

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ KASDI MERBAH D'OUARGLA

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la
communication

Département d'Electronique et Des Télécommunications

Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Science et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Instrumentation Industriel

Présenté par :

ALLAOUI Ahmed Tarek

BENALIA Brahim

BOUHELAL Abdessalam

Thème

Ajustement d'un régulateur SPWPID par la
méthode méta-heuristique PSO

Devant le jury:

Dr BENKRINAH Sabra	« MCB »	Président	UKM Ouargla
Mr AOUF Anour Esadat	« MAA »	Examineur	UKM Ouargla
Dr BENCHABANE Abderrazak	« MCB »	Encadreur	UKM Ouargla
Dr CHARIF Fella	« MCB »	Co-Encadreur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2019 / 2020

Dédicace

Avant tout, nous remercions « Dieu » le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail. A nos chers parents : notre mère et notre père, symboles d'amour et de sacrifices pour leurs soutiens moral et financier durant notre longues années d'études. On leurs souhaite de dieu tout puissant, une longue vie pleine de bonheur et de prospérité.

- A toutes nos chères sœurs, et nos frères
- A toute la famille ALLAOUI et BENALIA et BOUHELLAL
- A tous nos chers amis
- A tous nos chers collègues d'études
- A tous nos professeurs durant nos longues années d'études.

Remerciements

Le plus grand merci revient tout d'abord à « Dieu » qui, lui seul, nous a guidé dans le bon chemin durant notre vie et qui nous a donné le courage, la volonté, et la force pour élaborer ce travail d'initiation à la recherche.

Nous présentons nos sincères remerciements avec nos profonds respects à notre promoteur, **Dr. Abderrazak BENCHABANE** et au **Dr. Fella CHARIF** pour leur suivi, leur coopération et pour leurs discussions passionnantes et fructueuses. Leurs précieux conseils ont grandement contribué à ce modeste travail.

Nous tenons à remercier également **Mr. AOUF Anouar Esadat** et **Dr. BENKRINAH Sabra** d'avoir accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Enfin, je tiens à remercier ma famille pour leurs encouragements et leur soutien inconditionnel, et à tous mes amis qui m'ont apporté un grand soutien le long de ce travail.

Résumé: L'objectif de ce travail est la détermination des paramètres d'un régulateur PID pondéré à la consigne et de faire une comparaison entre lui et le régulateur PID en terme de dépassement et de temps de réponse en utilisant l'algorithme d'optimisation par essaim de particules pour contrôler un système de lévitation magnétique, Ce système est connu par sa non-linéarité et son instabilité en boucle ouverte. Les résultats des expérimentations ont montré que le contrôleur PID pondéré par point de consigne efficace pour éliminer le dépassement mieux que le régulateur PID.

Mots clés : SLM, régulateur SPWPID, régulateur PID, OEP

Abstract: The objective of this work is the determination of the parameters of a set-point weighted PID regulator and make a comparison between him and the PID regulator in term of the overshoot and rise time by using the algorithm of particle swarm optimisation to control a magnetic levitation system This system is known by its nonlinearity and instability in open loop., the results were of the experiment showed that the set-point weighted PID controller effective in eliminating overshoot better than the PID regulator .

Key words : MAGLEV, SPWPID regulator, regulator PID, PSO

المخلص : الهدف من هذه التجربة هو ايجاد معايير منظم نقطة الضبط المرجحة التناسبي التكاملية التفاضلي واجراء مقارنة بينه وبين المنظم التناسبي التكاملية التفاضلي من ناحية التجاوز و وقت الاستجابة وذلك بواسطة خوارزمية تحسين سرب الجسيمات للتحكم في نظام الرافعة المغناطيسية, وهذا النظام معروف بالخطية وعدم الاستقرار. وقد اظهرت النتائج ان منظم نقطة الضبط المرجحة التناسبي التكاملية التفاضلي فعال جدا في القضاء على التجاوز افضل من المنظم التناسبي التكاملية التفاضلي.

كلمات مفتاحية : نظام الإرتفاع المغناطيسي, منظم نقطة الضبط المرجحة التناسبي التكاملية التفاضلي , المنظم التناسبي التكاملية التفاضلي , تحسين سرب الجسيمات.

Liste des figures

- Figure 1.1** Schéma de principe d'une boucle de régulation.
- Figure 1.2** Boucle ouverte
- Figure 1.2** Boucle ouverte
- Figure 1.4** Régulateur PID
- Figure 1.5** Action proportionnelle P
- Figure 1.6** Action intégrale I.
- Figure 1.7** Action dérivée D.
- Figure 1.8** PID en série.
- Figure 1.9** PID en parallèle.
- Figure 1.10** PID en mixte.
- Figure 1.11** La trace de (T_u et T_a) de méthode réponse indicielle.
- Figure 1.12** La réponse de système
- Figure 2.1.** Principe du système à lévitation magnétique
- Figure 2.2** Système à lévitation magnétique en boucle fermée
- Figure 2.3** Diagramme schématique du système Maglev
- Figure 1.4** Régulateur PID avec système Maglev.
- Figure 2.6** Principe du déplacement d'une particule
- Figure 2.5** Régulateur SPWPID avec système Maglev.
- Figure 2.7** Organigramme de l'algorithme de PSO
- Figure 2.8.** Principe d'ajustement des paramètres PID par PSO
- Figure 2.9** Principe d'ajustement des paramètres SPWPID par PSO.
- Figure 3.1** Système de lévitation magnétique et son interfaçage
- Figure 3.2** Réponse de système pour le signal carré
- Figure 3.3** Réponse de système pour le signal triangulaire.
- Figure 3.4** Réponse de système pour le signal sinusoïdale.
- Figure 3.5** Signal d'entrée (signal carré)
- Figure 3.6** Simulation de Maglev système avec régulateur PID
- Figure 3.7** Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 1

Figure 3.8 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 5

Figure 3.9 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 10

Figure 3.10 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 60

Figure 3.11 Fonction de cout

Figure 3.12 Évolutions des paramètres (K_p, K_i, K_d).

Figure 3.13 Simulation de Maglev système avec régulateur PID

Figure 3.14 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 1

Figure 3.15 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 5

Figure 3.16 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 10

Figure 3.17 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 60

Figure 3.18 Fonction de cout (Objective)

Figure 2.19 Évolutions des paramètres ($K_p, K_i, K_d, K_{d1}, K_{p1}$)

Liste des tableaux

Tableau 1.1. Caractéristiques du régulateur PID

Tableau I.2: -Réglages de Ziegler et Nichols en boucle ouverte.

Tableau I.3 Réglage de Ziegler et Nichols par méthode du gain critique.

Tableau 2.1 Les caractéristiques de bobine

Tableau 2.2 Les paramètres système du système Maglev

Tableau 3.1 Les paramètres de régulateur PID/PSO (résultats)

Tableau 3.2 Les paramètres de régulateur SPWPID/PSO (résultats)

Tableau 3.3 Tableaux de comparaison entre régulateur SPWPID et PID

Sommaire

Remerciements	I
Résumé	II
Liste des figures	III
Listes des tableaux	V
Sommaire	VI
Introduction générale	1

Chapitre 1

Généralité sur le régulateur PID

1.1. Introduction	2
1.2. L'objectif global de la régulation.....	2
1.3. Eléments constitutifs d'une boucle de régulation.....	3
1.4. Les types de boucle	3
1.5. Régulateur PID	4
1.5.1. Définition	4
1.5.2. Action proportionnelle (P)	5
1.5.3. Action intégrale (I)	6
1.5.4. Action dérivée (D)	7
1.6. Structure du régulateur proportionnelle intégrale dérivée (PID).....	8
1.6.1. PID en série	8
1.6.2. PID en parallèle	8
1.6.3. PID en mixte	9
1.7. Ajustement des paramètres d'un régulateur PID	9
1.7.1. Manuelle ajustement.....	9
1.7.1.1. Méthode de Ziegler et Nichols	9
1.7.1.2. Méthode de la réponse indicielle	9

1.7.1.3. Méthode de point critique	10
1.7.2. Auto Ajustement des paramètres	11
1.7.2.1. Critères de performance.....	12
1.8. Conclusion	13

Chapitre 2

Modélisation du système de lévitation magnétique et la conception du régulateur PID par l’algorithme PSO

2.1. Introduction	14
2.2. Description du système Maglev	15
2.3. Modélisation du système de lévitation magnétique	16
2.4. System avec régulateur PID	18
2.5. System avec régulateur PID à consigne pondéré	19
2.6. Ajustement du régulateur PID/SPWPID par l’algorithme PSO	19
2.6.1. Optimisation par l’algorithme de l’essaim de particules	19
2.6.2. Formulation de l’algorithme PSO	20
2.6.3. Algorithme de base du PSO	22
2.6.4. Ajustement du régulateur PID par l’algorithme PSO	22
2.6.5. Ajustement du régulateur SPWPID par l’algorithme PSO	24
2.7 Conclusion	25

Chapitre 3

Simulation et résultats

3.1. Introduction	26
3.2. Formulation de la fonction objective.....	26
3.2.1. Système avec régulateur PID	27
3.2.2. Système avec régulateur SPWPID	28
3.3. La simulation et les résultats	28
3.3.1. Signale d’excitation	28

3.3.2. Paramètres de l'algorithme (PSO)	30
3.3.3. Simulation et résultats de (système/régulateur PID)	30
3.3.4. Simulation et résultats de (système/régulateur SPWPID)	32
3.4. La comparaison entre la régulateur PID et régulateur SPWPID	34
3.5. Conclusion	35
Conclusion générale.....	36
Bibliographie	37

Introduction générale

Le système de lévitation magnétique (Maglev) est un exemple de système intrinsèquement non linéaire et instable, En raison de ces propriétés, il devient difficile de concevoir un régulateur qui contrôlera efficacement ce système. L'application de Maglev peut être trouvée dans différents domaines de recherche incluant les systèmes de transport à grande vitesse [22], les dispositifs de photolithographie pour la fabrication de semi-conducteurs [23], suite à ces vastes applications, il devient extrêmement important de développer une stratégie de contrôle appropriée pour le système Maglev. Le Régulateur PID a toujours été le choix préféré des ingénieurs en contrôle vu sa simplicité et sa mise en œuvre facile. Il a été appliqué dans plusieurs domaines de recherche [24-25]. Pour fournir une bonne performance globale, différentes techniques de réglage des paramètres du régulateur sont élaborées. Cependant il rare de trouver une technique de réglage permettant de fournir une bonne réponse à tous égards.

Dans ce mémoire on a proposé d'utiliser un régulateur PID basé sur le point de consigne pondéré (Set Point Weighted PID) avec un auto-ajustement de ces paramètres. L'algorithme de l'optimisation par l'essaim particule (PSO) récemment évoluée a été utilisé pour identifier les valeurs appropriées des paramètres du régulateur en optimisant la fonction objectif. Les performances du contrôleur SPWPID sont comparées à celles du contrôleur PID avec toujours un auto-ajustement avec l'algorithme PSO.

Le mémoire est composé de trois chapitres répartis comme suit : Le premier chapitre présente le régulateur PID et les méthodes d'ajustement de ces paramètres. Le deuxième chapitre présente La modélisation du système de lévitation magnétique et son contrôle via un régulateur PID/SPWPID avec un auto-ajustement utilisant l'algorithme PSO. Dans le troisième chapitre on présente les simulations effectuées sur le modèle du Maglev et les résultats obtenus. Enfin, la conclusion générale présente une récapitulation du travail réalisé.

Chapitre 1

Généralité sur le régulateur PID

1.1 Introduction

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie est le régulateur PID (proportionnel intégral dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres les performances (amortissement, temps de réponse) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre. Nombreux sont les systèmes physiques qui, même en étant complexes, ont un comportement voisin de celui d'un deuxième ordre, dans une certaine échelle de temps. Par conséquent, le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriel et est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres du procédé, quand on n'est pas trop exigeant pour les performances de la boucle fermée par rapport à celles de la boucle ouverte (par exemple, accélération très importante de la réponse ou augmentation très importante de l'amortissement en boucle fermée) [1].

La réalisation d'une boucle d'asservissement par PID est un problème très important, car il influence : sur la qualité de la régulation sur un site industriel et le temps de mise en œuvre de la commande.

Cette réalisation comporte deux aspects essentiels :

- Le réglage du régulateur PID, pour lequel la connaissance d'un modèle dynamique du procédé d'une part et les performances désirées d'autre part déterminent le choix de la méthode de la synthèse.
- L'implantation du régulateur dans une version analogique ou numérique et dans une configuration série, parallèle ou mixte.

De plus en plus, les régulateurs PID commercialisés offrent la possibilité d'autoréglage, qui réalise le calcul automatique des paramètres, à la demande de l'utilisateur.

1.2. L'objectif global de la régulation

La régulation est l'action de régler automatiquement une grandeur de telle sorte que celle-ci garde constamment sa valeur ou reste proche de la valeur désirée, quelles que soient les perturbations qui peuvent subvenir [2].

1.3. Eléments constitutifs d'une boucle de régulation

Une boucle de régulation Doit comporter au minimum les éléments suivants ; un capteur de mesure, un transmetteur souvent intégré au capteur, un régulateur et un actionneur. Elle est souvent complétée par : un enregistreur, des convertisseurs, des sécurités.

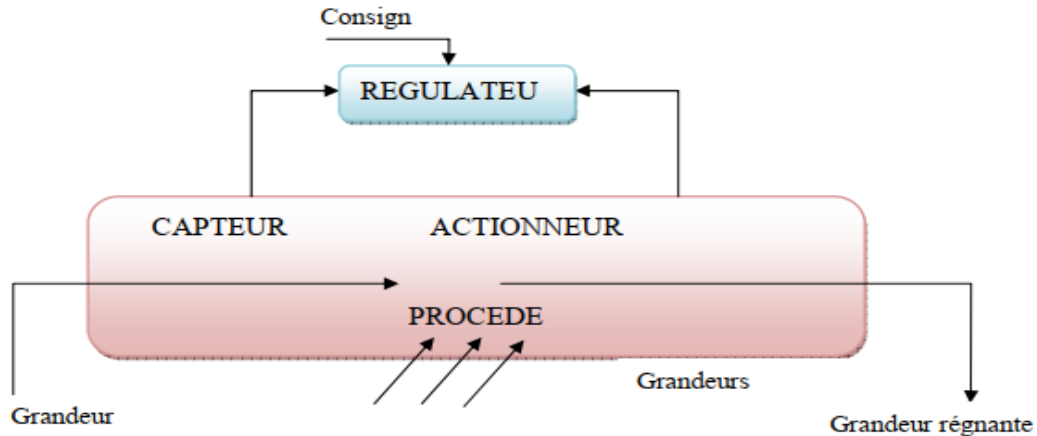


Figure 3.1 Schéma de principe d'une boucle de régulation.

Le régulateur reçoit deux informations ; Le signal de mesure provenant du capteur, et la consigne (qui peut être locale ou externe). En fonction de l'écart entre ces deux valeurs, il délivre un signal de sortie dirigé vers l'actionneur afin d'annuler cet écart et de ramener la mesure vers la valeur de consigne [3].

1.4 Les types de boucle

La figure (I.2) présente une boucle ouverte. La grandeur de la correction est indépendante de la grandeur de la mesure. Le régulateur est en mode manuel consiste à laisser à l'utilisateur le choix de la valeur du signal de commande appliquée à l'actionneur.

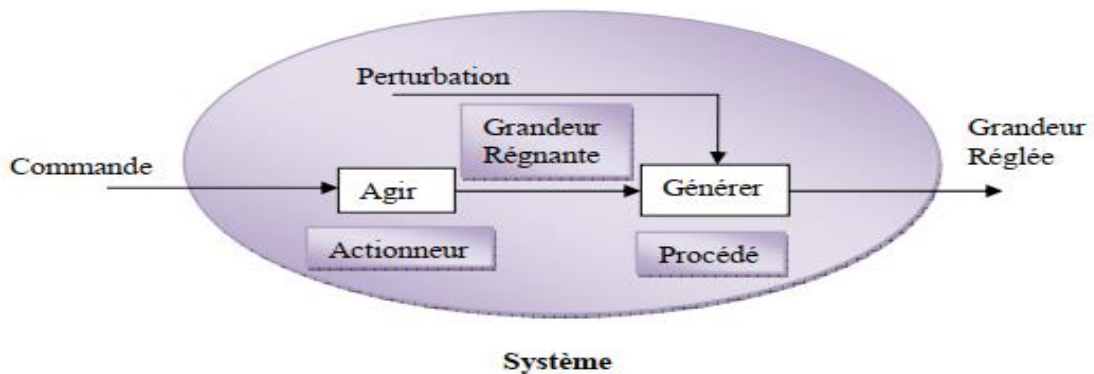


Figure 1.2 Boucle ouverte.

Une boucle est dite fermée figure (1.3) si la grandeur de la mesure affecte la grandeur de la correction (grandeur manipulée).

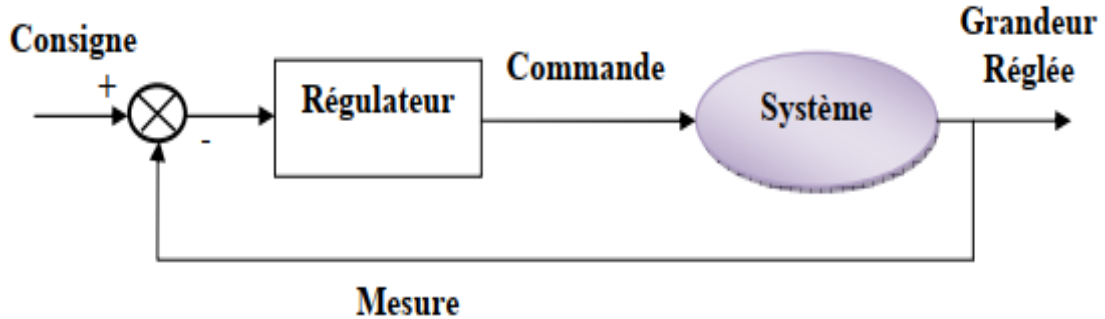


Figure 1.3 Boucle Fermée.

1.5. Régulateur PID

1.5.1. Définition

Régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé) C'est système d'auto régulation (boucle fermée), qui cherche à réduire l'erreur entre la consigne et la mesure [2].

$$\text{erreur} = \text{consigne} - \text{mesure}$$

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).

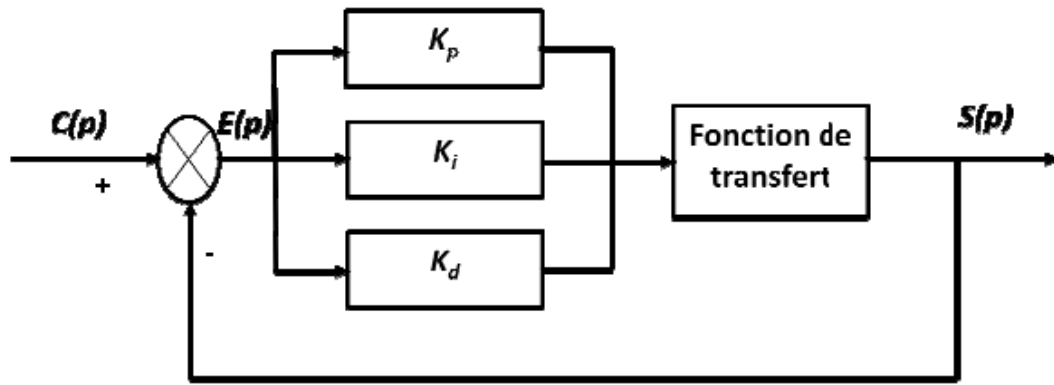


Figure 1.4 Régulateur PID

Un régulateur PID est obtenu par l'association de ces trois fonctions suivantes :

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

1.5.2. Action proportionnelle (P)

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 (on diminue la bande proportionnelle) mais, on est limité par la stabilité du système. Le régulateur P est utilisé lorsqu'on désire régler un paramètre dont la précision n'est pas importante figure (1.5).

L'équation de la commande u de l'action proportionnelle P est comme suit :

$$u(t) = K_p e(t) = K_p (y_c(t) - y(t)) \quad (1.1)$$

Et la fonction de transfert de l'action proportionnelle P est :

$$C(s) = K_p \quad (1.2)$$



Figure 1.5 Action proportionnelle P

1.5.3. Action intégrale (I)

L'action est dite intégrale lorsque le signal de commande est proportionnel à l'intégrale du signal d'erreur. Elle complète l'action proportionnelle et permet d'éliminer l'erreur résiduelle en régime permanent. Afin de rendre le système plus dynamique (diminuer le temps de réponse), on diminue l'action intégrale mais, ceci provoque l'augmentation du déphasage 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 figure (1.6).

L'équation de la commande u de l'action intégrale I est comme suit :

$$u(t) = K_i \int_0^t (y_c(\tau) - y(\tau)) d\tau = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t (y_c(\tau) - y(\tau)) d\tau \quad (1.3)$$

Et la fonction de transfert de l'action intégrale I est :

$$C(s) = \frac{K_p}{T_i s} = \frac{K_i}{s} \quad (1.4)$$

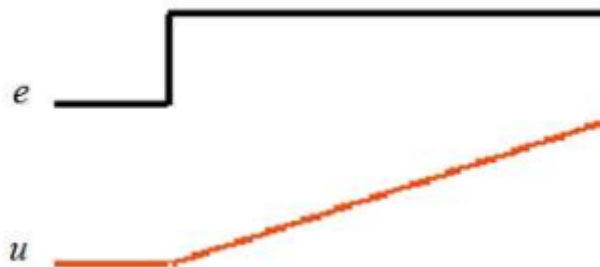


Figure 1.6 Action intégrale I.

1.5.4. Action dérivée (D)

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 figure (1.7).

Dans la pratique, l'action dérivée est appliquée aux variations de la grandeur à régler seule et non de l'écart mesure-consigne.

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

L'équation de la commande u de l'action dérivée D est comme suit :

$$u(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.5)$$

Et la fonction de transfert de l'action dérivée D est :

$$C(s) = K_p T_d s \quad (1.6)$$

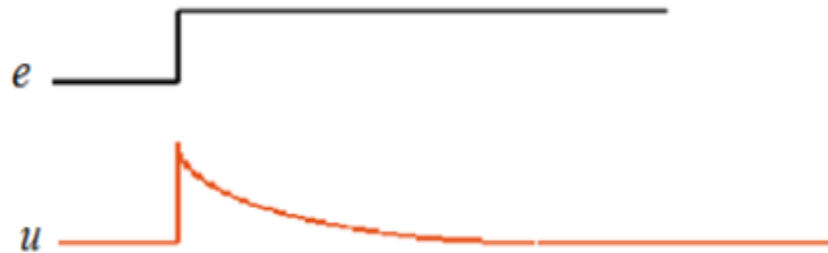


Figure 1.7 Action dérivée D.

Sur le tableau ci-dessous, on résume l'effet de l'augmentation des trois paramètres du régulateur sur la réponse du système.

Coefficient	Temps de montée	Temps de stabilisation	Dépassement	Erreur Statique
Kp	Diminue	Augmente	Augmente	Diminue
Ki	Diminue	Augmente	Augmente	Annule
Kd	-	Diminue	Diminue	-

Tableau 1.1. Caractéristiques du régulateur PID

1.6. Structure du régulateur proportionnelle intégrale dérivée (PID)

Les trois corrections, proportionnelle, intégrale et dérivée, permettent de définir trois structures de régulateur différentes [2]:

1.6.1. PID en série

de l'équation :
$$u(t) = K_p * \left\{ \left(1 + \frac{T_d}{T_i} \right) e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e * dt + T_d * \frac{de}{dt} \right\} \tag{1.7}$$

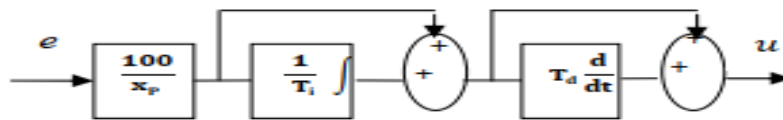


Figure 1.8 PID en série.

1.6.2 PID en parallèle

de l'équation :
$$u(t) = K_p * e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e * dt + T_d * \frac{de}{dt} \tag{1.8}$$

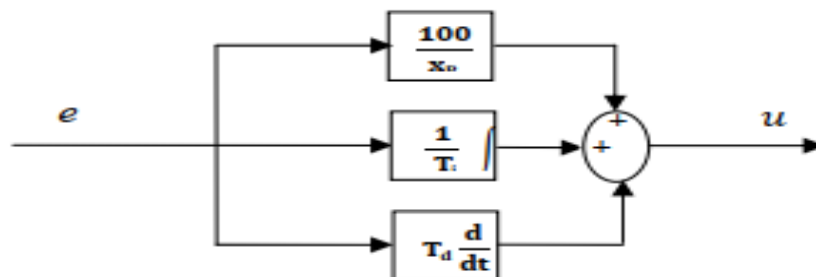


Figure 1.9 PID en parallèle.

1.6.3 PID en mixte

$$\text{de l'équation : } u(t) = K_p * e + \frac{1}{T_I} \int_0^t e * dt + T_d * \frac{de}{dt} \quad (1.9)$$

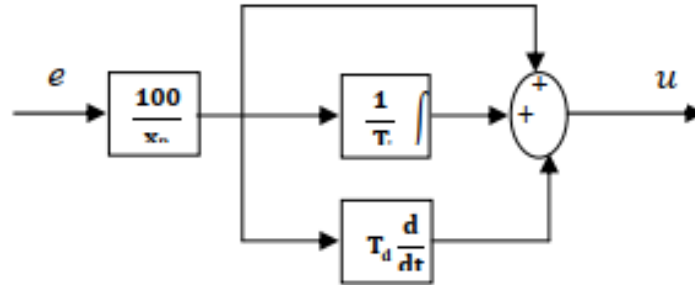


Figure 1.10 PID en mixte.

1.7. Ajustement des paramètres d'un régulateur PID

Il existe plusieurs méthodes de réglage des paramètres du régulateur PID, Il existe deux catégories :

1.7.1 Manuelle ajustement

1.7.1.1 Méthode de Ziegler et Nichols

En 1942, Ziegler et Nichols [1] ont proposé deux approches heuristiques basées sur leurs expériences et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité.

1.7.1.2 Méthode de la réponse indicielle

Pour obtenir les paramètres du régulateur PID, il suffit d'enregistrer la réponse indicielle du processus seul (c'est-à-dire sans le régulateur), puis de tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe. On mesure ensuite les deux grandeurs T_u et T_a comme indiqué par la figure 1.11.

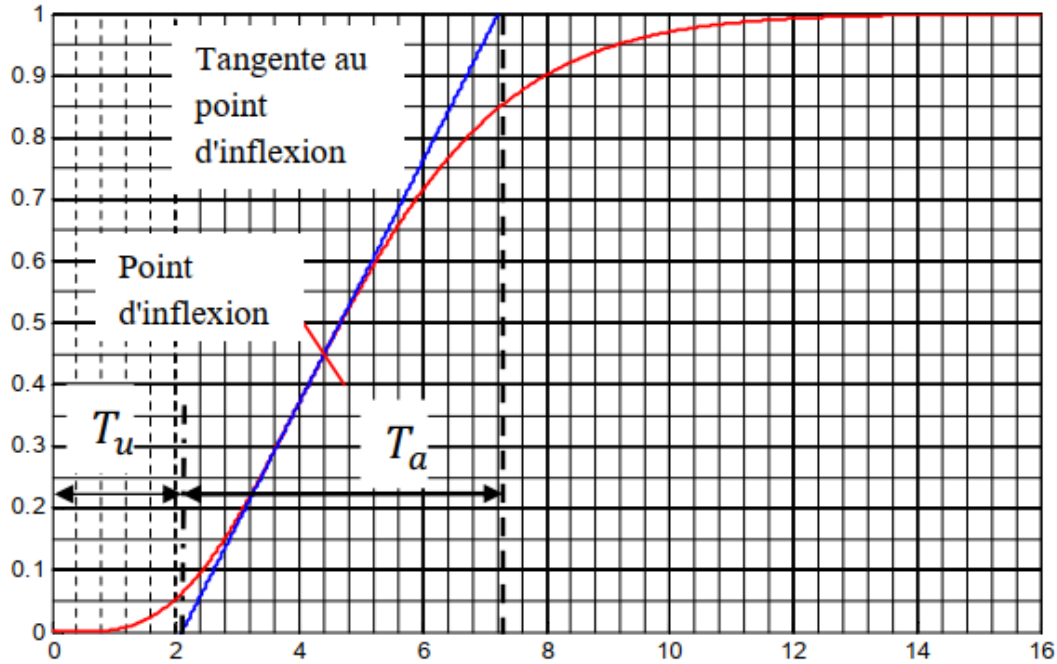


Figure 1.11 La trace de (T_u et T_a) de méthode réponse indicielle.

On peut alors calculer les coefficients du régulateur choisi à l'aide du tableau (I.2)

Type	PID série	PID parallèle	PID mixte
K_p	$0.6 * \frac{T_a}{T_u}$	$1.2 * \frac{T_a}{T_u}$	$1.2 * \frac{T_a}{T_u}$
T_i	T_u	$1.67 * \frac{T_u^2}{T_a}$	$2 * T_u$
T_d	T_u	$0.6 * T_a$	$\frac{T_u}{2}$

Tableau I.2: -Réglages de Ziegler et Nichols en boucle ouverte [1].

Généralement, les gains K_p proposés par Ziegler-Nichols sont trop élevés et conduisent à un dépassement supérieur à 20%. Donc il faut réduire K_p d'un facteur 2 pour obtenir une réponse satisfaisante.

1.7.1.3 Méthode de point critique

On boucle le processus sur un simple régulateur proportionnel K_p dont on augmente le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente; on se trouve ainsi à la limite de stabilité (Figure 1.12). Après avoir relevé le gain critique K_{cr} du régulateur et la période

d'oscillation T_{cr} de la réponse, on peut calculer les paramètres de régulateur choisis à l'aide du tableau 1.3.

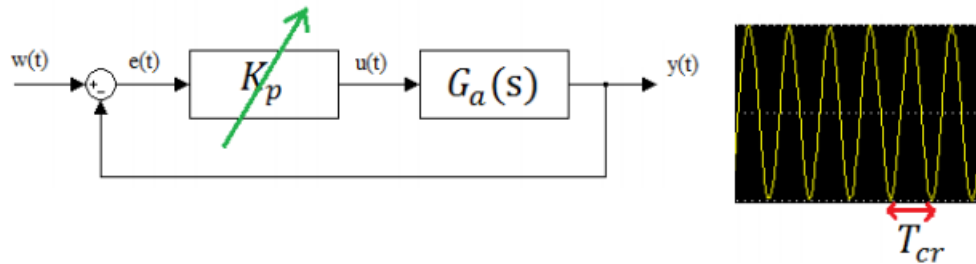


Figure 1.12 La réponse de système

Type	PID série	PID parallèle	PID mixte
K_p	$0.3 * K_{cr}$	$0.6 * K_{cr}$	$0.6 * K_{cr}$
T_i	$\frac{T_{cr}}{4}$	$\frac{T_{cr}}{1.2 * K_{cr}}$	$\frac{T_{cr}}{2}$
T_d	$\frac{T_{cr}}{4}$	$\frac{T_{cr} * K_{cr}}{13.3}$	$\frac{T_{cr}}{8}$

Tableau I.3 Réglage de Ziegler et Nichols par méthode du gain critique.

1.7.2 Auto Ajustement des paramètres

Bien que les contrôleurs PID aient un grand succès dans l'industrie, ils ne sont pas toujours faciles à utiliser. Pour que les boucles fonctionnent à leur potentiel, elles doivent d'abord être réglées pour s'adapter à chaque application, puis ré-réglées périodiquement pour conserver le comportement en boucle fermée souhaité. Les contrôleurs à réglage automatique peuvent aider en générant automatiquement des paramètres de réglage appropriés. Il comprend une fonction de contrôle PID traditionnelle ainsi qu'une fonction d'auto-réglage qui essaie de maintenir des performances optimales en boucle fermée en mettant continuellement à jour les paramètres de réglage P, I et D. du contrôleur.

Le réajustement continu ou « l'auto-réglage » est un défi plus difficile car les fonctions de réglage et de commande fonctionnent simultanément. Le contrôleur doit continuer à maintenir la variable de processus à un niveau spécifié tout en essayant d'apprendre comment la variable de processus réagit aux efforts de contrôle. Malheureusement, ce sont des objectifs contradictoires. Le maintien d'une variable de processus constante prive la fonction de réglage.

Une autre stratégie de l'autoréglage est le réglage du point de consigne. Un changement de point de consigne fournit une démonstration particulièrement utile du comportement d'entrée / sortie d'un processus. Sans mettre la boucle hors ligne, la fonction d'autoréglage peut observer comment la variable de procédé réagit à chaque effort de commande lorsque la fonction de commande tente d'atteindre le nouveau point de consigne en utilisant ses paramètres de réglage actuels. Si cette réaction s'avère trop lente, la fonction de réglage peut remplacer des paramètres de réglage plus agressifs ou vice-versa.

Malheureusement, les changements de point de consigne ont tendance à être rares dans de nombreuses applications de contrôle de processus où l'objectif du contrôleur est de maintenir une pression, un niveau, un débit ou une température donnés à une valeur spécifique pour toujours. Le réglage du point de consigne est plus utile dans les applications par lots, telles que les opérations de chauffage et de refroidissement multi phases où les changements de point de consigne sont plus fréquents.

1.7.2. Critères de performance

Les critères d'intégrale d'erreur prennent en compte la totalité de la réponse des procédés et les indices de performances les plus utilisés [1]:

ISE : Intégrale de l'Erreur Quadratique (Intégral of Square Error) , de formule suivant :

$$f_{ISE} = \int_0^t e^2 (t) dt \quad (1.10)$$

IAE : Intégrale de la valeur absolue de l'erreur (Integral of Absolute Error), de formule suivant :

$$f_{IAE} = \int_0^t | e (t) | dt \quad (1.11)$$

ITSE : Integral of Time Squared Error ,de formule suivant :

$$f_{ITSE} = \int_0^t t e^2 (t) dt \quad (1.12)$$

ITAE : Integral of Time Absolute Error, de formule suivant :

$$f_{ITAE} = \int_0^t t | e (t) | dt \quad (1.13)$$

1.8. Conclusion

Dans ce chapitre on a vu l'objectif global de la régulation, et on a représenté le régulateur PID comment il fonctionne (Proportionnel intégral dérivé) leur structure dans l'industrie, et on a défini les deux méthodes de l'ajustement de la régulateur PID (l'auto ajustement et manuelle ajustement), nous utiliserons l'un d'entre eux méthodes dans notre prochaine étude.

Chapitre 2

Modélisation du système de lévitation magnétique et la conception du régulateur PID par l'algorithme PSO

2.1. Introduction

Maglev (en anglais Magnetic Levitation MAGLEV) est une technologie qui permet de suspendre un objet dans un air contre la force de gravité en manipulant une force magnétique [4]. La technologie de suspension magnétique devient de plus en plus populaire car ce système est sans contact, à faible bruit et à faible frottement [5]. Ces systèmes sont utilisés dans les domaines des systèmes de transport terrestre à grande vitesse [6], de la lévitation des souffleries etc...

L'approche utilisée pour résoudre le problème par électroaimant. Le courant traversant les bobines de l'électroaimant produit un champ magnétique ou une force variable. La bille est soumise à deux forces, la force électromagnétique et celle de la pesanteur, si la force électromagnétique est supérieure à celle de la pesanteur, ou bien en d'autres mots, si la bille est plus près de la bobine, elle se colle à son noyau. Par contre si la force électromagnétique est inférieure, la bille tombe, Ce qui veut dire que pour que la bille reste suspendue dans l'air, la force de l'électro-aimant doit être égale à la force pesanteur.

Généralement, le système de suspension magnétique est de nature typiquement non linéaire et instable, et est décrit par des équations différentielles hautement non linéaires. C'est pourquoi, sa méthodologie de modélisation et de contrôle attire de nombreux chercheurs du monde entier [5]. Pour réaliser la boucle fermée, la position de la bille doit être déterminée, donc un capteur optique de position est utile. La bille suspendue est opaque et coupe un faisceau lumineux, l'intensité lumineuse reçue dépend donc de la position de la bille. La tension issue du capteur convertie en distance sera comparée à la distance désirée. La figure (2.1) montre le système de lévitation magnétique en boucle ouvert.

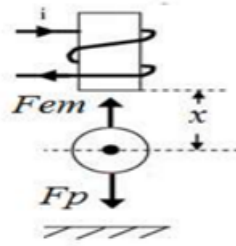


Figure 2.1. Principe du système à lévitation magnétique

2.2. Description du système Maglev

Les parties principales du système de lévitation magnétique de laboratoire sont la bobine électromagnétique fixée sur un support en acier, le capteur de position et la bille d'acier. Ces parties sont regroupées en deux parties, une partie mécanique et une partie électrique. A l'exception de la partie mécanique, les parties électriques jouent un rôle important dans le contrôle du système, elles permettent le transfert des signaux mesurés au PC et les signaux de contrôle du PC vers le système à travers une carte d'entrées/sorties.

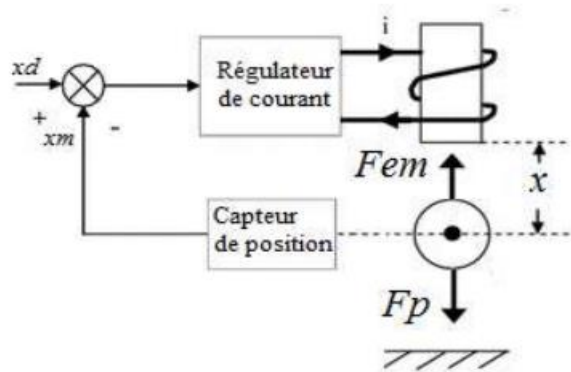


Figure 2.2 Système à lévitation magnétique en boucle fermée.

Les caractéristiques de la bobine sont :

Tableau 2.1 Les caractéristiques de bobine [7].

Description	Valeur
Noyau	Fer
Diamètre de noyau	25mm
Diamètre de bobine	80mm
Nombre de spires	2850
Résistance	22 ohm
Inductance L	277mH SUR 1Khz 442mH SUR 120 KHZ

2.3. Modélisation du système de lévitation magnétique

Le comportement dynamique du système de lévitation magnétique (SLM) peut être modélisé par des équations différentielles. Le modèle est obtenu en appliquant les équations de base de la physique et de la mécanique du système [11,14]. Le diagramme schématique du système Maglev [7] considéré pour cette étude est présenté à la figure (2.3)

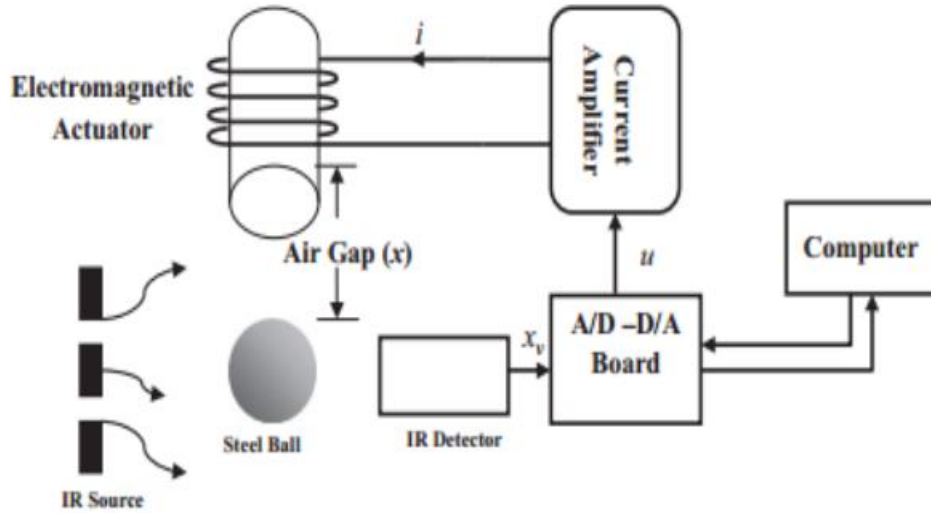


Figure 2.3 Diagramme schématique du système Maglev

Dans ce mémoire, le système Maglev (modèle n ° 33-210) de Feedback Instruments a été considéré. Lorsque le courant traverse la bobine, il est magnétisé et attire la balle dans le sens ascendant. Dans le même temps, la force gravitationnelle de la terre la tire vers le bas. Il y a un capteur infrarouge présent dans la configuration Maglev qui surveille la position de la balle en continu.

Le modèle non linéaire le plus simple [8] en termes de position de bille x et de courant de bobine électromagnétique i est donné par :

$$m\ddot{x} = mg - k\frac{i^2}{x^2} \quad (2.1)$$

Où m est la masse de la balle, i est le courant dans la bobine, x est la distance entre la boule et l'électroaimant. K est une constante de la force électromagnétique du système bobine-bille.

On note ici qu'en utilisant l'équation (1.2), on peut déterminer le courant en régime permanent I_0 qui produit une position d'équilibre x_0 en mettant le terme $\frac{d^2x}{dt^2} = 0$, d'où :

$$I_0 = \sqrt{\frac{mg}{K}} x_0 \quad (2.2)$$

Théoriquement, en fixant la position désirée, on peut calculer le courant nécessaire pour l'équilibre, mais comme on a dit au paravent, le système est très vulnérable aux perturbations et la bille ne maintenait pas son équilibre.

Parameter	Notation	Value
Mass of the steel ball	m	0.02 kg
Acceleration due to gravity	g	9.81 m/s ²
Equilibrium value of current	i_0	0.8 A
Equilibrium value of position	x_0	0.009 m
Control voltage to coil current gain	k_1	1.05 A/V
Sensor gain, offset	k_2, η	143.48 V/m, - 2.8 V
Control voltage input level	u	± 5 V
Sensor output voltage level	x_v	+ 1.25 V to - 3.75V

Tableau 2.2 Les paramètres système du système Maglev [7]

Pour analyser la dynamique du système, Le modèle non linéaire du système doit être linéarisé autour d'un point de fonctionnement nominal (x_0, I_0).

Pour des petites variations autour du point d'équilibre :

$$x(t) = x_0 + \hat{x}(t), \quad I(t) = I_0 + \hat{i}(t) \quad (2.3)$$

L'équation (1.2) peut être réécrite sous la forme :

$$\frac{d^2 \hat{x}(t)}{dt^2} = g - \frac{K}{m} \left(\frac{I_0 + \hat{i}(t)}{x_0 + \hat{x}(t)} \right)^2 \quad (2.4)$$

En linéarisant l'équation (2.4) autour du point 'équilibre ie, $\hat{x}(t) = 0, \hat{i}(t) = 0$, on aura :

$$\frac{d^2 \hat{x}(t)}{dt^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(g - \frac{K}{m} \left(\frac{I_0 + \hat{i}(t)}{x_0 + \hat{x}(t)} \right)^2 \right) \Big|_{\hat{x}(t)=0, \hat{i}(t)=0} \hat{x} + \frac{\partial}{\partial i} \left(g - \frac{K}{m} \left(\frac{I_0 + \hat{i}(t)}{x_0 + \hat{x}(t)} \right)^2 \right) \Big|_{\hat{x}(t)=0, \hat{i}(t)=0} \hat{i}$$

$$\frac{d^2 \hat{x}(t)}{dt^2} = \frac{2KI_0^2}{mx_0^3} \hat{x} - \frac{2KI_0}{mx_0^2} \hat{i} \quad (2.5)$$

En prenant la transformée de Laplace de l'équation (2.5), on aura :

$$H(p) = \frac{\hat{x}(p)}{\hat{i}(p)} = \frac{-a}{p^2 - b} \quad (2.6)$$

Avec :

$$b = \frac{2KI_0^2}{mx_0^3} = \frac{2g}{x_0}, \quad a = \frac{2KI_0}{mx_0^2} = \frac{2g}{i_0} \quad (2.7)$$

Comme la tension issue du capteur est proportionnelle à la distance de la bille par rapport au point d'équilibre, et le courant de l'électroaimant est proportionnel à la tension appliquée à ses bornes :

$$i = k_1 u$$

$$x_v = k_2 x$$

En utilisant les données du tableau 2.1, La fonction de transfert peut être modifiée sous la forme:

$$G(p) = \frac{\hat{X}_v(p)}{\hat{U}(p)} = \frac{-ak_1k_2}{p^2-b} = \frac{-3518.85}{p^2-2180} \quad (2.8)$$

Les pôles du système Maglev sont situés à $\pm 46,69$. En raison de la présence d'un pôle sur la moitié droite du plan de Laplace, le système devient très instable. Pour obtenir un comportement contrôlé stable du système, il devient extrêmement important de concevoir un contrôleur approprié.

2.4. System avec régulateur PID

La structure générale du régulateur PID avec système Maglev est représentée dans la figure (2.4).

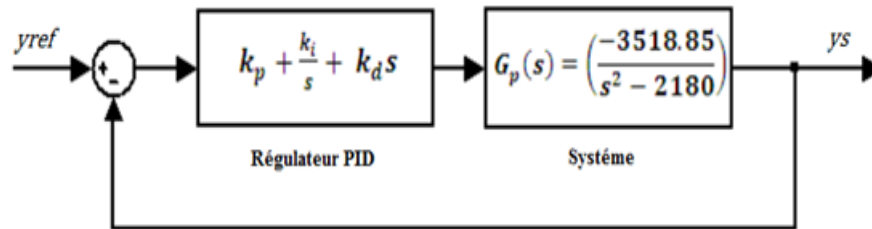


Figure 2.4 Régulateur PID avec système Maglev.

L'équation des caractéristiques du système Maglev avec contrôleur PID pour la rétroaction unitaire est donnée par :

$$1 + G_p(s)G_c(s) = 0 \quad (2.9)$$

$$1 + \left(\frac{-3518.85}{s^2-2180} \right) \left(k_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) = 0 \quad (2.10)$$

2.5. System avec régulateur PID à consigne pondéré

Le contrôleur SPWPID peut être représenté comme un contrôleur PID avec un contrôleur PD présent dans la boucle interne [9]. Il dispose d'une plus grande flexibilité pour satisfaire avec précision les spécifications de conception.

La structure d'un système avec régulateur à consigne pondéré est donnée dans la figure (2.5) En raison d'une telle structure, le contrôleur SPWPID est également connu sous le nom de contrôleur PID-PD.

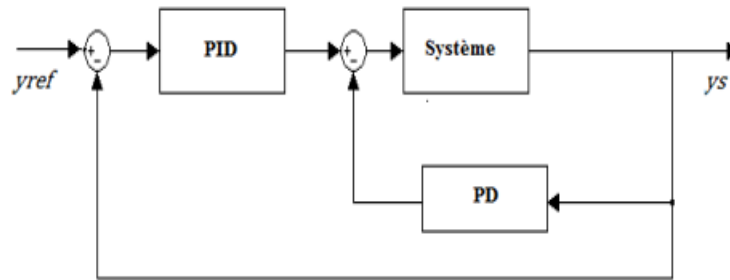


Figure 2.5 Régulateur SPWPID avec système Maglev.

Avec un retour unitaire, l'équation des caractéristiques du système avec le contrôleur SPWPID est donnée par :

$$1 + Gp(s)((GPID(s) + GPD(s))) = 0 \quad (2.11)$$

où K_{P1} , K_I et K_{D1} sont le gain proportionnel, intégral et dérivé du contrôleur PID et K_{P2} et K_{D2} sont le gain proportionnel et dérivé du contrôleur PD. L'équation ci-dessus avec les valeurs des paramètres du contrôleur peut être écrite comme :

$$1 + \left(\frac{-3518.85}{s^2 - 2180}\right) \left(\left(k_p + \frac{K_I}{s} + K_d s\right) (K_{P2} + K_{D2} s) \right) = 0 \quad (2.12)$$

2.6. Ajustement du régulateur PID/SPWPID par l'algorithme PSO

2.6.1. Optimisation par l'algorithme de l'essaim de particules

L'optimisation par l'essaim de particules (PSO) a été introduite pour la première fois par James Kennedy et Russell Eberhart en 1995 [15]. Il est utilisé dans plusieurs applications telles que l'allocation de puissance des réseaux de communication coopératifs [16], l'évolution des réseaux de neurones artificiels [17] [18], l'apprentissage automatique [19], la reconnaissance de

caractères [21] et de nombreuses autres applications. De plus, le PSO s'est avéré robuste et rapide pour résoudre des problèmes non linéaires ou non différentiables [20]. Dans la méthode PSO, un essaim de particules, inspiré par le comportement de flocking chez les oiseaux, se déplace (vole) dans un espace de recherche à N dimensions pour atteindre la meilleure solution. Chaque particule d'une population a deux propriétés principales, sa position actuelle appelée position de particule et sa vitesse.

Le déplacement de ses particules en essaim est complexe, sa dynamique obéit à des règles et des facteurs bien spécifiques:

- Chaque individu dispose d'une certaine intelligence « limitée » (qui lui permet de prendre une décision).
- Chaque individu doit connaître sa position locale et disposer d'information locale de chaque individu se trouvant dans son voisinage.
- Obéir à ces trois règles simples, « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « voler à la même vitesse ».

Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

- La particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- La particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée.
- La particule tend à se fier à l'expérience de ses voisins et ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

En utilisant ces facteurs et règles, les particules se déplacent dans l'espace de recherche selon des formules mathématiques pour finalement converger vers la position souhaitée.

2.6.2. Formulation de l'algorithme PSO

L'essaim de particules est constitué de p particules et la position de chaque particule représente une solution dans l'espace de recherche. Les particules changent d'état selon les trois principes suivants [13]:

- **Une composante d'inertie** : la particule s'efforce de suivre spontanément le sens de son déplacement.
- **Une composante cognitive** : la particule fait tout pour se diriger vers la meilleure position rencontrée jusqu'à présent.

- **Une composante sociale** : la particule s'inspire également de l'expérience, du parcours des autres particules, pour se diriger vers la meilleure position rencontrée par ses voisins. Ce déplacement est illustré dans la figure (2.6).

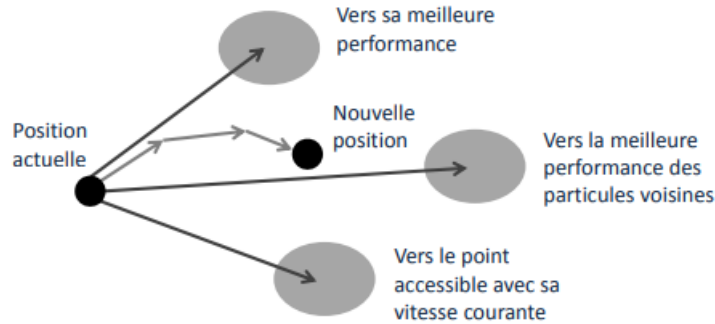


Figure 2.6 Principe du déplacement d'une particule

Chaque itération k fait bouger chaque particule i , en fonction de trois composantes [10,13]:

- Sa vitesse actuelle $v_i(k)$,
- Sa meilleure solution p_{besti} ,
- La meilleure solution obtenue dans son "voisinage" g_{best} .

La mise à jour de la position (k) et la vitesse $v_i(k)$ d'une particule pi est représentée par les équations (2.13) et (2.14) :

$$v_i(k + 1) = \omega v_i(k) + c_1 \cdot r_1 [p_{besti}(k) - x_i(k)] + c_2 \cdot r_2 [g_{best}(k) - x_i(k)] \quad (2.13)$$

$$x_i(k + 1) = x_i(k) + v_i(k + 1) \quad (2.14)$$

Où :

- $x_i(k)$ est la position de la particule i à l'itération k .
- ω est la masse d'inertie qui contrôle l'influence de la précédente vitesse de la particule sur la suivante, appelée coefficient d'inertie. Le but de l'introduction de ce paramètre est de réaliser un équilibre entre la recherche locale (exploitation) et la recherche globale (exploration)
- c_1 et c_2 sont des facteurs d'accélération, appelées coefficients d'accélération qui sont fixés par l'utilisateur et définies par la relation $c_1 + c_2 \leq 4$.
- r_1 et r_2 sont des nombres générés aléatoirement à chaque itération suivant une loi uniforme sur l'intervalle $[0, 1]$.

Le nombre de particule utilisé pour la résolution du problème dépend essentiellement de deux facteurs, la taille de l'espace de recherche et le rapport entre les capacités de calcul de la machine et le temps maximum de recherche. Il n'y a pas de règle pour déterminer ce paramètre, faire de nombreux essais permet de se doter de l'expérience nécessaire à l'appréhension de ce paramètre [12].

2.6.3. Algorithme de base du PSO

Les étapes essentielles de l'optimisation par essaim de particules sont présentées par l'organigramme de la figure (2.7). En général le critère d'arrêt peut être un nombre d'itérations fixe ou bien en fonction de la fonction objective ou bien lorsque les vitesses des particules tendent vers 0.

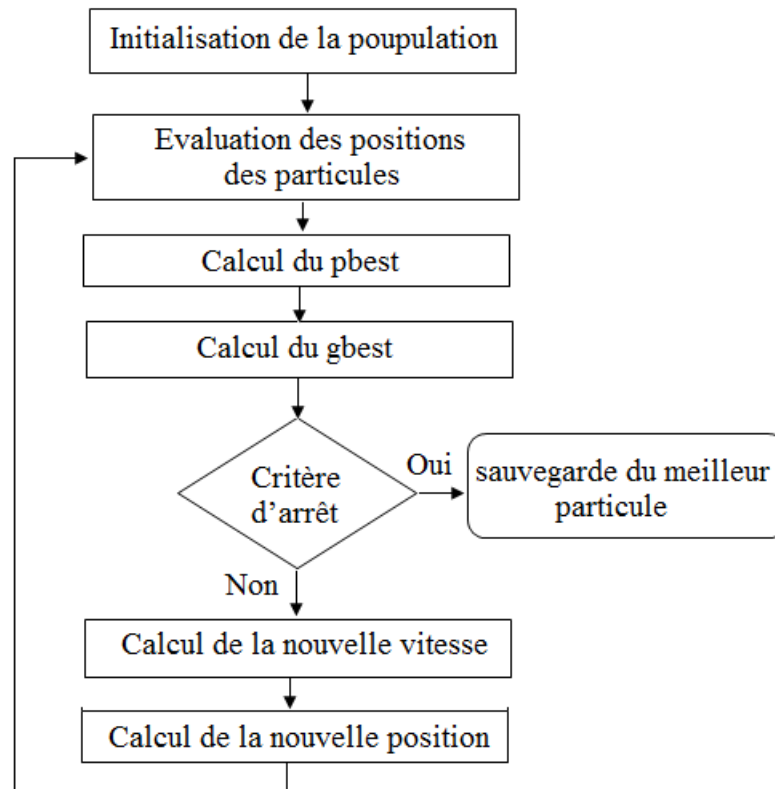


Figure 2.7 Organigramme de l'algorithme de PSO.

2.6.4. Ajustement du régulateur PID par l'algorithme PSO

La structure générale utilisée pour l'auto-détermination des paramètres du régulateur PID par l'algorithme PSO est représenté sur la figure (2.8)

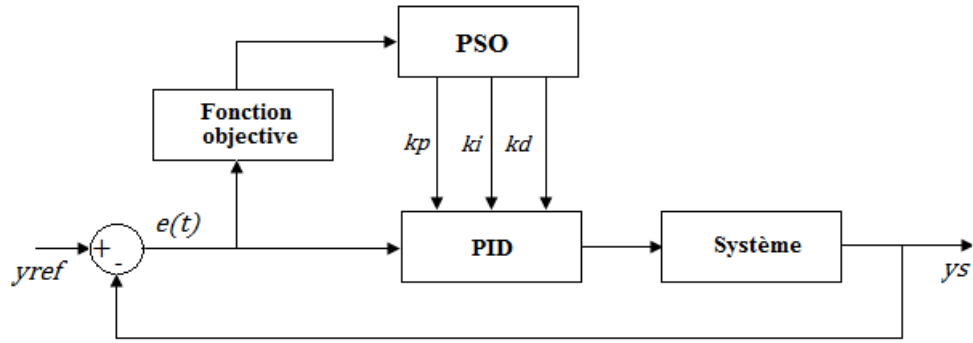


Figure 2.8. Principe d'ajustement des paramètres PID par PSO.

Pour avoir une bonne précision dynamique d'un système à une entrée échelon, il faut que le régime transitoire soit caractérisé par un faible dépassement et un temps de réponse optimal. Pour cela, les paramètres d'un régulateur PID sont choisis de manière à minimiser l'erreur dynamique entre la consigne y_{ref} et la réponse du système y_s :

$$e(t) = y_{ref}(t) - y_s(t) \quad (2.15)$$

Les trois paramètres du régulateur PID forme une particule. Les particules sont initialisées aléatoirement et sont mises à jour selon les équations suivantes :

Pour $m = 1, 2, 3, \dots, N_{pop}$

$$\Delta Kp_m^{k+1} = \Delta Kp_m^k + c_1 r_1 (pbest_m^k - Kp_m^k) + c_2 r_2 (gbest_m^k - Kp_m^k) \quad (2.16)$$

$$\Delta Ki_m^{k+1} = \Delta Ki_m^k + c_1 r_1 (pbest_m^k - Ki_m^k) + c_2 r_2 (gbest_m^k - Ki_m^k) \quad (2.17)$$

$$\Delta Kd_m^{k+1} = \Delta Kd_m^k + c_1 r_1 (pbest_m^k - Kd_m^k) + c_2 r_2 (gbest_m^k - Kd_m^k) \quad (2.18)$$

$$Kp_m^{k+1} = Kp_m^k + \Delta Kp_m^{k+1} \quad (2.19)$$

$$Ki_m^{k+1} = Ki_m^k + \Delta Ki_m^{k+1} \quad (2.20)$$

$$Kd_m^{k+1} = Kd_m^k + \Delta Kd_m^{k+1} \quad (2.21)$$

où N_{pop} est le nombre de particules, $K(p, i, d)_m^k$ est le poids de la particule m à l'itération k , $pbest_m^k$ est la meilleure position de la particule m à l'itération k . $gbest_m^k$ est la meilleure position des particules à l'itération k .

Les étapes de l'algorithme PSO peuvent être décrites comme suit [7]:

- **Etape 1**

Initialisation des paramètres Kp_m^0 , Ki_m^0 , Kd_m^0 , ΔKp_m^0 , ΔKi_m^0 , ΔKd_m^0 de chaque particule aléatoirement dans la plage autorisée. La quantité $pbest_m^k$ est évalué pour chaque particule.

La valeur g_{best} est la meilleur valeur des $p_{best}_m^K$.

- **Étape 2**

La valeur de la fonction objective (fitness) est calculée pour chaque particule Si la valeur est meilleure que le p_{best} actuel de la particule, la valeur p_{best} est remplacée par la valeur actuelle. Si la meilleure valeur de p_{best} est meilleure que la valeur actuelle de g_{best} , cette dernière sera remplacée par la meilleure des p_{best} .

- **Étape 3**

Mise à jours des paramètres selon les équations (2.16) -(2.21).

- **Étape 4**

Si le nombre d'itérations actuel atteint le nombre d'itération maximum prédéterminé, quitter, sinon, passez à l'étape 2.

2.6.5. Ajustement du régulateur SPWPID par l'algorithme PSO

La structure générale utilisé pour l'auto-détermination des paramètres du régulateur SPWPID par l'algorithme PSO est représenté sur la figure (2.9) où le régulateur SPWPID caractérisé par les cinq paramètres $kp, ki, kd, kp1, kd1$ est synthétisé de la même manière qu'avec le PID ordinaire.

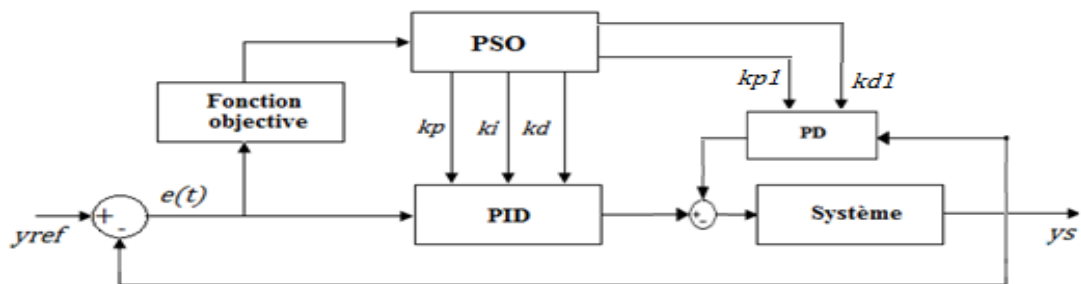


Figure 2.9 Principe d'ajustement des paramètres SPWPID par PSO.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le système de lévitation magnétique (Maglev) et sa modélisation en boucle fermée. On a discuté la conception des deux régulateurs PID et SPWPID et l'ajustement de leurs paramètres par l'algorithme. Dans la suite on va utiliser ces régulateurs pour contrôler la position d'une bille dans le système de lévitation magnétique (Maglev) pour voir la meilleur régulateur .

Chapitre 3

Simulation et résultats

3.1. Introduction

Le système MAGLEV disponible au niveau du laboratoire d'automatique (figure 3.1) c'est un modèle simplifié du système de lévitation. Le modèle mathématique de ce système nous a permis de former différents types de régulateurs PID et leurs tests en utilisant l'environnement MATLAB et Simulink. Le système de lévitation magnétique en main réfère à une unité électromécanique et une carte électronique pour le contrôle. Le MAGLEV peut être utilisé en mode autonome. Comme montré dans la figure (3.1), le système consiste en un panneau en liaison avec le PC via une carte d'entrées/sortie et l'environnement MATLAB.

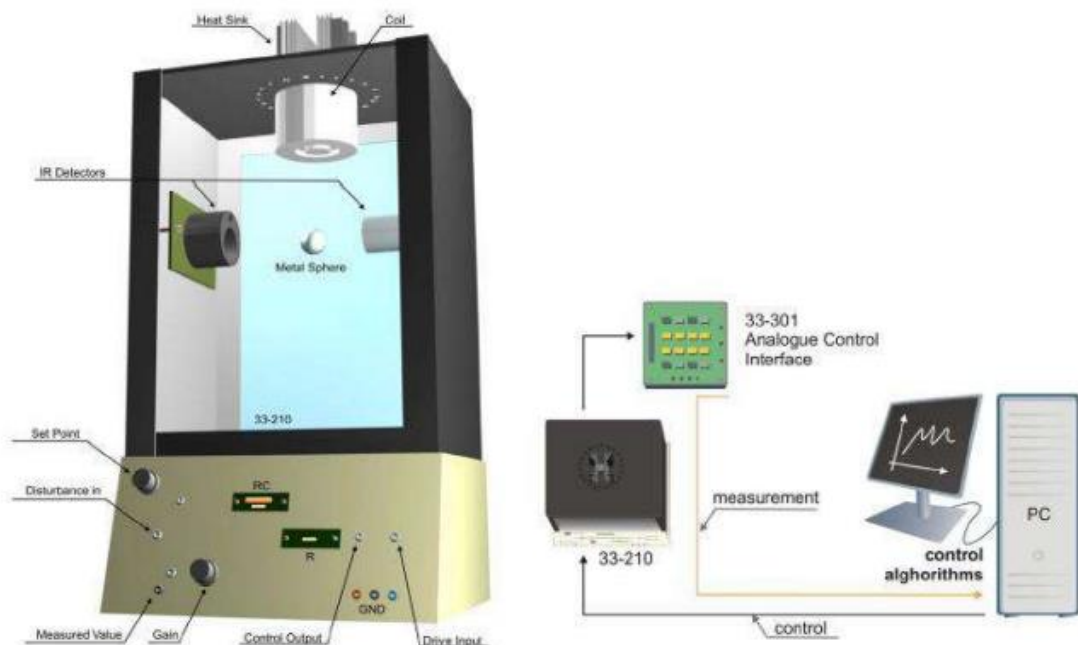


Figure 3.1 Système de lévitation magnétique et son interfaçage

3.2. Formulation de la fonction objective

Cette section décrit la conception du contrôleur PID et SPWPID pour le système Maglev, pour cette étude, les spécifications de conception ont été prises comme:

- Dépassement maximal $\leq 5\%$
- Temps de réponse $t_s \leq 2$ sec

Rappelons que pour un système de deuxième ordre, le dépassement est lié au coefficient d'amortissement par:

$$D_{\%} = 100e^{\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (3.1)$$

le temps de réponse à $n\%$ est lié à la pulsation propre par :

$$t_{rn\%} = \frac{1}{\xi\omega_n} \ln \frac{100}{n} \quad (3.2)$$

Selon ces deux spécifications, les pôles dominants obtenus en résolvant l'équation caractéristique :

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (3.3)$$

sont:

$$s_{1,2} = -2 \pm 2,1i \quad (3.4)$$

3.2.1. Système avec régulateur PID

En substituant la valeur de s_1 dans l'équation caractéristique du système avec le régulateur pour un retour unitaire :

$$1 + G_p(s)G_c(s) = 0 \quad (3.5)$$

$$1 + \left(\frac{-3518.85}{s^2 - 2180}\right) \left(k_p + \frac{K_i}{s} + K_d s\right) = 0 \quad (3.6)$$

puis en séparant les parties réelle (R) et imaginaire (I), on obtient :

$$R = 1 + 1,6138k_p - 0,3853k_i - 3,2146k_d \quad (3.7)$$

$$I = -0,0062k_p - 0,4015k_i + 3,4014k_d \quad (3.8)$$

La fonction objective considérée pour obtenir la valeur de k_p, k_i, k_d est de la forme :

$$fPID = |R|^2 + |I|^2 \quad (3.9)$$

3.2.2. Système avec régulateur SPWPID

De la même manière, on remplace la valeur de s_1 dans l'équation caractéristique du système avec le régulateur SPWPID et avec un retour unitaire :

$$1 + G_P(s)((G_{PID}(s) + G_{PD}(s))) = 0 \quad (3.10)$$

$$1 + \left(\frac{-3518.85}{s^2-2180}\right) \left(k_p + \frac{K_i}{s} + K_d s\right) (k_{p2} + k_{D2}s) = 0 \quad (3.11)$$

on obtient les deux équations :

$$R_1 = 1 + 1.6138K_{P1} - 0.3853K_{I1} - 3.2146K_{D1} + 1.6138K_{P2} - 3.2146K_{D2} \quad (3.12)$$

$$I_1 = -0.0062K_{P1} - 0.4015K_{I1} + 3.4014K_{D1} - 0.0062K_{P2} + 3.4014K_{D2} \quad (1.19)$$

la fonction objective pour obtenir les valeurs des paramètres du contrôleur SPWPID (K_{P1} , K_{I1} , K_{D1} , K_{P2} et K_{D2}) a la même forme que la fonction objective considérée pour trouver les valeurs des paramètres du régulateur PID, c'est-à-dire :

$$f_{SPWPID} = |R|^2 + |I|^2 \quad (1.20)$$

3.3. La simulation et les résultats

3.3.1. Signale d'excitation

La figure (3.2-3.4) à représente la simulation de system Maglev/régulateur PID avec différent signaux d'excitation, dans cette étude nous choisirons la signale d'excitation:

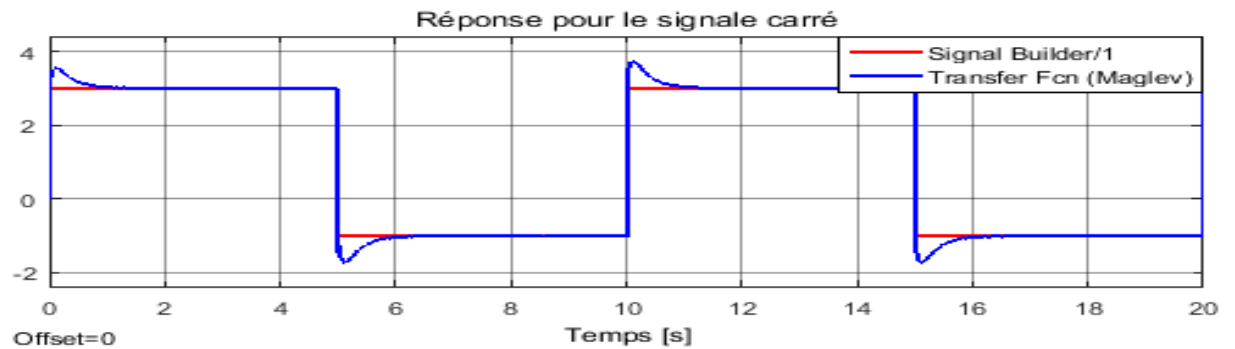


Figure 3.2 Réponse de système pour le signale carré.

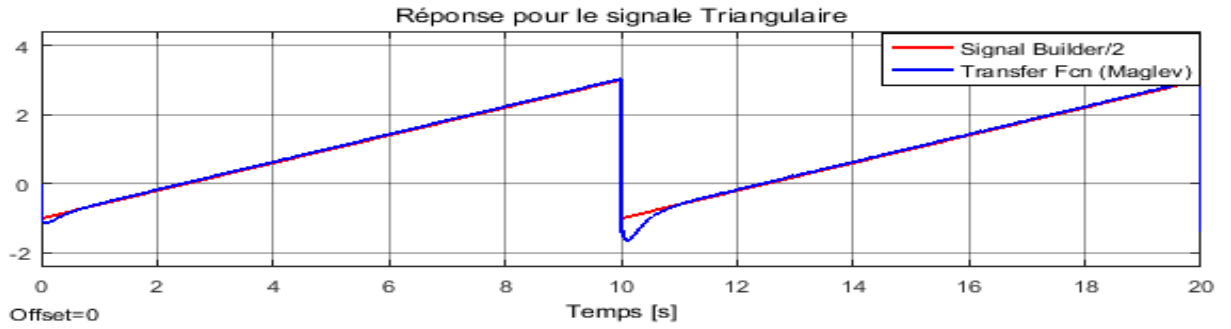


Figure 3.3 Réponse de système pour le signal triangulaire.

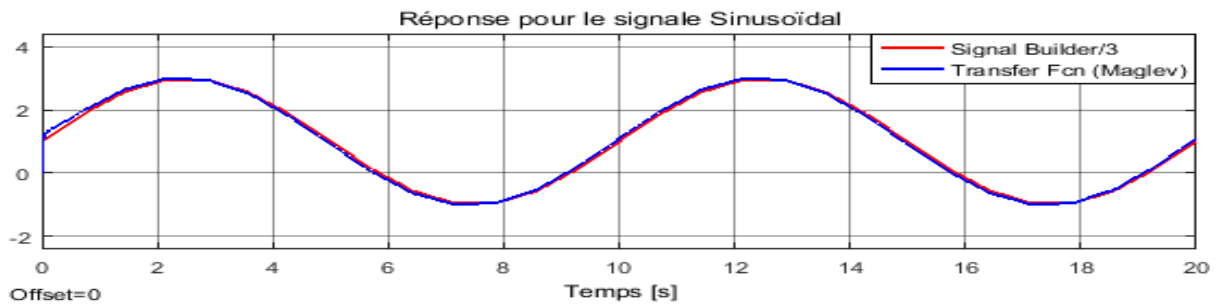


Figure 3.4 Réponse de système pour le signal sinusoïdale.

Donc après quelques exécutions pour différents signaux, pour cette étude on choisira le signal carré parce qu'il nous permet de voir et de calculer le temps de réponse du système et le dépassement maximal. Les caractéristiques du signal d'excitation sont :

- Amplitude : 2.0 v
- Fréquence : 0.1 Hz
- Offset : 1V

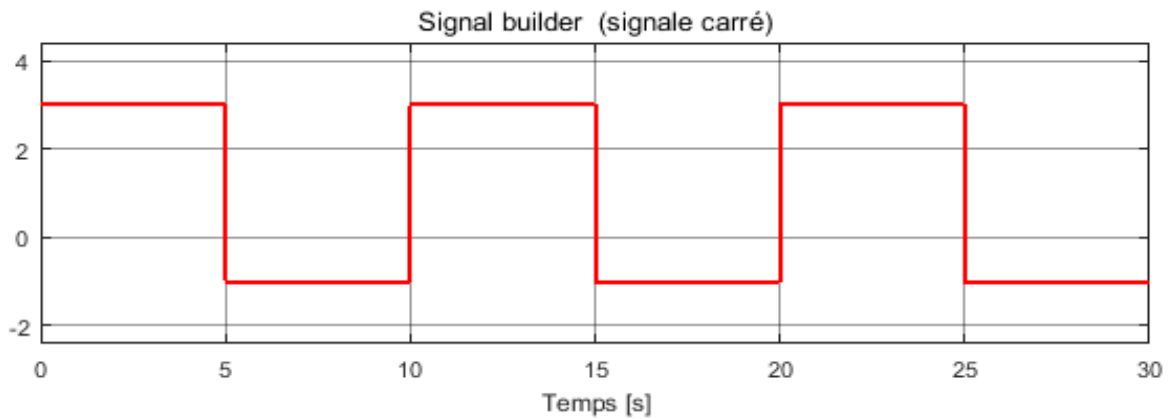


Figure 3.5 Signal d'entrée (signal carré).

3.3.2. Paramètres de l'algorithme (PSO)

L'algorithme PSO nécessite les coefficients de confiance c_1 , c_2 , le nombre de particules et le nombre d'itérations maximal. Après plusieurs essais, on a choisi :

- Max Particules : 25
- Max Itération : 60
- $C_1 = 2.05$, $C_2 = 2.05$

3.3.3. Simulation et résultats de (système/régulateur PID)

Dans cette partie nous simulerons la système (Maglev/régulateur PID) comme représentée dans la figure (3.6), et on a choisir de visualiser la sortie du système aux itérations 1 ,5 ,10 ,60 pour voir bien la performance du système pendant l'évolution des paramètres (K_p , K_i , K_d) de la régulateur et leur influence sur le système.

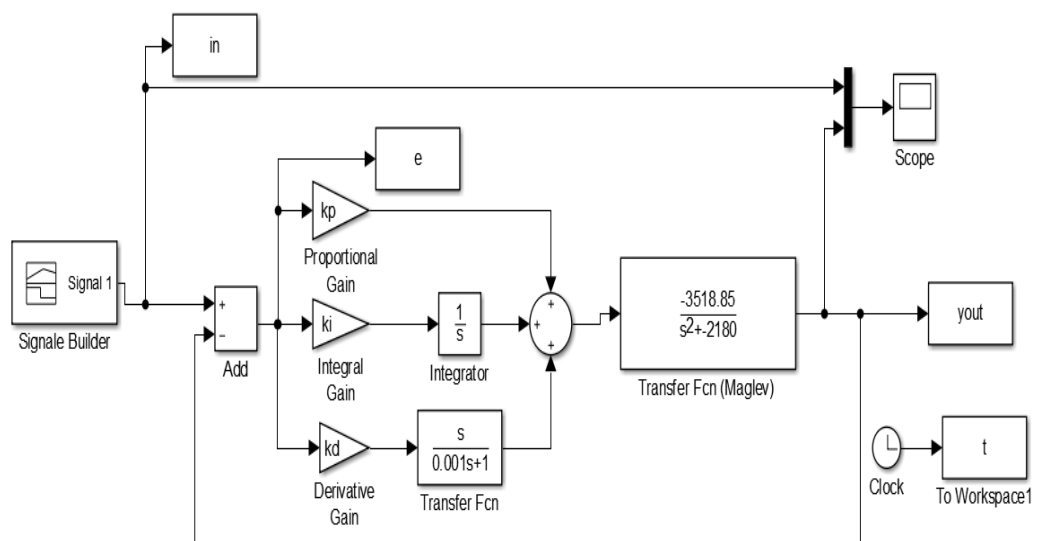


Figure 3.6 Simulation de Maglev système avec régulateur PID.

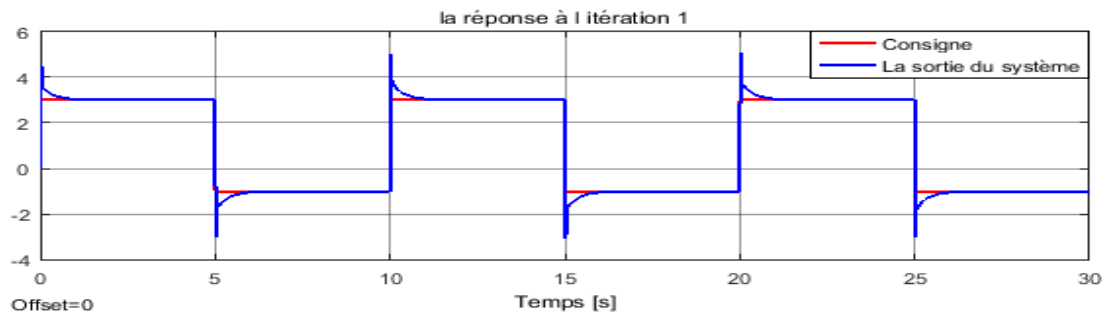


Figure 3.7 Trajectoire de la s sortie mesurée à l'itération 1

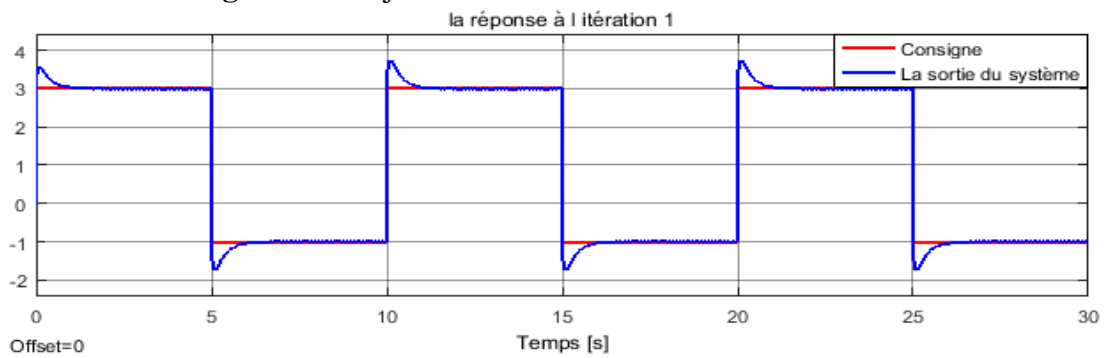


Figure 3.8 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 5

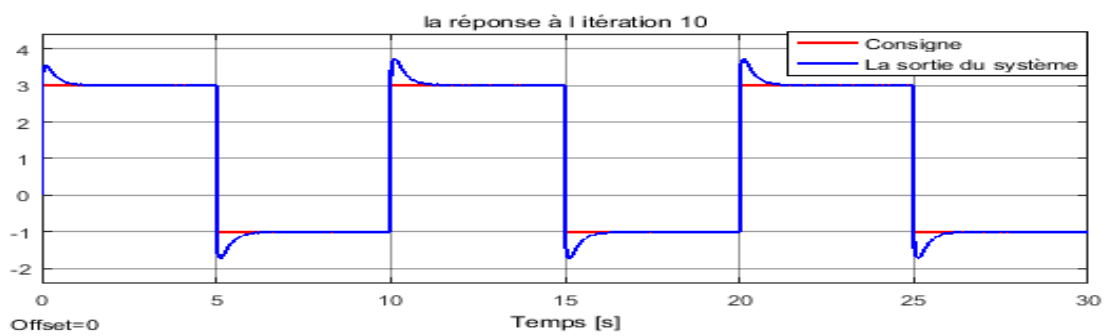


Figure 3.9 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 10



Figure 3.10 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 60

Les figures 3.6-10 représentent la performance du système en fonction des Itérations, Les performances du régulateur PID s'améliorent. On peut voir en passant de la figure (3.9) à la figure (3.12) que le temps de réponse et le dépassement diminuent.

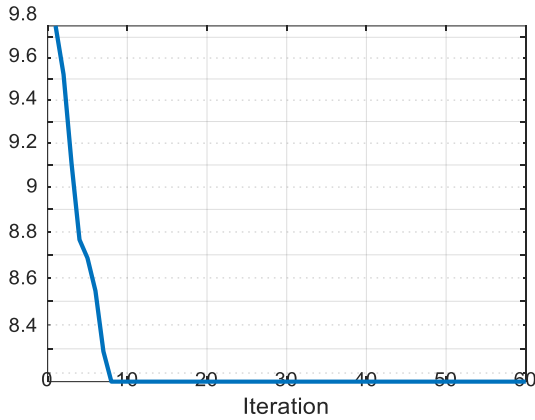


Figure 3.11 Fonction de cout (Objective).

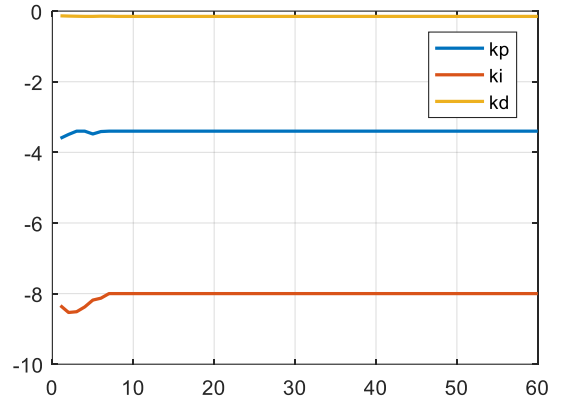


Figure 3.12 Évolutions des paramètres (Kp,Ki,Kd).

Tableau 3.1 Les paramètres de régulateur PID/PSO (résultat).

Kp	Ki	Kd
-3.4000	-8.0000	-0.1500

3.3.4. Simulation et résultats de (système/régulateur SPWPID)

Dans cette partie nous simulerons le système (Maglev/régulateur SPWPID) comme représenté dans la figure (3.13), nous avons choisi de trouver des résultats comme nous l'avions fait précédemment avec le régulateur PID.

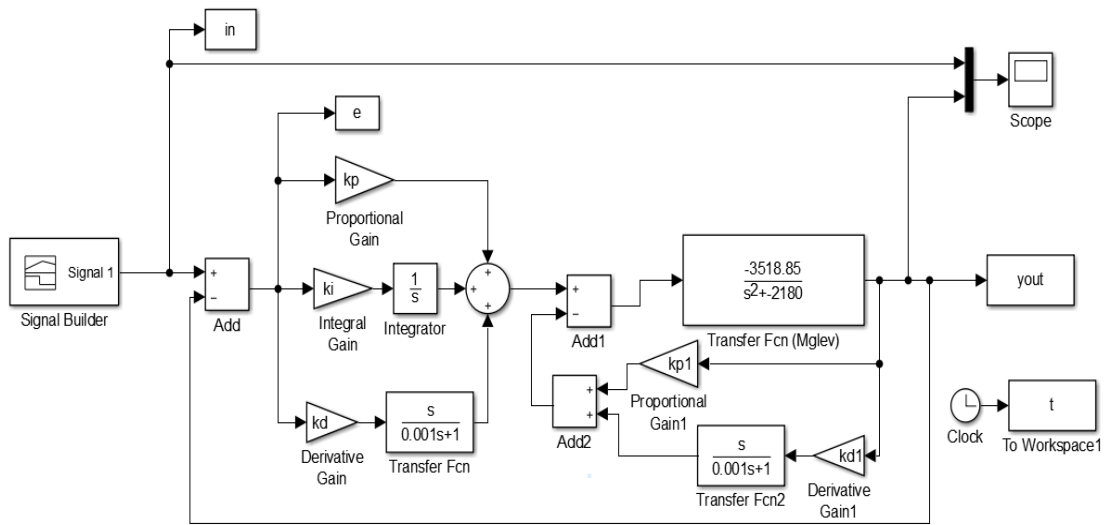


Figure 3.13 Simulation de Maglev système avec régulateur PID



Figure 3.14 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 1

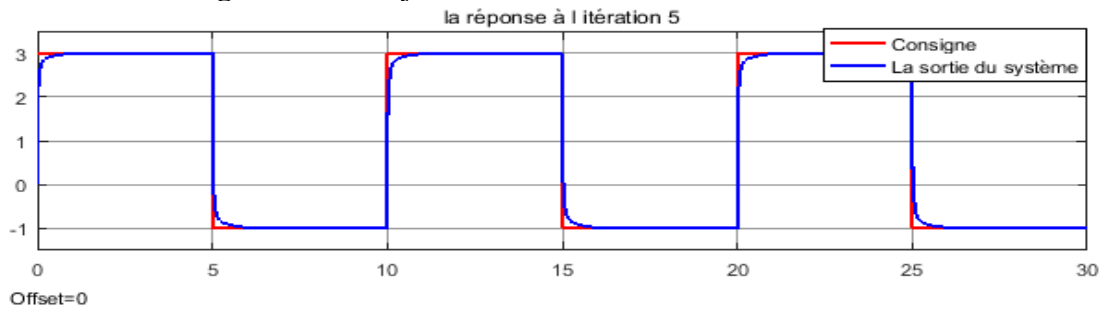


Figure 3.15 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 5

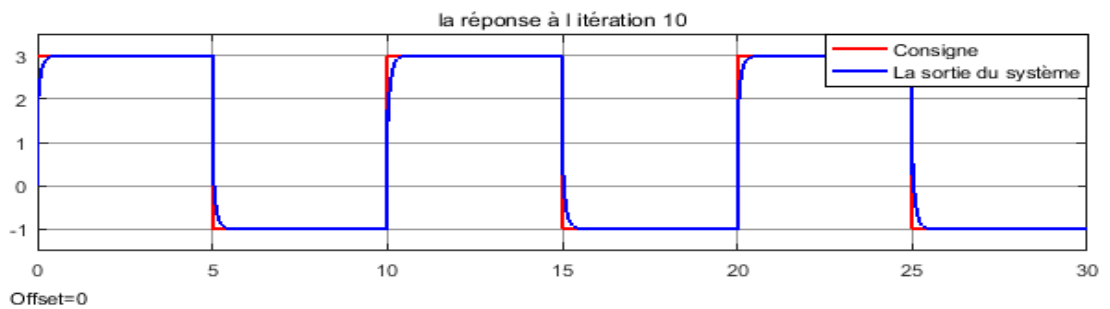


Figure 3.16 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 10

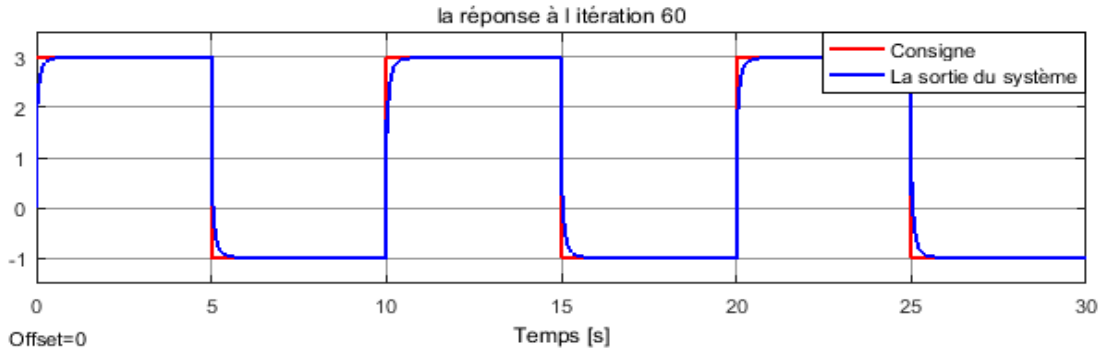


Figure 3.17 Trajectoire de la sortie mesurée à l'itération 60

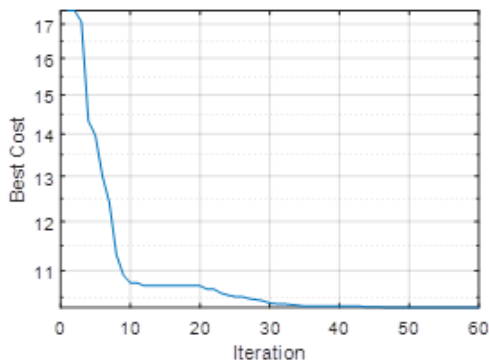


Figure 4.19 Évolutions des paramètres (Kp, Ki, Kd, Kd1, Kp1)

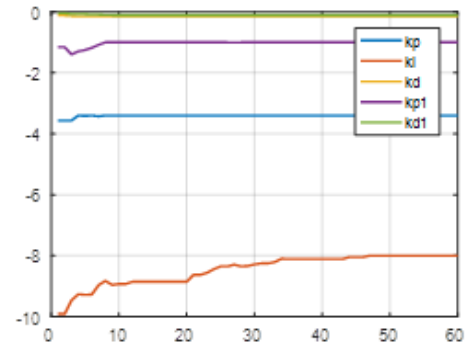


Figure 3.18 Fonction de cout (Objective)

Après la simulation on trouve les résultats optimaux des paramètres de régulateur suivant :

Tableau 3.2 Les paramètres de régulateur SPWPID/PSO (résultats)

Kp	Ki	Kd	Kp1	Kd1
-3.4000	-8.0000	-0.1500	-1.0000	-0.1100

3.4. La comparaison entre la régulateur PID et régulateur SPWPID

Tableau 3.3 Tableaux de comparaison entre régulateur SPWPID et PID

	Tempe de réponse [ms]	Dépassement %
Régulateur PID	2.913	11.076
Régulateur SPWPID	133.038	0.133

D'après les données disponibles dans le tableau (3.3) et l'analyse des figures de réponses des systèmes, il a été constaté que la conception du contrôleur SPWPID offre de meilleures performances en termes de dépassement par rapport au contrôleur PID ; mais le contrôleur PID mieux que SPWPID en termes de temps de réponse.

3.5. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'application de l'algorithme PSO pour l'auto-ajustement des gains d'un régulateur PID et régulateur SPWPID pour simuler la contrôle d'une bille dans un système MagLev et on fait une comparaison entre la performance des régulateurs PID et SPWPID. Les résultats montrant que le régulateur SPWPID est meilleur que régulateur PID en termes de dépassement et le régulateur PID est meilleur que SPWPID en termes de temps de réponse.

Conclusion générale

La lévitation magnétique en général se réfère au processus d'objet flottant dans l'air sous l'influence de la force électromagnétique et la force de la pesanteur. La force électromagnétique est causée par un courant circulant à travers une bobine magnétique du système de lévitation. Dans ce mémoire, on a considéré le problème de minimiser le dépassement en sortie de système de lévitation magnétique en utilisant un régulateur SPWPD. Vu la non linéarité et l'instabilité naturelle du système de lévitation magnétique, on a choisi d'auto-ajuster le régulateur SPWPID utilisant l'algorithme d'optimisation PSO. En fixant les performances voulues ; premier dépassement et temps de réponse maximal autorisé, on a construit une fonction objective à minimiser. Les résultats obtenus sont satisfaisants. Il montrant que le régulateur SPWPID est meilleur que régulateur PID en terme de dépassement et le régulateur PID est meilleur que SPWPID en terme de temps de réponse.

Bibliographie

- [1] O.Aidan, « handbook of PI and PID controller tuningrules 1 », published by Imperial College Press, 2006.
- [2] Goldberg, D.E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. Addison-Wesley,1989.
- [3] A. Hadad, optimization des coefficients du régulateur PID par Essaim de particule d'un processus chimique, Mémoire de master, département d'électrotechnique, université de Sétif, 2013.
- [4] Sahoo, N., Tripathy, A., Sharma, P. 2018. Single axis control of ball position in magnetic levitation system using fuzzy logic control. International Conference on Functional Materials and Chemical Engineering (Icfmce 2017), 323.
- [5] Qin, Y.M. 2014. A modeling and control approach to magnetic levitation system based on state-dependent ARX model. Journal of Process Control, 24(1), 93-112
- [6] Valiente-Blanco, I. 2014. Characterization and Improvement of Axial and Radial Stiffness of Contactless Thrust Superconducting Magnetic Bearings. Tribology Letters, 54(3), 213-220.
- [7]. A. Ghosh et al., “Design and implementation of a 2-DOF PID compensation for magnetic levitation systems,” ISA Transactions., Vol. 53, pp. 1216 -1222, 2014.
- [8]. Magnetic Levitation: Control Experiments Feedback Instruments Limited, UK, 2011.
- [9]. C.C. Chen, “Set-Point Weighted PID Controller Tuning for Time-Delayed Unstable Processes,” Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 47, No. 18, pp. 6983–6990, 2008
- [10] A. Berkani. , ‘ Méta-heuristique Hybride Réseaux de Neurones Artificiels-PSO du Recuit Simulé pour la Commande d'un Procédé Industriel Non-linéaire’. Mémoire de magistère en Électronique de l'université Batna , 2013.

- [11] M. Bonyadi. , ‘Particle swarm optimization : theoretical analysis, modifications, and application to constrained optimization problems’, Ph.D thesis .Faculty of engineering, computer, and mathematical sciences, University of Adelaide , 2014
- [12] M. Clerc and J. Kennedy. , ‘The particle swarm: explosion, stability, and convergence in multi-dimensional complex space’. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, pp. 58–73, 2002.
- [13] N. Mancor. , ‘Contribution à l’optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)’. Mémoire de magister en Électrotechnique de l’Université Mohamed Khider – Biskra , 2012
- [14] P. Suster , A. Jadlovsk . , ‘ Modeling and Control Design of Magnetic Levitation System ,’ Technical University of Kosice/Department of Cybernetics and Artificial Intelligence, Košice, Slovakia, 2007.
- [15] Eberhart, R.; Kennedy, J. Micro Machine and Human Science, ”A New Optimizer Using Particle Swarm Theory”, Proceedings of 1995 IEEE 6th International Symposium, Pages: 39-43
- [16] Zhiqian Bai; Yinlong Xu; Peihao Dong; Peng Gong; Kyungsup Kwak, ”Particle swarm optimization based power allocation in DF cooperative communications”, Ubiquitous and Future Networks (ICUFN), 2013 Fifth International Conference on , vol., no., pp.316,320, 2-5 July 2013
- [17] Gaxiola, F.; Melin, P.; Valdez, F.; Castillo, O., ”Optimization of type-2 fuzzy weight for neural network using genetic algorithm and particle swarm optimization”, Nature and Biologically Inspired Computing(NaBIC), 2013 World Congress on , vol., no., pp.22,28, 12-14 Aug.2013
- [18] Wei-Chang Yeh, ”New Parameter-Free Simplified Swarm Optimization for Artificial Neural Network Training and its Application in the Prediction of Time Series”, Neural Networks and Learning Systems, IEEE Transactions on , vol.24, no.4, pp.661,665, April 2013
- [19] Guoshao Su, ”Accelerating Particle Swarm Optimization Algorithms Using Gaussian Process Machine Learning”, Computational Intelligence and Natural Computing, 2009. CINC ’09. International Conference on ,vol.2, no., pp.174,177, 6-7 June 2009

- [20] Duan H.B.; Liu S.Q.; "Non-linear dual-mode receding horizon control for multiple unmanned air vehicles formation flight based on chaotic particle swarm optimisation", *Control Theory and Applications*, vol.4,no.11, pp.2565,2578, November 2010
- [21] Guo Zhitao; Yuan Jinli; Dong Yongfeng; Gu Junhua, "Handwritten Chinese Characters Recognition Based on PSO Neural Networks", *Proceedings of 2009 IEEE International Conference*, Pages:350-353
- [22]. P. Holmer, "Faster than a speeding bullet train," *IEEE Spectrum*, Vol. 40, No. 8, pp. 30-34, 2003.
- [23]. W.J. Kim, D.L. Trumper, "High-precision magnetic levitation stage for photolithography," *Precision Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 66-77, 1998
- [24]. K. Yavarian, A. Mohammadian, and F. Hashemi, "Adaptive Neuro Fuzzy Inference System PID Controller for AVR System Using SNR-PSO Optimization," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Vol. 7, No. 3, pp. 394-408, 2015.
- [25]. K. Jagatheesan , B. Anand , and M. Omar, "Design of Proportional - Integral - Derivative controller using Ant Colony Optimization technique in multi-area Automatic Generation Control," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Vol. 7, No. 4, pp. 541-558, 2015.