

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

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département : Electromécanique*

## ***Mémoire***

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Electromécanique**

**Spécialité : Automatique et informatique industrielle**

Par

- **Mebarki Ilyas**
- **Bendjebel Hamza**

*Intitulé*

***Commande robuste et optimale d'un système sous-actionné***

*Soutenu le : 25/06/2022*

*Devant le Jury composé de :*

<b><i>Mme</i></b>	<b><i>Aouabed Fatiha</i></b>	<b><i>MCB</i></b>	<b><i>Président</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>
<b><i>Mr</i></b>	<b><i>Bouchama ziyad</i></b>	<b><i>MCB</i></b>	<b><i>Examineur</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>
<b><i>Mme</i></b>	<b><i>Chérife Aida</i></b>	<b><i>PR</i></b>	<b><i>Examineur</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>
<b><i>Mme</i></b>	<b><i>Djamila Zehar</i></b>	<b><i>MCB</i></b>	<b><i>Encadreur</i></b>	<b><i>Univ-BBA</i></b>

*Année Universitaire 2021/2022*

**Remerciements :**

*Je remercie tout d'abord « ALLAH » de m'avoir donné la santé, le courage et la volonté pour achever ce modeste travail.*

*Je tiens également à exprimer ma plus profonde gratitude à mon encadreur MCA.zahar .djamila pour son suivi et conseils. Sans oublier les enseignants du département d'Electrotechnique qui ont contribué à ma formation.*

*Je termine par remercier tous mes amis et collègues qui m'ont soutenu durant l'élaboration de mon travail.*

# Dédicaces

*Avec un énorme plaisir, un coeur ouvert et une immense joie, que je dédie mon travail à mes très chers, respectueux et magnifiques parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études. A mon frère et mes soeurs pour leurs appuis et leur encouragement.*

*A tous mes amis et toute ma promotion, et en particulier mon binôme **hamza**.*

*A tous ce qui de loin ou de près n'ont pas cessé de m'apporter leur soutien, pendant mes années d'études.*

*Que ce travail soit l'accomplissement de vos voeux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.*

**Ilyas**

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents qui m'a soutenu durant la durée de mes études.*

*A tous les enseignants et professeurs qui m'ont enseigné*

*A mes frères et mes soeurs et à ma grande famille « Bendjebel » et « Khinouche ».*

*Mon binôme **ILYES**.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours scolaire et universitaire.*

**HAMZA**

## **Résumé :**

L'objectif de ce travail est d'élaborer une commande robuste, répondant aux exigences de stabilité et des performances désirées, d'une classe des systèmes sous actionnés.

D'abord, nous avons présenté la théorie de la commande synergétique, des applications sont faites aux deux systèmes complètement actionné et sous actionné.

Afin d'améliorer les performances du système sous actionné, nous avons introduit la méthode d'optimisation par essaim particulaire PSO, cette dernière a été utilisée pour l'optimisation paramétrique du contrôleur synergétique, tout en vérifiant des fonctions objectives bien déterminées.

Les résultats de simulation obtenus, ont montré l'efficacité du contrôleur développé.

**Mots Clés :** système sous actionné, stabilité, robustesse, commande synergétique, optimisation d'essaim particulaire

## **Abstract :**

The principle objective of This work, is to elaborate a robust control, responding to stability criteria and desired performances, for a class of under actuated systems.

At first, we have presented the synergetic control theory, application of this control has been made for two types of systems, actuated and under actuated.

In order to enhance performances of the underactuated system, we have introduced the particle swarm optimization PSO, this latter has been used for the parametric optimization of the synergetic controller, while cheking determined objective functions.

Obtained simulation results, have shown the effectiveness of the developed controller.

**Key Words :** Underactuated system, stability, robustness, synergetic control, particle swarm optimization

**ملخص:** الهدف من هذا العمل هو تطوير تحكم قوي، يلبي متطلبات الاستقرار والأداء المطلوب، لفئة من الأنظمة الخاملة. أولاً، قدمنا نظرية التحكم السينرجي، حيث تم تطبيقها على كل من الأنظمة التي تعمل بشكل كامل والخاملة. من أجل تحسين أداء النظام الخامل، قدمنا طريقة تحسين سرب جسيمات PSO، وقد تم استخدام هذه الأخيرة لتحسين حدودي التحكم السينرجي، مع التحقق من وظائف الهدف المحددة جيداً. أظهرت نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها فعالية المتحكم المحسن. **الكلمات الرئيسية:** النظام الخامل، الاستقرار، المتانة، التحكم السينرجي، تحسين سرب الجس

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE : .....	1
<b>CHAPITER I : SYSTEMES MECANQUES SOUS-ACTIONNES</b>	
I. Introduction : .....	3
I.2 Systèmes mécaniques complètement actionnés : .....	3
I.2.1 définition : .....	3
I.2.2 Modélisation mathématique: .....	3
I.3 Système mécaniques sous-actionnés : .....	5
I.3.1 définition : .....	5
I.3.2 modélisation d'un système sous-actionné d'ordre deux:.....	6
I.4 Quelques exemples de systèmes mécaniques sous-actionnés : .....	6
I.4.1 Le pendule (inversé) sur chariot : .....	6
I.4.2 Les bateaux à simple propulseur : .....	7
I.4.3 Le pendubot : .....	8
I.4.4 L'acrobot : .....	8
I.4.5 Le pendule de Furuta: .....	9
I.5 Intérêt de l'étude des systèmes sous-actionnés : .....	10
I.5.1 Intérêt de l'étude des systèmes sous-actionnés : .....	10
I.5.2 En médecine : .....	10
I.5.3 Dans l'aérospatiale : .....	10
I.5.4 En robotique : .....	11
I.6 Conclusion : .....	11
<b>CHAPITER II : LA COMMANDE SYNERGETIQUE</b>	
II.1 Introduction : .....	13
II.2 La théorie de la commande synergétique : [13] .....	13
II.3 Principe de la synergie : .....	14
II.4 Caractères généraux : .....	15
II.5 Spécificité par domaine d'application : .....	15
II.6 Principes de la commande synergétique : .....	16
II.7 Commande synergétique d'un système dynamique continu : .....	17
II.7.1 Commande synergétique d'un système dynamique discret : .....	19
II.8 Synthèse de la commande synergétique d'un pendule inverse: .....	20
II.8.1 Développement de la commande : .....	20

II.8.2 Résultats de simulation :	21
II.9 Application de la commande synergétique sur un système sous actionné :	24
II.9 .1 Résultats de simulation :	26
II.9.1.1 Résultats de simulation sans perturbation :	26
II.9 .1.2 Résultats de simulation avec perturbations :	30
II.10 Conclusion :	35

### **CHAPITER III : OPTIMISATION PAR ESSAIM PARTICULAIRE(PSO)**

III.1 Introduction :	37
III.2. Introduction à l'optimisation par l'essaim particulaire:	37
III.3 Définition de la méthode :	39
III.4 Définitions de base :	40
III.4.1 Définition de l'optimisation :	40
III.4.2 Fonction Objective :	40
III.4.3 Variables de décision :	40
III.4.4 Formulation d'un problème d'optimisation :	41
III.4.5 Minimum global :	41
III.4.6 Minimum local :	41
III.5 Conception et Déroulement de l'algorithme :[31] :	42
III.6 Principe de l'Algorithme PSO :	43
III.7 Critères d'évaluation de performances :[28] :	44
III.8 Application de la méthode PSO sur un système sous actionné :	46
III.9 Résultats de simulation :	48
III.10 Comparaison entre les résultats :	52
III.11 Conclusion :	55
<b>Bibliographie.....</b>	<b>59</b>

## Liste Des Figures

Figure I. 1 le système pendule inverse. [1].....	7
Figure I. 2 Le bateaux. [5].....	7
Figure I. 3 le pendubot en coordonnées généralisés.[6].....	8
Figure I. 4 l'acrobot en coordonnées généralisés. [2] .....	8
Figure I. 5 le pendule de Furuta en coordonnées généralisés. [2].....	9
Figure I. 6 Pendule gyroscopique inverse. [7].....	10
Figure I. 7 robot biped et sa représentation en 2D. [7].....	11
Figure II.8 Représentation graphique de la solution de l'équation de contrainte d'évolution pour différentes conditions initiales .[22] .....	18
FigureII.9 schéma d'un pendule inversé [11].....	20
Figure II.10 Le signal $x_1(t)$ et sa référence $y_r(t)$ .....	22
Figure II.11 Le signal de commande $U(t)$ .....	22
Figure II.12 La macro-variable $\psi(t)$ .....	23
Figure II .13 Le signal d'erreur $e(t)$ .....	23
Figure II.14 La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$ .....	26
Figure II.15 La sortie du système $x_2(t)$ et la sortie $y_1(t)$ .....	27
Figure II.16 La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_2(t)$ .....	27
Figure II.17 La sortie du système $x_4(t)$ et la sortie $y_2(t)$ .....	28
FigureII. 18 L'erreur $e_1(t)$ .....	28
Figure II.19 L'erreur $e_2(t)$ .....	29
Figure II.20 La macro variable $\psi_3(t)$ .....	29
Figure II.21 La commande $U(t)$ .....	30
Figure II.22 La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$ .....	31
Figure II.23 La sortie du système $x_2(t)$ et la sortie $y_1(t)$ .....	31
Figure II.24 La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_2(t)$ .....	32
Figure II.25 La sortie du système $x_4(t)$ et la sortie $y_2(t)$ .....	32
Figure II.26 L erreur $e_1(t)$ .....	33
Figure II.27 L erreur $e_2(t)$ .....	33
Figure II.28 La macro variable $\psi_3(t)$ .....	34
Figure II.29 La commande $U(t)$ .....	34
Figure III.30Groupe de : oiseux .....	38

Figure III.31 Groupe de : abeilles .....	38
Figure III.32 Déplacement d'une particule[28].....	40
Figure III.33 Illustration des différents minima d'une fonction objective. ....	42
Figure III.34 Organigramme général de la méthode PSO [28] .....	43
Figure III.35 Organigramme de la méthode PSO don système (pont roulant).....	47
Figure III.36 La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désirée $y_1(t)$ .....	48
Figure III.37 la sortie du système $x_2(t)$ et la sortie $y_1(t)$ .....	49
Figure III.38 La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_2(t)$ .....	49
Figure III.39 La sortie du système $x_4(t)$ et la sortie $y_2(t)$ .....	50
Figure III.40 L erreur $e_1(t)$ .....	50
Figure III.41 L erreur $e_3(t)$ .....	51
Figure III.42 La commande $U(t)$ .....	51
Figure III.43 la sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$ .....	52
Figure III. 44 la sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_2(t)$ .....	53
Figure III.45 L erreur $e_1(t)$ .....	54
Figure III.46 L erreur $e_3(t)$ .....	54
Figure III.47 La commande $U(t)$ .....	55

# **INTRODUCTION GENERALE**

### INTRODUCTION GENERALE :

Le développement technologique a conduit à la réalisation des systèmes de plus en plus complexes et hautement non linéaires. Pendant les dernières décennies, l'analyse et la commande des systèmes mécaniques non linéaires ont attiré beaucoup d'attention, spécialement dans les domaines de robotique, d'automatisation et de la commande.

La commande des systèmes mécaniques sous actionnés (SMSA) est en constante évolution depuis plusieurs années, mais la complexité de ces derniers (non linéarité et sous actionnement) rend la tâche de l'élaboration et le développement d'une commande pour l'ensemble de ces systèmes un peu difficile, et s'effectue plus lentement, en plus les résultats qui sont établis pour les systèmes non linéaires ne sont pas directement applicables au cas des SMSA.

Parmi les commandes modernes qui traite ce type de systèmes, on trouve la commande synergétique, c'est une technique de contrôle robuste assez proche de la commande par mode glissant .

Cette commande a prouvé son efficacité pour plusieurs types de systèmes non linéaire complexes.

Pour rendre les contrôleurs développés plus puissants et optimums, et répondre aux exigence des performances et des contraintes, d'autre méthodes d'optimisation paramétriques à savoir les méthodes méta-heuristiques sont introduits par plusieurs chercheurs, parmi ces techniques on trouve l'optimisation par essaim de particules PSO, cette dernière est basées sur l'intelligence collective.

Le travail de ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, on a présenté les systèmes mécaniques sous-actionnés et on a donné un rappelle sur les concepts permettant de concevoir leurs modèles mathématiques.

Dans le deuxième chapitre, la théorie de la commande synergétique est introduite, des exemples d'application sont donnés, afin de vérifier l'efficacité de cette commande

Le troisième chapitre, présente le principe de fonctionnement de la technique d'optimisation de l'essaim des particules (PSO), et l'application de cette méthode, afin d'obtenir des gains optimisés de la commande synergétique développée, pour d'un systèmes mécaniques sou actionné, et pour améliorer ses performances.

**CHAPITER I :**  
**SYSTEMES**  
**MECANIQUES**  
**SOUS-ACTIONNES**

**I. Introduction :**

Les systèmes sous-actionnés sont des systèmes caractérisé par un nombre d'entrées de commande inférieur au nombre de degrés de liberté. Cette caractéristique est soit imposée par la nature de la structure du système ou soit introduite volontairement par le concepteur pour minimiser le nombre d'actionneurs utilisés, et par conséquent réduire le poids, le volume et le coût. Plusieurs systèmes industriels font partie de cette classe de systèmes, tels que les hélicoptères, les avions, les satellites, les robots sous-marins, ...etc .

Le problème de commande des systèmes sous-actionnés est plus complexe que celle des systèmes complètement actionnés. Cela est due au couplage qui existe entre les sorties et les entrées.

Dans ce premier chapitre, nous passons en revue quelques généralités sur les systèmes mécaniques complètement actionnés et sous-actionnés, nous commençons par leur modélisation mathématique en suite nous présentons de quelques systèmes de cette catégorie, en appelant les concepts permettant de concevoir les modèles décrivant leurs dynamiques. Enfin, nous citons les intérêts de l'étude de tels systèmes.[1]

**I.2 Systèmes mécaniques complètement actionnés :****I.2.1 définition :**

Les systèmes mécanique complètement actionné sont des systèmes caractérisé par un nombre d'entrées de commande égal au nombre de degrés de liberté.

Dans ce type de système la commande par linéarisation exacte (connue aussi sous le nom de "Feedback linéarisation") au sens entrée-état ou bien au sens entrée-sortie est applicable.

**I.2.2 Modélisation mathématique:**

Afin de pouvoir modéliser un système mécanique par des équations mathématiques, on commence par choisir un ensemble de coordonnées permettant de le décrire. Ces coordonnées sont généralement nommées coordonnées généralisées. Cette dénomination provient de l'époque où l'utilisation des coordonnées cartésiennes était la plus naturelle.

L'intérêt du choix des coordonnées généralisées réside dans la simplification de la démarche de la modélisation puis de l'analyse de ces systèmes. Une fois les coordonnées généralisées choisies, on peut procéder de deux manières :

– Soit on fait une étude des forces agissant sur le système, et on applique la seconde loi de la dynamique de Newton, disant que la somme des forces appliquées est égale à la masse multipliée par l'accélération.

– Soit on étudie les différentes énergies échangées par le système, puis on exprime le lagrangien avant d'appliquer la formule d'Euler-Lagrange.

Cette deuxième méthode, en général plus simple à mettre en œuvre, est décrite dans ce qui suit.

Considérons un système mécanique composé de corps solides non déformables. Deux types d'énergie interviennent : l'énergie cinétique et l'énergie potentielle. Le lagrangien est la somme (au signe près) de ces deux quantités. Plus concrètement, si  $q$  représente le vecteur des coordonnées généralisées de dimension  $n$ ,  $E_c$  l'énergie cinétique et  $E_p$  l'énergie potentielle, le lagrangien (l'énergie mécanique globale) s'écrit sous la forme :

$$L(q, \dot{q}) = E_c - E_p = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - E_p(q), \quad (I.1)$$

où  $M(q)$  est la matrice d'inertie, définie positive.

Les équations différentielles décrivant la dynamique d'un système mécanique sont obtenues par l'application de l'équation d'Euler-Lagrange suivante :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = F(q)u, \quad (I.2)$$

où  $u \in R^m$  est le vecteur des forces externes et  $F(q) = (f_1(q); \dots; f_m(q))$  est la matrice correspondante, qui répartit les forces sur le système.

Les équations du mouvement dérivent de (I.2) et sont données par :

$$\sum_j m_{kj}(q) \ddot{q}_j + \sum_{ij} \Gamma_{ij}^k(q) \dot{q}_i \dot{q}_j + g_k(q) = e_k^T F(q)u, \quad k = 1, \dots, n, \quad (I.3)$$

où,  $e_k$  est la  $k^{ième}$  base standard de  $R^n$ ,  $g_k(q) = \partial_{q_k} L(q)$ ;  $m_{kj}$  sont les éléments de matrice d'inertie et  $\Gamma_{ij}^k(q)$  sont les symboles de Christoffel définis par :

$$\Gamma_{ij}^k(q) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial m_{kj}(q)}{\partial q_i} + \frac{\partial m_{ki}(q)}{\partial q_j} - \frac{\partial m_{ij}(q)}{\partial q_k} \right). \quad (I.4)$$

L'écriture de la formule précédente sous une forme vectorielle donne :

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) = F(q)u \quad (I.5)$$

où  $M(q)$  est la matrice d'inertie et  $C(q; \dot{q})$  est une matrice composée des éléments  $c_{ij}$  ; tel que :

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^n \Gamma_{kj}^i(q) \dot{q}_k \quad (I.6)$$

$C(q; \dot{q})\dot{q}$  contient deux types d'éléments. Ceux qui font intervenir les produits  $\dot{q}_i \dot{q}_j$  pour  $i = j$  sont appelés forces centrifuges. Ceux qui correspondent aux indices  $i \neq j$  sont les forces de Coriolis. Le vecteur  $G(q)$  représente les forces de gravité. Une propriété intéressante des systèmes mécaniques est que la matrice  $S_0 = \dot{M}(q) - 2C(q; \dot{q})$  est antisymétrique. Cette propriété est utilisée par exemple pour démontrer la passivité de ces systèmes.

les système complètement actionnés sont linéarisable en appliquant la commande par retour d'état suivante : [2]

$$U = F(\dot{q})^{-1}(M(q)\theta + C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q)) \quad (I.7)$$

### I.3 Système mécaniques sous-actionnés :

#### I.3.1 définition :

Un système mécanique est dit sous-actionné s'il admet moins d'actionneurs que de degrés de liberté, Cette restriction empêche une linéarisation par bouclage statique de la dynamique complète du système. [2]

**I.3.2 modélisation d'un système sous-actionné d'ordre deux:**

Supposons par exemple que  $F(q) = (0; Im)^T$ . Alors, les (n-m) premières équations de (I.5) peuvent chacune être exprimées par des équations différentielles du second ordre de la forme :

$$\varphi(q, \dot{q}, \ddot{q}) = 0 \tag{I.8}$$

Cette égalité contient les forces de Coriolis, centrifuge et de gravité.

La forme générale des équations dynamiques des systèmes sous-actionnés peut être donnée par l'équation (I.5)

le vecteur de configuration est  $q = (q_1, q_2) \in R^{(n-m)} * R^m$

où :  $q_1$  et  $q_2$  sont les vecteurs de configuration respectivement sous-actionnée et actionnée après répartition de la matrice d'inertie les dynamiques du système prennent la forme : [2]

$$M_{11}(q)\ddot{q}_1 + M_{12}(q)\ddot{q}_2 + C_1(q, \dot{q}) + G_1(q) = 0 \tag{I.9}$$

$$M_{12}(q)\ddot{q}_1 + M_{22}(q)\ddot{q}_2 + C_2(q, \dot{q}) + G_2(q) = Im \tag{I.10}$$

**I.4 Quelques exemples de systèmes mécaniques sous-actionnés :**

Dans cette partie, on présentera des exemples très connus des SMSA d'ordres deux, Comprenant :

**I.4.1 Le pendule (inversé) sur chariot :**

Le système pendule inversé est un système instable en boucle ouverte non linéaire avec des constantes de temps très rapides. Ce système est reconnu pour être une plateforme difficilement stabilisable et il est largement appliqué dans le domaine de la technologie de commande des robots. [3] [4]

Ce système est composé, comme indique la figure I.2, d'un chariot mobile en translation sur un axe horizontale et d'un pendule libre, fixé verticalement sur le chariot. Initialement le pendule est en position basse, le but étant de le redresser en position

d'équilibre et surtout le maintenir dans cette position. Donc en exerçant une force horizontale  $u(t)$  sur le chariot, il résulte une translation de mètres de celui-ci ainsi qu'une rotation de radians du pendule : quand le pendule penche vers la coté droite, le chariot doit le rattraper en effectuant un mouvement vers la droite. Et inversement. [1]

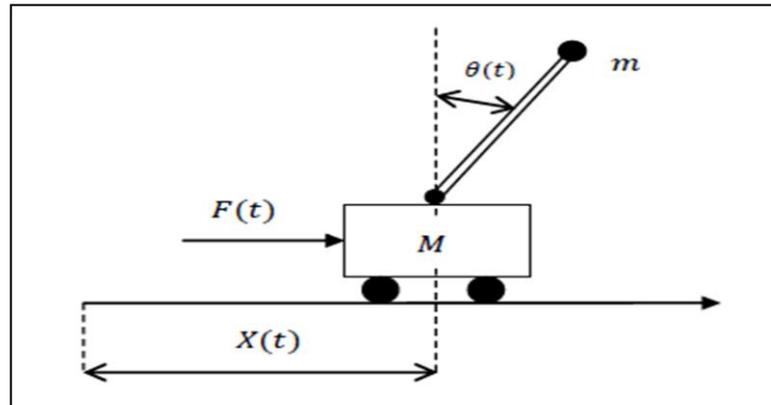


Figure I. 1 le système pendule inverse. [1]

#### I .4.2 Les bateaux à simple propulseur :

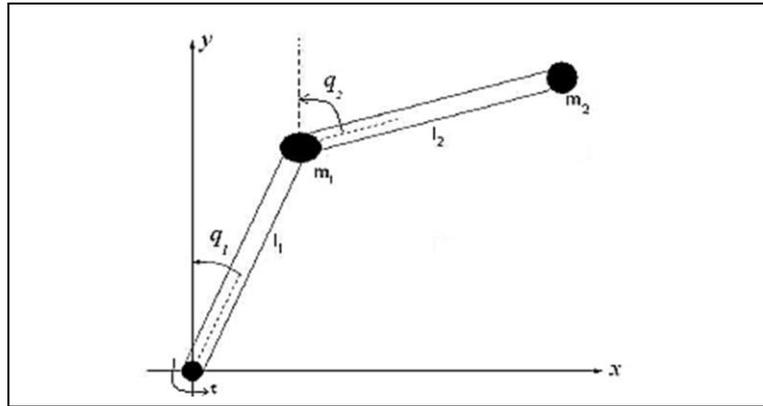
De nombreux bateaux naviguent avec un simple propulseur et un gouvernail, ils disposent donc de deux actionneurs et de trois degrés de liberté, ils sont considérés donc comme des systèmes sous-actionnés. Pour qu'ils puissent se déplacer latéralement, ils doivent être équipés de propulseurs latéraux relativement chers. La solution adaptée sera de leur appliquer une commande qui prend en compte le sous-actionnement du bateau. [5]



Figure I. 2 Le bateaux. [5]

**I .4.3 Le pendubot :**

Le pendubot, représenté dans la figure I.3, est constitué de deux tiges qui peuvent tourner autour de leurs axes respectifs. La tige 1, de masse  $m_1$  et de longueur  $l_1$ ; est actionnée par un couple de contrôle  $\tau$  tandis que la tige 2; de masse  $m_2$  et de longueur  $l_2$ , est en rotation libre autour de la tige 1. [2] [6]



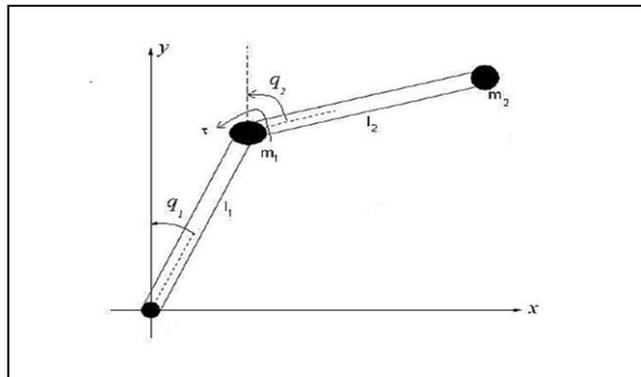
**Figure I. 3** le pendubot en coordonnées généralisés.[6]

A vitesse nulle, le pendubot admet une infinité de points d'équilibre instables donnés par  $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = 0$ ;  $q_1 = \text{cet}$  correspondant à la position haute de la tige 2 pour toute position de la première tige, et une infinité de points d'équilibre stables donnés par  $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = 0$ ;  $q_2 = \pi$  ; correspondant à la position basse de la tige numéro 2 . [2] [6]

**I .4.4 L'acrobot :**

L'acrobot est similaire au pendubot à la différence que c'est l'articulation joignant les 2 tiges qui est actionnée par un couple de commande  $\tau$  (voir figure I.4).

où  $m_1, m_2, l_1$  , et  $l_2$  sont respectivement les masses et longueurs des tiges 1 et 2;



**Figure I. 4** l'acrobot en coordonnées généralisés. [2]

L'acrobot admet aussi une infinité de points d'équilibre stables et instables. L'ensemble des points d'équilibre instables correspond aux positions où la verticale passant par le centre de gravité (ce dernier étant dans le demi-plan supérieur) du système global passe aussi par l'axe de rotation de la tige 1. Les positions d'équilibres stables sont identiques aux points instables, la seule différence étant que le centre de gravité est dans le demi-plan inférieur. Un simple calcul des moments d'ordre 1 des 2 masses ponctuelles  $m_1$  et  $m_2$  par rapport à l'axe de rotation de la tige numéro 1 donne

$$m_1 l_1 \sin(q_1) = m_2 l_2 \sin(q_2) , \text{correspondant aux points d'équilibres. [2]}$$

#### I .4.5 Le pendule de Furuta:

Le pendule de Furuta a été conçu par K. Furuta [FYKN92] ,pour contrer le handicap de la course limitée (en translation horizontale) du pendule inversé classique. Le bras actionné en rotation dans le plan horizontal permet une course infinie, ce qui facilite la conception du contrôle. A l'autre extrémité du bras vient s'ajouter un pendule libre en rotation dans le plan vertical orthogonal au bras.

Comme le montre la (figure I.5) où :

$m_p$  la masse du pendule,  $l$  et  $r$  les longueurs respectives du bras et du pendule. Les positions d'équilibre stable (instables) correspondent à  $\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dot{q}_3 = 0 \dots (\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = 0, q_3 = \pi)$  ; [2]

[FYKN92] K. Furuta, M. Yamakita, and S. Kobayashi. Swing-up control of inverted pendulum using pseudo-state feedback. Journal of Systems and Control Engineering, 206 :263–269, 1992.

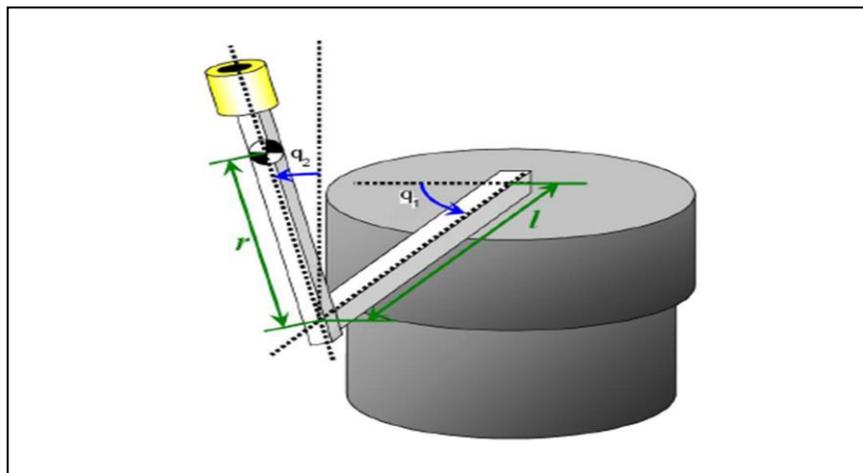


Figure I. 5 le pendule de Furuta en coordonnées généralisées. [2]

**I.5 Intérêt de l'étude des systèmes sous-actionnés :****I.5.1 Intérêt de l'étude des systèmes sous-actionnés :**

L'étude des systèmes sous-actionnés n'est pas faite par plaisir. Son importance est illustrée par les exemples d'application cités ci-dessous : [7]

**I.5.2 En médecine :**

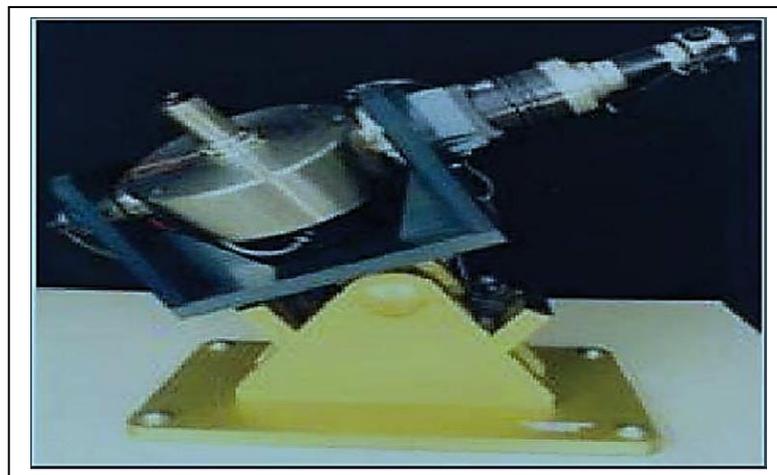
L'homme est un double pendule inversé en série, ses deux axes de rotation principaux sont les chevilles et les hanches.

Quand nous sommes en position debout, notre articulation travaille sans arrêt pour nous y maintenir. Les spécialistes qui travaillent à la réalisation de prothèses pour les hanches sont amenés à utiliser le modèle du double pendule inversé pour calculer l'ensemble des contraintes qui sont soumises à la prothèse. [7]

**I.5.3 Dans l'aérospatiale :**

Dans ce domaine aussi, l'étude des systèmes sous actionnés a une grande importance, par exemple pour commander et stabiliser l'attitude du satellite, le lancement des fusées...etc.

Pour stabiliser l'attitude d'un satellite par les actionneurs gyroscopiques, les actionneurs gyroscopiques également appelés girodynes (Control Moment Gyro : CMG) constituent un nouveau système d'actionneurs qui permettent de générer des couples dynamiques de commande de basculement d'attitude d'un satellite. L'expérience consiste à le rappeler vers la position d'équilibre (instable), donc il est vu comme un pendule inversé. [7]



**Figure I. 6** Pendule gyroscopique inverse. [7]

**I.5.4 En robotique :**

Dans le même ordre d'idée, un robot est vu comme un pendule inversé. Pour maintenir le robot en équilibre, il suffit de stabiliser le pendule inversé correspondant à sa position verticale au cours de son déplacement, et en présence d'autre perturbation. Par exemple de robot qui est déjà étudié et conçu à base de ce principe est le ROBOT BIPED, ce dernier peut se présenter par deux doubles pendules inversés en série, dont les deux pendules sont couplés par une tige avec deux articulations. [7]



**Figure I. 7** robot biped et sa représentation en 2D. [7]

**I.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné quelques généralités sur les systèmes mécaniques complètement actionnés et sous-actionnés et nous avons montré l'approche générale de leur modélisation mathématique. Ensuite nous avons cité quelques exemples, et particulièrement les plus utilisés dans la recherche et le domaine de la commande des systèmes.

A la fin ce chapitre, l'intérêt de l'étude de cette catégorie de système est mentionné.

# **CHAPITER II :**

## **La Commande Synergétique**

## II.1 Introduction :

La théorie de la commande synergétique est développée par Anatoly Kolesnikov [8]. Celle-ci est une nouvelle tendance dans le domaine du contrôle, basée sur les principes d'auto-organisation orientée et sur l'utilisation des propriétés dynamiques des systèmes non linéaires.

La synergétique est un domaine interdisciplinaire de recherche, lancé par *Hermann Haken* en 1969 [9-11]. L'auteur s'intéresse aux systèmes matériels et non matériels composés en général d'un ensemble de parties individuelles. La synergétique se base sur la spontanéité, c'est-à-dire, à l'apparition auto-organisée des nouvelles qualités dans le système. Ces qualités peuvent être structurelles ou fonctionnelles [10,11].

La commande synergétique est une technique de contrôle assez proche de la commande par mode glissant dans le sens où l'on force le système considéré à évoluer avec une dynamique pré-choisie par le concepteur. Elle en diffère dans le fait que la commande y est toujours continue et utilise une macro-variable qui peut être fonction de deux ou plusieurs variables d'état du système. [12]

Dans ce chapitre, nous introduisons les principes de la théorie de cette commande et leurs performances vérifiées par simulation en appliquant cette dernière à un système non linéaire.

## II.2 La théorie de la commande synergétique :[13]

Certaines méthodes avancées telles que les techniques de linéarisation ou la commande par modes glissants, permettent à des concepteurs d'éviter quelques problèmes de non linéarité, mais la multi-connectivité et la multi-dimensionnalité restent encore insurmontables. Ceci a obligé les chercheurs à s'orienter vers d'autres techniques plus efficaces entre autre celle synergétique .

En effet, la théorie de ce type de commande dit « synergétique » est l'une des nouvelles options prometteuses dans la théorie des commandes modernes et émergentes. Elle ouvre de nouveaux horizons dans la conception efficace de commande des systèmes non linéaires complexes et autres .

Cette nouvelle approche permet la conception analytique des lois de commande qui assurent non seulement la stabilité globale du système en boucle fermée, mais aussi la réduction de son ordre par des décompositions successives.

Par conséquent, la théorie de la commande synergétique permet aux concepteurs de résoudre efficacement beaucoup de problèmes difficiles de commande, lesquels n'ont toujours pas été résolus par les méthodes classiques connues .

Ces problèmes sont liés non seulement, à la stabilité globale de fonctionnement du système dans une boucle fermée ou à l'optimisation globale du comportement de ce dernier, mais également à la simplification de la transition d'une stratégie de partage de puissance à une autre, ou à la minimisation des pertes de l'énergie dans le système .

En général, la théorie de la commande synergétique fournit des méthodes pour concevoir des contrôleurs optimaux pour les systèmes dynamiques, lesquelles ont des secteurs d'attraction

### **II.3 Principe de la synergie :**

La synergie découle du grec : syn (sun) et qui signifie « je travaille ». Cette notion a été introduite par Émile Littré au XIXe dans son Dictionnaire de la langue française (1872-1877) et cela en la présentant comme ne relevant que du domaine de la physiologie, c.à.d, le « Concours d'action, d'effort, entre divers organes, divers muscles, et/ou Association de plusieurs organes pour l'accomplissement d'une fonction donnée».[14]

Autrement dit, la synergie est un effet positif de complémentarité dans une organisation. Elle est communément considérés de nos jours comme un phénomène par lequel plusieurs facteurs ou influences agissant ensemble créent un effet plus grand et plus efficace que la somme de tous les effets appliqués en même temps, et/ou créent un effet que chacun d'entre eux n'aurait pas créé isolément.[15]

La synergétique se base sur l'exemption, c.-à-d. à l'apparition de nouvelles propriétés dans le système d'une manière auto-organisée [14].

La question de base traitée par la synergétique est: y a-t-il des principes généraux d'auto-organisation, qui sont indépendants des natures des différentes parties d'un système et cela malgré la grande variété entre les natures de ces différentes parties, qui peuvent être des atomes, des molécules, neurones, ou mêmes des individus dans une société ?. Cette question

peut avoir une réponse positive en faveur de beaucoup de classe de systèmes, si l'attention est basée sur les échanges qualitatifs sur les échelles macroscopiques, c.-à-d. sur les échelles spatiales et temporelles entre ces éléments [14].

D'un autre côté, la synergétique peut prendre place entre les différentes parties d'un système, entre des systèmes ou même entre des disciplines scientifiques. Sa caractéristique principale réside dans la forte liaison entre l'expérience et la théorie ce qui à été prouvé par plusieurs travaux de recherches et laboratoires [14].

#### II.4 Caractères généraux :

Il est possible de distinguer quatre (4) types de synergies à savoir :

- **La maintenabilité** : la capacité à corriger et modifier simplement une structure, et même, parfois, la possibilité de modifier celle-ci en cours d'utilisation.[15]
- **La mutualisation** : capacité à identifier une fonction et à l'utiliser dans plusieurs contextes différents.[15]
- **La scalabilité** : capacité à pouvoir évoluer par un changement d'échelle, c'est-à-dire de supporter des volumes plus importants de flux sans remettre en cause la structure sous-jacente.[14]
- **La résilience** : est la capacité à continuer de fonctionner en cas de panne, ou détérioration d'un élément du processus.[14]

#### II.5 Spécificité par domaine d'application :

- **Physiologie** : La synergie musculaire est une contraction coordonnée de plusieurs muscles destinée à exécuter un mouvement précis.[15]
- **Médecine** : Elle correspond à l'action combinée de plusieurs médicaments en produisant des actions additives, qualifiées de synergiques. Les doses peuvent être différentes des doses de ces médicaments pris individuellement.[15]
- **Economie** : en économie, la notion de synergie est due à l'amélioration de l'organisation d'une nation, ou l'entreprise...etc. Un exemple de **synergie** connue dans ce cas est celle qui existe entre **Intel** et **Microsoft** (« **Wintel** ») : des microprocesseurs

de plus en plus puissants sont associés ou combinés afin d'offrir à l'utilisateur des fonctions plus conviviales.

Néanmoins, ces nouvelles fonctions vont à leur tour, à mesure qu'elles sont de plus en plus utilisées, entraîner une demande de microprocesseurs encore plus puissants. Par ailleurs, la baisse des coûts engendre une plus grande demande, qui elle-même va permettre aussi un nouvel abaissement des coûts (cercle vertueux).[14]

- **Industrie** : quand un régulateur unique dans un processus donné joue le même rôle que plusieurs régulateurs associés, on parlera d'action synergétique.

Par ailleurs, l'opposé de la synergie est l'**antagonisme** (ou synergie négative), qui est un phénomène dans lequel deux facteurs en combinaison ont un effet moindre que la somme de leurs effets attendus. Les deux effets peuvent également s'annuler (ex : ceux d'un acide et une base) et l'absence de synergie est appelée l'asynergie.[14]

## II.6 Principes de la commande synergétique :

La commande synergétique est une nouvelle technique de commande non-linéaire qui prend en compte les non-linéarités du système dans la conception de la commande. Une procédure de conception systématique donnant des lois de commande adaptées à l'implémentation numérique est proposée dans Kolesnikov et al. [16], [17].

De plus, la commande synergétique garantit non seulement un fonctionnement à fréquence de commutation constante, mais fournit également une stabilité asymptotique par rapport aux conditions requises de fonctionnement, et la robustesse vis-à-vis de la variation des paramètres du système, Ho et al., et al. [18], [19].

Le concepteur peut choisir les caractéristiques de la macro-variable en fonction des performances et des spécifications de la commande (dépassement, bornitude du signal de commande, etc ...) qui rendent la conception plus robuste. Par conséquent, la loi de commande ne provoquera pas de phénomènes de broutement comme dans l'approche de la commande par mode glissant. Les paramètres ont été optimisés et la mise en œuvre est facile à réaliser grâce à l'utilisation de variables non mesurables dans la loi de commande.[20]

**II.7 Commande synergétique d'un système dynamique continu :**

Considérons le système dynamique non-linéaire SISO de dimension  $n$  qui peut être décrit par l'équation non linéaire suivante :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x, u, t) \tag{II.1}$$

Où  $x$  représente le vecteur d'état du système et  $u$  représente le vecteur de commande. La synthèse du contrôleur synergétique débute par la définition d'une macro-variable par le concepteur, pour satisfaire le cahier des charges et considérer d'éventuelles contraintes de contrôle [21], qui est donnée par :

$$\psi = \psi(x, t) \tag{II.2}$$

Où  $\psi$  est la macro-variable et  $\psi(x, t)$  est une fonction définie par l'utilisateur, en général fonction des variables d'état. L'objectif de la commande synergétique est de forcer le système à évoluer sur le domaine choisit au préalable par le conceteur:

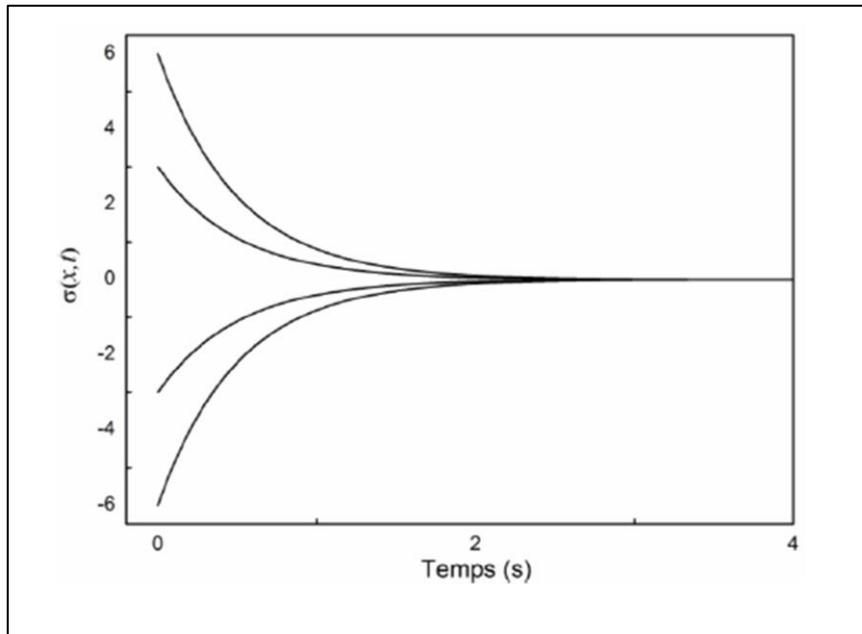
$$\psi = 0$$

Les caractéristiques de la macro-variable peuvent être choisies par le concepteur, selon les paramètres tels que l'objectif de commande, le temps de réponse, les limitations de la commande, etc.... La macro-variable peut être une combinaison linéaire simple des variables d'état, et elle est forcée d'évoluer d'une façon désirée exprimée par une contrainte choisie par le concepteur comme indiqué en exemple par l'équation suivante :

$$T\dot{\psi} + \psi = 0, \quad T > 0 \tag{II.3}$$

La solution de l'équation (II.3) donne la fonction suivante :

$$\psi(t) = \psi_0 e^{-t/T} \tag{II.4}$$



**Figure II.8** Représentation graphique de la solution de l'équation de contrainte d'évolution pour différentes conditions initiales .[22]

La figure.II.1 montre que la macro-variable  $\psi (t)$  converge vers l'attracteur  $\psi =0$  pour des conditions initiales différentes  $\psi= 0$  , où  $t$  représente le temps, et  $T$  est un paramètre de contrôle qui indique la vitesse de convergence du système en boucle fermée vers le domaine indiqué.

En tenant compte de la chaîne de la différentiation donnée par :

$$\frac{d\psi(x,t)}{dt} = \frac{d\psi(x,t)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \tag{II.5}$$

La substitution de (II.1) et de (II.3) dans (II.5) permet d'écrire :

$$T \frac{d\psi(x,t)}{dx} f(x,u,t) + \psi(x,t) = 0 \tag{II.6}$$

En résolvant (III.7) pour  $u$ , la loi de commande peut être ainsi obtenue:

$$u = g(x,\psi(x,t),T,t) \tag{II.7}$$

De (III.8), on peut voir que la commande dépend non seulement des variables d'état du système, mais également de la macro-variable et de la constante de temps choisie  $T$ . En d'autres termes, le concepteur peut choisir les caractéristiques du contrôleur en choisissant une macro-variable appropriée et une constante de temps spécifique  $T$ . En synthétisant le

contrôleur, chaque domaine présente une nouvelle contrainte sur le domaine de l'espace d'état et réduit l'ordre du système d'un degré. Dans la synthèse du contrôleur synergétique montré ci-dessus, il est clair que le contrôleur synergétique agit sur le système non-linéaire et une linéarisation ou une simplification du modèle n'est pas nécessaire comme lors de l'application de la théorie des commandes traditionnelles.[22]

### II.7.1 Commande synergétique d'un système dynamique discret :

Considérons un système dynamique non linéaire discret d'ordre  $n$  décrit comme suit :

$$x(k+1) = f(x(k), u(k), k) \quad (\text{II.8})$$

où  $x(k)$  représente le vecteur d'état du système,  $u(k)$  le vecteur de commande et  $f$  est une fonction non linéaire. La synthèse d'un contrôleur synergétique commence par la sélection d'une fonction appelée la macro-variable qui dépend des variables d'état du système.

$$\psi = \psi(x(k), k) \quad (\text{II.9})$$

L'objectif de commande est de forcer l'état du système à fonctionner sur la variété (manifold)  $\psi = 0$ . Le concepteur peut sélectionner les caractéristiques de la macro-variable en fonction des performances et des spécifications de commande (dépassement, bornitude du signal de commande, etc ...).

Dans l'approche de commande synergétique,  $T\dot{\psi} - \psi = 0$ , définit la trajectoire de convergence et sa vitesse au manifold invariant, Wang et al. [23].

Considérons la période d'échantillonnage  $T_s$ , la contrepartie discrète est dérivée comme suit :

$$T \left[ \frac{\psi(k+1) - \psi(k)}{T_s} \right] + \psi(k) = 0 \quad (\text{II.10})$$

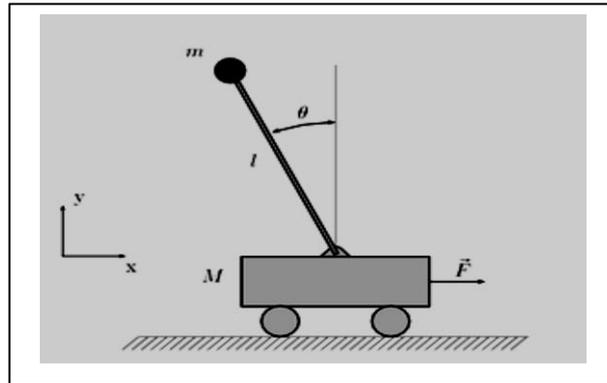
où  $T$  est un paramètre de conception qui spécifie la vitesse de convergence au manifolds. L'équation (4.3) peut être réécrite comme : [20]

$$\left( \frac{T}{T_s - T} \right) \frac{T}{T_s} \psi(k+1) + \psi(k) = 0 \quad (\text{II.11})$$

II.8 Synthèse de la commande synergétique d'un pendule inverse:

II.8.1 Développement de la commande :

Il s'agit d'appliquer le contrôleur synergétique développé à un pendule inversé, représenté sur la figure I.5 :



FigureII.9 schéma d'un pendule inversé [11]

La dynamique de ce pendule est décrite par la représentation d'état suivante :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{g \sin(x_1) - \frac{mlx_2^2 \cos(x_1) \sin(x_1)}{m_c + m}}{l\left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2(x_1)}{m_c + m}\right)} + \frac{\frac{\cos(x_1)}{m_c + m}}{l\left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2(x_1)}{m_c + m}\right)} u \end{aligned} \quad (\text{II.12})$$

Où  $x_1 = \theta$  est l'angle de rotation, la vitesse angulaire,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  l'accélération due à la gravité,  $m_c$  la masse du chariot,  $m$  la masse de la poutre,  $2L$  la longueur de la poutre et  $u$  la force appliquée.

Choisissons la macro-variable suivante :

$$\psi = \lambda e + \dot{e} \quad (\text{II.13})$$

$$e = x_1 - y_r \quad (\text{II.14})$$

$y_r$  est le signal de référence

$$\Rightarrow \dot{e} = \dot{x}_1 - \dot{y}_r = x_2 - \dot{y}_r \quad (\text{II.15})$$

$$\ddot{e} = \dot{x}_2 - \ddot{y}_r \quad (\text{II.16})$$

D'après ( II.3)

On a :

$$\dot{\psi} = \frac{-\psi}{T} \quad (\text{II.17})$$

$$\lambda \dot{e} + \ddot{e} = \frac{-\psi}{T} \quad (\text{II.18})$$

$$\lambda(x_2 - \dot{y}_r) + \dot{x}_2 - \ddot{y}_r = \frac{-\psi}{T} \quad (\text{II.19})$$

$$\lambda(x_2 - \dot{y}_r) + f + gu - \ddot{y}_r = \frac{-\psi}{T} \quad (\text{II.20})$$

$$u = \frac{-\psi}{T} - \frac{1}{g} [f + \lambda(x_2 - \dot{y}_r) - \ddot{y}_r] \quad (\text{II.21})$$

### II.8.2 Résultats de simulation :

L'objectif du contrôleur est de forcer l'angle du pendule  $\theta$  à suivre la trajectoire

Désirée définie par :  $y_d(t) = \frac{\pi}{12} \sin(t)$

Les paramètres du pendule sont :  $m_c = 1kg, m = 0.1kg, l = 0.5m$

Les paramètres de conception du contrôleur proposé sont ainsi choisis :

$T=0,12 ; k=5 ;$

Les résultats de simulation sont obtenus pour les conditions initiales :

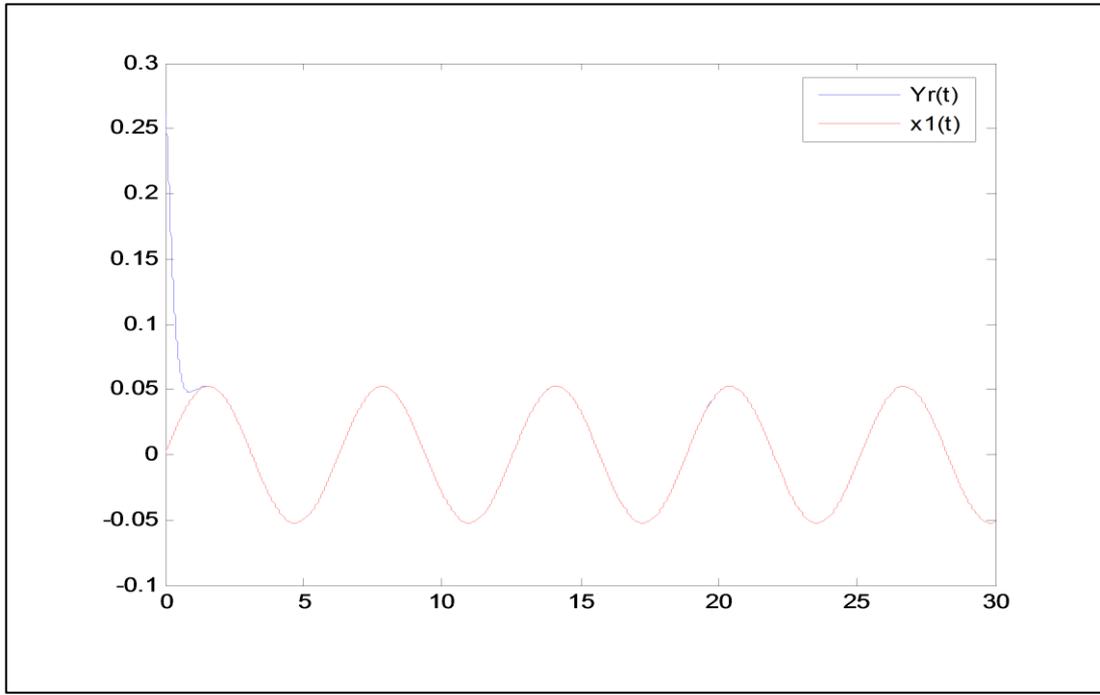


Figure II.10 Le signal  $x_1(t)$  et sa référence  $y_r(t)$

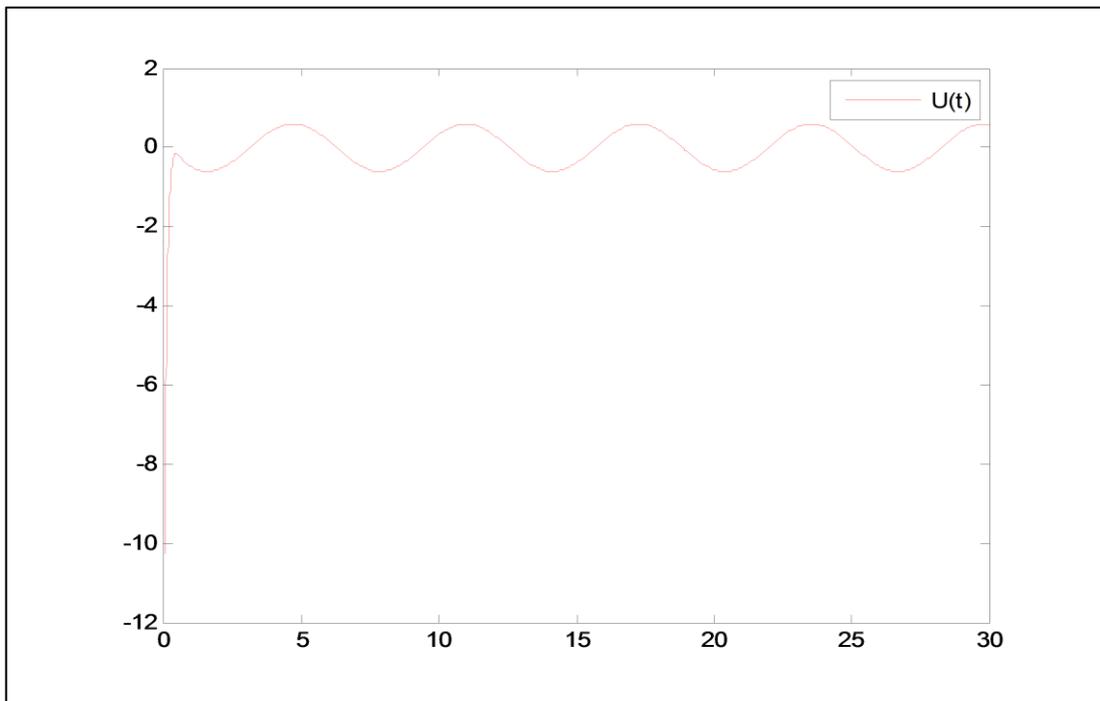


Figure II.11 Le signal de commande  $U(t)$

D'après les figures II.3 et II.4 on voit que le système est stable, le signal de sortie suit parfaitement le signal de référence, et le signal de commande est lisse.

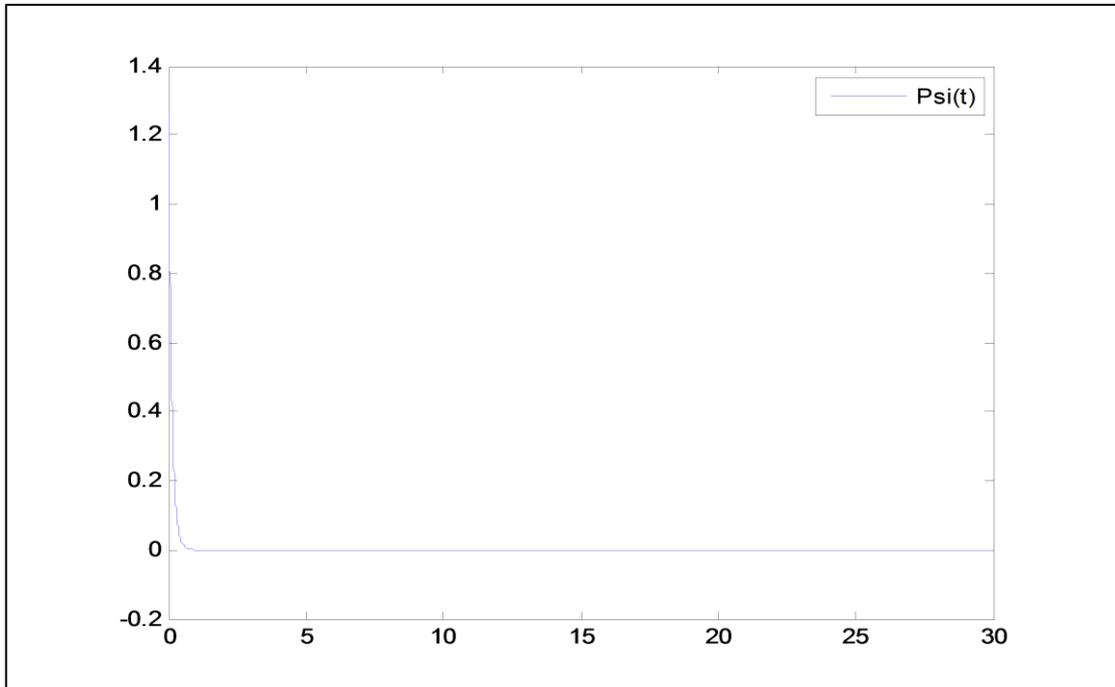


Figure II.12 La macro-variable  $\psi(t)$

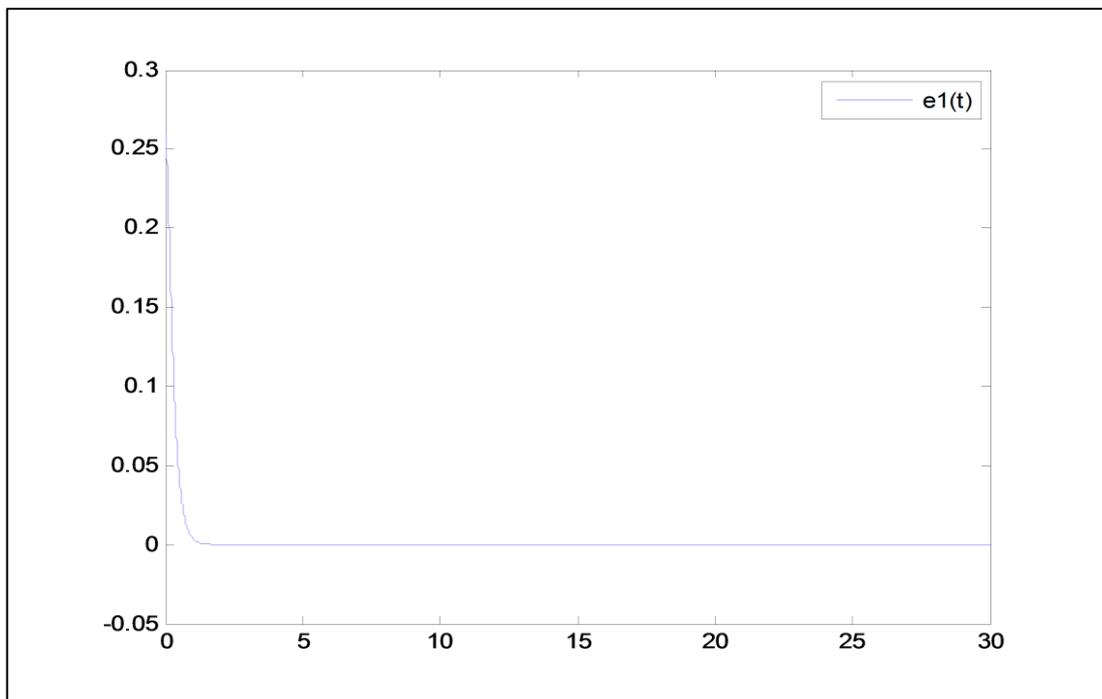


Figure II .13 Le signal d'erreur  $e(t)$

La figure II.6 montre que l'erreur converge vers zéro.

### II.9 Application de la commande synergétique sur un système sous actionné :

Le système sous actionné, sur lequel on va appliquer la commande synergétique est le pont roulant (Crane), ce dernier est décomposé en deux sous-systèmes, selon la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1 + g_1 U + d \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2 + g_2 U + d \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Tels que :  $f_1, f_2, g_1$  et  $g_2$  Sont des fonctions non linéaires données par :

$$f_1 = \frac{(m_p^2 l^2 \sin x_3) * (l x_4 - g \cos x_3)}{(m_p + m_c) m_p l^2 - m_p^2 l^2 \cos^2 x_3}$$

$$f_2 = \frac{(m_p l \sin x_3) * ((m_p + m_c) g - m_p l \cos x_3) x_4}{(m_p + m_c) m_p l^2 - m_p^2 l^2 \cos^2 x_3} \quad (\text{II.23})$$

$$g_1 = \frac{m_p l^2}{(m_p + m_c) m_p l^2 - m_p^2 l^2 \cos^2 x_3}$$

$$g_2 = \frac{m_p l \cos x_3}{(m_p + m_c) m_p l^2 - m_p^2 l^2 \cos^2 x_3}$$

$d$  : vecteur de perturbations externes

Où  $x_1 = x$  c'est le déplacement du chariot et  $x_2 = \theta$  c'est l'angle du pendule,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$  l'accélération due à la gravité,  $m_c$  la masse du chariot,  $m_p$  et  $L$  sont respectivement la masse et la longueur du pendule et  $U$  c'est le signal de commande.

D'après cette représentation, on peut déduire trois macro-variables  $\Psi_1$ ,  $\Psi_2$  et  $\Psi_3$  données par :

$$\begin{cases} \Psi_1 = k_1 e_1 + e_2 \\ \Psi_2 = k_2 e_3 + \Psi_1 \\ \Psi_3 = k_3 e_4 + \Psi_2 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Tels que :

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - y_1 \\ e_2 = x_2 - \dot{y}_1 \\ e_3 = x_3 - y_r \\ e_4 = x_4 - \dot{y}_x \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

$y_1$  et  $y_2$  des signaux de référence

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_1 = x_2 - \dot{y}_1 \\ \dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \ddot{y}_1 \\ \dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{y}_2 = x_4 - \dot{y}_2 \\ \dot{e}_4 = \dot{x}_4 - \ddot{y}_2 \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

$$\begin{cases} \ddot{e}_1 = \dot{x}_2 - \ddot{y}_1 \\ \ddot{e}_3 = \dot{x}_4 - \ddot{y}_2 \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

D'après ( $T\dot{\Psi} + \Psi = 0$ )

On peut faire sortir l'expression de la commande U

On a :

$$\dot{\Psi} = -\frac{\Psi}{T} \quad (\text{II.28})$$

$\Rightarrow$

$$\Psi = \Psi_3 = k_3 e_4 + \Psi_2 \quad (\text{II.29})$$

$$\Psi = \Psi_3 = k_3 e_4 + (k_2 e_3 + \Psi_1) \quad (\text{II.30})$$

$$\Psi = \Psi_3 = k_3 e_4 + (k_2 e_3 + (k_1 e_1 + e_2)) \quad (\text{II.31})$$

$$\dot{\Psi} = \dot{\Psi}_3 \quad (\text{II.32})$$

$$\dot{\Psi} = \dot{\Psi}_3 = k_3 \dot{e}_4 + (k_2 \dot{e}_3 + (k_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2)) \quad (\text{II.33})$$

$$\dot{\Psi} = \dot{\Psi}_3 = k_3 (\dot{x}_4 - \ddot{y}_r) + (k_2 (x_4 - \dot{y}_r) + (k_1 (x_2 - \dot{y}_x) + (\dot{x}_2 - \ddot{y}_x))) = -\frac{\Psi_3}{T} \quad (\text{II.34})$$

$$k_3((f_2 + g_2 U) - \ddot{y}_r) + (k_2(x_4 - \dot{y}_r) + (k_1(x_2 - \dot{y}_x) + ((f_1 + g_1 U) - \ddot{y}_x))) = -\frac{\Psi_3}{T} \quad (\text{II.35})$$

$$U = -\frac{1}{g_1 + k_3 g_2} [(f_1 + k_3 g_2) - k_3 \ddot{y}_r + k_2 x_4 - k_2 \dot{y}_r + k_1 x_2 - k_1 \dot{y}_x - \ddot{y}_x + \frac{\Psi_3}{T}] \quad (\text{II.36})$$

**II.9 .1 Résultats de simulation :**

Les paramètres du système sont donnés par :  $m_c = 2.27kg, m_p = 2.24kg, l = 0.5m, g = 9.81$

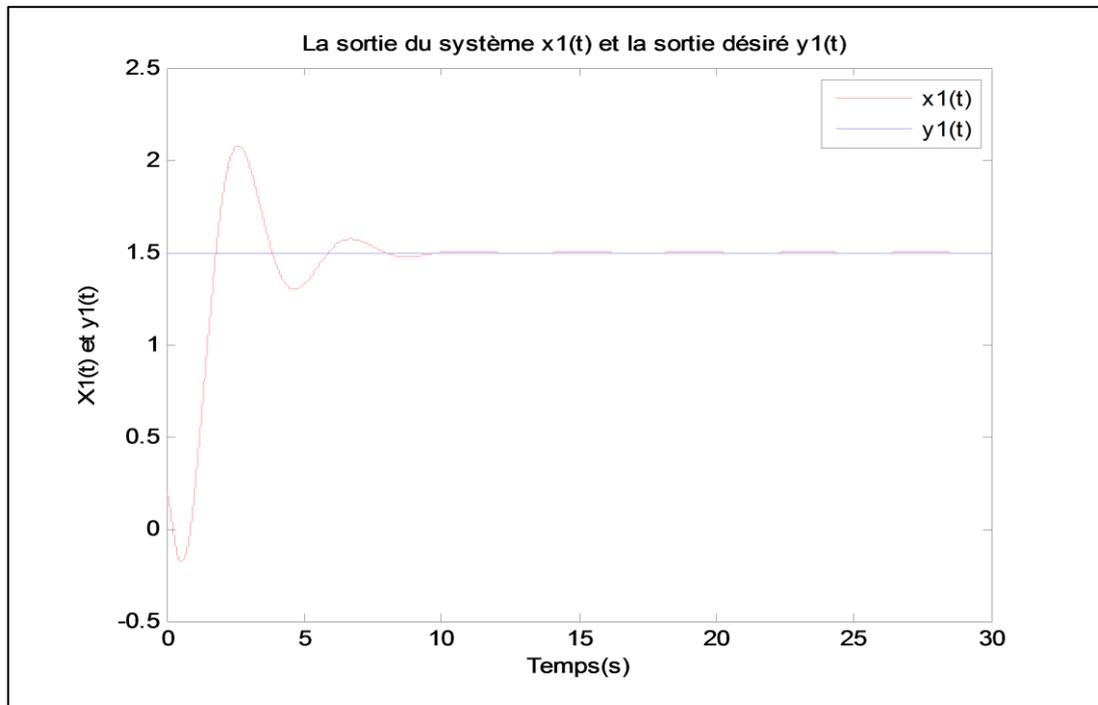
**II.9.1.1 Résultats de simulation sans perturbation :**

Les paramètres de conception du contrôleur proposé sont ainsi choisis :

$T=0,12 ; k_1=1.5 ; k_2=8 ; k_3=2 ;$

Le vecteur d'état initial est donné par :  $x = [0.5, 0, \pi/6, 0]^T$

Les résultats de simulation sont obtenus pour les conditions initiales :



**Figure II.14** La sortie du système x1(t) et la sortie désiré y1(t)

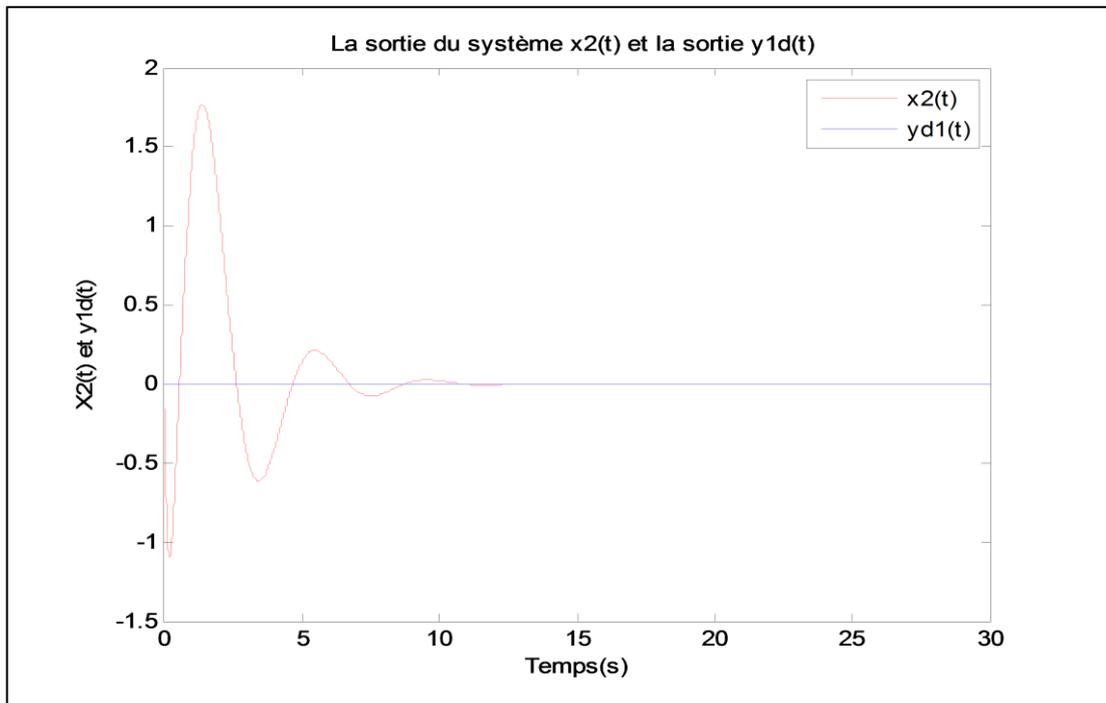


Figure II.15 La sortie du système  $x_2(t)$  et la sortie  $y_1(t)$

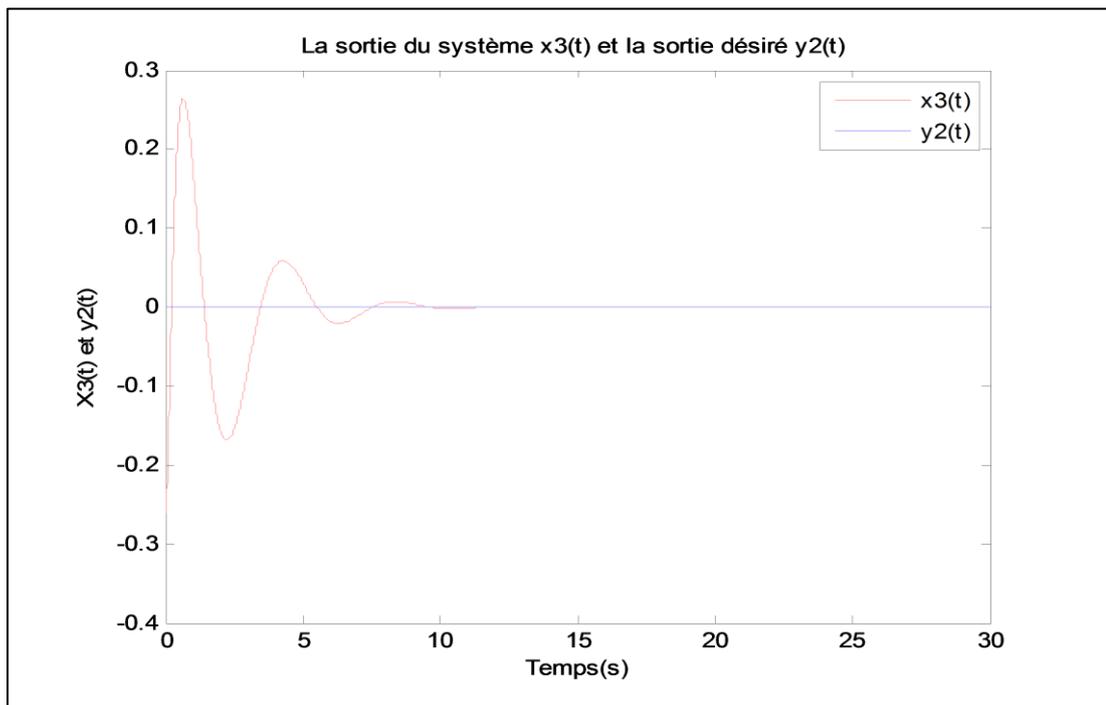


Figure II.16 La sortie du système  $x_3(t)$  et la sortie désiré  $y_2(t)$

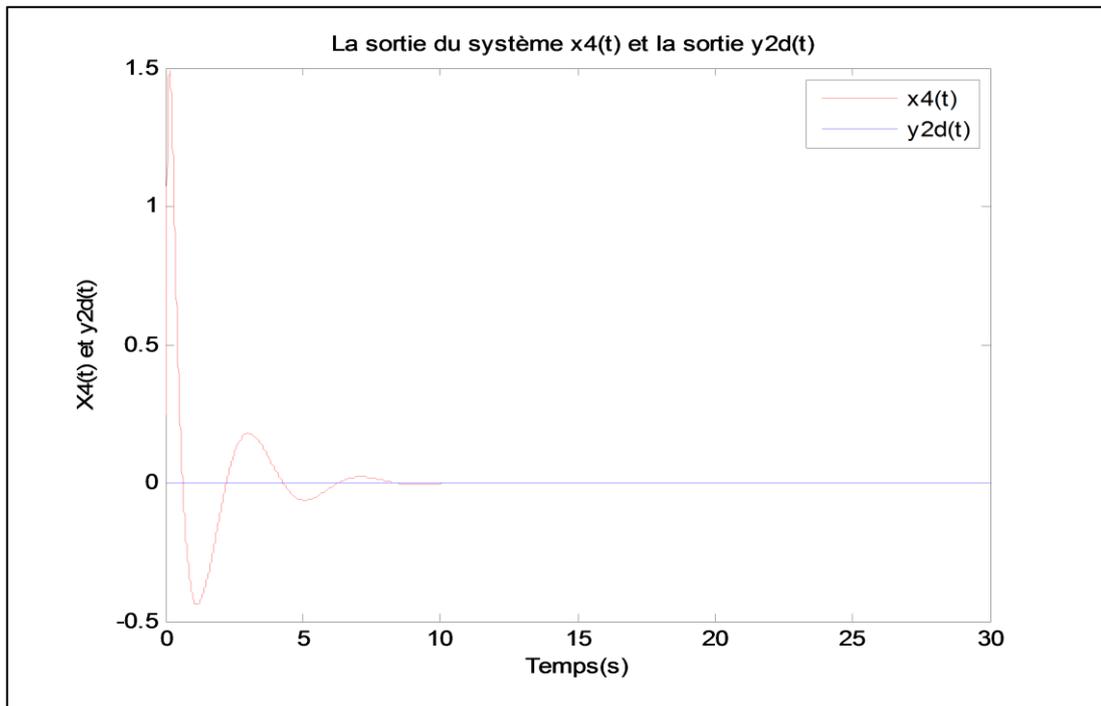


Figure II.17 La sortie du système  $x_4(t)$  et la sortie  $y_2(t)$

Les figures II.7 et II.9 montrent que le système est stable et les signaux de sortie convergent vers leurs références.

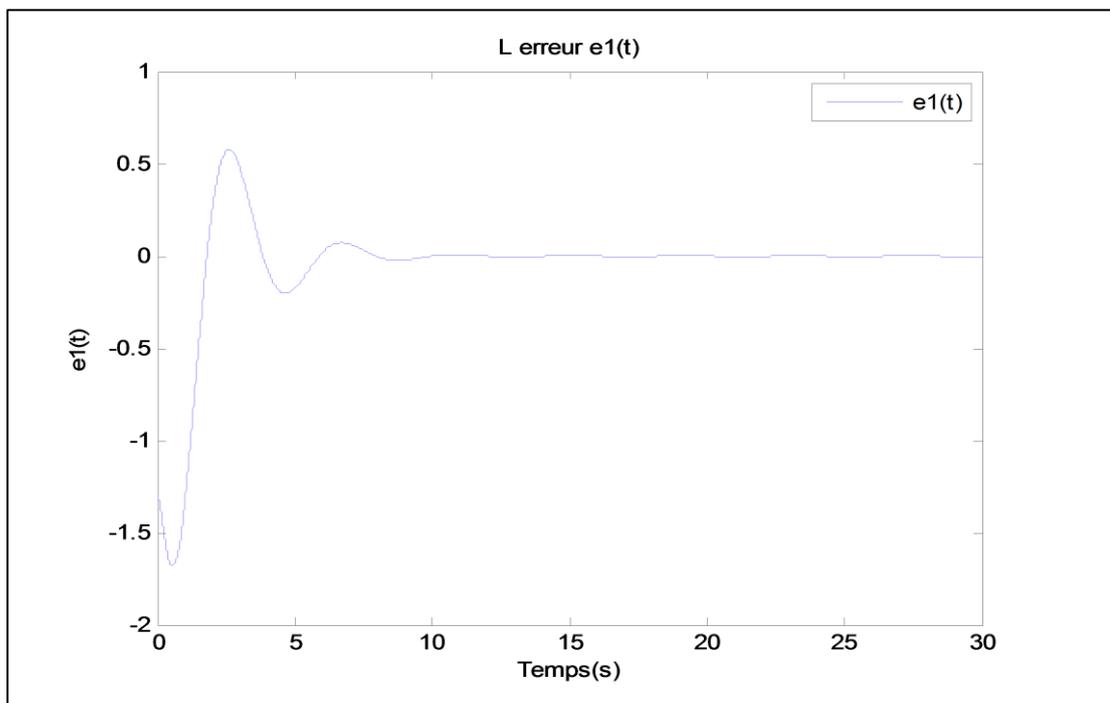


Figure II. 18 L'erreur  $e_1(t)$

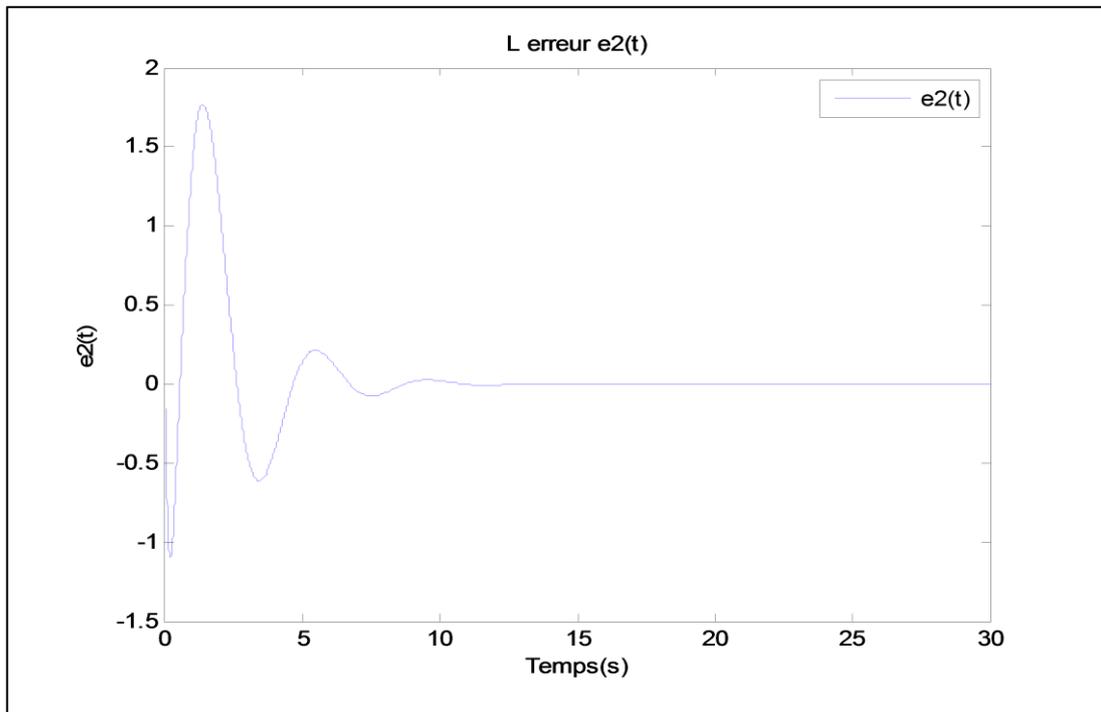


Figure II.19 L'erreur  $e_2(t)$

Les figures II.18 et II.19 représentent les erreurs, on peut remarquer que ces erreurs convergent vers zéro.

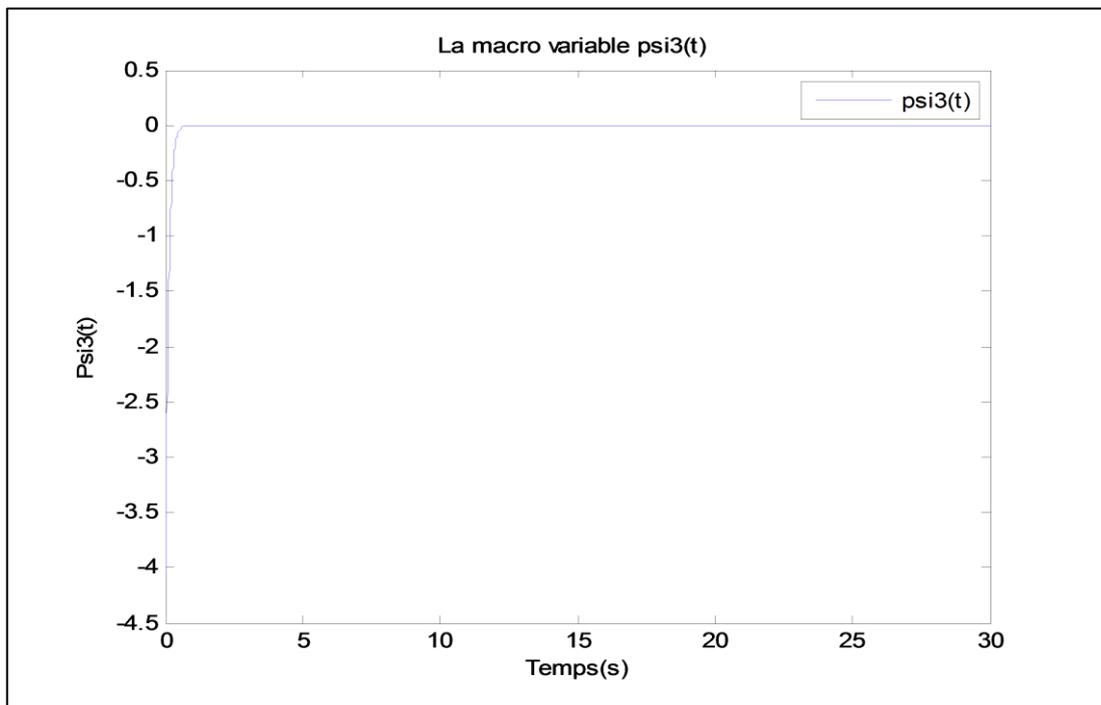


Figure II.20 La macro variable  $\psi_3(t)$

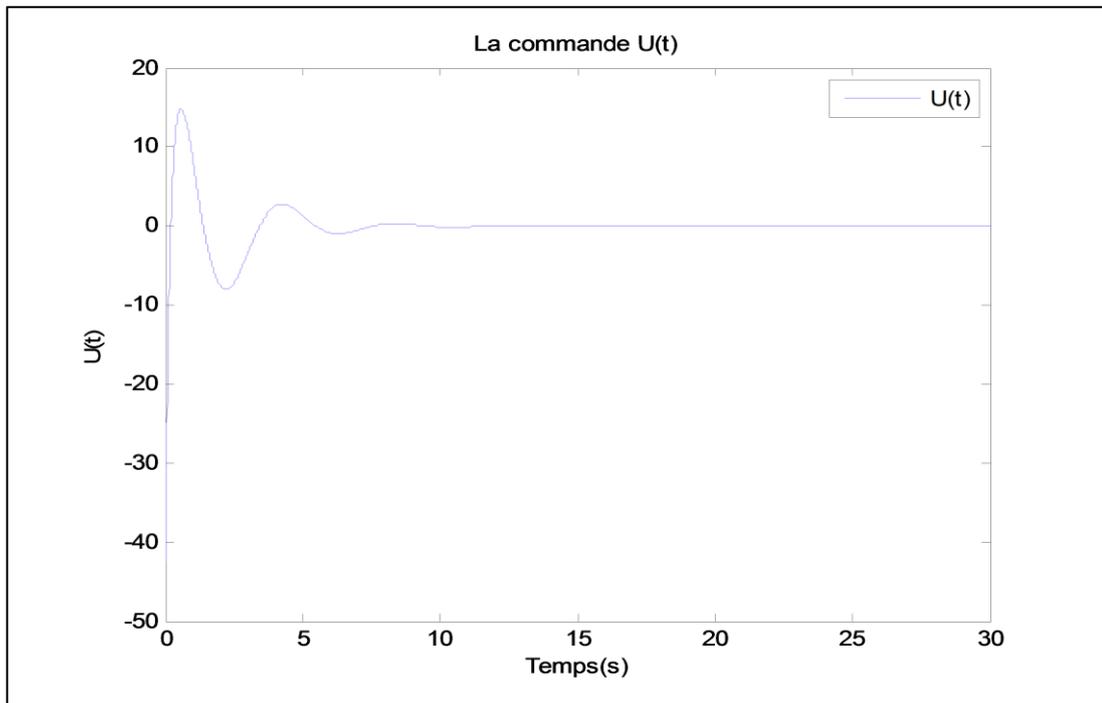


Figure II.21 La commande U(t)

Le signal de commande  $U(t)$  est représenté par la figure II.21, ce signal est stable et lisse

### II.9 .1.2 Résultats de simulation avec perturbations :

Les paramètres de conception du contrôleur proposé sont ainsi choisis :

$T=0,12$  ;  $k_1=1.5$  ;  $k_2=8$  ;  $k_3=2$  ;

Le vecteur d'état initial est donné par :  $x = [0.5, 0, \pi/6, 0]^T$

Les résultats de simulation sont obtenus pour les conditions initiales :

Le perturbation externe :  $d=0.5*\sin(0.01*t)$  et appliquée à l'instant 19 second

La masse du pendule est donnée par :  $m_p=2.3+0.01*\text{rand}(1,tf)$

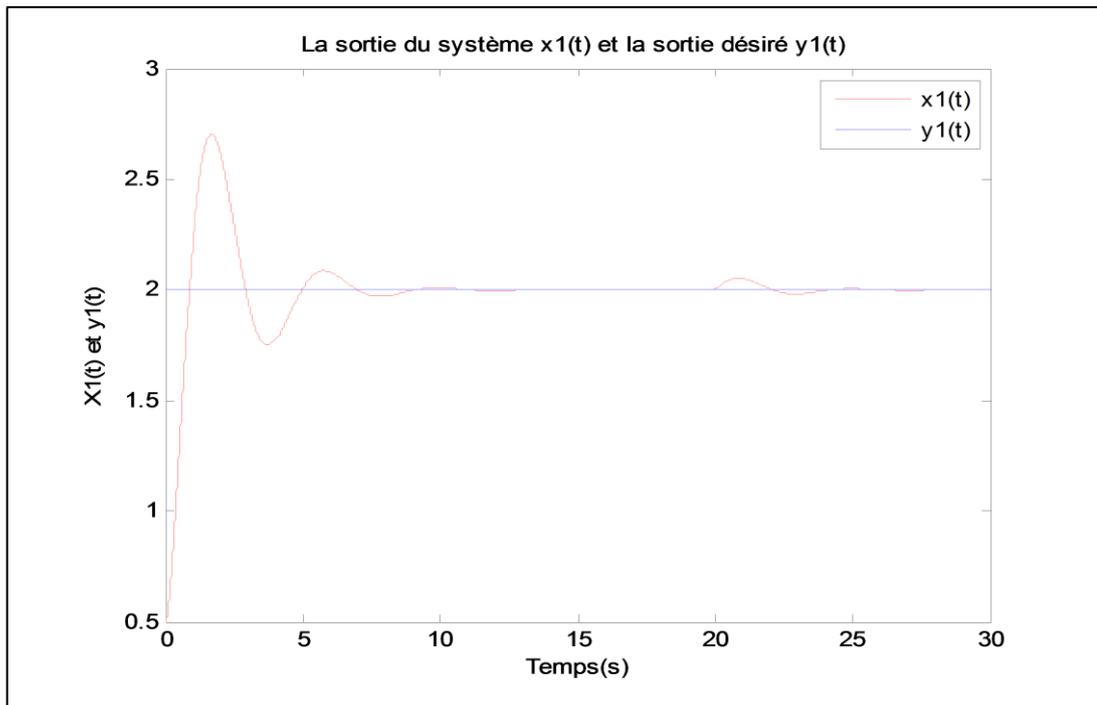


Figure II.22 La sortie du système  $x_1(t)$  et la sortie désiré  $y_1(t)$

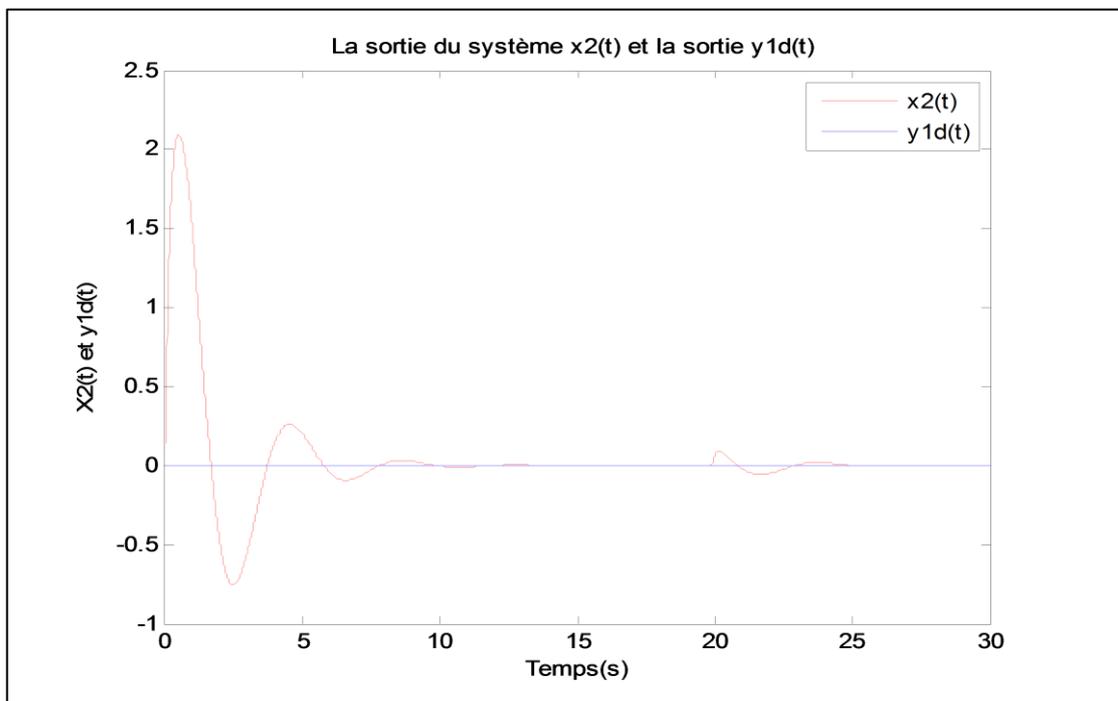


Figure II.23 La sortie du système  $x_2(t)$  et la sortie  $y_1d(t)$

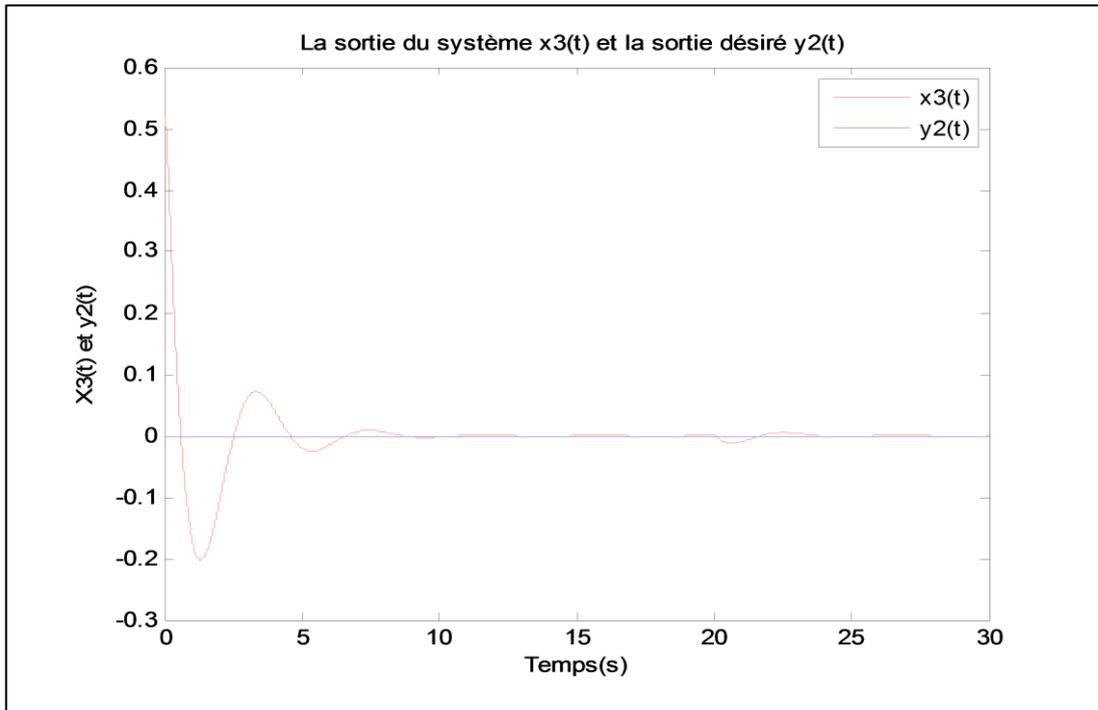


Figure II.24 La sortie du système  $x_3(t)$  et la sortie désiré  $y_2(t)$

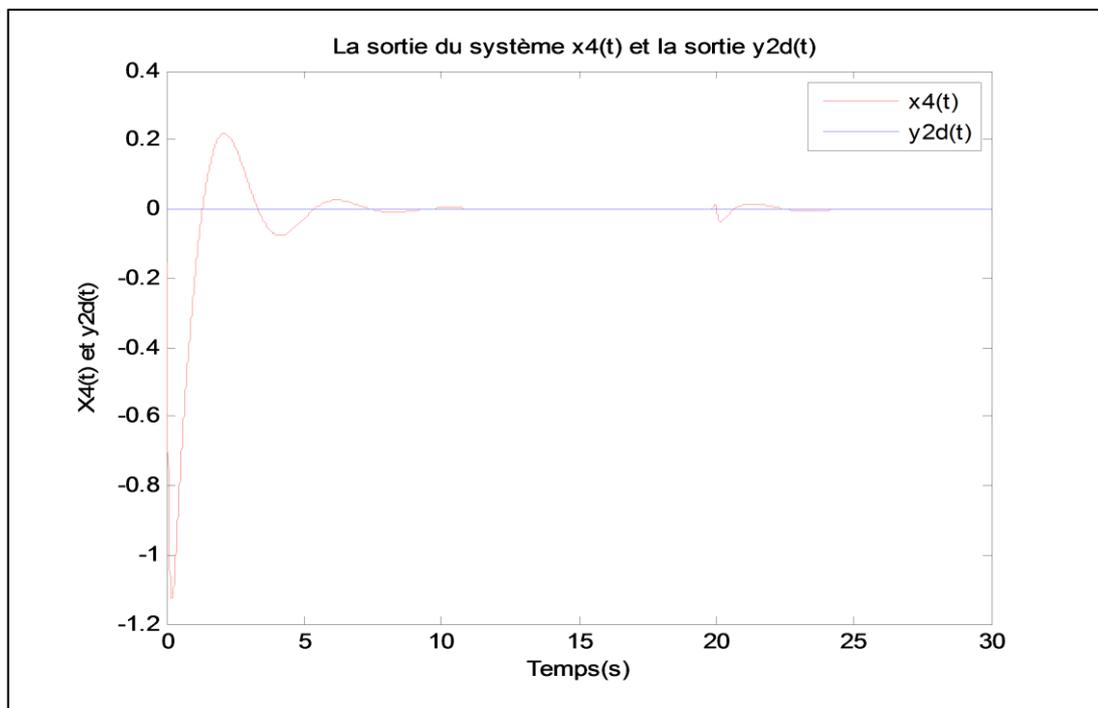


Figure II.25 La sortie du système  $x_4(t)$  et la sortie  $y_2(t)$

D'après les figures II.24 et II.25, on peut voir que le système reste stable, et les signaux de sortie suivent leurs références, malgré la présence des perturbations paramétrique, et après avoir injecté la perturbation externe. Ce qui prouve la robustesse de notre commande.

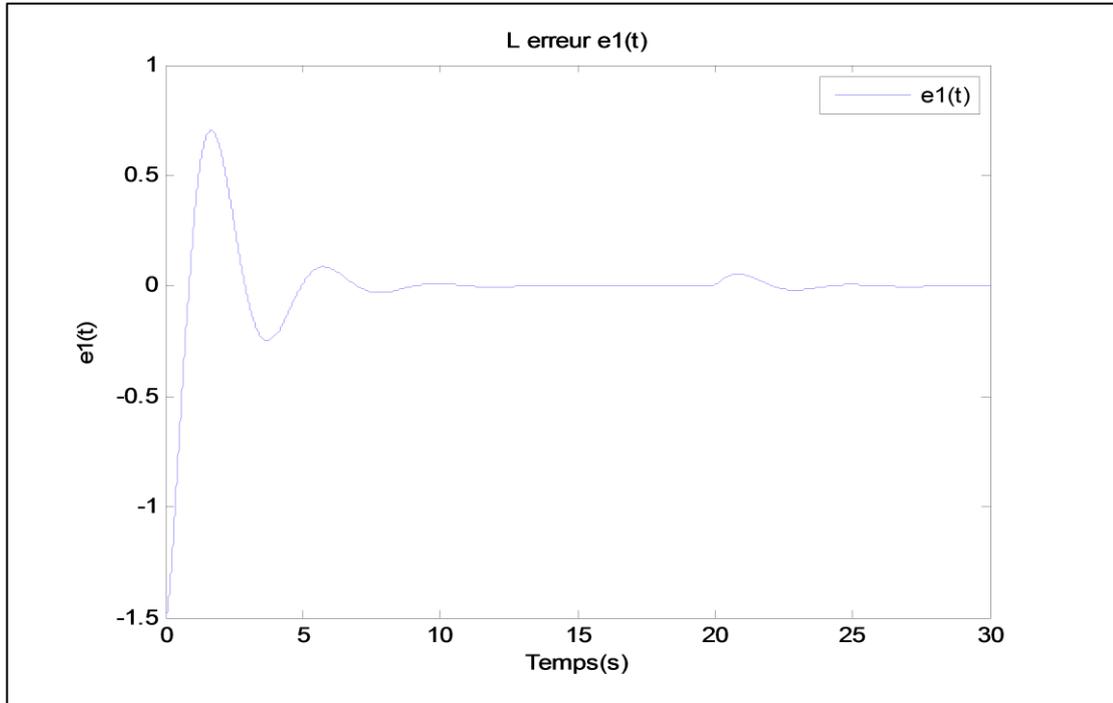


Figure II.26 L erreur e1(t)

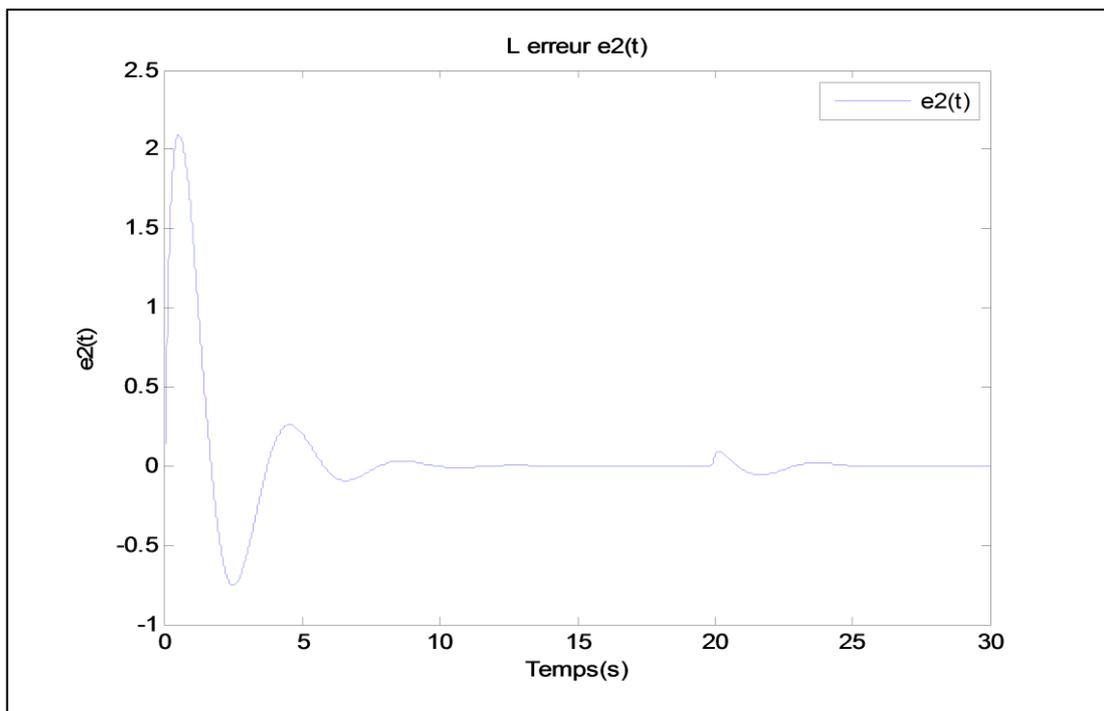


Figure II.27 L erreur e2(t)

Les figures II.26 et II.27 montrent que les erreurs convergent vers zéro.

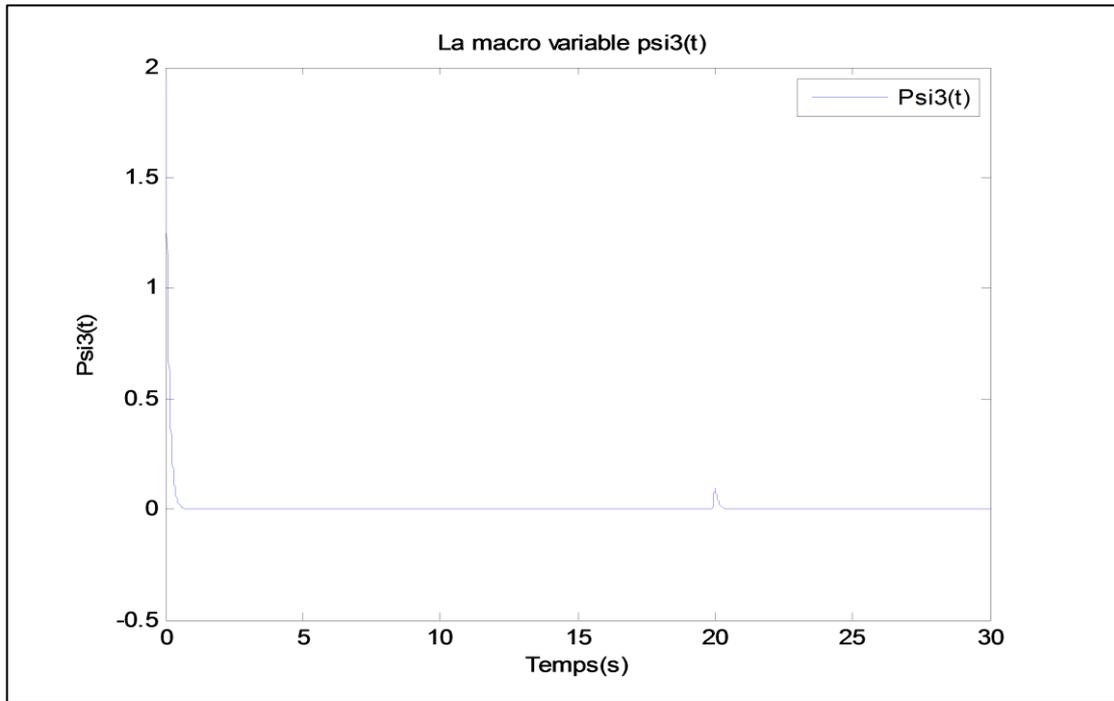


Figure II.28 La macro variable  $\psi_3(t)$

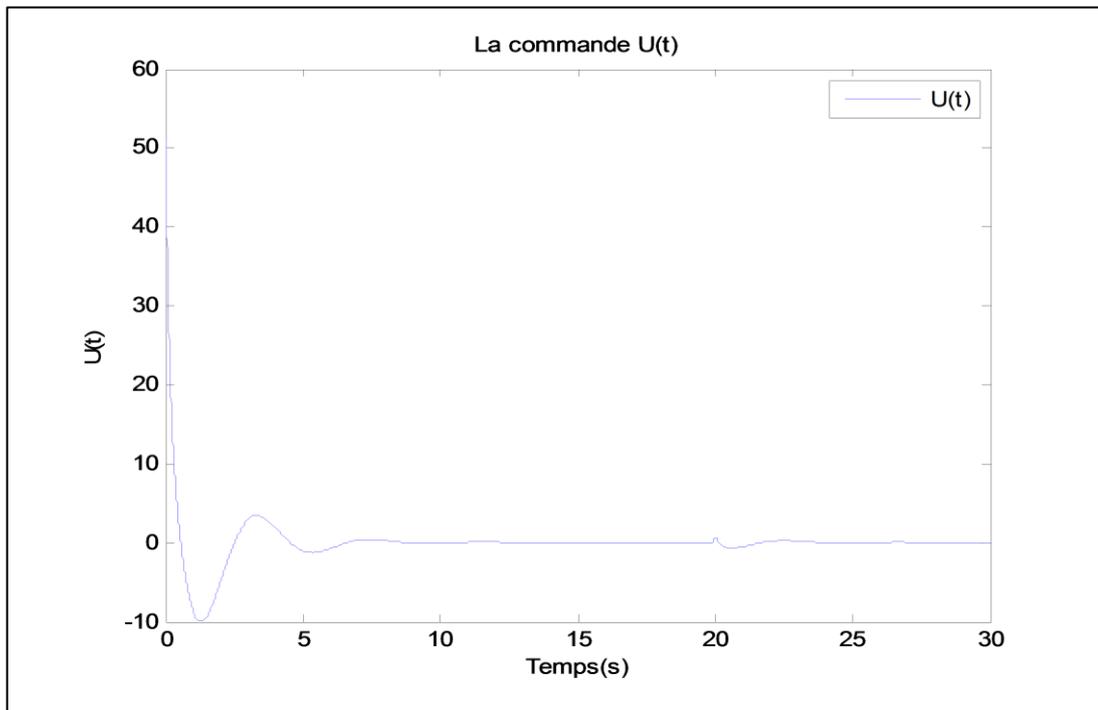


Figure II.29 La commande  $U(t)$

La figure II.29 représente le signal de commande, ce dernier est lisse et stable en présence des perturbations.

**II.10 Conclusion :**

Dans ce chapitre , nous avens présente la théorie de la commande synergétique ,sans principe et se caractéristique .

Cette commande est connue par sa robustes ,et sa simplicité et sa propriété de réduction d'ordre .

Parmi les commandes robustes modernes la commande par mode glissant , la commande hinfini ... etc ,c'est la commande synergétique qui est la plus réalisable en pratique .

Pour justifie l' intérêt de cette commande une application sur un simple pendule inverse est faite .

Les résultats de simulation ont montré l'efficacité et la robustesse de la commande synergétique.

**Chapitre III :**  
**Optimisation par**  
**Essaim Particulaire**  
**(PSO)**

**III.1 Introduction :**

En engineering plusieurs problèmes nécessitent l'utilisation des méthodes d'optimisation pour s'approcher ou avoir la solution optimale. Les méthodes déterministes semblent avoir rempli ce besoin, mais le problème des optimums locaux constitue un véritable piège pour accéder à l'optimum global. D'où, l'utilisation des méthodes stochastiques dites méta-heuristiques qui, en général, évitent ce problème et ayant une grande capacité de trouver l'optimum global .

Parmi ces méthodes méta-heuristiques, on trouve l'optimisation de l'essaim de particules (PSO), qui est un algorithme d'optimisation, basé sur l'essaim intelligent. L'algorithme PSO est initialisé avec une population d'une solution candidate aléatoire. L'essaim intelligent est créée par la coopération et la concurrence des particules entre population, la recherche PSO a un arrière-plan intelligent beaucoup plus profond et pourrait être effectué facilement et simplement. En basant sur ses avantages, le PSO a été appliqué dans l'optimisation des fonctions, et dans l'intelligence artificielle telle que le réseau neuronal, et la commande floue et dans certains d'autres domaines à l'heure actuelle.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthode d'optimisation PSO, comment formuler un problème d'optimisation, et montrer l'algorithme de base qui permet de résoudre ce problème. Ensuite nous allons appliquer cette méthode à un système sous actionné, en vue d'avoir des performances améliorées du système, tout en choisissant les bons paramètres du contrôleur.

**III.2. Introduction à l'optimisation par l'essaim particulaire:**

Les méta-heuristiques, sont des méthodes d'optimisation permettant d'obtenir une valeur approchée de la solution optimale en un temps raisonnable. L'optimisation d'essaim de particules (PSO) fait partie de ces méthodes, c'est un nouvel algorithme de l'érudition computationnelle, introduit en premier par James Kennedy et Russell Eberhart en 1995. Elle porte quelque ressemblance avec la computation évolutionnaire, inspiré par le comportement social des oiseaux s'assemblant ou le banc de poissons figure (IV.2)[24].

Depuis son apparition, PSO a gagné la popularité croissante parmi les chercheurs et les praticiens comme une technique robuste et efficace pour résoudre des problèmes d'optimisation difficiles.



**Figure III.30** Groupe de : oiseaux



**Figure III.31** Groupe de : abeilles

Le PSO est basée sur les « interactions sociales », entre des « agents » appelés « particules », dans le but d'atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun, où chaque particule a une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information [25].

L'objectif de PSO est trouver l'optimum global de quelque multidimensionnelle (habituellement non linéaire) fonction et avoir les particules converger sur l'optimum de la fonction, beaucoup comme un essaim d'oiseaux convergeant vers sa destination. L'algorithme a prouvé son efficacité à résoudre beaucoup de problèmes d'optimisation.

Les particules sont distribuées initialement aléatoirement à travers l'espace de recherche et sont dotées d'une vitesse initiale. Chaque particule se tient au courant de son emplacement et aptitude (la valeur de la fonction qui est optimisée), aussi bien que la meilleure place (et aptitude correspondante) elle a rencontré si loin dans son vol.

Avec le temps, la vitesse de chaque particule est ajustée afin qu'elle se déplace vers sa propre meilleure place et la meilleure place trouvée par une autre particule dans son voisinage.

Le voisinage d'une particule est le sous-ensemble de particules dans l'essaim avec lequel elle a un lien direct. Ce réseau de rapports entre toutes les particules est connu comme la sociométrie, ou topologie de l'essaim.

L'algorithme PSO s'arrête quand un critère est satisfait. Il donne souvent de meilleurs résultats d'une manière plus rapide, comparé à d'autres méthodes. Une autre raison pour laquelle PSO est attrayant c'est qu'il y a peu de paramètres à ajuster.

PSO a été appliquée avec succès dans de nombreux domaines: la fonction d'optimisation, la formation de réseaux de neurones artificiels, les contrôleurs flous, et d'autres zones où les algorithmes évolutionnaires peuvent être appliqués.[26]

### **III.3 Définition de la méthode :**

Dans la méthode de PSO, le comportement social est modélisé par une équation mathématique, permettant de guider les particules durant leur processus de déplacement [26]. Le déplacement d'une particule est influencé par trois composantes : la composante d'inertie, la composante cognitive et la composante sociale.

Chacune de ces composantes reflète une partie de l'équation, figure 2.1 [27] :

- 1) La composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- 2) La composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- 3) La composante sociale : la particule tend à se diriger vers le meilleur site atteint par ses voisins. [28]

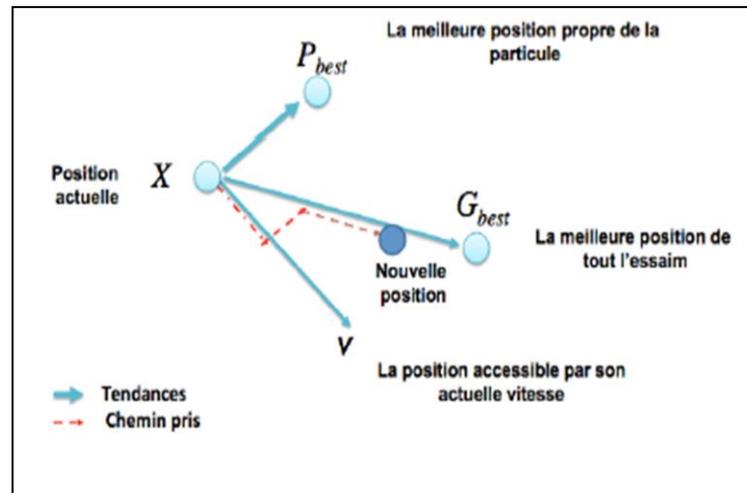


Figure III.32 Déplacement d'une particule[28]

### III.4 Définitions de base :

Avant d'entamer les concepts de base de l'optimisation d'essaim de particules, il est préférable de donner un bref aperçu sur l'optimisation en notant que les définitions présentées sont liées à un problème de minimisation.

#### III.4.1 Définition de l'optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation

#### III.4.2 Fonction Objective :

C'est le nom donné à la fonction  $f$  (on l'appelle aussi fonction de coût ou critère d'optimisation). C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (Trouver un optimum soit un minimum ou un maximum).

#### III.4.3 Variables de décision :

Elles sont regroupées dans le vecteur  $\vec{x}$ . C'est en faisant varier ce vecteur que l'on recherche un optimum de la fonction  $f$ .

**III.4.4 Formulation d'un problème d'optimisation :**

Un problème d'optimisation est présenté sous la forme suivante :

$$\text{Minimiser } f(\vec{x}) \quad (\text{fonction à optimiser}) \quad (\text{III.1})$$

$$\text{Sujet de : } \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \quad (m \text{ contraintes d'inégalité}) \quad (\text{III.2})$$

$$\vec{h}(\vec{x}) = 0 \quad (p \text{ contraintes d'égalité}) \quad (\text{III.3})$$

Avec ,  $\vec{x} \in R^n$  ,  $\vec{g}(\vec{x}) \in R^m$  ,  $\vec{h}(\vec{x}) \in R^p$

Les vecteurs  $\vec{g}(\vec{x})$  et  $\vec{h}(\vec{x})$  représentent respectivement  $m$  contraintes d'inégalité et  $p$  contraintes d'égalité.

**III.4.5 Minimum global :**

On a la fonction  $f : \Omega \subseteq R^n \rightarrow R$  , tel que  $\Omega \neq \emptyset$  . Pour  $x^* \in \Omega$  , on dit que  $x^*$  est un optimum

global si et seulement si :

$$\forall x \in \Omega : f(x^*) \leq f(x) \quad (\text{III.4})$$

Tel que :

$x^*$  : L'optimum global.

$f$  : La fonction objective.

$\Omega$  : La région faisable  $\Omega \in s$  .

$s$  : L'espace de recherche global.

Le minimum global est illustré par le point M3 dans la Figure (III.1).

**III.4.6 Minimum local :**

Un point  $x^*$  est un minimum local de la fonction  $f$  si et seulement si :

$$f(x^*) < f(x), \forall (x^*) \text{ et } x^* \neq x \quad (\text{III.5})$$

D'où  $V(x^*)$  définit un voisinage de  $x^*$  .

Deux minimums locaux sont illustrés dans la figure (III.1) sont les points M1 et M2.

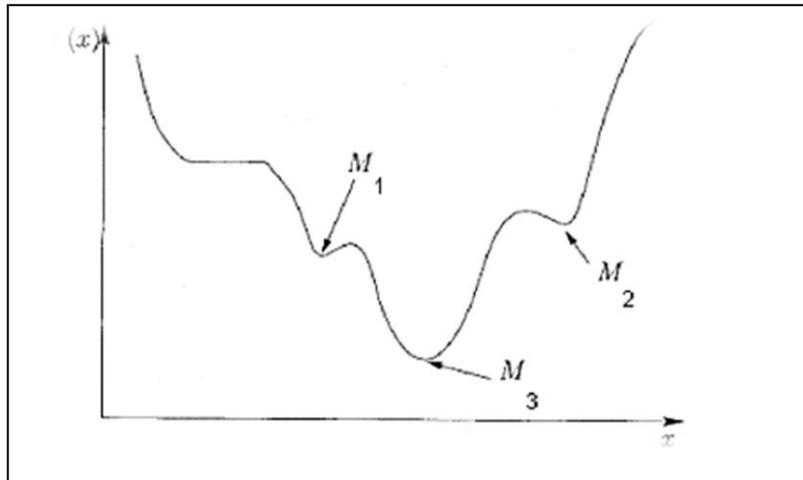


Figure III.33 Illustration des différents minima d'une fonction objective.

### III.5 Conception et Déroulement de l'algorithme :[31]

Pour expliquer le principe de l'algorithme PSO, appliqué pour résoudre un problème de minimisation ou de maximisation, considérons le problème d'optimisation:

$$\min\{f(x_j)\}, \quad j=1, 2, 3, \dots \quad (\text{III.6})$$

La fonction fitness associée est:

$$\text{fitness}(x_j) = f(x_j) \quad (\text{III.7})$$

L'algorithme PSO se déroule suivant les étapes suivantes:

**Etape 1:** initialiser une population de particules et de vitesses, uniformément réparties dans l'espace de recherche, et fixer le critère d'arrêt .

**Etape 2:** évaluer la fonction objectif, pour chaque particule .

**Etape 3:** mettre à jour la meilleure position \_\_\_\_\_ pour chaque particule et la meilleure position globale  $H$ \_\_\_\_\_ dans la population.

**Etape 4:** mettre à jour la position et la vitesse .

**Etape 5:** si une particule, déplacée par l'algorithme vers la limite ou à l'extérieur de l'espace de recherche, le mécanisme de confinement des particules Intervient et ramène la particule à l'intérieur de l'espace de recherche.

**Etape 6:** vérifier le critère d'arrêt. Si le critère d'arrêt n'est pas satisfait, aller vers l'étape 2; sinon, le programme se termine, et la solution optimale est produite.

La figure (III-5) montre l'organigramme général de la méthode PSO :

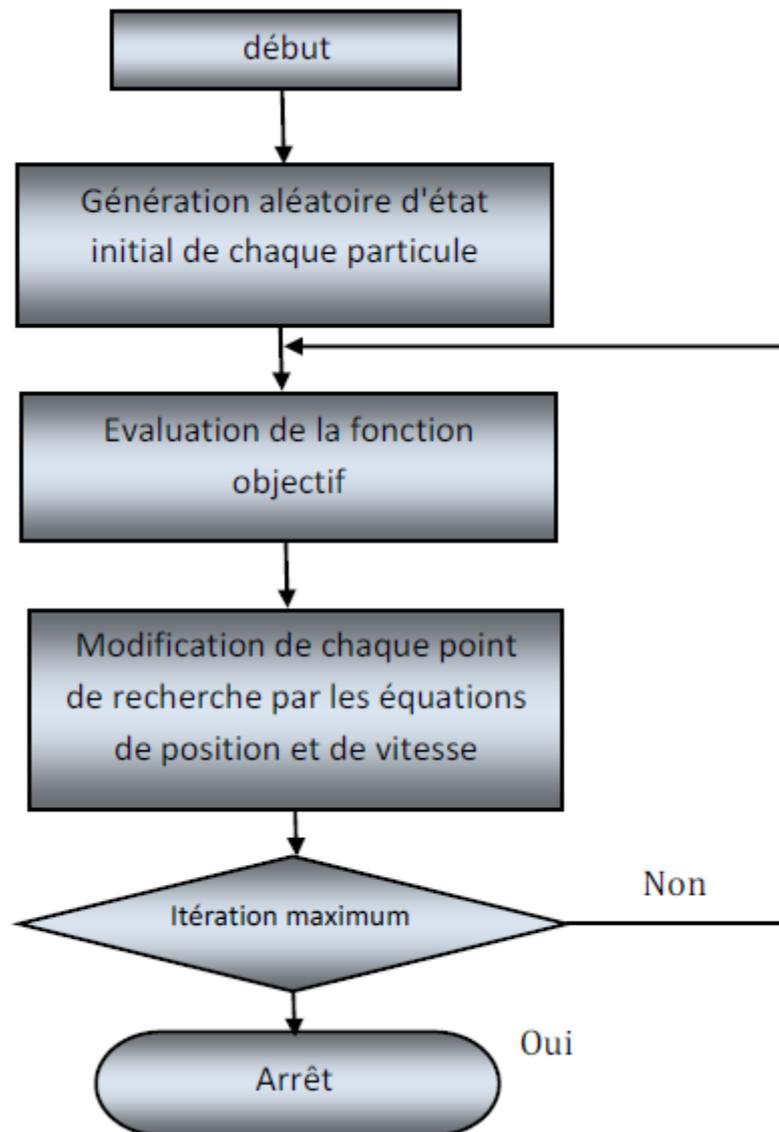


Figure III.34 Organigramme général de la méthode PSO [28]

### III.6 Principe de l'Algorithme PSO :

Dans le PSO, chaque individu de la population est dit (particule), tandis que la population est connue sous le nom (swarm). Il faut noter, que la particule peut bénéficier des mouvements des autres particules dans la même population pour ajuster sa position et sa vitesse durant le processus d'optimisation. Chaque individu utilise l'information locale à laquelle il peut accéder sur le déplacement de ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles très simples comme "rester proche des autres individus",

“aller dans la même direction”, “aller à la même vitesse” suffisent pour maintenir la cohésion du groupe tout entier[29].

Au départ de l’algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l’espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps : Chaque particule est capable d’évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c’est-à-dire la meilleure position qu’elle a atteinte jusqu’ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).

Chaque particule est capable d’interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d’obtenir de chacune d’entre elles sa propre meilleure performance.

A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance, modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c’est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse. Pour ce faire, elle combine trois informations :

Sa vitesse actuelle.

Sa meilleure position actuelle.

La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisins.

Le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l’exploration de l’espace de recherche.

Naturellement, pour pouvoir être programmé, tout ceci est formalisé dans des équations de mouvement. Un point intéressant est que, contrairement à bien d’autres heuristiques qui restent purement expérimentales, il existe une analyse mathématique précisant les conditions de convergence et le choix des paramètres [30].

### **III.7 Critères d’évaluation de performances :[28]**

La quantification de la performance du système est obtenue grâce à un indice de performance. les performances choisi dépend du processus en cours d’examen est choisi de telle sorte qu’on insiste sur les aspects spécifiques de la performance du système. Les indices de performances préférés en ingénierie de commande incluent l’intégrale de l’erreur carrée (ISE) indice (III.8), Intégral de temps multiplié par l’erreur carrée (ITSE) indice (III.9),

l'intégrale de l'erreur absolue (IAE) indice (III.10) et l'intégrale de temps multiplié par l'erreur absolue (ITAE) indice (III.9).

L'indice ISE:

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (III.8)$$

les caractéristiques de cet indice de performance est qu'il pénalise lourdement les grandes erreurs et légèrement les petites erreurs. Un système conçu par ce critère tend à montrer une diminution rapide pour une grande erreur initiale. D'où la réponse est rapide et oscillatoire menant à un système qui a une mauvaise stabilité relative.

L'indice ITSE:

$$ITSE = \int_0^{\infty} t.e^2(t) dt \quad (III.9)$$

Ce critère met peu l'accent sur les erreurs initiales et pénalise fortement les erreurs se produisant vers la fin de la réponse transitoire à une entrée échelon.

L'indice IAE:

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (III.10)$$

Les systèmes basés sur cet indice pénalisent l'erreur de commande.

L'indice ITAE:

$$ITAE = \int_0^{\infty} t.|e(t)| dt \quad (III.11)$$

Un système est conçu en utilisant ce critère ait des petits dépassements et oscillations amorties bien. Toute grande erreur initiale à un échelon-réponse est pénalisé légèrement tandis que des erreurs se produisent plus tard dans la réponse sont pénalisés lourdement. L'indice de performance ITAE est utilisé dans cette étude.

**III.8 Application de la méthode PSO sur un système sous actionné :**

Afin d'améliorer les performances de notre système « Pont Roulant », étudié dans la chapitre précédent, nous avons appliqué la méthode d'optimisation PSO, qui a permet de trouver les paramètres optimums des macro-variables et de notre contrôleur suivants : T, k1, k2 et k3 et qui satisfait les fonctions du cout des deux sous-systèmes, suivantes :

$$F1 = \int_0^{\infty} t |e_1| dt \quad (\text{III.12})$$

$$F2 = \int_0^{\infty} t |e_3| dt \quad (\text{III.13})$$

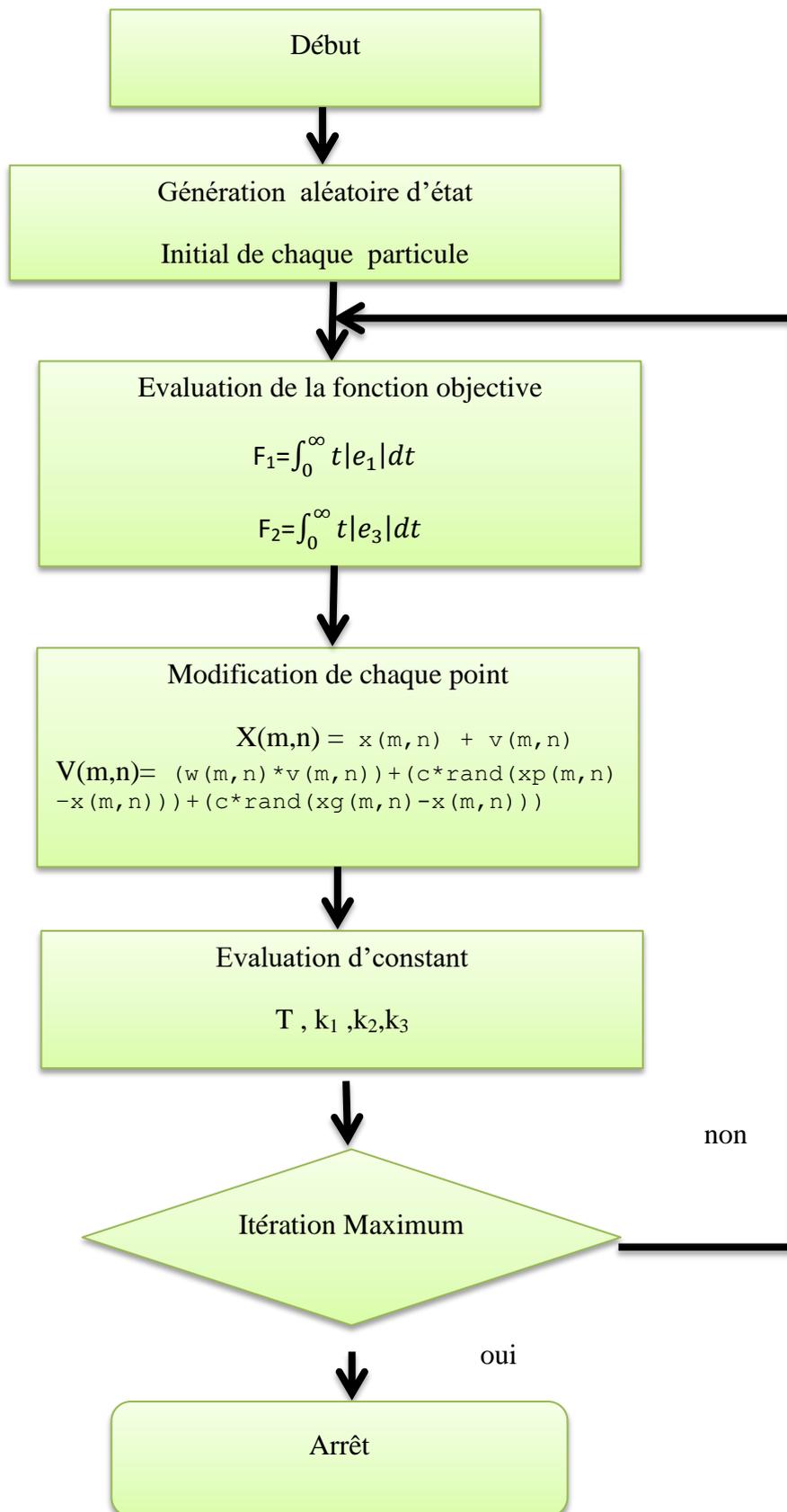


Figure III.35 Organigramme de la méthode PSO don système (pont roulant)

Tels que : « x » et « v » sont respectivement la position et la vitesse de chaque particule.

« m » est le nombre de particules

« n » est le nombre de variables à optimiser

### III.9 Résultats de simulation :

Les paramètres du système sont donnés par :  $m_c = 2.27kg, m_p = 2.24kg, l = 0.5m, g = 9.81$

Nombre de particules = 10 ;

Itération maximale = 35 ;

C = 2;

W = 0.9;

#### Condition initiale :

$X = [0.01, 0, \pi/12, 0]$

$Y_1 = 0.5 ; Y_2 = 0$

Les résultats de simulation de la commande synergétique obtenus par PSO

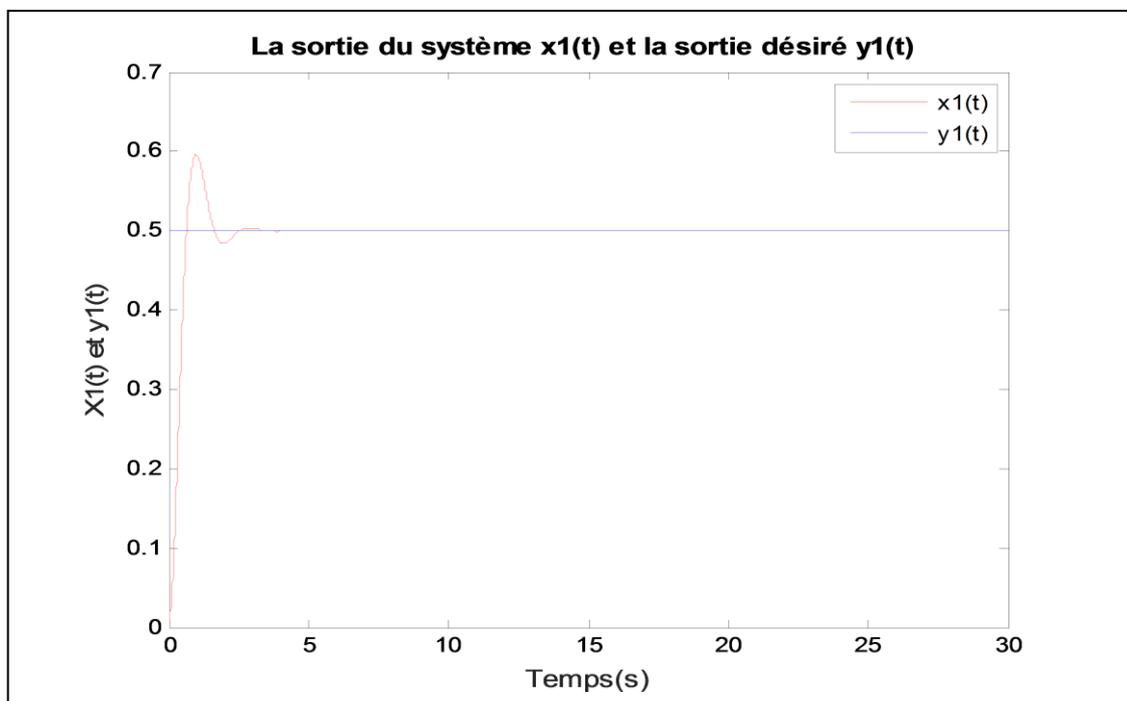


Figure III.36 La sortie du système x1(t) et la sortie désirée y1(t)

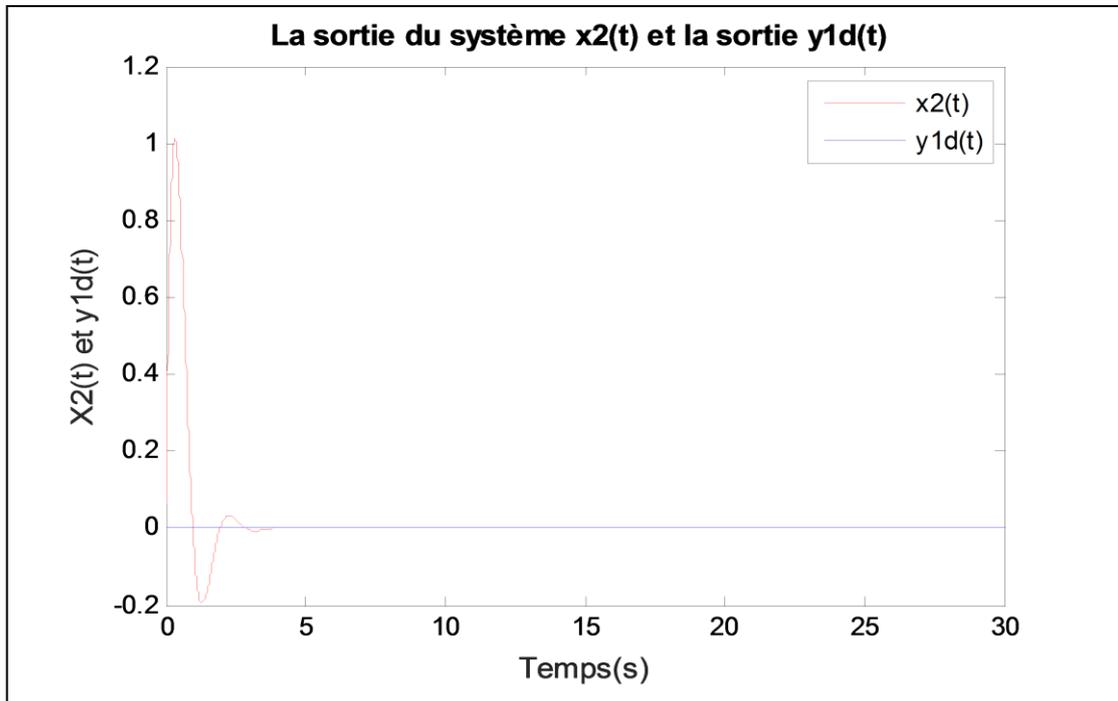


Figure III.37 la sortie du système  $x2(t)$  et la sortie  $y1(t)$

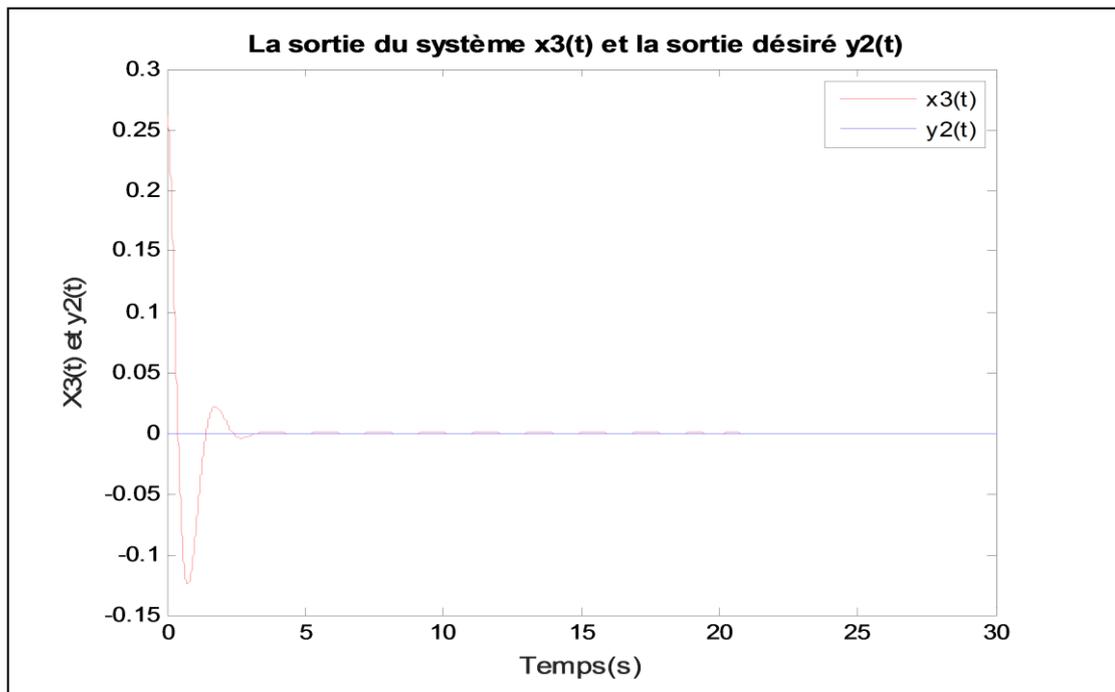


Figure III.38 La sortie du système  $x3(t)$  et la sortie désiré  $y2(t)$

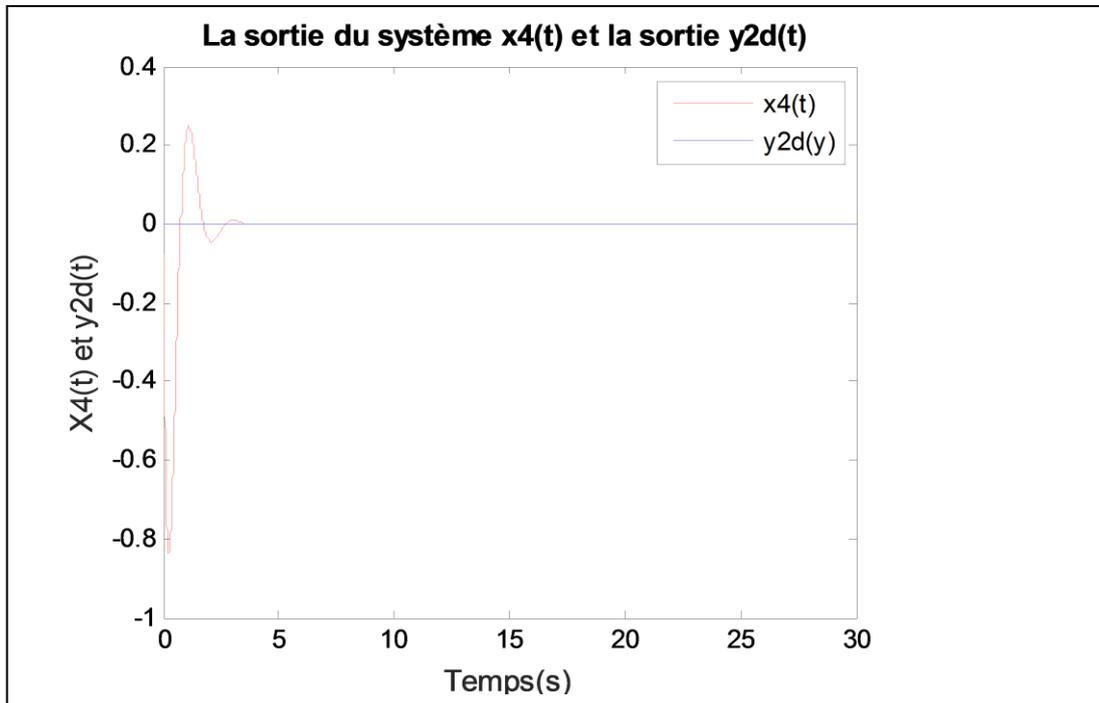


Figure III.39 La sortie du système  $x_4(t)$  et la sortie  $y_{2d}(t)$

Les figures (III.36), (III.38) et montrent que le système est stable et les signaux de sortie convergent vers leurs références avec un temps de réponse minimal.

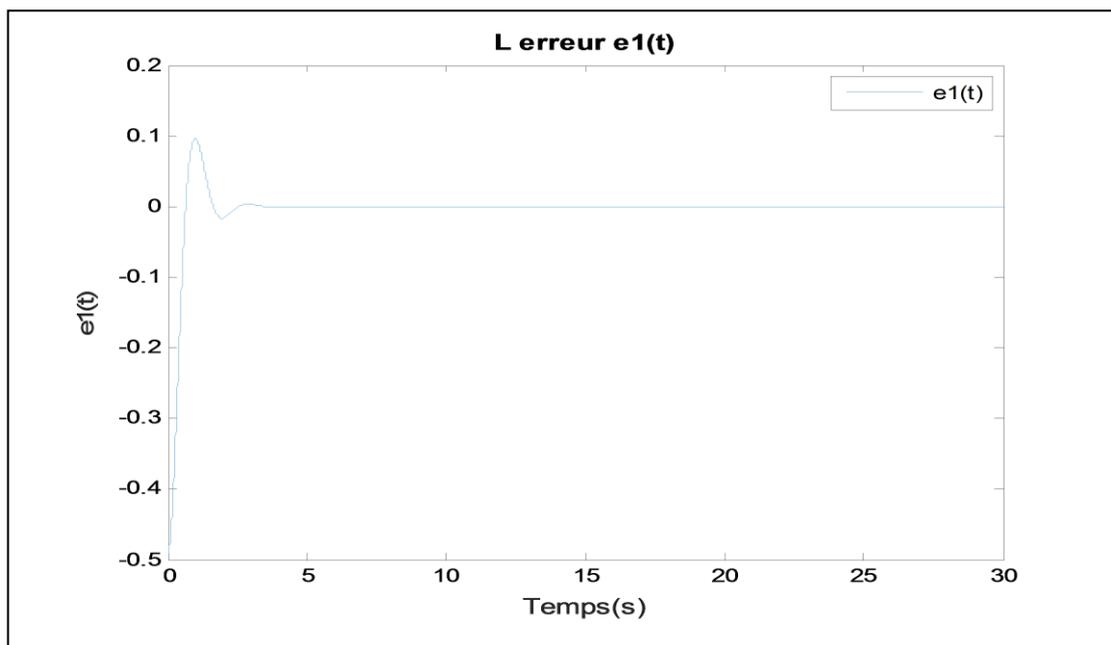


Figure III.40 L erreur  $e_1(t)$

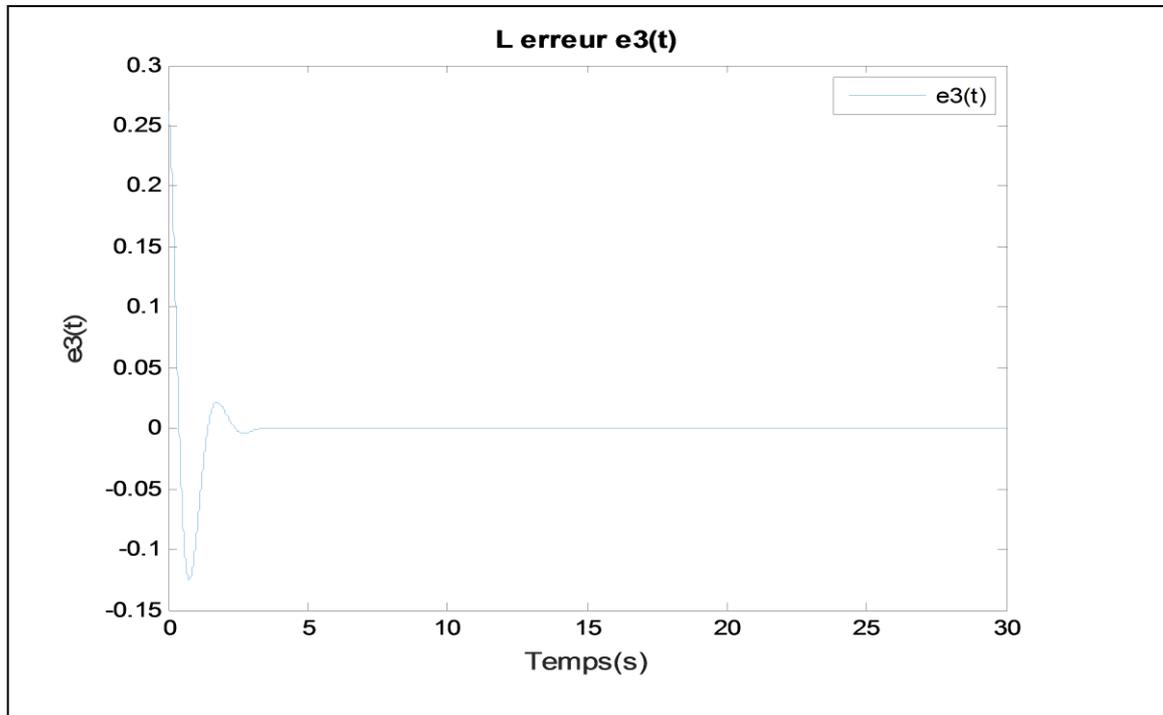


Figure III.41 L erreur  $e_3(t)$

Les figures (III.40) et (III.41) représentent les erreurs, on peut remarquer que ces erreurs convergent vers zéro.

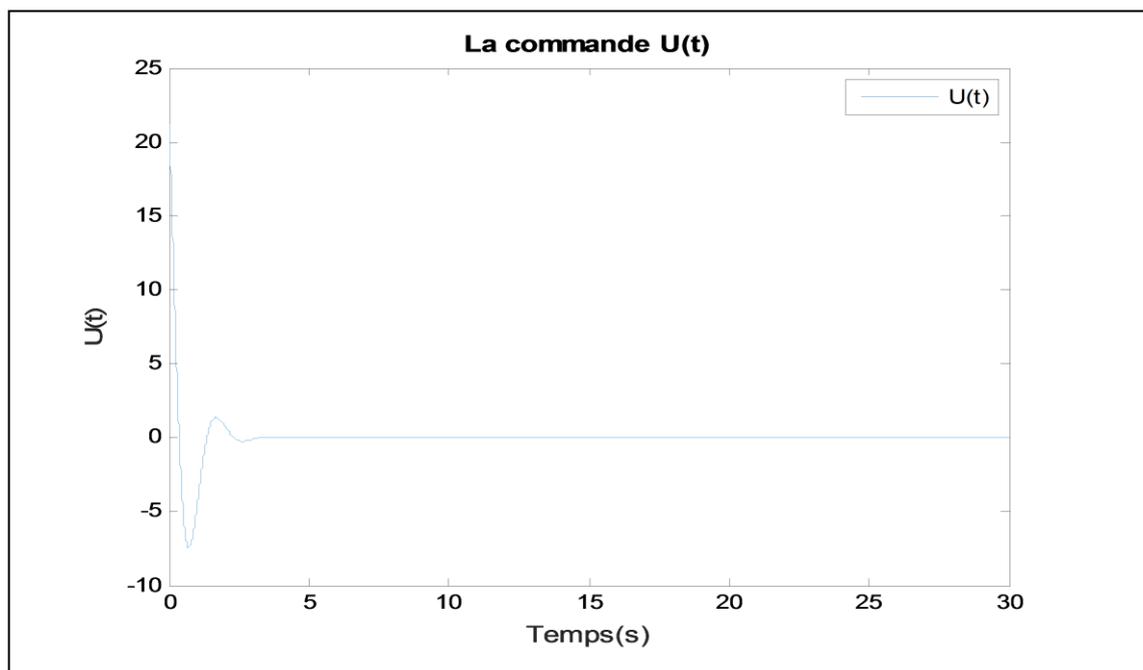


Figure III.42 La commande  $U(t)$

Le signal de commande  $U(t)$  par la méthode PSO est représenté par la figure (III.42), ce signal est stable et lisse

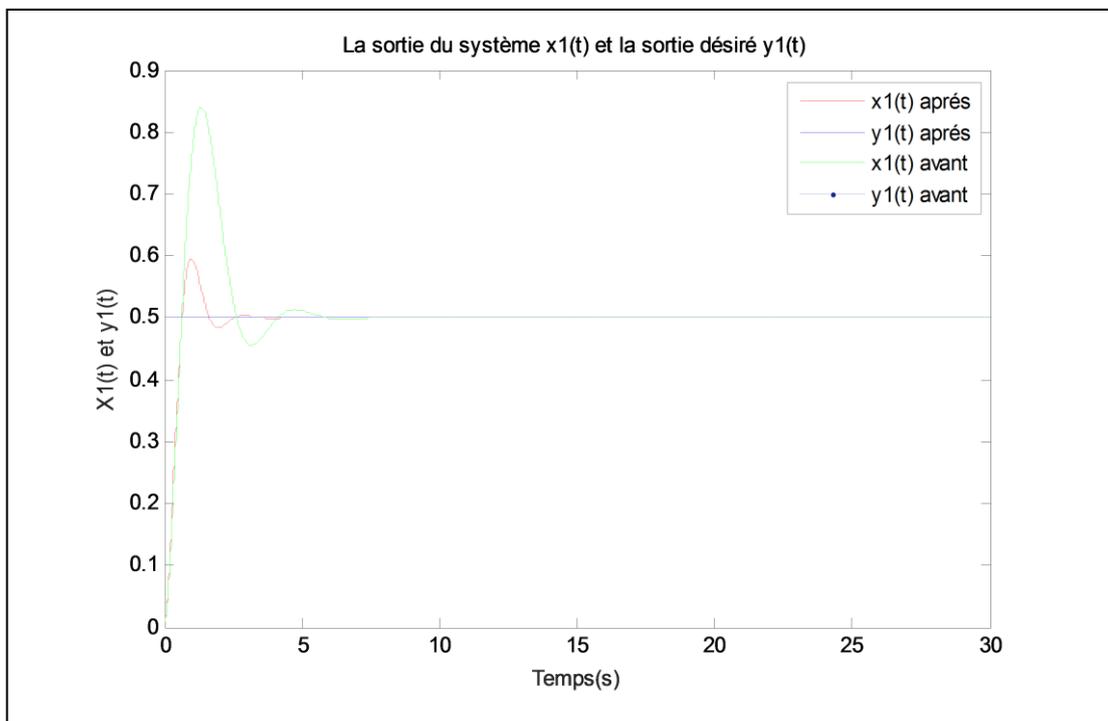
**III.10 Comparaison entre les résultats :**

Dans cette partie on va montrer les résultats de simulation et faire une comparaison, pour les deux cas, avant et après optimisation, avec les mêmes conditions initiales.

Les paramètres à optimiser sont donnés dans le tableau suivant :

Paramètres	Avant optimisation	Après optimisation
<b>T</b>	<b>0.12</b>	<b>0.4573</b>
<b>K1</b>	<b>0.8</b>	<b>1.8103</b>
<b>K2</b>	<b>5</b>	<b>3.5951</b>
<b>K3</b>	<b>2</b>	<b>0.8857</b>

Les figures suivant représentent les résultats de simulation pour le système sous-actionné Pont roulant ,pour les deux cas avec et sans optimisation .



**Figure III.43** la sortie du système  $x1(t)$  et la sortie désiré  $y1(t)$

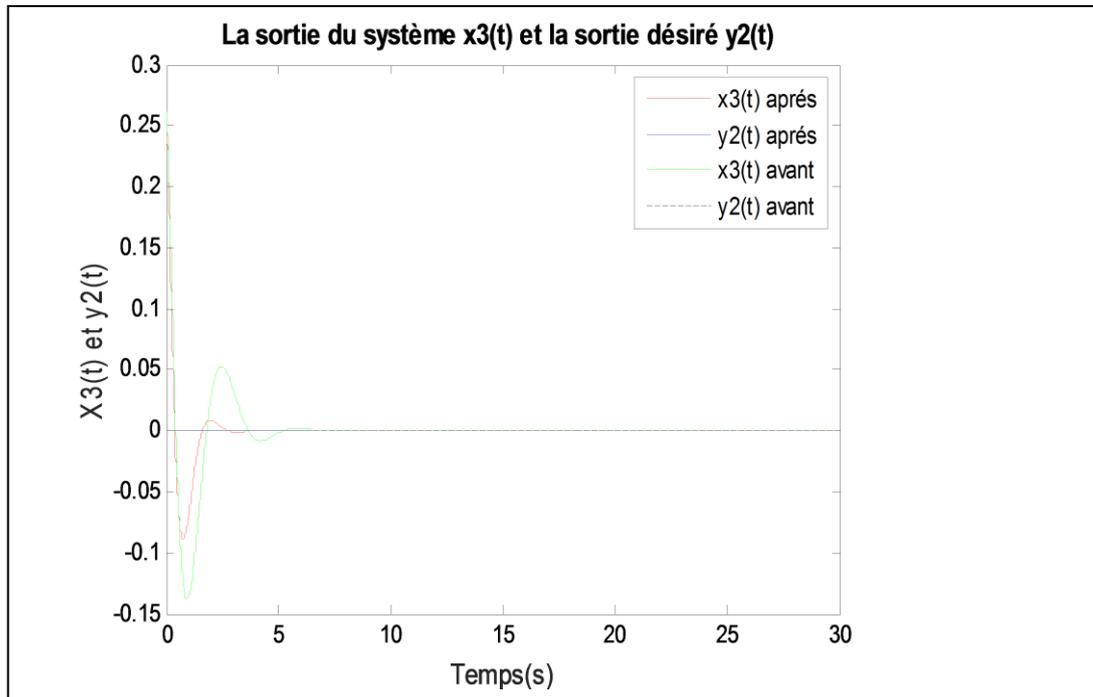


Figure III. 44 la sortie du système  $x_3(t)$  et la sortie désiré  $y_2(t)$

D'après Les figures (III.43) et (III.44) on remarque que les sorties du système en utilisation de PSO sont stables et convergent rapidement vers leurs références, par rapport au résultats

Trouvés sans optimis ation.

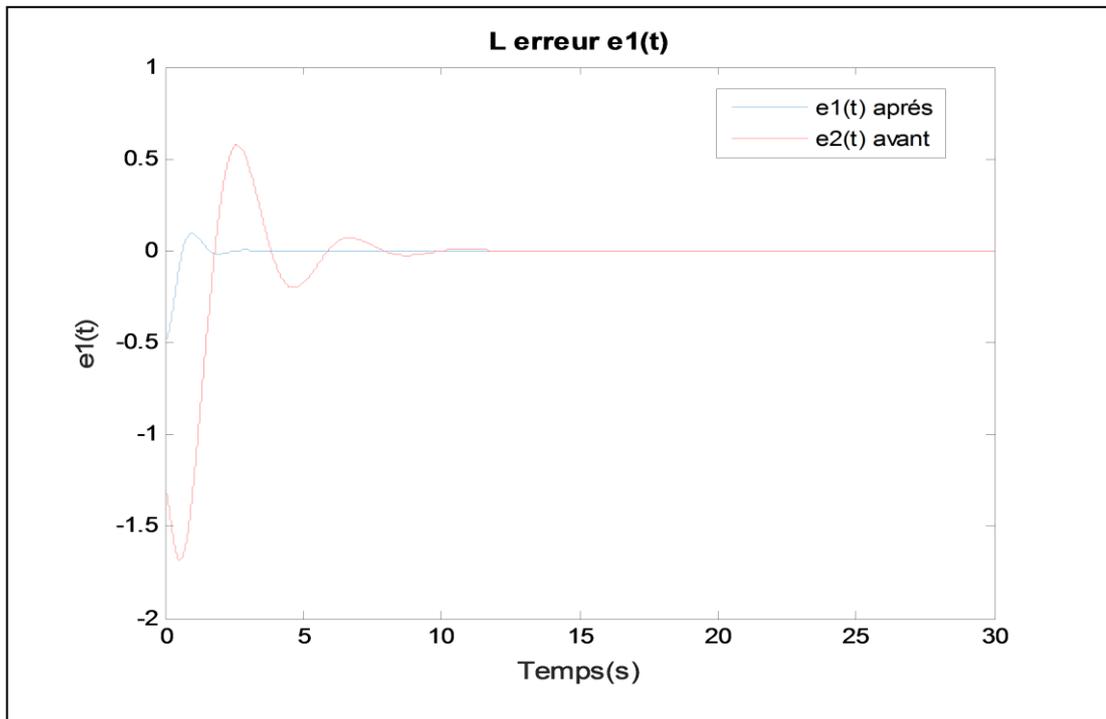


Figure III.45 L erreur e1(t)

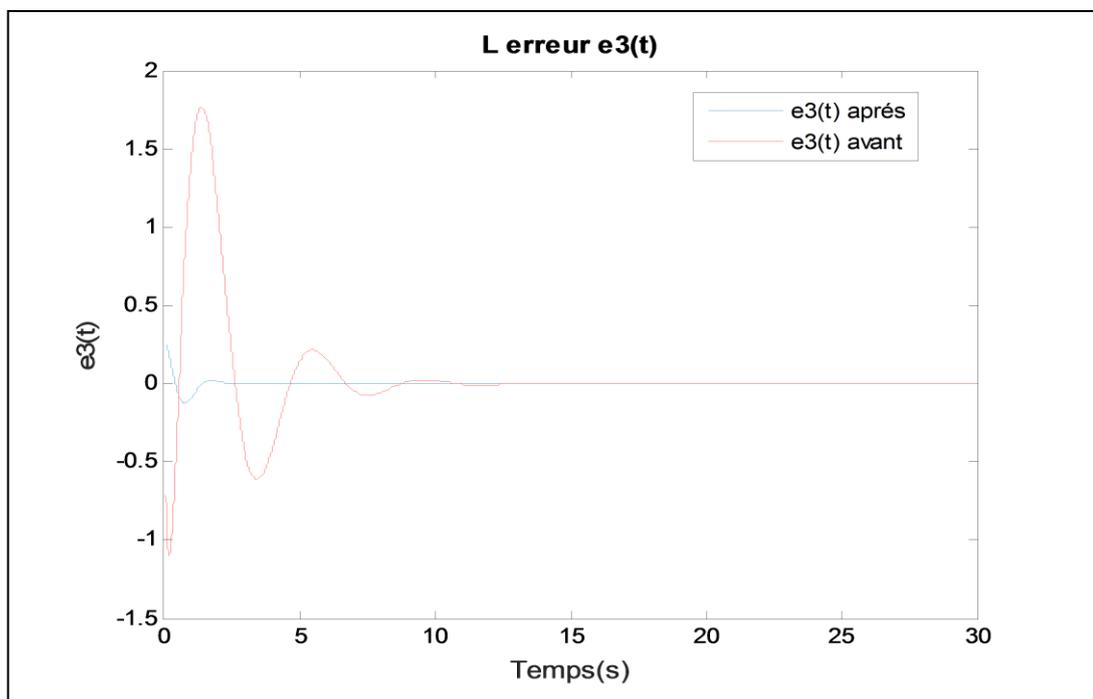


Figure III.46 L erreur e3(t)

Les figures (III.45) et (III.46) représentent les erreurs, avant et après optimisation PSO, on peut remarquer que ces erreurs après utilisation de la méthode PSO, il n'a pas fallu longtemps pour converger vers zéro.

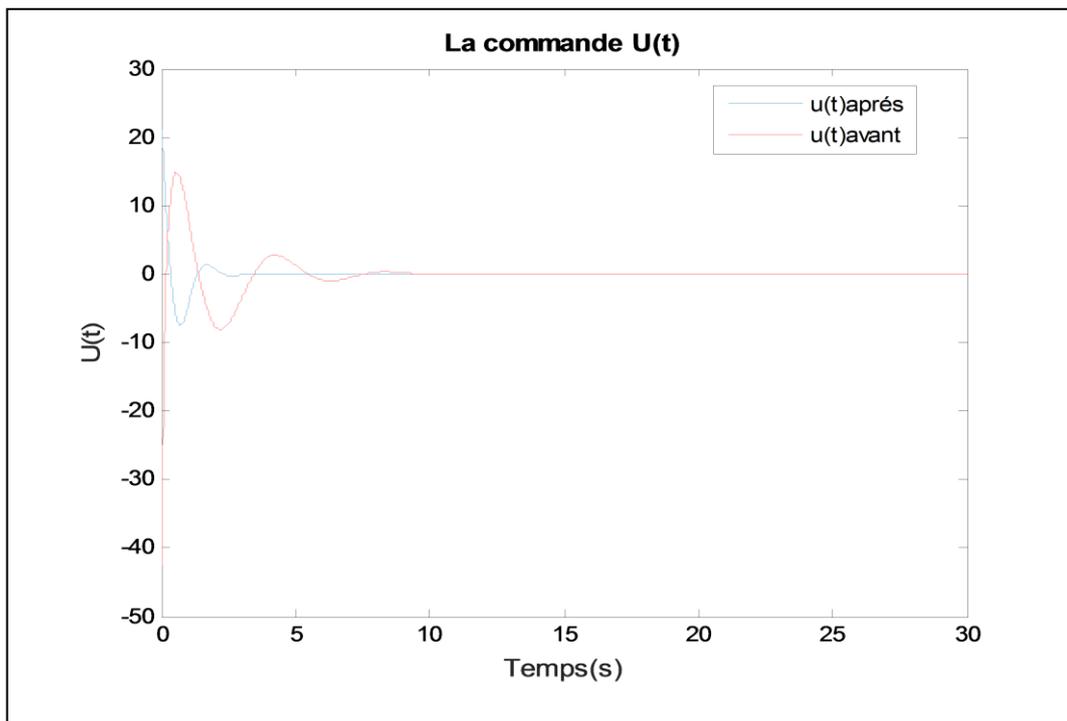


Figure III.47 La commande U(t)

Le signal de commande  $U(t)$  avant et après utilisation de la méthode PSO, est représenté par la figure (III.47), on remarque que ce signal est amélioré en cas de PSO, il est plus stable et plus lisse .

Une comparaison est faite ici ,entre la commande synergétique et la commande synergétique optimisé par PSO , L'application de cette technique a rendu le système plus stable avec de bonnes performances, et cela pour un nombre de population et d'itérations réduit.

### III.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, Nous avons présentés, des connaissances de base sur l'optimisation. Suivi de l'introduction à la méthode d'Optimisation par Essaim de Particules PSO, son principe de base, son énoncé mathématique ainsi que les différentes étapes de son algorithme. Cette méthode stochastique est utilisée pour éviter le recours au calcul habituel pour déterminer les valeurs des gains du contrôleur selon un objectif précis.

Dans notre étude, l'algorithme de PSO est alors employé pour trouver les gains optimaux du contrôleur synergétique d'un système sous actionné.

Les résultats de simulation, montrent que le système devient plus stable et avec de bonnes performances, par rapport aux résultats du système en utilisant la commande synergétique toute seule.

# **CONCLUSION GENERALE**

### CONCLUSION GENERALE :

L'étude présentée dans ce manuscrit a pour objectif, d'aborder une technique de commande robuste, qui constitue une alternative aux commandes classiques généralement employées en automatique, afin de répondre aux objectifs de performance de stabilisation d'un SMSA.

Dans la première partie de ce travail, nous avons d'abord présenté quelques généralités sur les systèmes mécaniques sou actionnés d'ordre deux, leurs caractéristiques, leurs modèles mathématiques, ainsi que les intérêts apportés par l'étude de ce genre de systèmes.

Dans la deuxième partie, on a développé une loi de commande synergétique pour cette classe de systèmes sous actionnés, où on a testé son efficacité par simulation.

Le contrôleur synergétique a permis d'améliorer les performances de systèmes sous actionnée du point de vue robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes, et réduit la dimension du schéma de contrôle et donc facilite sa conception.

Ensuite, on a introduit la notion d'optimisation par le biais d'une méthode méta-heuristique en l'occurrence l'optimisation par essaim de particules PSO, cette méthode est utilisée pour déterminer de façon optimale les paramètres de la loi de commande synergétique. L'application de PSO a rendu le système plus stable et cela pour un nombre de population et d'itérations réduit. Les résultats de simulation montrent que, grâce à cette technique, la stabilité et les performances dynamique du système sont améliorées.

A la fin de ce manuscrit une comparaison entre les résultats obtenus est faite pour bien montrer l'intérêt de notre étude.

Comme perspective, on peut citer les points suivants :

- Pour la partie optimisation, on n'a pas pris en considération l'existence des perturbations, ce qui donne l'aidé d'améliorer les résultats pour ce cas.
- Pour les systèmes sous actionnés avec des états non mesurables, on peut proposer d'introduire Un observateur d'état.
- On propose aussi d'implémenter la commande pour des validations expérimental

## **Bibliographie**

- [1] Bey khaoula et Ben Toumi Amina , Commande robuste par mode glissant des systèmes non linéaires sous-actionnés,2019/2020.
- [2] Samer Raichy, Contribution à l'estimation et à la commande de systèmes mécaniques sous-actionnés, 01 décembre 2008 .
- [3] C Aguilar, "Approximate feedback linéarisation and sliding mode control for the single inverted pendulum," 2002.
- [4] A.S Shiriaev, A Pogromsky, and H Ludvigsen, "on global properties of passivity- based control of an inverted pendulum," vol. 10, no. 04, 2000.
- [5] Chourouk El Biad , Samy Lafnoune , Commande robuste par mode glissant d'un system mécanique sous actionné, Montpellier ,21 Février 2014.
- [6] M,W Spong and D.J Block, "The Pendubot: a mechatronic system for control research and education," in Procceedings of the 34th IEEE Conférence on Décision and Control, New Orléans, Dec.1995, pp. 555-556.
- [7] Boulatika Zakaria , "sur la stabilisation des système mécaniques sous-actionnés», mémoire de master en automatique ,2012 ,université de Jijel .
- [8] A. Kolesnikov and G. Veselov, Modern applied control theory: synergetic approach in control theory, in Russian, Moscow-Taganrog, TSURE press, 2000.
- [9] D. Loginov, Possibilities of modeling the creative part of engineering design process using the synergetic approach, International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences,5, (1), 95-104, 2011.
- [10] H. Haken, H. Knyazeva, Arbitrariness in nature: synergetics and evolutionary laws of prohibition, Journal for General Philosophy of Science, 31, (1), 57-73, 2000.
- [11] H. Haken, Synergetics, Introduction and advanced topics, Springer, 2004.

- [12] BEHIIH, K , Contribution à la commande des systèmes non linéaires incertains et perturbés, Université Ferhat Abbas – Setif 1,29 ,Dec ,2020
- [ 13] A. Kolesnikov, G. Veselov, A. Monti, et al., "Synergetic Synthesis of DC-DC Bwst Convener Controllers: Theoly and Experimental Analysis", in Proc of the IEEE AppliedPowerElectronics2002,Dallas,pp.409415,Texas,2002.
- [14] Y.Abdenour ,contribution à la Commande robuste synergétique et à structures variables floue d'un moteur asynchrone à cage, l'USTHB,2011.
- [15] Djelaili El habib et Sedjerari Mokhtar , Commande synergétique d'une machine asynchrone à double alimentation intégrée dans un système éolien ,mémoire de master en elctrotechnique, 2017,saida.
- [16] A.Kolesnikov,G.Veselov,A.Kuzmenko,A.Popov,andA.Kuzmenko. Modern Applied Control Theory :Synergetic Approach in Control Theory. TSURE Press, Moscow-Taganrog, 2, Moscow, 2000.
- [17] A. Kolesnikov, A. Monti, F. Ponci, E. Santi, and R. Dougal. Synergetic synthesis of DC-DC boostconvertercontrollers:Theoryandexperimentalanalysis. Proc. Int. Conf. of IEEE Applied Power Electronics Conference, 1 :409–415, 2002.
- [18] H.F. Ho, Y.K. Wong, and A.B. Rad. Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering eliminationfor nonlinearSISOsystems. Simulation Modelling Practice and Theory,17(7):1119– 1210, 2009.
- [19] Z.Bouchama,N.Essounbouli,M.N.Harmas,andK.Saoudi. Reachingphasefreeadaptivefuzzy synergetic power system stabilizer. International journal of Electrical Power & Energy Systems, 77 :43–49, 2016.
- [20] Boukhalfa Abdelouaheb, Contribution à la commande adaptative floue pour les systèmes non linéaires discrets incertains, Université de Sétif-1,2019.
- [21] Li. Dougal, K. Proddutur, E. Santi and A. Monti, « Synergetic Control of a Boost Converters Theory and Experimental Verification », Proceedings IEEE Southeast Con 2002.
- [22] Medjbeur Lemya , Contribution au Contrôle Adaptatif Flou des Systèmes non Linéaires ,Université Batna2.
- [23] Qi.Wang,F.Jiuchao,andLi.Tao. Analysisofthesynergeticcontrolbasedonvariablestructure andapplicationofpowerelectronics. Proc. Int.Conf. on Information Engineering and Computer Science, 1 :354–360, 2009.

- [24] L.Kartobi, « Optimisation de la synthèse des Facs par les algorithmes génétiques et les essais particuliers pour le contrôle des réseaux électriques », mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique de l'ENP, 29 Novembre 2006
- [25] Maria Zemzami, Norelislam Elhami, Abderahman Makhloufi, Mhamed Itmi, Nabil Hmina, Application d'un modèle parallèle de la méthode PSO au problème de transport d'électricité, Université Ibn Tofail, ENSA, Kenitra, Maroc
- [26] Kennedyj , Eberhartr , “Particle Swarm Optimization,” Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks, IEEE Press, vol. 8, no. 3, pp. 1943–1948. 1995
- [27] Cooreny., Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en génie médical et en électronique. Thèse de Doctorat, Université de Paris 12 Val de Marne, France. 2008.
- [28] Abderrezek Hadjer , Contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires,mémoire de magister en automatique,2014, Université de setif-1
- [29] Bazi.smail «Contribution à la Commande Robuste d'une Machine Asynchrone par la Technique PSO « Particle Swarm Optimization » ».ingénieur d'état en électrotechnique université BATNA 2004
- [30] Aitkaid Djamilia, « Commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide des régulateurs fractionnaires », thèse doctorat en sciences de l'ingénieur, Université MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU, 2011.
- [31] Rehouma Ridha et Maamra Ali , Commande Optimisée du GADA Par La Méthode Essaim de Particules (PSO) , Juin 2015, Université d'El-Oued .