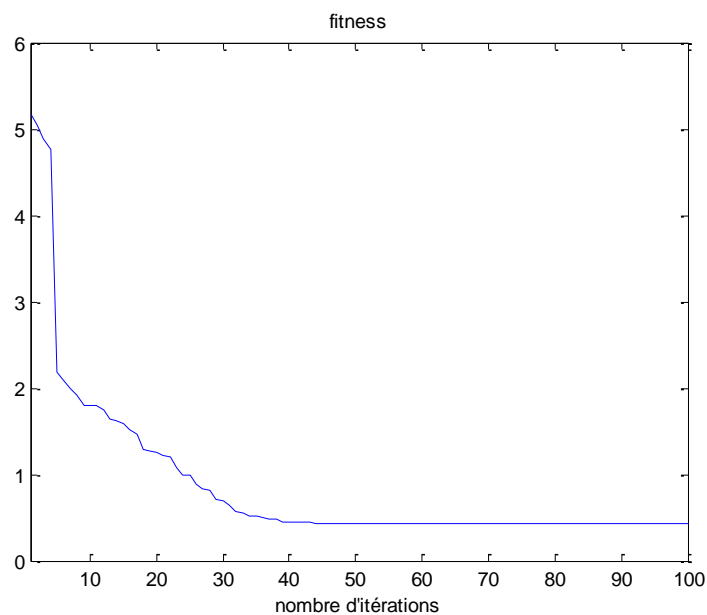


Figure III.13 : Evolution de la fonction d'évaluation

Les paramètres du contrôleur PID obtenus par l'algorithme de chauve-souris utilisé sont donné par le tableau III.6. On trouve dans le même tableau une comparaison avec la méthode PSO. Le contrôleur BAT-PID conçu est relativement plus performant que celui optimisé par PSO selon le temps de réponse. La figure III.14 donne la nouvelle tension du système AVR commandé. La sortie du système est stable, précise et plus rapide avec absence du dépassement.

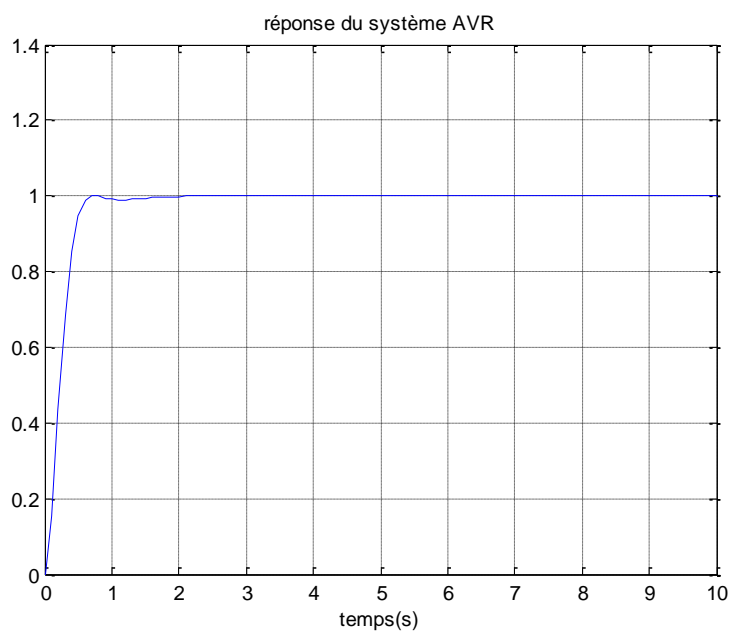


Figure III.14 : Nouvelle réponse du système AVR par le régulateur PID optimisé

La méthode de réglage	Kp	Ki	Kd	Temps de réponse (ts)	Dépassement (D%)
Chauve-souris (BAT)	0.5533	0.3836	0.1743	0.4s	0
PSO [29]	0.630	0.453	0.227	0.43	0

Tableau III.6 : Nouveaux paramètres PID et performances du système obtenus par l'algorithme BAT

d. Test de robustesse

Pour montrer la robustesse du régulateur BAT-PID, on suppose que le gain du générateur du modèle AVR passe de 0,7 à 1,0 avec un pas de 0,1 en raison du changement de condition de charge. La réponse indicielle avec le contrôleur BAT-PID précédemment conçu est affichée dans la Figure III.15. On peut voir sur cette figure, que le contrôleur conçu est robuste pour les incertitudes.

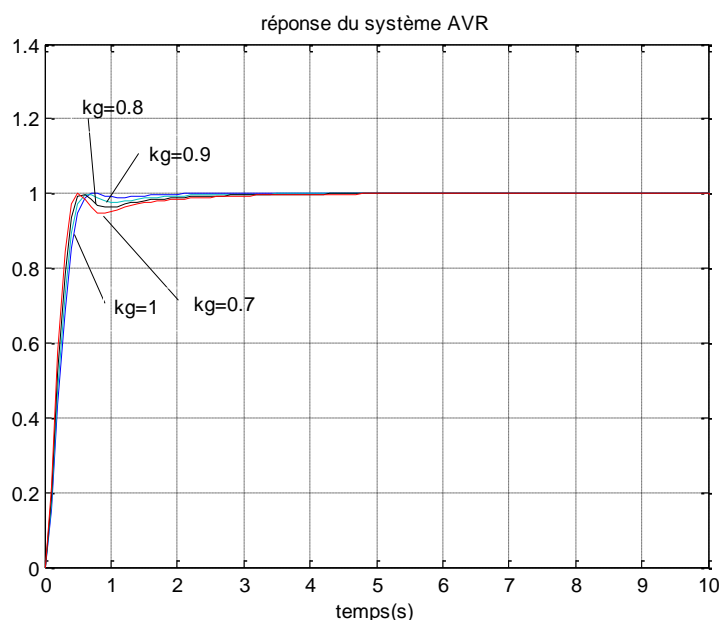


Figure III.15 : Test de robustesse via le changement de k_g du générateur.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des exemples d'application de la méthode d'optimisation de chauve-souris (BAT) décrite dans le chapitre II pour la synthèse d'un régulateur PID optimal. Durant le processus d'optimisation, les solutions possibles sont évaluées par l'intermédiaire d'une fonction qui fait intervenir les critères de performance calculés sur la réponse du système global.

Les simulations réalisées sur trois systèmes d'ordre différents, nous montrent que le régulateur PID optimisé par l'algorithme de chauve-souris est plus performant que le PID dont les paramètres sont obtenus par la méthode de Ziegler-Nichols ou autre méthodes de la littérature technique.

Conclusion Générale

Les travaux que nous avons menés dans ce mémoire ont pour but de présenter une approche de commande optimale de type PID en utilisant l'optimisation par l'algorithme de chauve-souris (BAT). Il s'agit de rechercher les paramètres optimaux (K_p , K_i et K_d) d'un régulateur PID pour améliorer les performances de la boucle de régulation.

Le premier chapitre a permis de rappeler les généralités sur les systèmes asservis et les différentes performances d'un système. Après le concept fondamental de la commande classique conventionnelle à base des régulateurs PID est présenté. Nous avons cité ensuite les différents types du correcteur P, PI, PD et PID, leurs principes de fonctionnement en boucle ouverte et en boucle fermée, aussi que les différentes structures d'un régulateur PID (série, parallèle et mixte). Après, nous avons cité les différentes méthodes de synthèse du régulateur PID puis on a détaillé le principe de la méthode de Ziegler –Nichols qui permet de calculer de façon systématique les paramètres du régulateur PID.

Le deuxième chapitre a présenté les différentes méthodes de méta heuristiques, parmi eux, on a présenté la méthode de chauve-souris. La méthode s'appuie sur une technique de régulation de fréquence pour augmenter la diversité des solutions dans la population, ainsi elle tente d'équilibrer l'exploration et l'exploitation pendant le processus de recherche, en imitant les

variations des taux d'émission d'impulsions et la vitesse des chauves-souris lors de la recherche de proies. L'algorithme standard de chauve-souris présente de nombreux avantages, à savoir la convergence rapide vers l'optimum global.

Le dernier chapitre est divisé en trois parties : la première partie est consacrée pour l'optimisation d'un régulateur PID d'un système de 2^{ème} ordre, après on a fait la synthèse de la commande PID optimisé pour un système de 3^{ème} ordre et on a comparé les résultats obtenus par celles de la littérature technique. Puis la même procédure d'optimisation est appliquée pour la régulation de la tension de sortie d'un système de réglage automatique (AVR). Dans tous les système, l'objectif est de minimiser un certain critère ITAE qui a une relation avec l'erreur entre la sortie calculée et désirée, tous en respectant les performances désirées.

Les résultats obtenus sont très encourageants et la comparaison effectuée avec la méthode de réglage de Ziegler-Nichols et autres méthodes récentes, justifie bien l'intérêt de la méthode dans la conception des régulateurs de type PID.

Notre étude est purement théorique, nous suggérons de valider les résultats dans un banc d'essai pour donner un avis définitif.

Bibliographie

- [1] Ziegler J .G., Nichols N .B., Optimum setting for automatic controllers, ASME, vol. 64, pp. 759-768, novembre 1942.
- [2] Young-Hyun Moon, et al., « Fuzzy Logic based extended integral control for load frequency control», Proc. of IEEE Power Engg. Society winter meeting, Vol.3, Issue 1, 2001, pp.1289-1293.
- [3] H.L. Zeynelgil, A. Demiroren, N.S.Sengor «The application of ANN technique for automatic generation control for multi-area power system».,International Journal of Electrical Power and Energy systems, 24(2002), pp.345-354.
- [4] D.M.Vinod Kumar, «Intelligent Controllers for Automatic Generation Control», Proc. Of IEEE region 10 International conference on global connectivity in Energy, Computer, Communication and Control, 1998, pp.557-574.
- [5] A.Soundarrajan, et al., «Intelligent controllers for Automatic Generation Control.», In the proceedings of International conference on Robotics, Vision , Information and signal Processing , January 2003. pp.307-311.
- [6] Zwe-Lee Gaing , “A Particle swarm optimization approach for optimum design of PID Controller in AVR system” , IEEE Transactions on Energy Conversion , Vo.19, No.2, 2004.
- [7] D.B.Fogel , “Evolutionary Computation: Towards a New Philosophy of machine Intelligence”, 2nd Edition, IEEE Press , New York 2000, pp227-279.
- [8] Emmanuel De Geest, “ Méthodes d'optimisation pour le réglage de contrôleurs PID,” mémoire d'Ingénieur en Electricité, Université de liège, Belgique, 2000-2001.

- [9] O. Ben Kherif, "Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID Classique et un Régulateur PID Intelligent," Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf-M'SILA, Algérie, 2016.
- [10] Maurice Rivoire J-LF, Ed. Eyrolles. Cours d'automatique, tome 2 – Asservissement, régulation, commande analogique..
- [11] A. Mallek et G.Merabet, Régulation de la température huile de turbine de la centrale thermique de CAP-DJINET, mémoire de master en Electronique, université de Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.
- [12] Philippe de Larminat, "Automatique : Commande des systèmes linéaires," Hermes édition, 1996.
- [13] Jean Pierre Corriou, "Commande des procédés" Edition Lavoisier, Paris, 1996.
- [14] J. Silva, « PID controllers for Time-Delay Systems », Springer, 2005.
- [15] Boukhris M. Regulation de vitesse d'une machine asynchrone, Université de Kasdi Merbah OURAGLA, Master en Electrotechnique (2014)
- [16] Eric Magarotto, "cours de régulation", université de Caen, France.
- [17] Vrancic D., Anti-Wind up and conditionnel Transfer for PID contrôler Conférence AntiWind up and conditionnel Transfer for PID contrôler vol. Vol.A. pp 183-6.
- [18] W.Boutana, N.Ykhalfoune, Etude Comparative en Simulation entre un Régulateur PID et un Régulateur flou, mémoire de master en Electronique des systèmes embarqués, université de Jijel, Algérie, 2019.
- [19] Vrancic D. et al., A new tuning method for PID Controllers, 4th IFAC conference on system structure and control, Bucharest, october 23-25, 1997.
- [20] A.Chaib, Optimisation d'un régulateur PID flou par les algorithmes génétiques, magister en Automatique industriel, Université de Annaba, Algérie, 2010.
- [21] Zoghmar M, Habchi A, Étude comparative entre deux régulateurs PID et FLC appliqués à la Machine à Courant Continu, master Génie électrique, Université LARBI BEN M'HIDI
DE OUM ELBOUAGHI,2012

- [22] A. Zaatri, Asservissements et Régulation Industrielle, Cours destiné aux étudiants de 4^{ème} Année Ingénieurs, Université Mentouri, Constantine.
- [23] M. BLONDIN, Algorithme contraint d'optimisation pour la synchronisation de correcteurs avec saturation, université de Québec , Canada, 2014.
- [24] Ibtissem chiha, Noureddine Liouane and pierre Borne, "Tuning PID Controller Using Multi objective Ant Colony Optimization", Hindawi Publishing Corporation, Volume 2012, Article ID 536326, 7 pages.
- [25] Ilhem Boussaid, "perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue, thèse de doctorat, Ecole Doctorale (ED32) Mathématiques et sciences et technologies de l'information et de la communication (MSTIC) paris, France , juin 2013.
- [26] BELGANDI Imad Eddine, MEDJBER Rédha, "Application de la méthode « simulated Annealing » pour le calcul de dispatching économique, Master en système énergétiques, Université de Saida , Algerie ,2017.
- [27] D. Corne, M. Dorigo and F. Glover, "New Ideas in Optimization", McGraw-Hill, 1999.
- [28] Christophe Rapine et denis Trystram, 2002, Théorie de Complexité, Notes de cours, ENSGI – INP, Grenoble.
- [29] A.I.ayeb, Utilisation des Approches d'Optimisation Combinatoire pour la Vérification des Applications Temps Réel. Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [30] Lyes BELHOUL, "Résolution de problèmes d'optimisation combinatoire mono et multiobjectifs par énumération ordonnée, pour l'obtention du grade de docteur en informatique : université Paris-Dauphine, Laboratoire d'analyse et Modélisation de systèmes pour l'aide à la Décision, paris, 2014.
- [31] E. GLIZE, "Méthodes exactes pour les problèmes combinatoires bi-objectifs : Application aux problèmes de tournées de véhicules, l'obtention du Doctorat, université de Toulouse Midi-Pyrénées, 2019.
- [32] R. Meziane., « Optimisation de la structure d'un réseau de production d'énergie électrique et Amélioration de sa performance », thèse de doctorat, USTO 2007.
- [33] O. Roux, « La mémoire dans les algorithmes à colonie de fourmis : applications à

L'optimisation et à la programmation automatique », thèse de doctorat de l'Université du Littoral Côte d'Opale, 2001.

- [34] V. Angel, « La Rugosité des paysages : une théorie pour la difficulté des problèmes d'optimisation combinatoire relativement aux métaheuristiques », Thèse De Doctorat De L'université de Paris-Sud, Orsay, 1998.
- [35] H. Bouraoui, « Optimisation d'un Conùôlan Flou par les Algorithmes Génétiques : Application à Commande d`m Pendule hversé », Master 1[en Electronique, Univeisité de Jijel, 2010.
- [36] X.-S. Yang, "A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm," Nat. Inspired Coop. Strateg. Optim. (NICSO 2010), pp. 65–74, 2010.
- [37] D. Come, M. Dorigo and F. Glover, « New Ideas in Optimization », MCGr";-Hi.//, 1999.
- [36] S. Induja, V.P. Eswaramurthy, Bat Algorithm: An Overview and its Applications, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering Vol. 5, Issue 1, January 2016.
- [37] Ramesh, B., Mohan, V. C. J., Reddy, V. C. V., (2013). Application of bat algorithm for combined economic load and emission dispatch, Int. J. of Electrical Engineering and Telecommunications, Vol. 2, No. 1, pp. 1–9..
- [38] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum settlings for automatic controllers," Transactions of the ASME, vol. 64, pp. 759–768, 1942.
- [39] A. Bagis, "Determination of the PID controller parameters by modified genetic algorithm for improved performance," Journal of Information Science and Engineering, vol. 23, no. 5, pp. 1469–1480, 2007.
- [40] Y. T. Hsiao, C. L. Chuang, and C. C. Chien, "Ant colony optimization for designing of PID controllers," in Proceedings of the IEEE Intemational Symposium on Computer Aided Control Systems Design, Taipei, Tai-wan, 2004.
- [41] O.I. Elgard, Electric Energy Systems Theory: An introduction, New York, USA: McGraw-Hill, 1982.
- [42] Z.L. Gaing, "A particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID

Controller in AVR System,” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 2, pp. 384-391, 2004

[43] V. Mukherjee, S.P. Ghoshal, “Intelligent Particle Swarm Optimized Fuzzy PID Controller for AVR System,” Electric Power System Research, vol. 77, no. 12, pp. 1689-1698, 2007

[44] D. Devaraj, B. Selvabala, “Real-Coded Genetic Algorithm and Fuzzy Logic Approach for Real-Time Tuning of Proportional–Integral–Derivative Controller in Automatic Voltage

Regulator System,” IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 3, no. 7, pp. 641–649, 2009.

[45] H. Gozde, M.C. Taplamacioglu, “Comparative Performance Analysis of Artificial Bee Colony Algorithm for Automatic Voltage Regulator (AVR) System,” Journal of the Franklin Institute, vol. 348, no. 8, pp. 1927–1946, 2011.

[46] Wong, C.C, Li S.A Y. Wang H. Optimal PID controller design for AVR system, Tamkang Journal of Science and Engineering; 12(3): 259-270 (2009)

Résumé

Les travaux menés dans ce mémoire ont pour but de présenter une approche de commande de type PID optimisée par l'algorithme de chauve-souris (*BAT Algorithm*). Il s'agit de rechercher les paramètres optimaux (K_p , K_i et K_d) du régulateur PID pour améliorer les performances de la boucle de régulation. Les performances de l'approche d'optimisation sont illustrées sur des systèmes de complexité différente y compris le système de réglage automatique de tension (AVR). Les résultats obtenus sont très encourageants et la comparaison effectuée avec la méthode de réglage de Ziegler-Nichols et autres méthodes d'optimisation récentes, justifie bien l'intérêt de la méthode dans la conception des régulateurs de type PID.

Mots clés : Régulateur PID, optimisation, algorithme de chauve-souris, système AVR.

المخلص

يهدف العمل الذي تم تنفيذه في هذه الأطروحة إلى تقديم نهج تحكم من نوع PID محسن بواسطة خوارزمية BAT. الهدف هو العثور على المعلومات المثلى (K_p, K_i, K_d) لمنظم PID لتحسين أداء حلقة التحكم. يظهر أداء نهج التحسين على أنظمة مختلفة التعقيد بما في ذلك نظام ضبط الجهد التلقائي (AVR). النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة للغاية والمقارنة التي أجريت مع طريقة ضبط Ziegler-Nichols وطرق التحسين الحديثة الأخرى، تبرر بوضوح الهدف من استعمال الطريقة BAT في تصميم متحكم من نوع PID. الكلمات الرئيسية: منظم PID، نهج التحسين، خوارزمية الخفافيش، نظام AVR.

Abstract

The work carried out in this thesis aims to present a PID-type control approach optimized by the BAT Algorithm. The aim is to find the optimal parameters (K_p , K_i and K_d) of the PID regulator to improve the performance of the control loop. The performance of the optimization approach is shown on systems of different complexity including the Automatic Voltage Adjustment (AVR) system. The results obtained are very encouraging and the comparison made with the Ziegler-Nichols tuning method and other recent optimization methods, clearly justifies the interest of the method in the design of PID-type regulators.

Keywords: PID regulator, optimization, BAT algorithm, AVR system.