

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج
Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département D'électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Par : - GUEBAILI Zakarya

- KECHIDA Belkacem

Sujet

**Commande synergétique sans phase de convergence
d'un système non linéaire**

Soutenu publiquement, le 26/ 06/ 2024, devant le jury composé de :

Mme Tahï Wassila	Grade	Univ-BBA	Président
Mme Chérif Aida	Grade	Univ-BBA	Examineur
Mme Zehar Djamilâ	Grade	Univ-BBA	Encadrant

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous exprimons tout d'abord notre gratitude envers Allah tout-puissant pour nous avoir accordé la force,

La patience, la santé et la volonté nécessaires à la réalisation de ce travail de recherche.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre profond respect à notre promotrice **Dr Zehar Djamila**, pour avoir accepté de nous guider. Nous lui sommes reconnaissants pour sa disponibilité constante, sa rigueur, son intégrité scientifique, ses précieux conseils et la confiance qu'il nous a accordée tout au long de ce travail.

Nous tenons également à remercier chaleureusement les membres du jury, pour avoir accepté d'examiner notre mémoire.

Nos remerciements les plus sincères vont également à tous les donneurs, sans qui ce travail n'aurait pas été possible.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation et bon déroulement de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ceux qui me sont proches et chers,

Pour leur soutien permanent dans mes études et dans ma vie leur confiance à moi leur encouragement et leur amour

Mes parents : Djamila et Mohamed

A ma sœur : Nadia pour leur support continuuel

A mon frère : Omar qui est toujours le pour moi

A mes amis : Hichem Fethallah, Akram, Djamel et Sohaib pour leur soutien moral

A ma promotrice Mme. Zehar Djamila

A tout ce qui ont participé à ma réussite et a tous qui m'aiment

A tout ma grande famille Kechida.

BELKACEM KECHIDA.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A ceux qui me sont proches et chers.

Pour leur soutien permanent dans mes études et dans ma vie leur confiance à moi leur encouragement et leur amour.

Ma chère mère : Daoud Sabira.

Mon oncle et sa femme : Daoud Adlen et Widad pour leur support continuuel.

A mon frère : Omar qui est toujours le pour moi.

A mes amis : Zahir, Issame, Lazher, salah, khaled et kiki pour leurs soutiens moraux.

A ma promotrice Mme. Zahra Djamila.

A tout ce qui ont participé à ma réussite et a tous qui m'aiment.

A tout ma grande famille Guebaili.

ZAKARYA GUEBAILI.

Table des matières

Remerciements	2
<i>Dédicaces</i>	3
Table des matières	4
Liste des figures	7
Abréviations et Symboles:	9
Introduction générale	10
Chapitre 1 : Introduction aux systèmes non linéaires	11
1.1. Introduction :	12
1.2. Historique :	12
1.3. Définition de système non linéaire :	13
1.4. Caractéristiques d'un système non linéaire :	13
1.4.1. Points d'équilibre :	13
1.4.2. Cycles limites :	15
1.4.3. Bifurcations :	15
1.4.4. Chaos :	15
1.5. Sous actionnement :	17
1.5.1. Définition :	17
1.5.2. Définition mathématique :	17
1.5.3. Exemple des systèmes sous actionnés :	18
1.6. Stabilité d'un système non linéaire :	19
1.6.1. Plan de phase.	19
1.6.2. Stabilité de Lyapunov :	21
1.7. Exemples des systèmes non linéaires :	23
1.7.1. Système mécanique :	23
1.8 Conclusion :	24
Chapitre 2 : Commande par mode glissant	25
2.1. Introduction	26
2.2. Historique	26
2.3. Systèmes a structure variables	26

2.3.1. Définition 1	26
2.3.2. Définition 2	27
2.4. Définition du mode glissant (Mg) :	27
2.4.1. Propriétés des modes glissants :	27
2.4.2. Objectif de la commande par mode glissant.....	28
2.4.3. Le régime glissant idéal :	28
2.4.4. Le régime glissant réel :	28
2.5. Conception de la commande par mode glissant.....	29
2.5.1. Choix de la surface de glissement :	30
2.5.2. Conditions d'existence du régime glissant :.....	30
2.5.3. Loi de commande.....	32
2.6. Le phénomène de chattering:	33
2.7. Solutions pour atténuer le phénomène de chattering :	34
2.7.1. Solution mathématique :	34
2.7.2. Solution par des lois d'approche :	35
2.7.3. Solution par de mode glissant d'ordre supérieurs :	36
2.7.4. Solution par l'approximation floue :	36
2.8. Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement	36
2.9. Conclusions	37
CHAPITER 3 : La Commande Synergétique	38
3.1. Introduction :	39
3.2. Présentation de la théorie de la commande synergétique.....	39
3.3. Caractères généraux :	39
3.4. Spécificité par domaine d'application :	40
3.5. Principes de la commande synergétique :	40
3.6. Synthèse de la commande synergétique d'un système dynamique continu :	40
3.7. Commande synergétique d'un système dynamique discret :	42
3.8. Exemple d'application :	42
3.9. Conclusion :	44
Chapitre 4 : Application des Commandes à Un Système Sous Actionné	45

4.1. Introduction :	46
4.2. Le système pont roulant (Crane) :	46
4.3. La commande par mode glissant	47
4.3.1. Synthèse de la loi de commande	47
4.3.2. Etude de la stabilité :	48
4.3.3. Résultats de simulation :	48
4.4 La commande synergétique	53
4.4.1. Synthèse de la loi de commande	53
4.4.2. Etude de la stabilité :	53
4.4.2. Résultats de simulation :	54
4.5. La commande synergétique sans phase de convergence	58
4.5.1. Synthèse de loi de commande	58
4.5.2. Etude de la stabilité :	59
4.5.3. Résultats de simulation :	59
4.6. Comparaison entre les commandes appliquées	64
4.6.1. Comparaison entre la commande par mode glissant et la commande synergétique	64
4.6.2. Comparaison entre la commande synergétique et la commande synergétique sans phase de convergence (cas sans perturbation)	65
4.6.3. Comparaison entre la commande synergétique et la commande synergétique sans phase de convergence (cas avec perturbation)	66
4.7. Conclusion	67
<i>Conclusion générale</i>	68
<i>Références bibliographiques</i>	69
Résumé :	71

Liste des figures

Chapitre 1 : Introduction aux systèmes non linéaires

Figure 1.1: Point d'équilibre d'un système linéaire.....	14
Figure 1.2 : Points d'équilibre d'un système non linéaire.....	14
Figure 1.3: Cycles limites d'un système de Van Der Pol.....	15
Figure 1.4 : Système de Duffing à bifurcations.....	16
Figure 1.5: Comportement chaotique.....	16
Figure 1.6: Le AC robot (a) et L'Pendule (b).....	18
Figure 1.7: Le pendule à roue inertielle.....	18
Figure 1.8: Le Pont roulant.....	19
Figure 1.9: Portrait d'un point singulier foyer (a) stable et (b) instable.....	20
Figure 1.10: Portrait de phase autour d'un point singulier selle.....	20
Figure 1.11 : Portrait de phase autour d'un point singulier centre.....	21
Figure 1.12 : Portrait de phase autour d'un point singulier nœud (a) stable (puits) et (b) instable.....	21
Figure 1.13 : courbe d'une fonction de Lyapunov.....	22
Figure 1.14 : Exemple d'un système stable (a) et asymptotiquement stable (b).....	23
Figure 1.15 : pendule simple.....	23

Chapitre 2: Commande par mode glissant

Figure 2.1 : Principe de la commande par mode glissant.....	28
Figure 2.2 : Régime glissement idéal.....	28
Figure 2.3 : Régime glissant réel.....	29
Figure 2.4 : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.....	32
Figure 2.5 : Fonction <i>sign</i> (Commande de type relais).....	33
Figure 2.6 : Phénomène de réticence.....	34
Figure 2.7 : Fonction « SAT ».....	35
Figure 2.8 : Fonction de classe C^1 ($\xi > 0$ et petit).....	35

Chapitre 3: Commande synergétique

Figure 3.1 : Représentation graphique de la solution de l'équation de contrainte d'évolution pour différentes conditions initiales.....	41
Figure 3.2 : Pendule inversé simple.....	43

Chapitre 4 : Application des Commandes à Un Système Sous Actionné

Figure 4.1 : Schéma de l'ensemble chariot-pendule.....	46
Figure 4.2: La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$	49
Figure 4.3 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$	49
Figure 4.4 : Le signal d'erreur $e_1(t)$	49
Figure 4.5 : Le signal d'erreur $e_3(t)$	50
Figure 4.6: La surface de glissement.....	50
Figure 4.7 : Le signal de commande.....	50
Figure 4.8 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$	51
Figure 4.9 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$	51

Figure 4.10 : Le signal d'erreur $e_1(t)$	52
Figure 4.11 : Le signal d'erreur $e_3(t)$	52
Figure 4.12 : La surface de glissement.	52
Figure 4.13 : Le signal de commande.	52
Figure 4.14 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$	54
Figure 4.15 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$	55
Figure 4.16 : Le signal d'erreur $e_1(t)$	55
Figure 4.17 : Le signal d'erreur $e_3(t)$	55
Figure 4.18 : La macro variable $\Psi(t)$	56
Figure 4.19 : Le signal de commande.	56
Figure 4.20 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$	57
Figure 4.21 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$	57
Figure 4.22 :Le signal d'erreur $e_1(t)$	57
Figure 4.23 : Le signal d'erreur $e_3(t)$	58
Figure 4.24 : La macro variable $\Psi(t)$	58
Figure 4.25 : Le signal de commande.....	58
Figure 4.26 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$	60
Figure 4.27 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$	61
Figure 4.28 :Le signal d'erreur $e_1(t)$	61
Figure 4.29 : Le signal d'erreur $e_3(t)$	61
Figure 4.30 : La macro variable $\Psi(t)$	62
Figure 4.31 : le signal de commande.....	62
Figure 4.32 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$	63
Figure 4.33 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$	63
Figure 4.34 : Le signal d'erreur $e_1(t)$	63
Figure 4.35 : Le signal d'erreur $e_3(t)$	64
Figure 4.36 : La macro variable $\Psi(t)$	64
Figure 4.37 : Le signal de commande	64
Figure 4.38 : Les réponses du système (y_1 (a) et y_3 (b))	65
Figure 4.39 : Les signaux des commandes.....	66
Figure 4.40 : Les réponses du système (y_1 (a) et y_3 (b))	66
Figure 4.41 : Les signaux des commandes.....	67
Figure 4.42 : Les réponses du système (y_1 (a) et y_3 (b))	67
Figure 4.43 : Les signaux des commandes.....	68

Abréviations et Symboles:

VSS : Variable Structure System.

MG : mode glissant.

SMC : Sliding Mode Control (Commande par mode glissant).

SYC : synergetic control (commande synergétique).

SYC-WRP : synergetic control without Reaching Phase (commande synergétique sans phase de convergence).

Introduction générale

Dans le domaine de l'automatique, la commande des systèmes non linéaires représente un défi majeur en raison de leur complexité et de leur comportement souvent imprévisible. Les méthodes de commande traditionnelles peuvent s'avérer insuffisantes pour stabiliser et réguler ces systèmes, rendant nécessaire le développement de nouvelles techniques avancées. Parmi celles-ci, la commande par mode glissant et la commande synergétique, qui se distinguent comme des solutions prometteuses.

Ce mémoire de fin d'étude se concentre spécifiquement sur l'application la commande par mode glissant et la commande synergétique avec et sans phase de convergence pour les systèmes non linéaires (spécialement les systèmes sous actionnés) les deux approches sont considérées comme des commandes robuste, elles jouent un rôle primordial dans la stabilité des systèmes en présence des perturbations, ou dans le cas des incertitudes paramétriques.

Le but de cette étude est de trouver parmi ces commandes, celle qui améliore les performances du système.

Le chapitre 1, de ce mémoire sera dédié à l'étude des systèmes non linéaires. Nous analyserons les caractéristiques distinctives de ces systèmes, en mettant l'accent sur leur comportement complexe, leur stabilité et leur réponse non linéaire.

Le chapitre 2, se penche en détail sur la commande par mode glissant, une méthode fréquemment employée pour la commande des systèmes non linéaires. Nous exposerons les principes fondamentaux de cette approche, en incluant la construction de la surface de glissement et la conception du contrôleur associé. Nous mettrons également en lumière les limitations de la commande par mode glissant classique, notamment la phase de convergence initiale qui peut provoquer des retards et potentiellement déstabiliser le système, en présence des perturbations, ainsi que le phénomène de chattering.

Le chapitre 3, représente la commande synergétique qui est une méthode de commande innovante à haute performance qui garantit un découplage complet entre les sorties à contrôler, et une robustesse identique à celle du contrôleur pour mode glissant tout en évitant le problème de chattering.

Dans le chapitre 4, un développement théorique de la commande par mode glissant ainsi que la commande synergétique, pour un système sous actionné est donné, nous exposerons aussi les résultats obtenus à partir des simulations menées pour évaluer l'efficacité des différentes stratégies de commande, Nous analyserons les performances des contrôleurs développés en termes de stabilité et de robustesse face aux perturbations et aux incertitudes paramétriques.

Chapitre 1 :

Introduction aux

systemes non linéaires

1.1. Introduction :

Les systèmes non linéaires sont omniprésents dans notre monde et sont souvent à l'origine de comportements complexes et fascinants. Contrairement aux systèmes linéaires, où les relations entre les variables sont proportionnelles et prédictibles, les systèmes non linéaires exhibent une diversité de comportements qui défient souvent les modèles simples.

Dans un système non linéaire, les interactions entre les composants ne peuvent pas être représentées par des équations linéaires. Au lieu de cela, ces systèmes sont caractérisés par des relations complexes, souvent décrites par des équations différentielles non linéaires ou des équations aux dérivées partielles.

Les systèmes non linéaires se retrouvent dans de nombreux domaines, de la physique des particules à la biologie des systèmes, en passant par l'économie et l'ingénierie. Par exemple, les phénomènes chaotiques observés dans certains systèmes dynamiques, tels que le battement de cœur irrégulier ou les fluctuations climatiques, sont des manifestations directes de la non-linéarité.

Comprendre et modéliser les systèmes non linéaires est essentiel pour résoudre un large éventail de problèmes du monde réel. Cependant, en raison de leur complexité, cela peut être un défi de taille. Les outils mathématiques et les techniques de modélisation doivent souvent être adaptés pour capturer efficacement le comportement non linéaire.

Dans ce chapitre, nous explorerons les bases des systèmes non linéaires, y compris leurs caractéristiques principales, les méthodes d'analyse et de modélisation, ainsi que leur importance dans divers domaines d'application. En fin du chapitre, nous donnons des exemples pour des phénomènes réels et intrigants des systèmes non linéaires au cœur de nombreux phénomènes intrigants et essentiels dans notre monde moderne.

1.2. Historique :

L'histoire du contrôle non linéaire prend ses origines au XVIIIe siècle avec l'invention du régulateur centrifuge "flyball", utilisé pour réguler l'admission de vapeur dans les machines à vapeur, bien qu'il fonctionnât sans concepts analytiques clairs. En 1892, le mathématicien russe A.M. Lyapunov a proposé deux méthodes pour évaluer la stabilité des systèmes dynamiques décrits par des équations différentielles ordinaires (ODE). Ces travaux, traduits en français en 1907, ont ensuite été appliqués au contrôle par Kalman et Bertram. L'ingénierie du contrôle était encore naissante jusqu'à la fin des années 1930, lorsque la communauté scientifique a commencé à s'attaquer au défi du contrôle des servomécanismes, souvent modélisés par des systèmes du second ordre, en utilisant la méthode du plan de phase, introduite par Poincaré. La Seconde Guerre mondiale a accéléré la recherche sur le contrôle non linéaire des servomécanismes, en raison des exigences des systèmes de conduite de tir et de contrôle des véhicules guidés. Entre 1940 et 1960,

trois approches analytiques principales ont émergé pour analyser les systèmes non linéaires : la description par fonctions, la méthode du plan de phase et diverses techniques impliquant des systèmes de relais [1].

1.3. Définition de système non linéaire :

Par définition, un système non linéaire ne satisfait pas les conditions de linéarité, notamment le principe de superposition. Un processus décrit par une équation différentielle dont les coefficients ne dépendent que du temps est strictement linéaire, mais non stationnaire. Cela signifie que son comportement peut varier en fonction du moment initial choisi. En pratique, les systèmes linéaires non stationnaires sont souvent aussi complexes à traiter que les systèmes non linéaires. Lorsqu'un ingénieur parle de système linéaire, il fait généralement référence à un système linéaire stationnaire ou invariant, caractérisé par des équations différentielles ou récurrentes à coefficients constants.

Outre la non-validation du principe de superposition, il existe des différences importantes en termes de stabilité. Alors qu'un système linéaire peut être stable ou instable pour un réglage donné, avec les oscillations marquant la limite entre les deux, les systèmes non linéaires peuvent présenter des oscillations stables, avec une amplitude et une période spécifique, dans un phénomène appelé "pompage". De plus, contrairement aux systèmes linéaires, l'évolution vers un état stable peut dépendre des conditions initiales pour les systèmes non linéaires. Une autre différence significative peut concerner la précision, en particulier lorsque des non-linéarités de type seuil sont présentes, ainsi que la vitesse de convergence, qui peut varier selon le point de départ.

La non-linéarité d'un processus peut être intrinsèque, comme dans le cas de la loi définissant la puissance dissipée dans une résistance en fonction de l'intensité, $P = RI^2$ isolée, comme dans le cas d'un système sous contrôle [2].

1.4. Caractéristiques d'un système non linéaire :

Les systèmes non linéaires sont définis par des équations différentielles qui ne sont pas linéaires, Leurs attributs sont définis par les éléments suivants :

1.4.1. Points d'équilibre :

Considérons le système modélisé par l'équation différentielle suivante :

Définition : Un point d'équilibre de l'équation $\dot{x} = F(x)$ est un point x^* de l'espace des phases vérifiant $F(x^*) = 0$ [1].

Exemple 1 :

Soit un système linéaire décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{X}(t) = -X(t), X(0) = X_0 \quad (1.1)$$

$$\dot{X}(t) = -X(t) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Point d'équilibre } X = 0 \\ \text{Solution } X(t) = X_0 e^{-t} \end{array} \right. \quad (1.2)$$

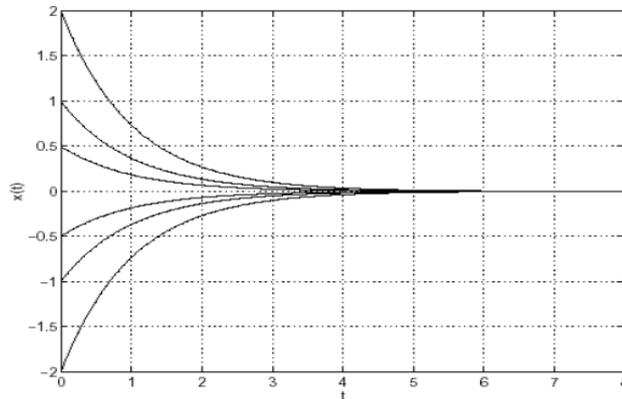


Figure 1.1: Point d'équilibre d'un système linéaire [3].

Dans un système linéaire, s'il existe un unique point d'équilibre à $X=0$, ce dernier est stable. En conséquence, toutes les trajectoires associées à différentes conditions initiales convergent vers cet état stable d'équilibre.

Exemple 2 :

Soit un système non linéaire décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{X}(t) = -X(t) + X^2(t), \quad X(0) = X_0 \quad (1.3)$$

Le système non linéaire a les caractéristiques suivantes :

$$\dot{X}(t) = -X(t) + X^2(t) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{points d'équilibre } X = 0 \text{ et } 1 \\ \text{solution } X(t) = \frac{X_0 e^{-t}}{1 - X_0 + X_0 e^{-t}} \end{array} \right. \quad (1.4)$$

Figure 1.2 : représente différentes conditions initiales

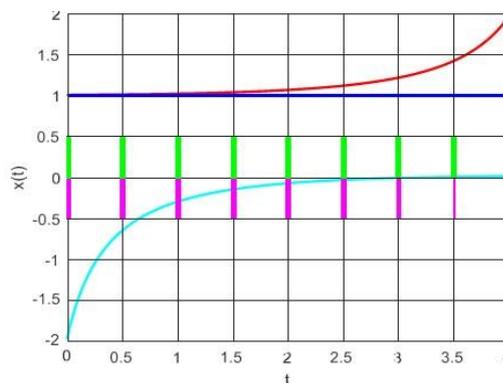


Figure 1.2 : Points d'équilibre d'un système non linéaire [3].

Dans le système non linéaire, il existe deux points d'équilibre, $X=0$ et $X=1$. Le point $X=1$, étant instable, agit comme une sorte de limite de stabilité. Ainsi, l'axe se divise en deux régions de conditions initiales : celles pour lesquelles les trajectoires convergent vers l'état d'équilibre 0 et celles pour lesquelles elles divergent [3].

1.4.2. Cycles limites :

Dans le domaine des systèmes dynamiques, un cycle limite, ou cycle-limite sur un plan ou une variété bidimensionnelle est une trajectoire fermée dans l'espace des phases, telle qu'au moins une autre trajectoire spirale à l'intérieur lorsque le temps tend vers $\pm \infty$. Ces comportements s'observent dans certains systèmes non linéaires. Si toutes les trajectoires voisines approchent le cycle limite lorsque $t \rightarrow +\infty$, on parle de cycle limite stable ou attractif. Si en revanche cela se produit lorsque $t \rightarrow -\infty$, on parle de cycle limite instable ou non attractif.

La courbe fermée dans la figure ci-dessous représente un cycle limite, ce qui signifie que peu importe la condition initiale choisie, on finira toujours par revenir au même cycle [4].

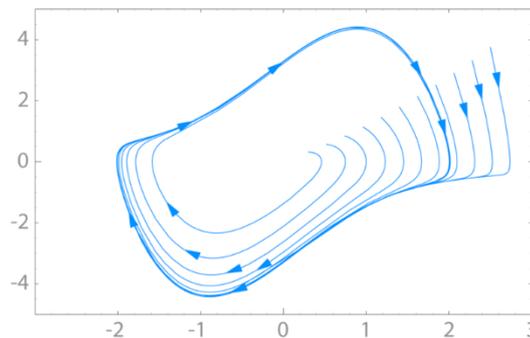


Figure 1.3: Cycles limites d'un système de Van Der Pol [4].

1.4.3. Bifurcations :

Un autre ensemble de concepts utile à l'analyse des systèmes dynamiques est la théorie de la "bifurcation". Ce concept renvoie à l'étude des changements de comportement d'un système

Lorsque les paramètres de ce dernier changent. La bifurcation signifie un changement qualitatif de la dynamique du système, qui résulte du changement de ses paramètres. Par exemple, déstabilisation d'un équilibre stable, apparition ou disparition d'un cycle ou d'un attracteur, ...

La valeur pour laquelle la bifurcation se produit est nommée le point de bifurcation. Soit le système dynamique non linéaire de dimension n :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t, \mu) \tag{1.5}$$

Avec le paramètre de contrôle μ , et soit x^* sa solution.

Définition 1 :

Une bifurcation est caractérisée comme un changement qualitatif observé dans la solution x^* du système (1.5), dès lors que le paramètre μ est modifié. Plus précisément, il s'agit de la disparition ou de la modification de la stabilité existante, ainsi que de l'émergence de nouvelles solutions.

Définition 2 :

Un système est dit structurellement stable ou robuste si le portrait de phase ne change pas dans une perturbation de ses paramètres. Par conséquent une bifurcation correspond à une perte de stabilité structurelle (la valeur du paramètre pour laquelle le système (1.5) n'est pas structurellement stable).

La figure (1.4) montre un système se ramenant à quatre types de bifurcations générique que nous allons présenter sur quatre cas simples monodimensionnels [5].

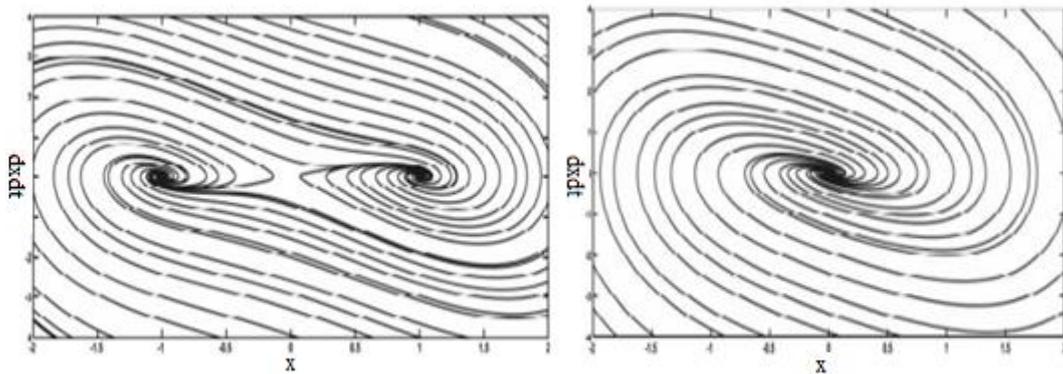


Figure 1.4 : Système de Duffing à bifurcations [5].

1.4.4. Chaos :

Un système non linéaire peut avoir un comportement en régime permanent, plus complexe que ceux habituellement répertoriés, tels que l'équilibre, les oscillations périodiques. Dans ce cas, la sortie du système est extrêmement sensible aux conditions initiales, d'où la non prévisibilité de la sortie. Certains comportements chaotiques font ainsi apparaître un aspect aléatoire, malgré leur nature déterministe intrinsèque [6].

Exemple :

$$\ddot{x}(t) + 0.1\dot{x}(t) + x^5(t) = 6 \sin(t) \tag{1.6}$$

Pour les deux conditions initiales différentes suivantes :

$$\text{trit: } (x(0) = 2; \dot{x}(0) = 3) \text{ et Trait: } (x(0) = 2.01; \dot{x}(0) = 3.01)$$

Nous obtenons les deux courbes présentées sur la figure (1.5):

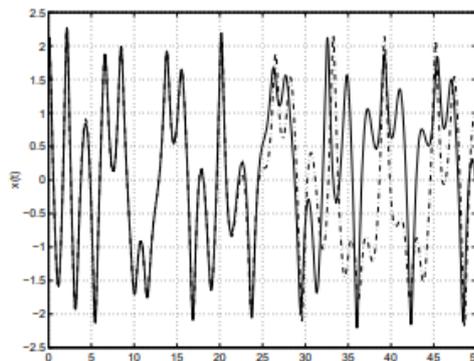


Figure 1.5: Comportement chaotique [6].

Certains de ces phénomènes manifestent des comportements de type aléatoire en dépit de la nature déterministe du système. Ce comportement est présent dans les phénomènes de turbulences en mécanique des fluides ou dans les phénomènes issus des dynamiques atmosphériques.

1.5. Sous actionnement :

1.5.1. Définition :

Un système non linéaire est dit sous actionné, si le nombre de ses entrées de commande est inférieur au nombre de ses degrés de liberté [13].

1.5.2. Définition mathématique :

Un système non linéaire contrôlé associé au vecteur de configuration $q \in Q$ et au lagrangien $L(q, \dot{q})$ satisfaisant l'équation suivante :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L(q, \dot{q})}{\partial q} = F(q)U \quad (1.7)$$

Est appelé un système mécanique sous actionné si $m = \text{rang}(F(q)) < n = \text{dim}(q)$.

Tel que : $U \in \mathbb{R}^m$ et $F(q) = (f_1(q), f_2(q), \dots, f_m(q))$ est la matrice des forces externes.

Et :

$$L(q, \dot{q}) = T - V = \frac{1}{2} \dot{q}^T M(q) \dot{q} - V(q) \quad (1.8)$$

Voici quelques éléments importants à considérer pour les systèmes sous actionnés :

- **Non-linéarité** : Contrairement aux systèmes linéaires où la sortie est une fonction linéaire de l'entrée, les systèmes non linéaires peuvent présenter des comportements beaucoup plus complexes. Par exemple, dans un système électrique, la relation entre la tension et le courant peut être non linéaire en raison de la présence de composants tels que des diodes ou des transistors.
- **Sous actionnement** : Le système est sous actionnement, ce qui signifie qu'il a des moyens pour influencer son propre comportement. Cela peut inclure des actionneurs tels que des moteurs, des vannes, des actionneurs hydrauliques, etc.
- **Complexité** : En raison de la non-linéarité, la modélisation et l'analyse des systèmes non linéaires sous actionnement peuvent être complexes. Ils peuvent également présenter des comportements imprévus ou chaotiques dans certaines conditions.
- **Contrôle** : La conception de contrôle pour ces systèmes nécessite souvent des approches avancées. Les techniques de contrôle non linéaire, telles que le contrôle

par retour d'état non linéaire ou le contrôle adaptatif, peuvent être nécessaires pour stabiliser et réguler ces systèmes de manière efficace.

- **Applications :** Les systèmes non linéaires sous actionnement sont courants dans de nombreux domaines, y compris l'ingénierie, la robotique, les systèmes électriques, mécaniques et biologiques [13].

1.5.3. Exemple des systèmes sous actionnés :

Voici quelques exemples des systèmes mécaniques sous actionnés :

- **Le Pendubot et l'ACrobot :**

Ils sont constitués de deux bras manipulateurs qui peuvent tourner autour de leurs axes respectifs, la différence entre les deux se présente au niveau de la position de l'actionneur, comme montré sur la figure (1.6)

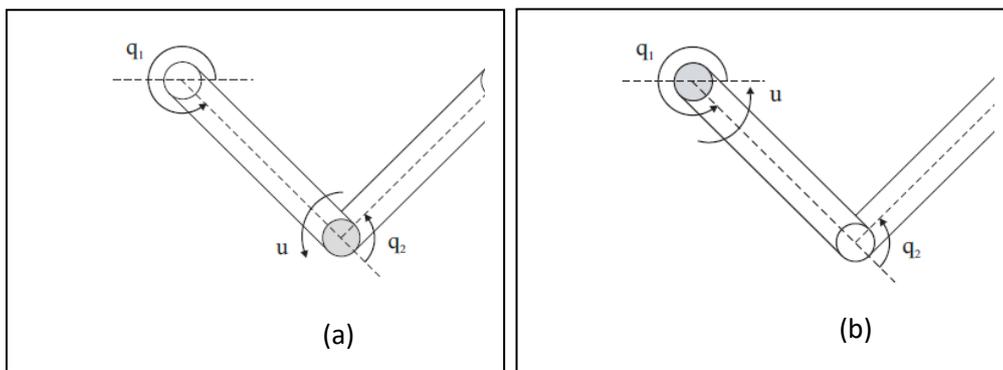


Figure 1.6: Le ACrobot (a) et L'Pendubot (b) [14].

- **Le pendule à roue inertielle :**

Ce système est représenté sur la figure (1.7), il est constitué d'un pendule libre en rotation autour d'un axe lié au sol, l'autre extrémité du pendule étant reliée à un disque actionné qui ne peut que tourner.

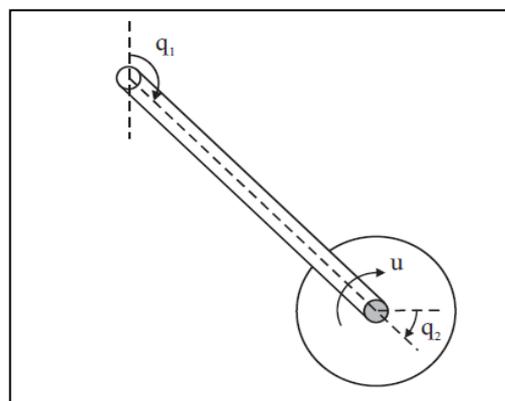


Figure 1.7: Le pendule à roue inertielle [14].

- **Le Pont roulant :**

Il est présenté sur la figure (1.8), ce système comporte deux éléments : un chariot libre en translation et un pendule solidaire et libre en rotation, le tout est commandé par un seul moteur électrique, un peu plus de détail sur ce système sera donné dans le chapitre 4 (Equations et commande), car il sera notre système d'application.

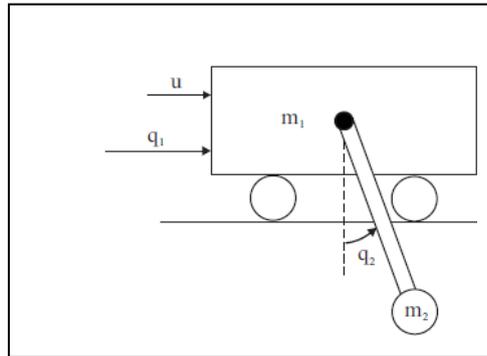


Figure 1.8: Le Pont roulant [14].

1.6. Stabilité d'un système non linéaire :

L'analyse de la stabilité d'un système non linéaire consiste à examiner son comportement, notamment à proximité des points d'équilibre. Deux méthodes peuvent être utilisées dans le cadre de l'analyse de la stabilité locale ou globale, à savoir :

- Plan de phase.
- Théorie de Lyapunov.

1.6.1. Plan de phase.

La méthode du plan de phase est une méthode graphique qui permet d'étudier de façon qualitative le comportement des systèmes dynamiques de deuxième ordre décrits par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) = f_1(x) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) = f_2(x) \end{cases} \quad (1.9)$$

Où x_1 et x_2 sont les états du système, $f_1(x)$ et $f_2(x)$ sont des fonctions non linéaires quelconques. La méthode du plan de phase a pour but d'analyser le comportement de ce système sans résoudre l'équation différentielle le régissant.

1.6.2.1 Points singuliers :

Les points singuliers sont les points d'équilibre dans le plan de phase. On obtient les points d'équilibre par la résolution des équations algébriques suivantes :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0 \\ \dot{x}_2 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_1(X_1, X_2) = 0 \\ f_2(X_1, X_2) = 0 \end{cases} \quad (1.10)$$

Les points d'équilibre d'un système du second ordre sont appelés points singuliers parce que plusieurs trajectoires passent par ces points d'équilibre ce qui implique que la pente. [9]

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{f_1(X_1, X_2)}{f_2(X_1, X_2)} \quad (1.11)$$

N'est pas définie en ces points

1.6.1.2 Nature des points singuliers :

En étudiant les propriétés de la matrice Jacobienne J , qui représente les trajectoires à proximité du point singulier. Afin de garantir la stabilité du point singulier, il est nécessaire que toute trajectoire revienne au point initial, c'est-à-dire pour $t \rightarrow +\infty$. On vérifie cette condition uniquement si les valeurs propres présentent des parties réelles négatives.

L'analyse des valeurs propres permet donc d'identifier l'aspect global des trajectoires autour d'un point spécifique.

Les diverses variations des valeurs propres en fonction de leurs signes et de leurs natures permettent de définir les cas suivants :

- **Point singulier foyer :**

Lorsque les valeurs propres sont complexes, il y a une partie imaginaire non nulle qui est conjuguée. Les courbes sont considérées comme un foyer attractif ou stable lorsque la partie réelle est négative, tandis qu'elles sont répulsives ou instables lorsqu'elles sont positives, comme la montre la figure (1.9).

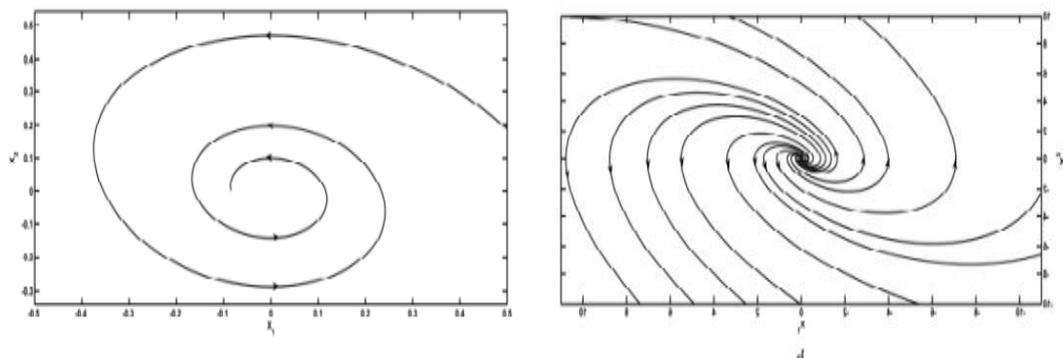


Figure 1.9: Portrait d' autour d'un point singulier foyer (a) stable et (b) instable [9].

- **Point singulier selle (col) :**

Si les valeurs propres sont réelles et de signes opposés. On dit que les courbes intégrales forment un col.

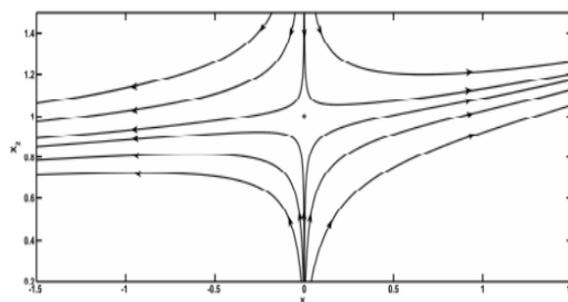


Figure 1.10: Portrait de phase autour d'un point singulier selle [8].

• **Point singulier centre :**

Si les valeurs propres sont imaginaires pures. Les courbes forment un centre. Les orbites sont des cercles.

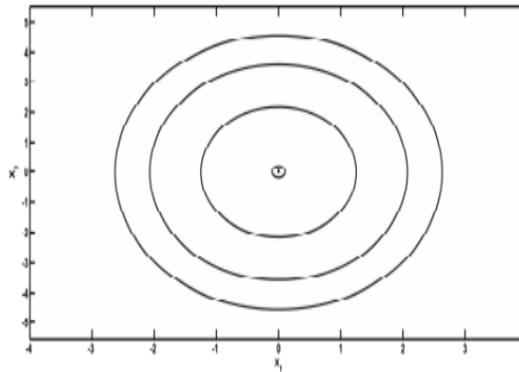


Figure 1.11 : Portrait de phase autour d'un point singulier centre [8].

• **Point singulier nœud :**

En cas de réalité des valeurs propres et de même signe. Il est considéré comme un nœud attractif ou stable lorsque les valeurs propres sont négatives, et répulsif ou instable lorsque les valeurs propres sont positives, comme la représente la figure (1.12) [9].

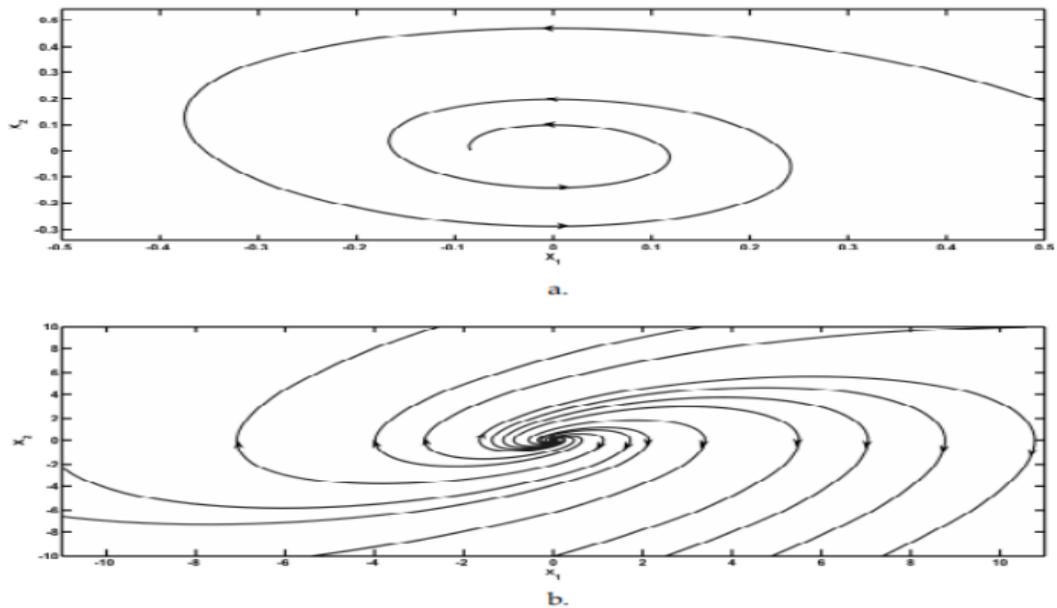


Figure 1.12 : Portrait de phase autour d'un point singulier nœud (a) stable (puits) et (b) instable [9].

1.6.2. Stabilité de Lyapunov :

La notion de stabilité de Lyapunov (ou, plus exactement, de stabilité au sens de Lyapunov) est introduite en mathématiques et en automatique dans l'analyse des systèmes dynamiques. Globalement, la stabilité est aussi utilisée en mécanique, dans les modèles économiques, les algorithmes numériques, la physique nucléaire, etc.

Les conditions nécessaires pour vérifier une fonction de Lyapunov dans un problème dynamique sont similaires à celles que l'énergie potentielle, doit vérifier pour assurer la stabilité d'un système physique [10].

Définition 1 :

Soient un ouvert de \mathbb{R}^n contenant 0 et $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction de classe C^1 , V est dite définie positive si :

$$i) \quad V(0) = 0 \tag{1.12}$$

$$ii) \quad V(u) > 0 \text{ pour } u \in \Omega \setminus \{0\} \tag{1.13}$$

Définition 2 :

V est dite semi-définie positive si :

$$iii) \quad V(0) = 0 \tag{1.14}$$

$$iv) \quad V(u) \geq 0 \text{ pour } u \in \Omega \tag{1.15}$$

Définition 3:(Fonction de Lyapunov)

Soient $u = V(x^*) \subset \mathbb{E}$ et $V: u \rightarrow \mathbb{R}^n$ continue. V est une fonction de Lyapunov en x si :

1. $V(x) > V(x^*)$ pour $x \neq x^*$ dans u ,
2. pour toute solution $x(\cdot), t \rightarrow V(x(t))$ décroissante i.e.

$$\frac{d}{dt}V(x(t)) \leq 0 \quad \forall t \in I_0 \tag{1.16}$$

V une fonction de Lyapunov stricte en x^* Si de plus :

3. Pour toute solution $x(\cdot), t \rightarrow V(x(t))$ est strictement décroissante i.e

$$\frac{d}{dt}V(x(t)) < 0 \quad \forall t \in I_0 \tag{1.17}$$

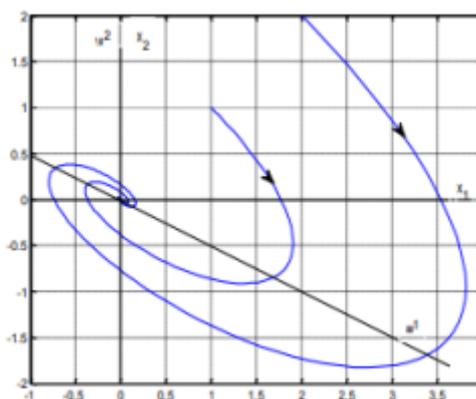


Figure 1.13 : courbe d'une fonction de Lyapunov [10].

Théorème 1.2 (Stabilité au sens de Lyapunov).

Soit $x(t)$ solution de $\dot{x} = f(x)$

et soit V une fonction de classe C^1 définie positive sur Ω un voisinage de $x^* = 0$ (sans perte de généralité on prend l'équilibre exactement l'origine)

- (i) Si $\frac{dV}{dt}$ est semi-définie négative alors x^* est stable.
- (ii) Si $\frac{dV}{dt}$ est définie négative alors x^* est asymptotiquement stable.

Dans le cas (i) $V(x)$ est dite fonctionne Lyapunov faible, et dans le cas (ii) $V(x)$ est dite fonction de Lyapunov stricte [10].

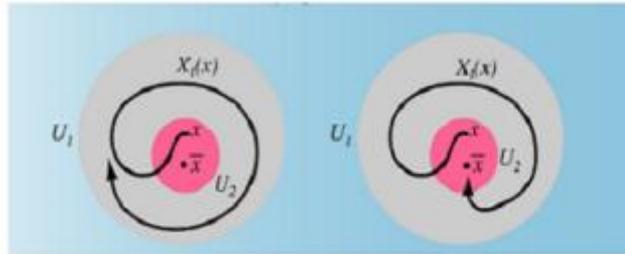


Figure 1.14 : Exemple d'un système stable (a) et asymptotiquement stable (b) [10].

1.7. Exemples des systèmes non linéaires :

1.7.1. Système mécanique :

Soit le système représenté par la figure En appliquant le premier principe de la dynamique par projection sur l'axe tangentiel, on obtient l'équation différentielle du mouvement.

$$ml^2\ddot{\theta} = -mgl \sin(\theta) + k\dot{\theta} \quad (1.18)$$

Où : l est la longueur de la corde, m est la masse en mouvement, θ est l'angle que la corde fait avec la verticale. g est l'accélération de la gravite, et k le coefficient de friction.

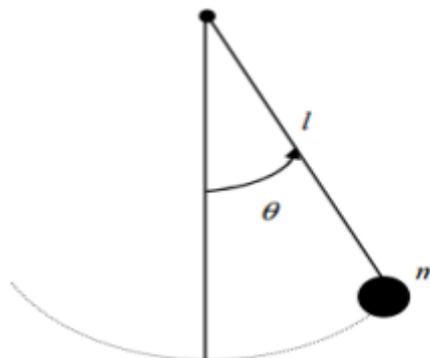


Figure1.15 : pendule simple [11].

A partir de ce modèle mathématique, il est possible de dériver un modèle dans l'espace d'état non linéaire en choisissant les variables d'état $x_1 = \theta$ et $x_2 = \dot{\theta}$, comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{l}{g} \sin(x_1) - \frac{k}{m} x_2 \end{cases} \quad (1.19)$$

1.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné les concepts fondamentaux concernant les systèmes non linéaires et nous avons montré la différence de ces derniers par rapport aux systèmes linéaires, mettant en lumière leurs différentes caractéristiques qui s'expriment de leur nature. Ensuite nous avons présenté les éléments cruciaux pour garantir leur stabilité.

A la fin de ce chapitre un exemple d'un système mécanique non linéaire est donné, afin de montrer d'une façon générale la nature des équations utilisées, pour l'étude de la stabilité et la synthèse de la commande d'un système non linéaire.

Chapitre 2 :
Commande par mode
glissant

2.1. Introduction

La commande par modes glissants des systèmes non linéaires a été largement étudiée et développée depuis son introduction. Celle-ci appartient à une classe plus large appelée commande à structure variable.

L'objectif de la commande par mode glissant est de contraindre le système à évoluer au bout d'un temps fini et de maintenir sur une surface dite surface de glissement, à l'aide d'une commande discontinue, où le comportement résultant correspond aux dynamiques souhaitées. La technique des modes glissants consiste à ramener la trajectoire d'un état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une commutation appropriée autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre, d'où le phénomène de glissement. L'avantage de cette commande est qu'elle est robuste aux perturbations et aux incertitudes de modèle.

Dans ce chapitre, nous présenterons le concept général de la commande par mode de glissement [15].

2.2. Historique

Des recherches sur la commande à structure variable ont été données par l'auteur soviétique Decarlo et autres (1998) et par Hung et autres (1993). La procédure de contrôle de la trajectoire du système force la zone d'état appelée surface de glissement. Les trajectoires du système et la surface de glissement sont alors confondus lors de l'utilisation de commandes à haute fréquence de commutation. Le principal avantage de la commande à structure variable avec le mode glissant est la durabilité contre les changements de paramètres ou les perturbations.

Le phénomène de chattering associé à la commande par mode glissant, présente un inconvénient majeur par ce qu'il peut exciter la dynamique de la commutation à haute fréquence qui le rend indésirable. Une méthode utilise une couche limite autour de la commutation. Une autre méthode, remplace la commande du type maximum / minimum par une fonction de vecteur d'unité avec une constante positive. Cependant ces approches ne fournissent aucune garantie quant à la convergence exacte au mode glissant et présente un problème de chattering- robustesse [16], [17].

2.3. Systèmes à structure variables

Lorsque le système ou le correcteur utilisé adopte de manière discontinue deux ou plusieurs expressions, on parle de système à structures variables. Cela conduit aux définitions suivantes :

2.3.1. Définition 1

Un système à structure variable (VSS) est un système qui change de structure pendant son fonctionnement. Il se caractérise par le choix d'une structure et d'une logique de commutation, ce qui permet au système de passer d'une structure à l'autre à tout moment. Dans les systèmes à

structures variables utilisant le mode de glissement, la trajectoire d'état est dirigée vers une surface appelée hyperplan, puis, grâce à la loi de commutation, elle est maintenue à proximité de cette surface. Cette surface est appelée surface de glissement et le mouvement le long de cette surface est appelé mouvement de glissement.

2.3.2. Définition 2

Ce système est défini par des équations différentielles de type :

$$\dot{x} = \begin{cases} f_1(X) & \text{si la condition 1 est vérifiée} \\ \vdots & \\ f_n(X) & \text{si la condition n est vérifiée} \end{cases} \quad (2.1)$$

Où :

f_i les fonctions appartiennent à un ensemble de sous-systèmes de classe C^k . [18]

2.4. Définition du mode glissant (Mg) :

Le mode glissant (MG) est une stratégie de commande où le système est maintenu sur une surface de glissement, garantissant une réponse rapide et robuste aux perturbations. Cette approche est largement utilisée dans le domaine de la commande robuste des systèmes dynamiques. [19]

2.4.1. Propriétés des modes glissants :

Le principe de base de la commande par mode glissant consiste premièrement à attirer l'état du système dans une région convenablement sélectionnée (cette région s'appelle la surface de glissement), puis amener le système vers un état désiré. Donc, le comportement du système peut être décrit par trois phases:

- La phase de convergence : pendant laquelle la trajectoire d'état du système partant d'une condition initiale quelconque et converge vers la surface de glissement. Durant cette phase, le système reste sensible aux incertitudes.
- La phase de glissement : durant laquelle la trajectoire d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'état désiré. Le comportement du système ne dépend plus du système ni des perturbations, mais est entièrement déterminé par la surface de glissement.
- La phase de régime permanent : elle est ajoutée pour l'étude de réponse du système autour de son point d'équilibre, elle est caractérisée par la qualité et performances de commande.

La figure ci-dessous montre le principe de base de la technique de commande par mode glissant.

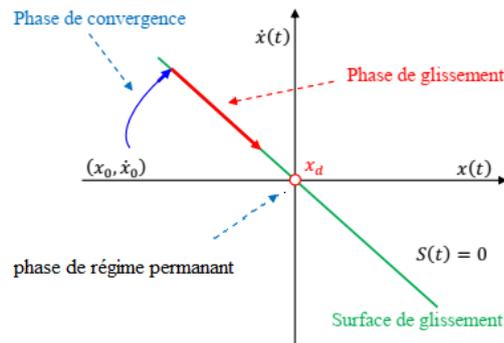


Figure 2.1 : Principe de la commande par mode glissant [17].

2.4.2. Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels:

- Atteindre une surface $S(x,t)=0$, telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, de régulation et de stabilité.
- Déterminer une loi de commande $u(x,t)$, qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

Le comportement dynamique résultant, appelé régime glissant idéal, est complètement déterminé par les paramètres et les équations définissant la surface.

L'avantage d'obtenir ce comportement est la réduction de l'ordre du système et le régime de glissant [20].

2.4.3. Le régime glissant idéal :

En théorie, l'organe de commutation est supposé idéal et insensible aux bruits, la fréquence de commutation est infinie, et la trajectoire en régime glissant décrit parfaitement l'équation $S(t) = 0$, d'où le régime glissant idéal [7].

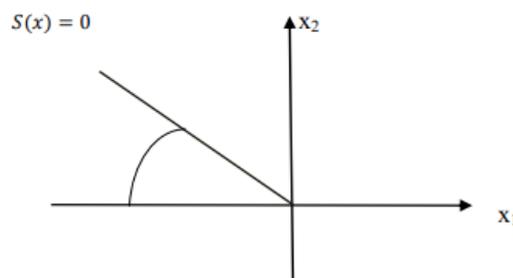


Figure 2.2 : Régime glissant idéal [20].

2.4.4. Le régime glissant réel :

Les commandes non linéaires sont de nature continue et son difficiles exprimer en échantillonné, plus particulièrement, la commande par mode de glissement. Ceci est du aux hypothèses de conception qui supposent que la fréquence de commutation est infinie. Dans les

(VSS) échantillonnés, l'état du système converge vers la surface sans y rester. Il se produit donc un mouvement de zigzag dans une bande au voisinage de la surface de commutation (Figure 2.3).

Cette bande est le siège du mode de glissement réel qui est appelé quasi-mode de glissement ou plus précisément pseudo mode de glissement. Ce mouvement est dû au fait que l'action de la commande n'est activée qu'aux instants d'échantillonnage et est maintenue constante entre ces instants. De plus, les grandeurs mesurées ou calculées à l'instant t_k ne sont disponibles qu'à l'instant t_{k+1} [21].

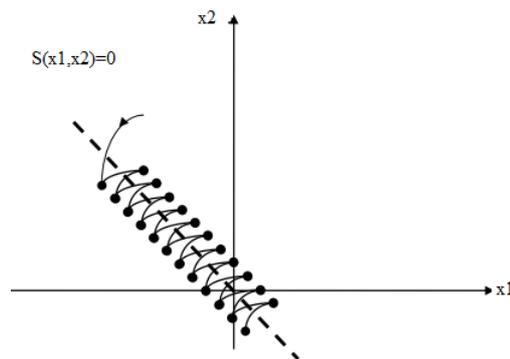


Figure 2.3 : Régime glissant réel [21].

2.5. Conception de la commande par mode glissant

La commande par mode glissant, à des avantages importants et multiples, tels que la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité de conception, la robustesse, etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis.

Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties: une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Ce dernier est important dans la commande non linéaire, elle a pour rôle d'éliminer ou réduire les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle.

Pour illustrer la méthode de conception de la commande par mode glissant d'ordre un, nous considérons le cas d'un système non linéaire, défini par [23]:

$$\dot{x}(t) = f(x) + g(x).u \quad (2.2)$$

Avec:

$x \in \mathbb{R}^n$: est le vecteur d'état.

$u \in \mathbb{R}^m$: est le vecteur de commande.

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes dépendantes l'une de l'autre.

- Choix de la surface de glissement.

- L'établissement des conditions d'existence et de convergence.
- Détermination de la loi de commande [15].

2.5.1. Choix de la surface de glissement :

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé.

Généralement, le nombre des surfaces de glissement est choisi égal à la dimension du vecteur de commande.

La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'état désiré du système. Il existe plusieurs formes de la surface de glissement qui ont été proposées, mais la surface la plus utilisée pour garantir la convergence vers l'état désiré du système est donné par Soltine [28].

La forme générale de la surface de glissement qui permet d'assurer la convergence d'une variable vers sa valeur désirée:

$$S = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (2.3)$$

Avec

λ : Constante positive.

r : est le degré relatif, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande.

$e(x) = x - x_d$: est l'écart entre la variable à régler et sa référence.

x : variable d'état.

x_d : valeur désirée.

Une autre forme de la surface est la suivante :

$$S(x) = \sum_{i=1}^n c_i (x_i - x_{id}) \quad (2.4)$$

La dynamique de convergence est assurée par les choix des coefficients c_i . L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro ($S(x)=0$), dont l'unique solution est ($e(x)=0$) pour un choix convenable des paramètres [15].

2.5.2. Conditions d'existence du régime glissant :

Les critères essentiels pour que les dynamiques d'un système convergent vers le point de glissement et y demeurent malgré les perturbations sont les conditions d'existence et de convergence. Deux aspects sont à prendre en compte pour évaluer la manière dont le système atteint cet état de convergence. Voici les deux types de conditions associées :

2.5.2.1. La fonction directe de commutation

C'est la première condition de convergence et la plus ancienne, elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro.

Elle s'exprime sous la forme :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (2.5)$$

Dans cette condition, il faut introduire pour $S(x)$ et sa dérivée $\dot{S}(x)$, les valeurs justes à gauche et à droite de la commutation [22].

2.5.2.2. La fonction de Lyapunov

La fonction de Lyapunov est une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système. La loi de commande doit permettre à cette fonction de décroître ($\dot{V}(x) < 0$).

On utilise cette fonction pour stabiliser les systèmes non linéaires.

Le principe est de sélectionner une fonction scalaire $S(x)$ qui assure l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et de construire une commande U de manière à ce que le carré de la surface corresponde à une fonction de Lyapunov. Pour cela, on définit la fonction de Lyapunov selon l'équation suivante :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (2.6)$$

Et sa dérivée par

$$\dot{V}(x) = S(x) \dot{S}(x) \quad (2.7)$$

Afin que la fonction $V(x)$ décroisse, il est nécessaire que sa dérivée soit négative. Cette condition n'est vérifiée que si la condition est remplie. L'équation $V(x)$ stipule que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement, exprimé par $S^2(x)$, diminue continuellement, ce qui contraint la trajectoire du système à se diriger vers la surface de glissement à partir des deux côtés de celle-ci. Cependant, cette condition suppose un régime glissant idéal, où la fréquence de commutation est infinie [24].

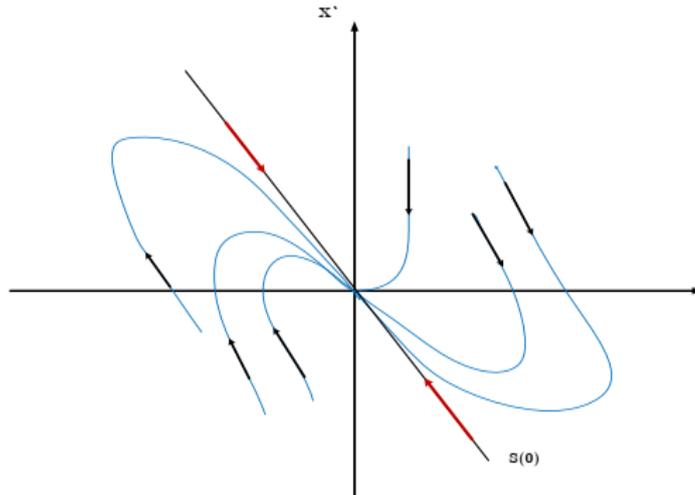


Figure 2.4 : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement [24].

2.5.3. Loi de commande

Afin d'assurer l'attractivité et l'invariance de la surface de glissement, on doit définir une loi de commande sous la forme suivante [25] :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (2.8)$$

Telle que U_{eq} est la commande équivalente définie par Utkin. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement (propriété d'invariance). La commande équivalente est exprimée, en considérant que la dérivée de la surface est nulle, c'est-à-dire $s(x) = 0$.

En effet, on peut interpréter la grandeur de la commande équivalente comme étant la valeur moyenne de la commande lors de la commutation rapide entre ces deux valeurs U_{max} et U_{min} [26].

Tandis que U_n est la commande discrète (commande de commutation) qui est déterminée afin de vérifier la condition de convergence en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système [27].

Quand le système est défini par l'équation :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (2.9)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2.10)$$

En régime glissant, sa dynamique doit vérifier la condition $s(x) = 0$.

La dérivée de la surface de glissement est donnée par :

$$\dot{S}(X) = \frac{dS}{dX} \frac{dX}{dt} = \frac{dS}{dX} (AX(t) + BU(t)) \quad (2.11)$$

En remplaçant l'expression de U dans l'équation dans l'équation (4.8), on obtient :

$$\dot{S}(X) = \frac{dS}{dX} [AX(t) + BU_{eq}] + \frac{dS}{dX} BU_n \quad (2.12)$$

Lorsque le mode glissant est atteint et en régime permanent, la surface de glissement est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, on déduit l'expression de la commande équivalente :

$$U_{eq} = -\left[\frac{dS}{dx}B\right]^{-1} \left[\frac{dS}{dx}AX(t)\right] \quad (2.13)$$

Pour assurer l'attractivité de la surface de glissement, il suffit d'ajouter le terme U_n à la loi de commande, de telle sorte que :

$$S(X) \cdot \dot{S}(X) < 0 \quad (2.14)$$

C'est-à-dire :

$$S(X) \frac{dS}{dx} BU_n < 0 \quad (2.15)$$

Pour vérifier cette condition, une solution simple est proposée pour U_n :

$$U_n = K(B)^{-1} \text{sign}(S(x)) \quad (2.16)$$

Où K est une matrice diagonale à coefficients constants et la fonction scalaire sign est représentée sur la figure (2.5). Le signe de K est choisi opposé au signe de $(B)^{-1}$. Le facteur $(B)^{-1}$ est toujours négatif pour la classe de système que nous considérons.

Le choix de ce gain est très influant car s'il est très petit, le temps de réponse sera très long, et s'il est choisi très grand, le temps de réponse sera très petit.

La figure suivante représente la fonction de la commande discrète de type relais :

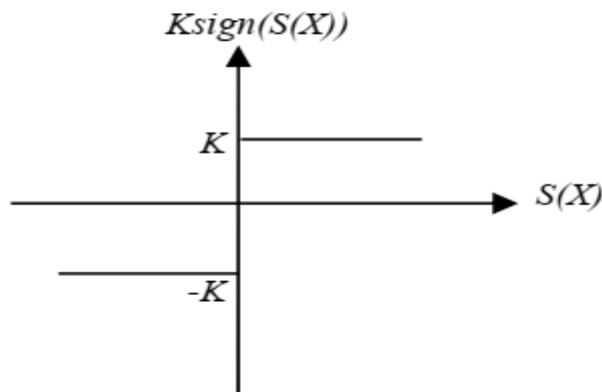


Figure 2.5 : Fonction sign (Commande de type relais) [27].

Le principal inconvénient de la commande de type relais réside dans le phénomène bien connu de "chattering" [27].

2.6. Le phénomène de chattering:

L'oscillation au voisinage de la surface est appelée réticence (Chattering dans la littérature anglo-saxonne) ou broutement. (La figure 2.6) montre l'effet de la réticence dans la convergence du système. La réticence n'est pas désirable, car elle induit des dynamiques de haute fréquence du système, augmentant la consommation énergétique.

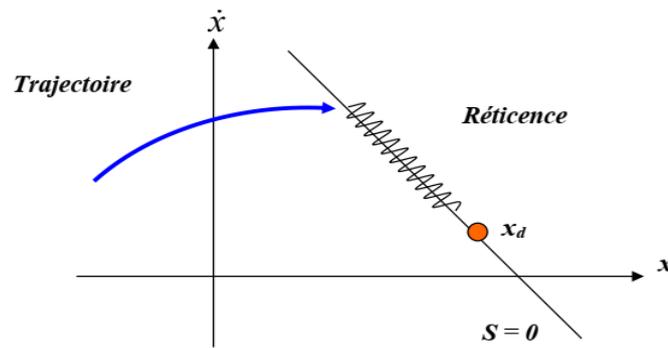


Figure 2.6 : Phénomène de réticence [28].

La réticence est le principal désavantage des modes glissants de nombreuses études ont été effectuée dans le but de réduire ou d'éliminer ce problème, par exemple les solutions par limitation de la condition de glissement, le terme $sign(S)$ dans la partie du glissement de la commande est souvent remplacé par un terme à variation plus douce, par exemple la fonction de saturation $sat(S)$ [28].

2.7. Solutions pour atténuer le phénomène de chattering :

Pour réduire ce phénomène, des extensions technologiques de la commande à structure variable ont été élaborées, on peut procéder par :

- Augmentation de la fréquence.
- Linéarisation de la commande par bande de surface en utilisant les fonctions continues de lissage ou de saturation.
- Décomposition de la commande en un terme équivalent (basse fréquence) et un terme discontinu (haute fréquence) [29].

2.7.1. Solution mathématique :

Cette approche implique de substituer la fonction "sign" par une approximation continue, mais seulement dans une zone proche de la surface. Parmi les fonctions utilisées à cette fin, on peut mentionner :

2.7.1.1. La fonction de saturation sat

$$\begin{cases} Sat(S) = 1 & \text{si } S > \mu \\ Sat(S) = -1 & \text{si } S < -\mu \\ Sat(S) = \frac{S}{\mu} & \text{si } |S| < \mu \end{cases} \quad (2.17)$$

μ Un paramètre petit et positif [24].

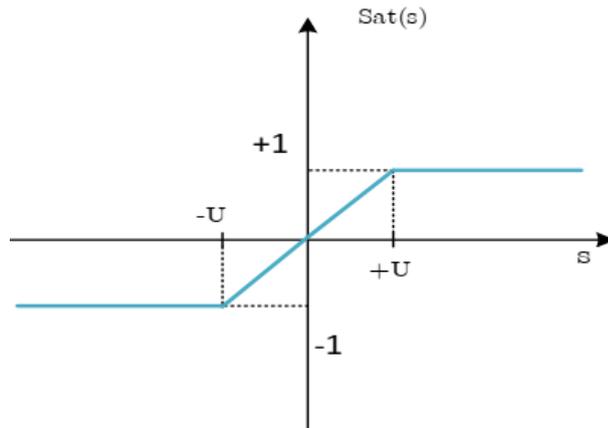


Figure 2.7 : Fonction « SAT » [24].

2.7.1.2. La fonction smooth

On peut aussi la remplacer par une fonction de classe C^1 . On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction (Figure 2.8).

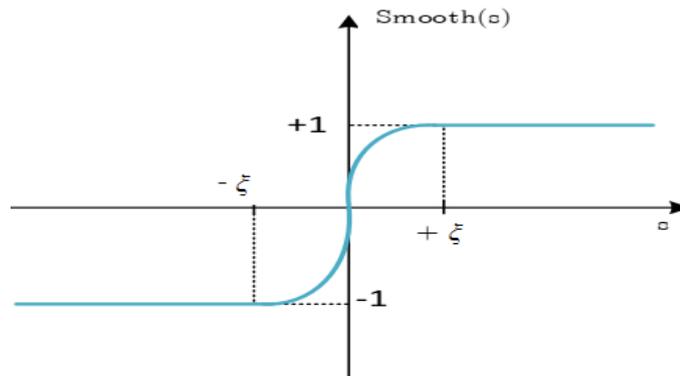


Figure 2.8 : Fonction de classe C^1 ($\xi > 0$ et petit) [26].

$$smooth(S(x)) = \tanh(S(x)) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} = \frac{S(x)}{|S(x)| + \xi} \quad (2.18)$$

D'où, on aura la commande douce suivante : [26]

$$U_n = K_x \frac{S(x)}{|S(x)| + \xi} \quad (2.19)$$

2.7.2. Solution par des lois d'approche :

Par ailleurs, une approche intéressante consiste à concevoir des lois de convergence non linéaires qui permettent une adaptation dynamique d'une composante de la commande en fonction de la variation de la fonction de glissement. Ainsi, plus le vecteur d'état est loin de la surface de glissement, plus cette composante est grande et tend à ramener le vecteur vers la surface, et inversement. Par conséquent, il est théoriquement possible de réduire les commutations haute fréquence en régime établi, sans toutefois affecter le temps de convergence ni même l'erreur de poursuite du système. Gao et Hung ont proposé notamment deux lois d'atteinte possibles pour réduire les commutations.

La première loi d'atteinte contient un terme proportionnel à la fonction de glissement qui permet au système d'atteindre plus rapidement la surface de glissement lorsque celui-ci en est éloigné. De plus, le terme proportionnel allège le travail de la partie discontinue $sign(s)$ et permet par conséquent une réduction des commutations sur la commande.

Cette loi d'atteinte est donnée par :

$$\dot{s} = -k \cdot sign(s) - Q. \quad (2.20)$$

Dans la deuxième loi de convergence figure une puissance fractionnaire de la fonction de glissement qui multiplie le signe de celle-ci, comme suite :

$$\dot{s} = -k \cdot [S]^\rho \cdot sign(s) \quad (2.21)$$

Où ρ est un réel strictement compris 0 et 1 il est par ailleurs démontré par Gao et Hung que la loi de convergence engendre un temps d'atteinte fini de la surface de glissement [29].

2.7.3. Solution par de mode glissant d'ordre supérieurs :

La solution par mode glissant d'ordre supérieur constitue une approche sophistiquée pour la commande des systèmes dynamiques, offrant des performances accrues et une robustesse améliorée dans des environnements complexes et perturbés [37].

2.7.4. Solution par l'approximation floue :

Cette approche combine les concepts de la logique floue avec ceux du mode glissant, une technique de contrôle robuste. Dans cette méthode, le mode glissant est utilisé pour assurer une performance robuste en suivant un certain chemin de contrôle, tandis que la logique floue est utilisée pour gérer les transitions entre les différents modes de fonctionnement du système.

L'idée générale est de créer un mode glissant flou qui permet au système de se stabiliser rapidement et de suivre efficacement une trajectoire de référence, même en présence de perturbations ou d'incertitudes dans le système [38].

2.8. Avantages et inconvénients de la commande par mode de glissement

Il y'a plusieurs avantages pour la commande par mode glissant : la précision, stabilité simplicité, faible temps de réponse et la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de la simplification sur modèle des systèmes.

Néanmoins, elle présente aussi des inconvénients car cette technique fait appel à un effort grand de commande, chose qui peut détériorer les organes de commande.

De plus, en réalité, on n'a pas le glissant idéal sur la surface mais des zigzags autour de engendre celle-ci. Ce phénomène est appelé 'broutement 'ou encore 'chattering', il plusieurs effet indésirable sur la qualité et la réalisation de la commande et sur le système représente ce phénomène,(Figure 2.6).

Le phénomène de broutement est considéré comme un obstacle réel pour l'application de la commande par mode glissant, pour y remédier plusieurs solutions ont été proposées. On peut citer :

La première c'est l'utilisation d'un observateur d'état asymptotique pour limiter la réticence.

La deuxième c'est l'utilisation d'algorithmes de commande par mode de glissant d'ordre supérieur, cette dernière solution a permis la réduction ou même l'atténuation du phénomène de chattering tout en gardant les propriétés de robustesse et là etc....convergence en temps fini [30].

2.9. Conclusions

Ce chapitre expose les concepts fondamentaux de la théorie des systèmes à structure variable, en mettant particulièrement l'accent sur la théorie des modes glissants. Nous avons introduit le principe de la commande par mode glissant, une approche non linéaire et robuste qui s'adapte aux variations paramétriques et aux perturbations externes des systèmes non linéaires. Un exemple d'application est présenté pour illustrer l'efficacité de cette commande. Cependant, malgré les avantages de la commande par mode glissant, le phénomène de chattering constitue un inconvénient majeur. Diverses solutions ont été proposées pour atténuer cet effet.

CHAPITER 3 : La Commande Synergétique

3.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié la commande par mode glissant en relevant ses avantages et ses inconvénients. L'un des inconvénients majeurs est la production d'oscillations sur l'organe de commande. Nous avons alors exposé quelques techniques pour réduire ce phénomène néfaste.

Cet inconvénient a motivé l'introduction d'une autre stratégie de commande dite synergétique qui s'apparente à la commande en mode de glissement sur beaucoup de points.

Cette commande, introduite pour la première fois par A.Kolesnikov , a trouvé un succès dans de nombreuses applications notamment en électronique de puissance dans la commande des convertisseurs statiques [31].

3.2. Présentation de la théorie de la commande synergétique.

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.

La théorie de la commande synergétique est l'une des nouvelles options prometteuses dans la théorie des commandes modernes. Elle ouvre de nouveaux horizons dans la conception efficace de commande des systèmes non linéaires complexes.

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, qui n'ont pas été résolus par les méthodes classiques connues [32].

3.3. Caractères généraux :

On peut identifier quatre types de synergies, à savoir :

- **La résilience** : c'est la capacité de maintenir le fonctionnement en cas de panne ou de dégradation d'un élément du processus.
- **La mutualisation** : capacité à identifier une fonction et à l'utiliser dans plusieurs contextes différents.
- **La scalabilité** : c'est la capacité à évoluer en changeant d'échelle, c'est-à-dire à gérer des volumes de flux plus importants sans compromettre la structure sous-jacente.
- **La maintenabilité** : la capacité à corriger et modifier simplement une structure, et même, parfois, la possibilité de modifier celle-ci en cours d'utilisation [33].

3.4. Spécificité par domaine d'application :

- **Physique** : formation des modèles spatio-temporels dans des lasers, système optique non linéaire, semi-conducteurs, hydrodynamique, plasmas, géophysique, météorologie, astrophysique.
- **Biologie** : modèles de l'évolution, évolution des biomolécules, croissance des plantes et des animaux. Médecine : activités des cerveaux, battement du cœur, circulation du sang.
- **Sociologie** : dynamique des groupes, formation collective d'ordre des paramètres régissant le comportement humain comprenant la formation de l'opinion publique etc.
- **Informatique** : auto-organisation, ordinateurs synergétiques, réseaux d'attracteurs. Théories de l'identification et de la reconnaissance : par exemple l'identification de modèles, commande des moteurs, commutation entre des états de coordination (par exemple modèle de Haken-Kelso-Bunz).
- **Théories des commandes** : commande indirecte par l'intermédiaire des paramètres de commande.
- **Théories des réseaux électriques** : modèles d'activité, stabilité. Théorie de l'information : compression de l'information, échange d'informations dans les processus d'auto-organisation [32].

3.5. Principes de la commande synergétique :

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. Récemment cette théorie a été appliquée avec succès dans le domaine des commandes de l'électronique de puissance. Cette nouvelle approche ne requiert pas la linéarisation du modèle et emploie explicitement un modèle non linéaire pour la synthèse de la commande. La synthèse de la commande synergétique dans le cas général est passée en revue dans la section suivante [34].

3.6. Synthèse de la 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 :

$$\frac{dx(t)}{dt} = f(x, u, t) \quad (3.1)$$

Où x représente le vecteur d'état du système et u représente le vecteur de commande. La synthèse satisfait le cahier des charges et considère d'éventuelles contraintes de contrôle, qui est donnée par :

$$\Psi = \Psi(x, t). \quad (3.2)$$

Où Ψ 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 concepteur : $\Psi = 0$.

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 [35] :

Du contrôleur synergétique débute par la définition d'une macro-variable par le concepteur, pour

$$T\dot{\Psi} + \Psi = 0 \quad T > 0 \quad (3.3)$$

La solution de l'équation (3.3) donne la fonction suivante :

$$\Psi(t) = \Psi_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad (3.4)$$

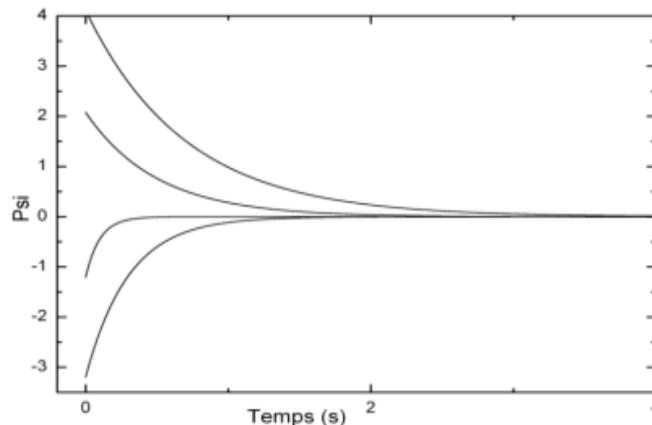


Figure 3.1 : Représentation graphique de la solution de l'équation de contrainte d'évolution pour différentes conditions initiales [35].

En résolvant l'équation (3. 3) pour u , la loi de commande est alors exprimée comme suit :

$$u = g(x, \psi(x, t), T, t) \quad (3.4)$$

À partir de l'équation (3.4), on s'aperçoit que la commande dépend non seulement des variables d'état du système, mais également de la macro-variable et du paramètre de contrôle T . En d'autres termes, le concepteur peut choisir les caractéristiques du contrôleur en choisissant une macro-variable appropriée et un paramètre de contrôle spécifique T . Dans la synthèse du contrôleur synergétique montré ci-dessus, il est clair que celui-ci agit sur le système non linéaire et une

linéarisation ou une simplification du modèle n'est pas nécessaire comme c'est souvent le cas pour les approches de commande traditionnelle. Par un choix approprié des macro-variables, le concepteur peut obtenir les caractéristiques intéressantes suivantes pour le système final :

- Stabilité globale
- Insensibilité vis-à-vis des paramètres

Il est intéressant de noter que la loi de la commande synergétique garantit la stabilité globale sur le domaine choisi. Il est à noter qu'une fois la contrainte (3.4) satisfaite le système y est assujéti et le restera malgré la variation éventuelle des paramètres du système. Cette propriété d'invariance par rapport aux perturbations est partagée par la technique de commande par mode glissant lors du glissement des trajectoires sur la surface.

3.7. Commande synergétique d'un système dynamique discret :

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

$$x(k + 1) = f(x(k), u(k), k) \quad (3.5)$$

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.

$$\Psi = \Psi(x(k), k) \quad (3.6)$$

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, borgegnitude du signal de commande, etc. ...) [35].

Dans l'approche de commande synergétique $T\Psi - \Psi = 0$ définit la trajectoire de convergence et sa vitesse au manifold invariant, Wang et al.

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

$$T \left[\frac{\Psi(k+1) - \Psi(k)}{T_s} \right] + \Psi(k) = 0 \quad (3.7)$$

Où T est un paramètre de conception qui spécifie la vitesse de convergence au manifolds. L'équation (3.4) peut être réécrite comme :

$$\left(\frac{T}{T_s - T} \right) \frac{T}{T_s} \Psi(k + 1) + \Psi(k) = 0 \quad (3.8)$$

3.8. Exemple d'application :

Pour mieux illustrer l'efficacité de la commande synergétique un exemple de simulation est présenté, qui consiste à commander un pendule inversé [36].

Il s'agit d'appliquer la commande synergétique à un pendule inversé afin d'apprécier les performances que permet ce type de commande tant en régulation qu'en poursuite. Le pendule est représenté sous sa forme simplifiée comme présenté sur la figure 3.1. Il est commandé par une force F appliquée au chariot, la grandeur à régler étant la position angulaire. L'équation dynamique du pendule inversé est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + g(x_1, x_2)u \end{cases} \quad (3.9)$$

Avec :

$$f(x_1, x_2) = \frac{g \sin(x_1) - \frac{mlx_2^2 \cos(x_1) \sin(x_1)}{M+m}}{l\left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2(x_1)}{M+m}\right)} \quad \text{et} \quad g(x_1, x_2) = \frac{\frac{\cos(x_1)}{m+M}}{l\left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2(x_1)}{m+M}\right)} \quad (3.10)$$

Où :

$y = x_1 = \theta$ Est l'angle du pendule.

$x_2 = \dot{\theta}$ Est la vitesse angulaire.

$g = 9.81m/s^2$ Est la gravité universelle, $M=1kg$ est la masse du chariot, $m=0.1kg$ est la masse du pendule, $2l$ est longueur du pendule ($l=0.5m$), y est la sortie du système, et U est la commande.

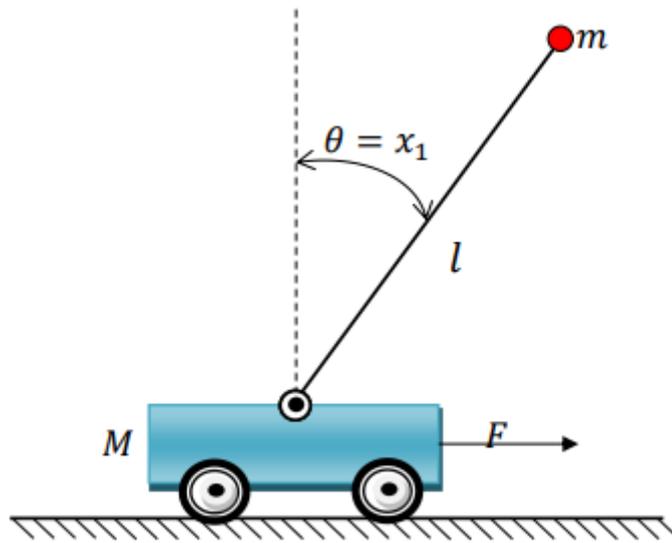


Figure 3.2 : Pendule inversé simple [36].

La synthèse de commande synergétique commence par le choix d'une macro-variable. On choisit, la macro-variable comme suit :

$$\psi = ke_1 + e_2, \quad k > 0 \quad (3.11)$$

Tel que :

$$\begin{cases} e_1 = e = y_m - x_1 \\ e_2 = \dot{e} = \dot{y}_m - \dot{x}_1 \rightarrow e_2 = \dot{y}_m - x_2 \end{cases} \quad (3.12)$$

Où, k est une constante positive, Y est le signal de référence. L'objectif de la commande synergétique est de forcer le système à suivre un signal de référence, de telle sorte que, c'est-à-dire que le système y est confiné et que l'on tend vers l'origine du plan de phase. En substituant (3.10) dans (3.4) on obtient :

$$\begin{cases} k\dot{e}_1 + \dot{e}_2 = -\frac{1}{T_S} \cdot \Psi \rightarrow \dot{e}_2 = -\frac{1}{T_S} \cdot \Psi - k\dot{e}_1 \\ \dot{e}_2 = \ddot{Y} - \dot{x}_2 \end{cases} \quad (3.13)$$

A partir des équations (3.9) et (3.12), la loi de commande est écrite comme suit :

$$u = \frac{1}{g(x)} (-f(x) + \ddot{Y}_m + k\dot{e}_2 + \frac{1}{T_S} \cdot \Psi) \quad (3.14)$$

La loi de commande (3.13) force la trajectoire d'état du système à satisfaire l'équation (3.4), et donc converge vers l'attracteur avec une constante de temps T_S et y demeure. Ce faisant la trajectoire d'état en satisfaisant cette condition (3.3) établit une dépendance linéaire entrée et Une interprétation géométrique de l'attracteur dans le portrait de phase est donnée sur (la figure 3.2) [35].

3.9. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la théorie de la commande synergétique, son principe et ces caractéristiques.

Cette commande est connue par sa robustes, et sa simplicité et sa propriété de réduction d'ordre Parmi les commandes robustes modernes qui existent, on trouve la commande par mode glissant, la commande infini ... etc, mais c'est la commande synergétique qui est la plus réalisable en pratique.

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

Chapitre 4 :
Application des
Commandes à Un
Systeme Sous
Actionné

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre, tout d'abord, nous exposons le modèle du pont roulant sous actionné. Ensuite, nous détaillerons le développement de la commande par mode glissant, ainsi que de la commande synergétique et de la commande synergétique sans phase de convergence. Chaque développement sera appliqué à la stabilisation du système « pont roulant », en utilisant l'environnement Matlab. En outre, nous réaliserons un test de robustesse en introduisant des perturbations et des incertitudes sur le modèle. Des résultats de simulation sont donnés, pour montrés l'efficacité des commandes appliquées.

4.2. Le système pont roulant (Crane) :

Le système du pont roulant est un système dynamique composé d'un chariot mobile le long d'une voie horizontale, sur lequel est monté un pendule simple. Le pendule est un bras rigide attaché au chariot à une extrémité, avec une masse ponctuelle à l'autre extrémité figure (4.1). Ce système est souvent utilisé comme un modèle pour étudier les principes de la régulation et du contrôle, ainsi que pour illustrer des concepts de dynamique non linéaire et de stabilité. Le but dans ce travail est de commander deux variables qui sont le déplacement x et l'angle θ avec une seule commande U .

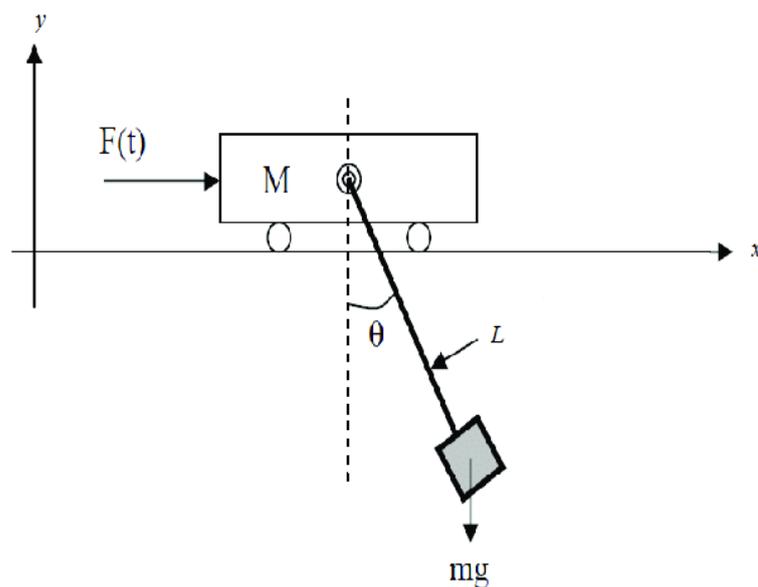


Figure 4.1 : Schéma de l'ensemble chariot-pendule

L'équation dynamique du pendule simple sur chariot est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f_1 + g_1 U + d \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = f_2 + g_2 U + d \end{cases} \quad (4.1)$$

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

$$f_1 = \frac{(-m_1 L \sin(x_3)) * (\cos(x_3) * x_4^2) + \frac{M_1 + m_1 \sin^2(x_3)}{L}}{M_1 + m_1 \sin^2(x_3)} \quad (4.3)$$

$$f_2 = \frac{(m_1 L \sin(x_3)) * x_4^2 - (m_1 g \cos(x_3) \sin(x_3))}{M_1 + m_1 \sin^2(x_3)} \quad (4.2)$$

$$g_1 = \frac{1}{M_1 + m_1 \sin^2(x_3)} \quad (4.3)$$

$$g_2 = \frac{\frac{-\cos(x_3)}{L}}{M_1 + m_1 \sin^2(x_3)} \quad (4.4)$$

d : vecteur de perturbations externes

Où $x_1 = x$ c'est le déplacement de 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_1 la masse du chariot, m_1 et L sont respectivement la masse et la longueur du pendule et U c'est le signal de commande.

4.3. La commande par mode glissant

4.3.1. Synthèse de la loi de commande

Pour mettre en œuvre notre contrôleur sur ce système, la méthode est identique à celle utilisée pour le système précédent :

On choisit la surface comme suit :

$$S_1(t) = \lambda_1 e_1 + e_2 \quad (\lambda > 0) \quad (4.5)$$

$$S_2(t) = \lambda_3 e_3 + e_4 \quad (4.6)$$

$$S(t) = \alpha_1 S_1(t) + \alpha_2 S_2(t) \quad (4.7)$$

Tel que :

$$\Rightarrow \begin{cases} e_1 = x_1 - y_1 \\ e_2 = x_2 - \dot{y}_1 \\ e_3 = x_3 - y_3 \\ e_4 = x_4 - \dot{y}_3 \end{cases} \quad (4.8)$$

y_1 et y_3 Des signaux de référence

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{y}_1 = e_2 = x_2 - \dot{y}_1 \\ \dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{y}_2 \\ \dot{e}_3 = \dot{x}_3 - \dot{y}_3 = e_4 = x_4 - \dot{y}_3 \\ \dot{e}_4 = \dot{x}_4 - \dot{y}_4 \end{cases} \quad (4.9)$$

$$\begin{cases} \ddot{e}_1 = \dot{x}_2 - \ddot{y}_1 \\ \ddot{e}_3 = \dot{x}_4 - \ddot{y}_3 \end{cases} \quad (4.10)$$

On a :

$$\dot{S} = \alpha_1 \dot{S}_1 + \alpha_2 \dot{S}_2 \quad (4.11)$$

$$\dot{S} = \alpha_1 (\lambda_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2) + \alpha_2 (\lambda_2 \dot{e}_3 + \dot{e}_4) \quad (4.12)$$

$$\dot{S} = \alpha_1 (\lambda_1 e_2 + \dot{e}_2) + \alpha_2 (\lambda_2 e_4 + \dot{e}_4) \quad (4.13)$$

$$\dot{S} = \alpha_1 (\lambda_1 (x_2 - \dot{y}_1) + \dot{x}_2 - \ddot{y}_1) + \alpha_2 (\lambda_2 (x_4 - \dot{y}_3) + \dot{x}_4 - \ddot{y}_3) \quad (4.14)$$

$$\dot{S} = \alpha_1 [\lambda_1 (x_2 - \dot{y}_1) + (f_1 + g_1 U - \ddot{y}_1)] + \alpha_2 [\lambda_2 (x_4 - \dot{y}_3) + (f_2 + g_2 U - \ddot{y}_3)] \quad (4.15)$$

$$u_c = \dot{S}(t) = -k \text{sign}(S(t)) \quad (4.16)$$

On substitue (4.16) dans (4.15) :

$$-k \text{sign}(S(t)) = \alpha_1 [\lambda_1 (x_2 - \dot{y}_1) + (f_1 + g_1 U - \ddot{y}_1)] + \alpha_2 [\lambda_2 (x_4 - \dot{y}_3) + (f_2 + g_2 U - \ddot{y}_3)] \quad (4.17)$$

On peut faire sortir l'expression de la commande U :

$$U_{eq1} = \frac{[(-\lambda_1 x_2) - f_1 + (\lambda_1 \dot{y}_1) + \ddot{y}_1]}{g_1} \quad (4.18)$$

$$U_{eq2} = \frac{[(-\lambda_2 x_4) - f_2 + (\lambda_2 \dot{y}_3) + \ddot{y}_3]}{g_2} \quad (4.19)$$

$$U_{eq} = \frac{\alpha_1 g_1 U_{eq1} + \alpha_2 g_2 U_{eq2}}{\alpha_1 g_1 + \alpha_2 g_2} \quad (4.20)$$

$$U_{sw} = \frac{-1}{\alpha_1 g_1 + \alpha_2 g_2} k \text{sign}(S(t)) \quad (4.21)$$

$$U = U_{eq} + U_{sw} \quad (4.22)$$

4.3.2. Etude de la stabilité :

On considère la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} S^2(t) \quad (4.25)$$

La dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\dot{V} = S(t) \dot{S}(t) \quad \forall S(t) \neq 0 \quad (4.26)$$

$$\dot{V} = S(\alpha_1 \dot{S}_1 + \alpha_2 \dot{S}_2) \quad (4.27)$$

$$\dot{V} = S(\alpha_1 [\lambda_1 (x_2 - \dot{y}_1) + (f_1 + g_1 U - \ddot{y}_1)] + \alpha_2 [\lambda_2 (x_4 - \dot{y}_3) + (f_2 + g_2 U - \ddot{y}_3)]) \quad (4.28)$$

4.3.3. Résultats de simulation :

a- Cas sans perturbation :

Les constantes du système sont données par : $M_1 = 2 \text{ kg}$, $m_1 = 0.2 \text{ kg}$, $L = 0.25 \text{ m}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$.

Les conditions initiales sont données par le vecteur : $x = (0.5, 0, \frac{\pi}{6}, 0)$ et les sorties désirées sont données par $(y_1 = 3, y_3 = 0)$.

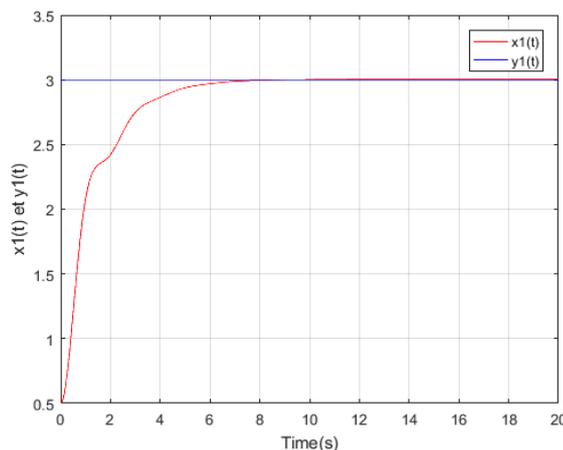


Figure 4.2: La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$

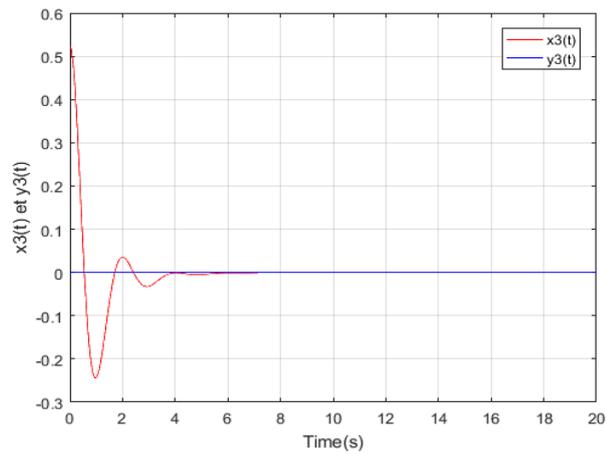


Figure 4.3 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$

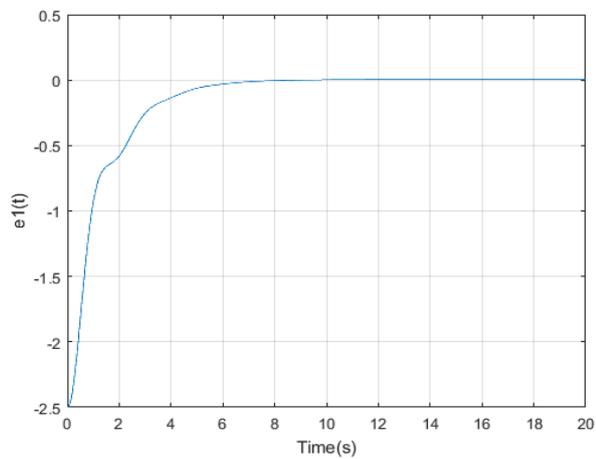


Figure 4.4 : Le signal d'erreur $e_1(t)$

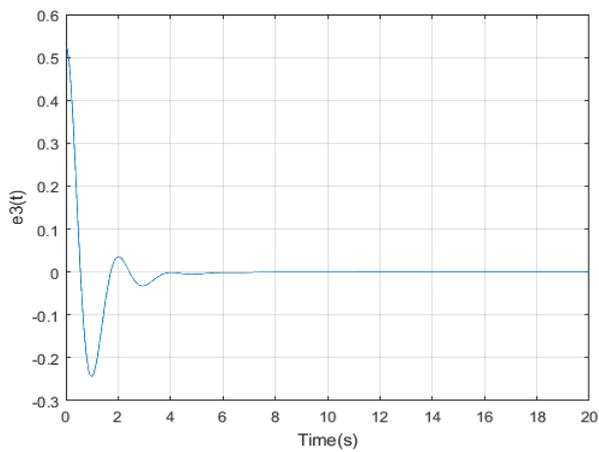


Figure 4.5 : Le signal d'erreur $e_3(t)$

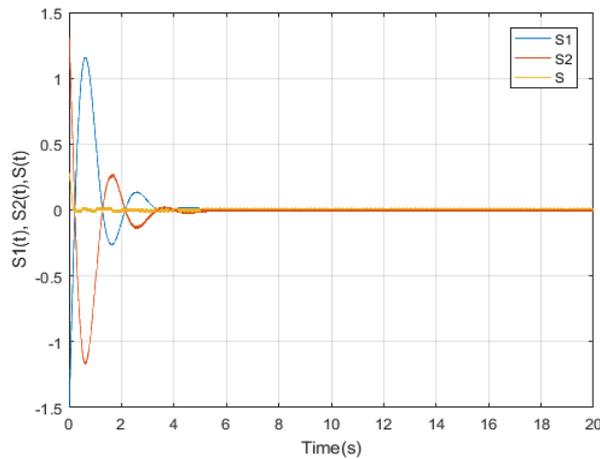


Figure 4.6: La surface de glissement

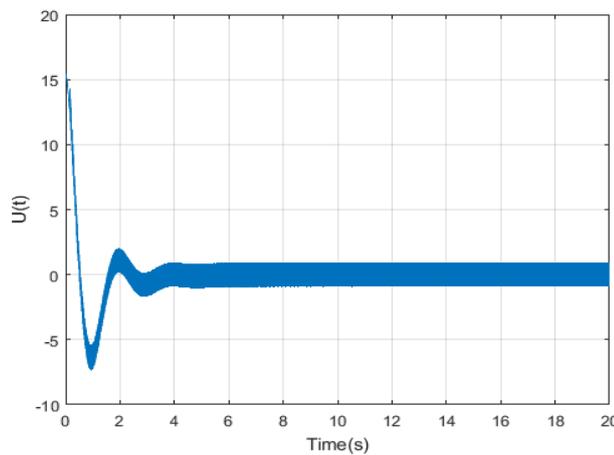


Figure 4.7 : Le signal de commande

L'interprétation des résultats :

D'après les figures (4.2) et (4.3) on peut voir que le système est stable et converge vers ses valeurs désirées. Les erreurs sont représentées par la figure (4.4) et la figure (4.5), elles tendent vers zéro, avec un temps de convergence respectivement égal à 6 secondes et à 4 secondes, pour le cas sans perturbations. Les surfaces de glissement qui sont présentées par la figure (4.6) sont stable. La figure (4.7) montre le signal de la commande, on peut remarquer que ce signal comporte le phénomène de chattering.

b- Cas avec perturbations :

Les constantes du système sont données par : $M_1 = 2 \text{ kg}$, $m_1 = 0.2 \text{ kg}$, $L = 0.25 \text{ m}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$.

Les conditions initiales sont données par le vecteur : $x = \left(0.5, 0, \frac{\pi}{6}, 0 \right)$ et les sorties désirées sont donnée par $(y_1 = 3, y_3 = 0)$.

L'incertitude paramétrique concernant la masse du chariot : $m = m + \Delta m$ et $\Delta m = 0.05$.

En appliquant la perturbation externe suivante : $d=3.5*\sin(t)$.

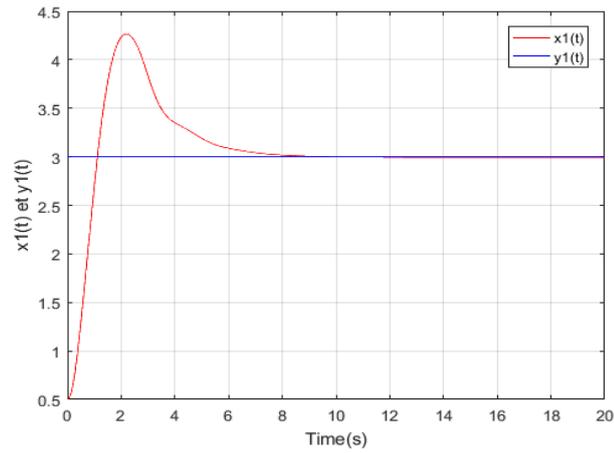


Figure 4.8 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$.

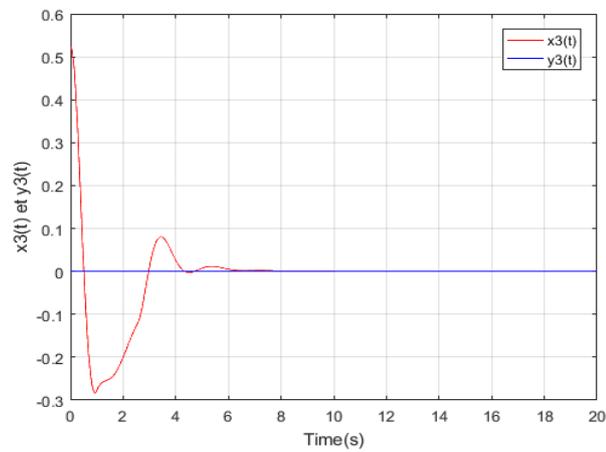


Figure 4.9 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$.

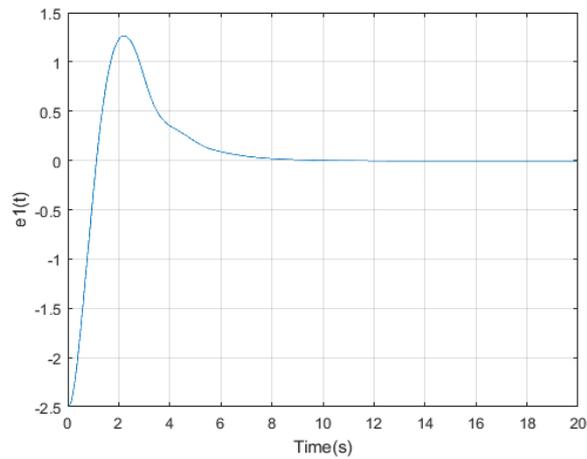


Figure 4.10 : Le signal d'erreur $e_1(t)$.

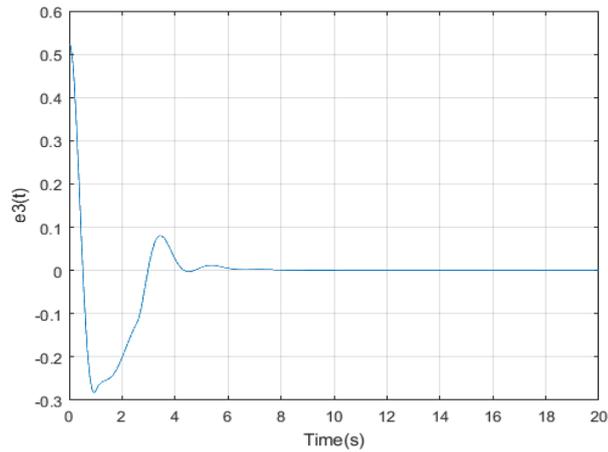


Figure 4.11 : Le signal d'erreur $e_3(t)$.

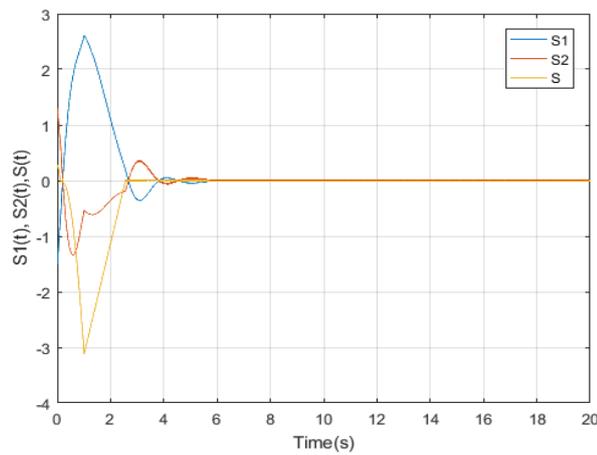


Figure 4.12 : La surface de glissement.

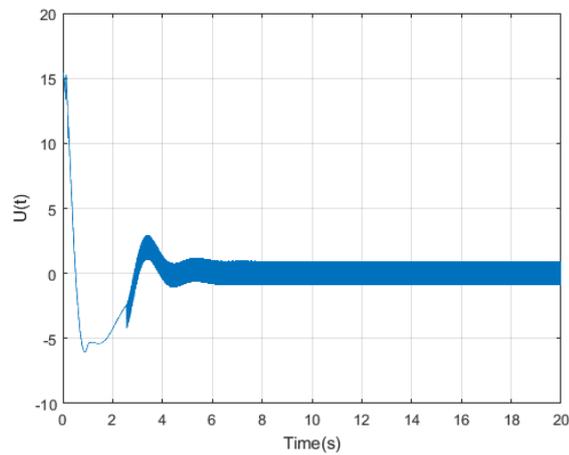


Figure 4.13 : Le signal de commande.

L'interprétation des résultats :

Dans ce cas nous allons discuter les performances d'un système de commande pour un pont roulant, en tenant compte des perturbations et des incertitudes paramétriques. Dans les figures (4.8) et (4.9), on peut voir que le système a pu suivre les signaux de référence, mais le temps de convergence est beaucoup plus lent par rapport au cas sans perturbations, ce qui suggère une certaine sensibilité de la commande lors de la phase de convergence du système.

La convergence des erreurs vers zéro, sont montré par les figures (4.10) et (4.11).

La figure (4.13) montre le signal de commande $U(t)$. Il semble que ce signal nécessite plus de temps par rapport au cas sans perturbations, mais une fois que le système atteint la phase de glissement, la commande devient stable et robuste, mais toujours elle comporte le phénomène de chattering.

D'après la figure (4.6), on peut remarquer que les surfaces de glissement sont stables, mais après un temps plus lent que le cas sans perturbation.

4.4 La commande synergétique

4.4.1. Synthèse de la loi de commande

Pour appliquer notre contrôleur à ce système, on procède exactement comme pour le système précédent :

$$\Psi_1 = \lambda_1 e_1 + e_2 \quad (4.29)$$

$$\Psi_2 = \lambda_2 e_3 + e_4 \quad (4.30)$$

$$\Psi = \Psi_1 + \lambda_3 \Psi_2 \quad (4.31)$$

D'après ($T\dot{\Psi} + \Psi = 0$)

On peut faire sortir l'expression de la commande U

$$\dot{\Psi} = -\frac{\Psi}{T} \quad (4.32)$$

$$\dot{\Psi} = \dot{\Psi}_1 + \lambda_3 \dot{\Psi}_2 \quad (4.33)$$

$$\dot{\Psi} = \lambda_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2 + \lambda_3(\lambda_2 \dot{e}_3 + \dot{e}_4) \quad (4.34)$$

$$\dot{\Psi} = \lambda_1(x_2 - \dot{y}_1) + \dot{x}_2 - \dot{y}_1 + \lambda_3(\lambda_2(x_4 - \dot{y}_3) + \dot{x}_4 - \dot{y}_3) \quad (4.35)$$

$$\dot{\Psi} = \lambda_1(x_2 - \dot{y}_1) + (f_1 + g_1 U - \dot{y}_1) + \lambda_3(\lambda_2(x_4 - \dot{y}_3) + (f_2 + g_2 U - \dot{y}_3)) \quad (4.36)$$

$$-\frac{\Psi}{T} = \lambda_1(x_2 - \dot{y}_1) + (f_1 + g_1 U - \dot{y}_1) + \lambda_3(\lambda_2(x_4 - \dot{y}_3) + (f_2 + g_2 U - \dot{y}_3)) \quad (4.37)$$

$$U = \frac{1}{g_1 + \lambda_3 g_2} \left[-\frac{\Psi}{T} - \lambda_1(x_2 - \dot{y}_1) - (f_1 - \dot{y}_1) - \lambda_3 \lambda_2(x_4 - \dot{y}_3) - \lambda_3(f_2 - \dot{y}_3) \right] \quad (4.38)$$

4.4.2. Etude de la stabilité :

On considère la fonction de lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} \Psi^2(t) \quad (4.39)$$

La dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\dot{V} = \Psi(t) \dot{\Psi}(t) \quad (4.40)$$

$$\dot{V} = \Psi \left(-\frac{\Psi}{T} \right) \quad (4.41)$$

$$\dot{V} = -\frac{\Psi^2}{T} \quad (4.42)$$

On voit que $\dot{V} < 0$, ce qui garantit que tous les signaux sont bornés et stables.

4.4.2. Résultats de simulation :

a- Cas sans perturbation :

Les constantes du système sont données par : $M_1 = 2 \text{ kg}$, $m_1 = 0.2 \text{ kg}$, $L = 0.25 \text{ m}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $T=0.2$.

Les conditions initiales sont données par le vecteur : $x = (0.5, 0, \frac{\pi}{6}, 0)$ et les sorties désirées sont donnée par ($y_1 = 3$, $y_3 = 0$).

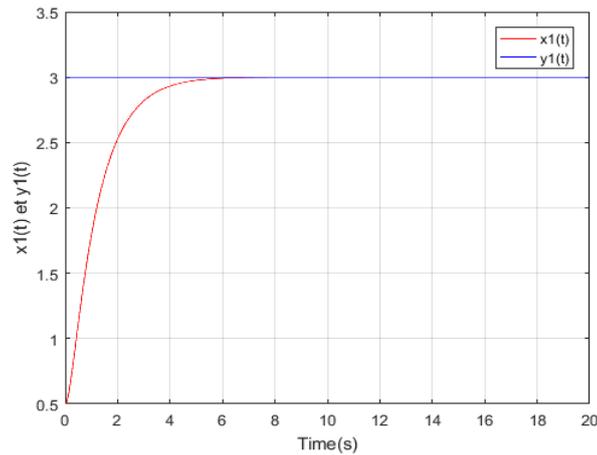


Figure 4.14 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$.

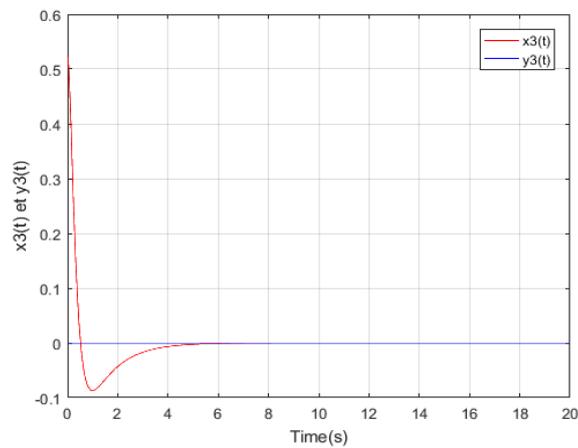


Figure 4.15 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$.

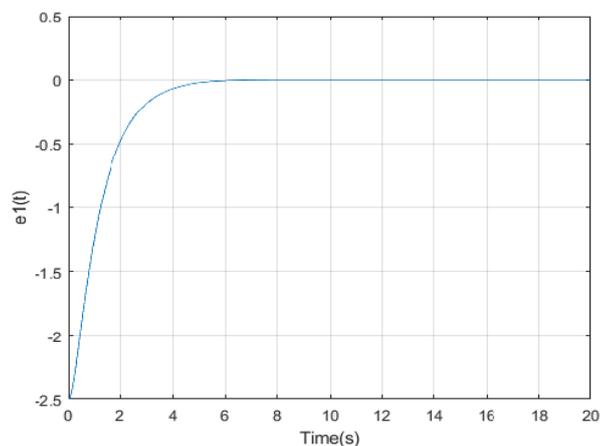


Figure 4.16 : Le signal d'erreur $e_1(t)$.

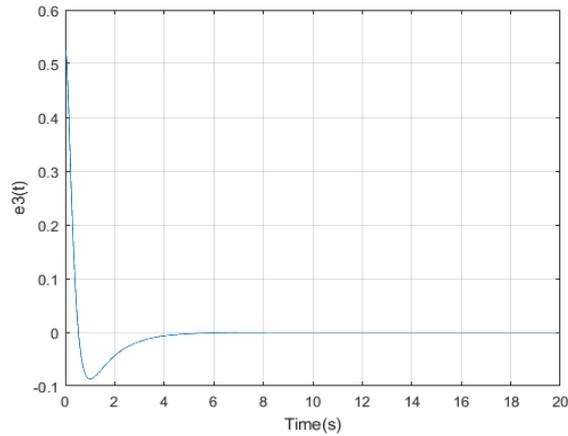


Figure 4.17 : Le signal d'erreur $e_3(t)$.

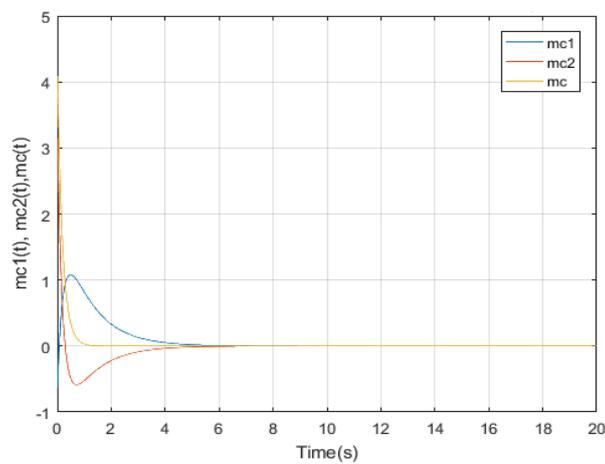


Figure 4.18 : La macro variable $\Psi(t)$.

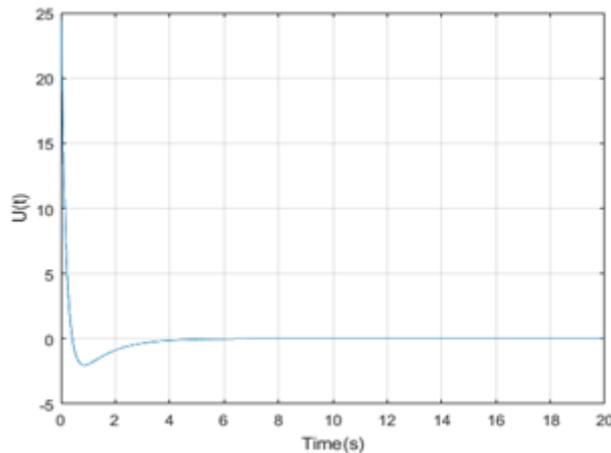


Figure 4.19 : Le signal de commande.

L'interprétation des résultats :

Les figures (4.14) et (4.15) montrent que le système est stable et les signaux de sortie convergent vers leurs références. Les figures (4.16) et (4.17) représentent les erreurs, on peut remarquer que ces erreurs convergent vers zéro. Le figure (4.18) représenté les macro-variables, on remarque que ces signaux sont stable. Le signal de commande $U(t)$ est représenté par la figure (4.19), ce signal est stable et lisse.

b- Cas avec perturbations :

Les constantes du système sont données par : $M_1 = 2 \text{ kg}$, $m_1 = 0.2 \text{ kg}$, $L = 0.25 \text{ m}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $T=0.2$.

Les conditions initiales sont données par le vecteur : $x = \left(0.5, 0, \frac{\pi}{6}, 0 \right)$ et les sorties désirées sont donnée par $(y_1 = 3, y_3 = 0)$.

L'incertitude paramétrique concernant la masse du chariot : $m = m + \Delta m$ et $\Delta m = 0.05$.

En appliquant la perturbation externe suivante : $d=3.5*\sin(t)$.

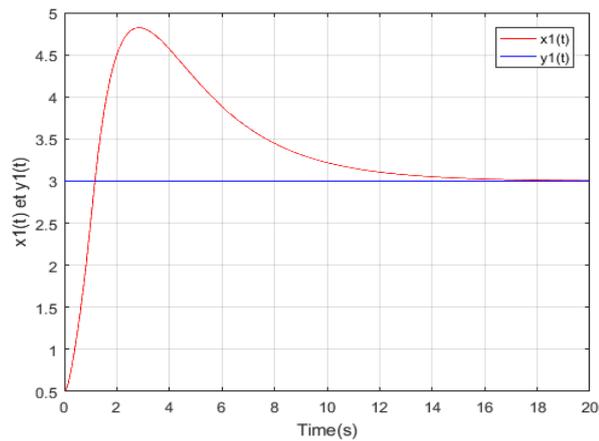


Figure 4.20 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$.

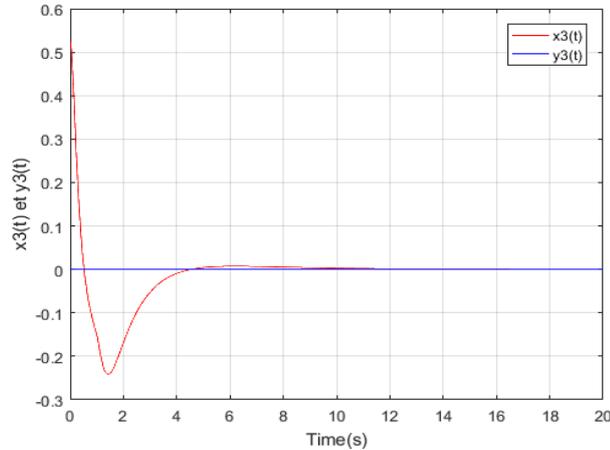


Figure 4.21 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$.

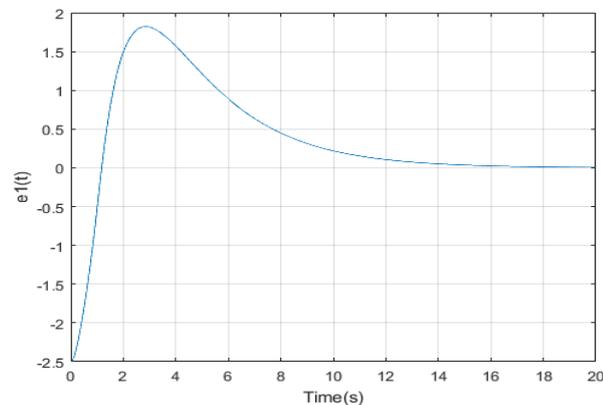


Figure 4.22 : Le signal d'erreur $e_1(t)$.

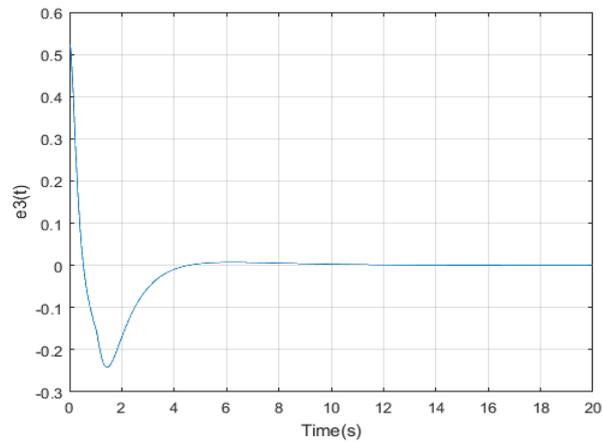


Figure 4.23 : Le signal d'erreur $e_3(t)$.

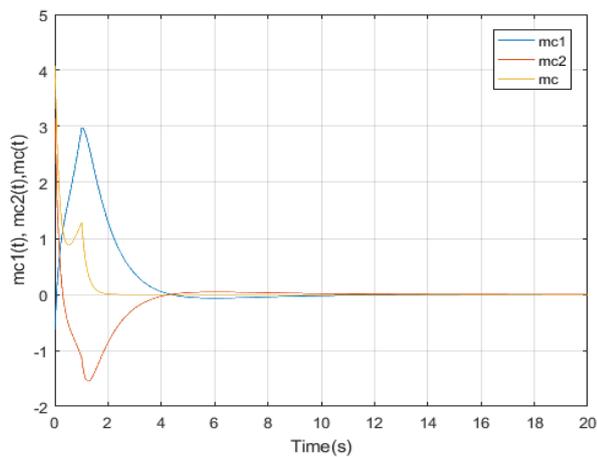


Figure 4.24 : La macro variable $\Psi(t)$.

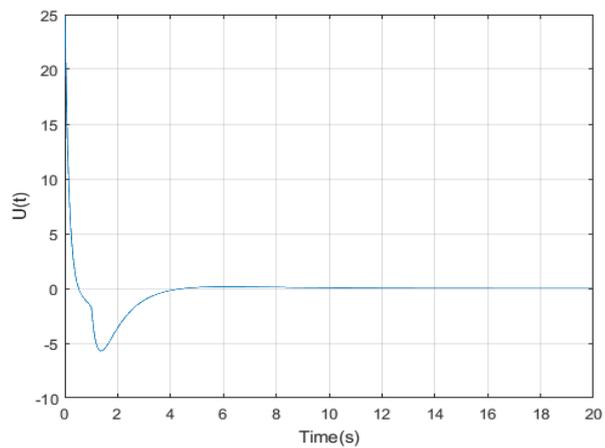


Figure 4.25 : Le signal de commande.

L'interprétation des résultats :

Après l'application des perturbations sur le système proposé au niveau de la phase de convergence, on constate que la convergence de l'erreur vers zéro, prend un temps énormément lent, comme illustré dans les figures (4.22) et (4.23), ce qui implique que le système a difficilement pu suivre les signaux de référence, c'est ce qu'on voit sur les figures (4.20) et (4.21). Ceci met en évidence la sensibilité de la commande pendant la phase de convergence du système. La figure

(4.24) représente les macro-variables, tandis que le signal de commande $U(t)$ est dépeint dans la figure (4.25). On observe que ce signal requiert plus d'énergie par rapport au cas sans perturbations, mais il demeure stable et régulier, ce qui témoigne de la stabilité et de la robustesse de la commande.

4.5. La commande synergétique sans phase de convergence

4.5.1. Synthèse de loi de commande

Dans cette section, nous présentons une approche novatrice visant à éliminer la phase de convergence et à assurer la stabilité du système en boucle fermée. Dans cette nouvelle approche, nous reformulerons la macro variable dynamique en définissant une nouvelle macro variable dans :

$$\Psi_1(t) = \lambda_1 e_1 + e_2 - Z_1(x_0, t) + \beta_1 \int_0^t e_1 \quad (4.43)$$

$$\Psi_2(t) = \lambda_3 e_3 + e_4 - Z_2(x_0, t) + \beta_2 \int_0^t e_3 \quad (4.44)$$

$$\Psi(t) = \Psi_1(t) + \lambda_3 \Psi_2(t) \quad (4.45)$$

Où la macro variable définie en (4.29) et (4.30), Z_1 et Z_2 un terme ajouté à la macro-variable, définie par (4.46) et (4.47) :

$$Z_1(x_0, t) = (1 + a_1 t) e^{-\epsilon t} \cdot \Psi_1(x_0) \quad (4.46)$$

$$Z_2(x_0, t) = (1 + a_1 t) e^{-\epsilon t} \cdot \Psi_2(x_0) \quad (4.47)$$

Tel que :

$$\Psi_1(x_0) = \lambda_1 e_1(x_0) + e_2(x_0) + \beta_1 \int_0^t e_1(x_0, t) \quad (4.48)$$

$$\Psi_2(x_0) = \lambda_2 e_2(x_0) + e_4(x_0) + \beta_2 \int_0^t e_3(x_0, t) \quad (4.49)$$

Et x_0 c'est le vecteur x à l'instant initial.

La dérivée temporelle de l'équation. (4.38) peut être réécrit comme suit :

$$\dot{\Psi} = \dot{\Psi}_1 + \lambda_3 \dot{\Psi}_2 \quad (4.50)$$

$$\dot{\Psi} = (\lambda_1 \dot{e}_1 + \dot{e}_2 - \dot{Z}_1 + \beta_1 \dot{e}_1) + \lambda_3 (\lambda_2 \dot{e}_3 + \dot{e}_4 - \dot{Z}_2 + \beta_2 \dot{e}_3) \quad (4.51)$$

$$\dot{\Psi} = (\lambda_1 \dot{e}_2 + \dot{e}_2 - \dot{Z}_1 + \beta_1 \dot{e}_1) + \lambda_3 (\lambda_2 \dot{e}_4 + \dot{e}_4 - \dot{Z}_2 + \beta_2 \dot{e}_3) \quad (4.52)$$

$$\dot{\Psi} = (\lambda_1(x_2 - \dot{y}_1) + \dot{x}_2 - \dot{y}_1 - \dot{Z}_1 + \beta_1 \dot{e}_1) + \lambda_3 (\lambda_2(x_4 - \dot{y}_3) + \dot{x}_4 - \dot{y}_3 - \dot{Z}_2 + \beta_2 \dot{e}_3) \quad (4.53)$$

$$\dot{\Psi} = \begin{bmatrix} [\lambda_1(x_2 - \dot{y}_1) + (f_1 + g_1 U - \dot{y}_1 - \dot{Z}_1 + \beta_1 \dot{e}_1)] \\ + \lambda_3 [\lambda_2(x_4 - \dot{y}_3) + (f_2 + g_2 U - \dot{y}_3 - \dot{Z}_2 + \beta_2 \dot{e}_3)] \end{bmatrix} \quad (4.54)$$

D'après ($T\dot{\Psi} + \Psi = 0$).

On peut faire sortir l'expression de la commande U

$$-\frac{\Psi}{T} = \begin{bmatrix} [\lambda_1(x_2 - \dot{y}_1) + (f_1 + g_1 U - \dot{y}_1 - \dot{Z}_1 + \beta_1 \dot{e}_1)] \\ + \lambda_3 [\lambda_2(x_4 - \dot{y}_3) + (f_2 + g_2 U - \dot{y}_3 - \dot{Z}_2 + \beta_2 \dot{e}_3)] \end{bmatrix} \quad (4.55)$$

$$U = \frac{1}{g_1 + \lambda_3 g_2} \begin{bmatrix} -\frac{\psi}{T} - \lambda_1(x_2 - \dot{y}_1) - (f_1 + \dot{y}_1 + \dot{Z}_1 - \beta_1 e_1) \\ -\lambda_3[\lambda_2(x_4 - \dot{y}_3) + (f_2 - \dot{y}_3 - \dot{Z}_2 + \beta_2 e_3)] \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

4.5.2. Etude de la stabilité :

On considère la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} \Psi^2(t) \quad (4.57)$$

La dérivée par rapport au temps est donnée par :

$$\dot{V} = \Psi(t) \dot{\Psi}(t) \quad (4.56)$$

$$\dot{V} = \Psi \left(-\frac{\dot{\Psi}}{T} \right) \quad (4.58)$$

$$\dot{V} = -\frac{\Psi^2}{T} \quad (4.59)$$

On voit que $\dot{V} < 0$, ce qui garantit que tous les signaux sont bornés et stables.

4.5.3. Résultats de simulation :

Cas sans perturbation :

Les constantes du système sont données par : $M_1 = 2 \text{ kg}$, $m_1 = 0.2 \text{ kg}$, $L = 0.25 \text{ m}$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $T = 0.2$.

Les conditions initiales sont données par le vecteur : $x = (0.5, 0, \frac{\pi}{6}, 0)$ et les sorties désirées sont données par ($y_1 = 3$, $y_3 = 0$).

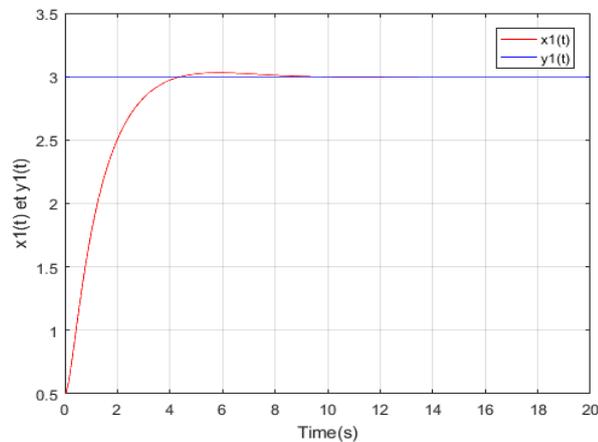


Figure 4.26 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$.

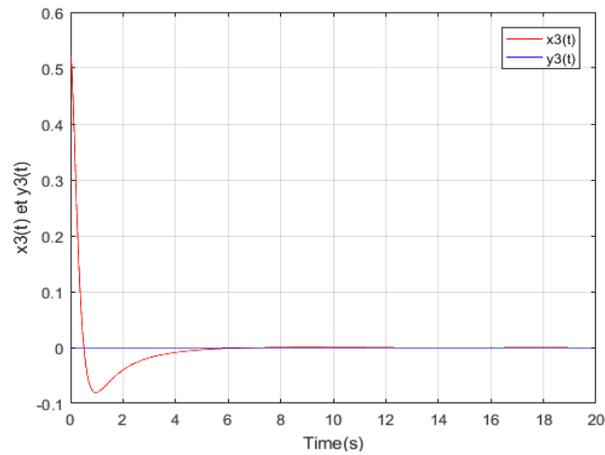


Figure 4.27 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$.

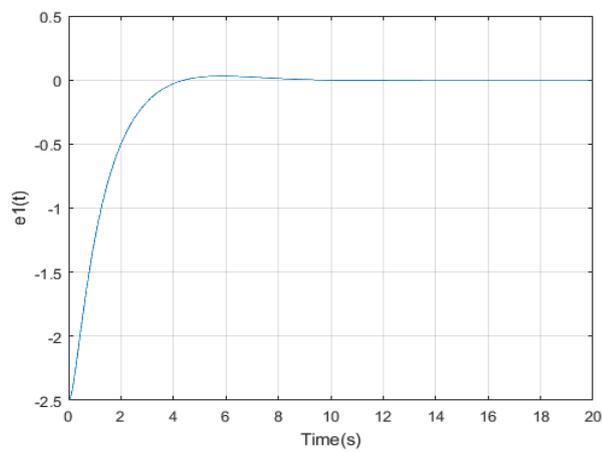


Figure 4.28 :Le signal d'erreur $e_1(t)$.

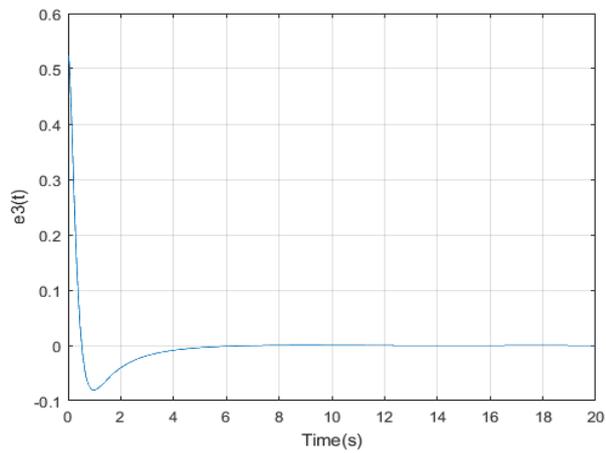


Figure 4.29 : Le signal d'erreur $e_3(t)$.

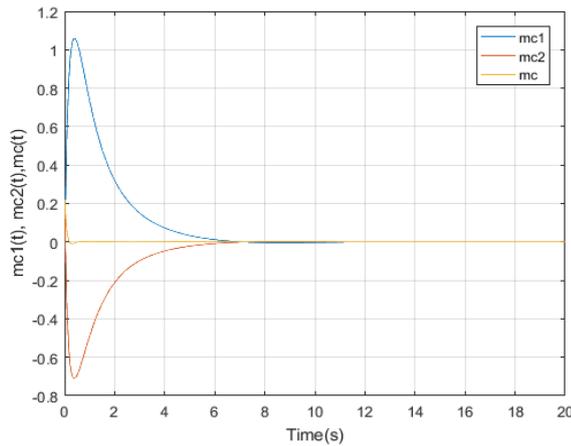


Figure 4.30 : La macro variable $\Psi(t)$.

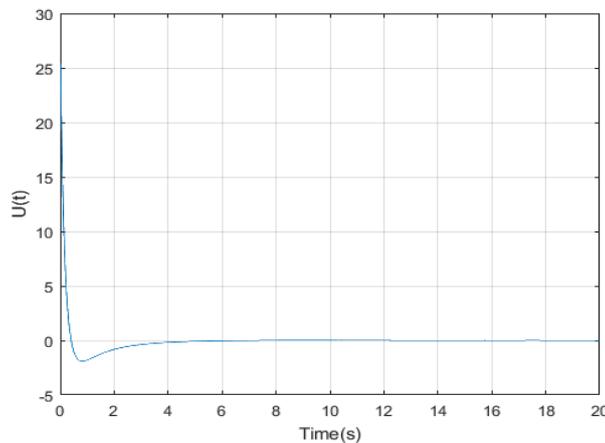


Figure 4.31 : le signal de commande.

L'interprétation des résultats :

Les figures (4.26) et (4.27) démontrent que le système est stable, où les signaux de sortie convergents vers leurs références, avec un temps de réponse plus amélioré par rapport à la commande synergétique avec phase de convergence. Les figures (4.28) et (4.29) indiquent une convergence des erreurs vers zéro. Le figure (4.30) confirme la stabilité des macro-variables. En ce qui concerne le signal de commande $U(t)$, sa stabilité et sa régularité sont mises en évidence par la figure (4.31).

b-Cas avec perturbations :

Les constantes du système sont données par : $M_1 = 2 \text{ kg}$, $m_1 = 0.2 \text{ kg}$, $L = 0.25 \text{ m}$, $g=9.8 \text{ m/s}^2$, $T=0.2$.

Les conditions initiales sont données par le vecteur : $x = \left(0.5, 0, \frac{\pi}{6}, 0\right)$ et les sorties désirées sont donnée par $(y_1 = 3, y_3 = 0)$

L'incertitude paramétrique concernant la masse du chariot : $m = m + \Delta m$ et $\Delta m = 0.05$.

En appliquant la perturbation externe suivante : $d=3.5*\sin(t)$.

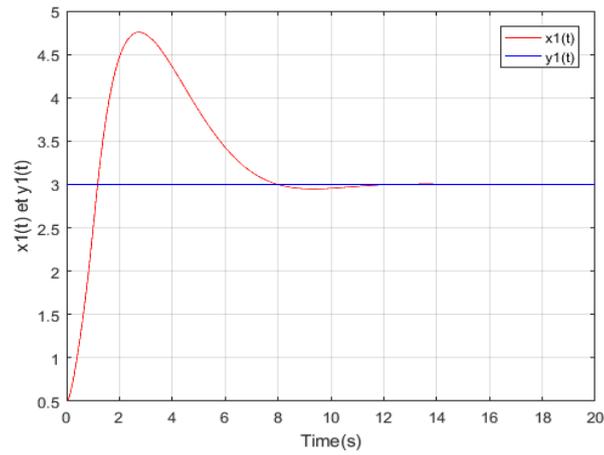


Figure 4.32 : La sortie du système $x_1(t)$ et la sortie désiré $y_1(t)$.

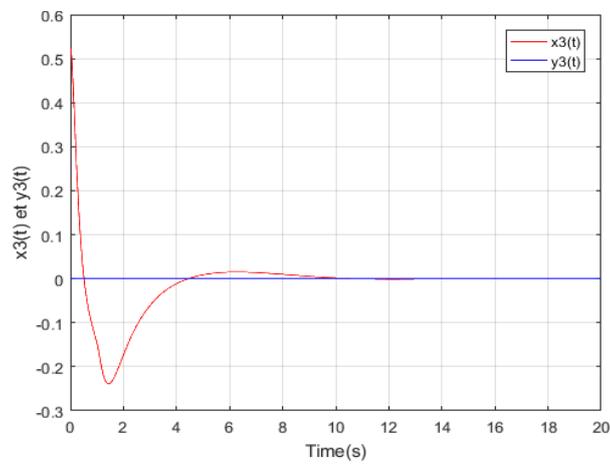


Figure 4.33 : La sortie du système $x_3(t)$ et la sortie désiré $y_3(t)$.

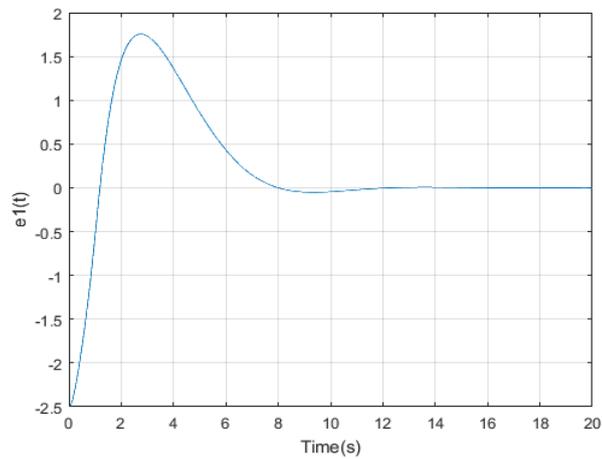


Figure 4.34 : Le signal d'erreur $e_1(t)$.

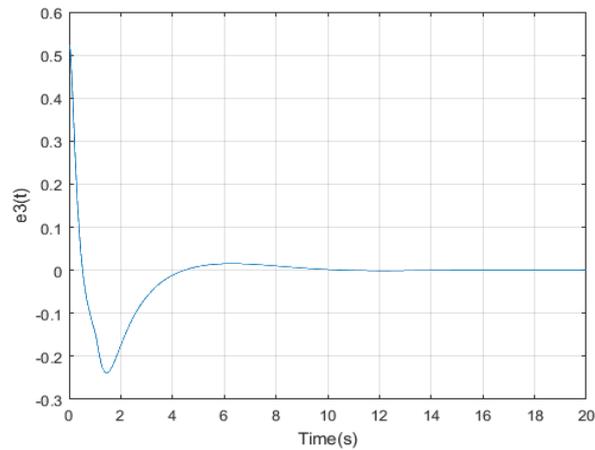


Figure 4.35 : Le signal d'erreur $e_3(t)$.

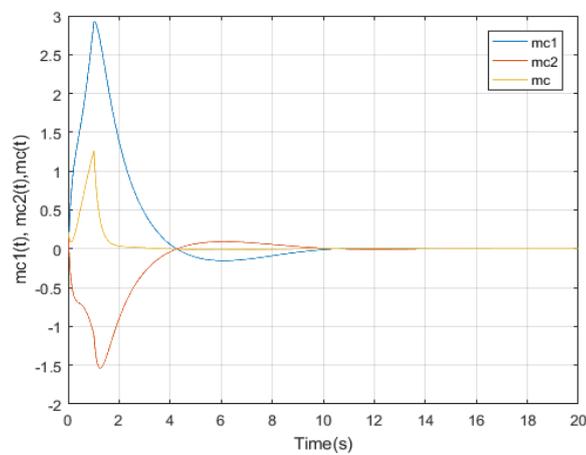


Figure 4.36 : La macro variable $\Psi(t)$.

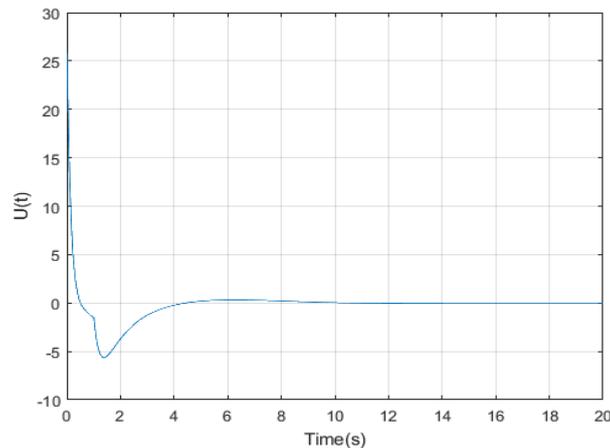


Figure 4.37 : Le signal de commande.

L'interprétation des résultats :

D'après les figure (4.32) et (4.33) on voit que malgré l'existence des perturbations et de l'incertitude paramétrique, le système suit le signal de référence, avec un temps de réponse moins que celui de la commande synergétique simple avec perturbation. Les figures (4.34) et (4.35), qui représentent respectivement les erreurs de convergence et les macro-variables, convergent vers zéro. La figure (4.37) représente le signal de commande ce dernier est stable et lisse.

Les résultats de ces simulations mettent en évidence que l'approche de commande synergétique sans phase de convergence est robuste face aux variations de paramètres et aux perturbations. En d'autres termes, cette méthode de commande démontre une forte robustesse, même lors de la phase de convergence, tout en assurant de bonnes performances du système en termes de stabilité et de temps de réponse.

4.6. Comparaison entre les commandes appliquées

En comparant brièvement les différentes commandes utilisées, à savoir la commande par mode glissant simple (SMC), la commande synergétique (SYC), la commande synergétique sans phase de convergence (SYC -WRP)

4.6.1. Comparaison entre la commande par mode glissant et la commande synergétique

D'après les figures (4.38), on remarque que dans les deux commandes, le système a pu suivre ses références. Cependant, les performances ne sont pas identiques en termes de qualité, comme le montrent clairement l'erreur dynamique et le temps de réponse du système. La commande synergétique (SYC) présente un temps de réponse supérieur inférieur à celui de la commande par mode glissant. La figure (4.39), représente les signaux des deux commandes, où on voit nettement que le signal de la commande synergétique est plus lisse et le système ne demande pas beaucoup d'énergie par rapport à la commande par mode glissant (SMC).

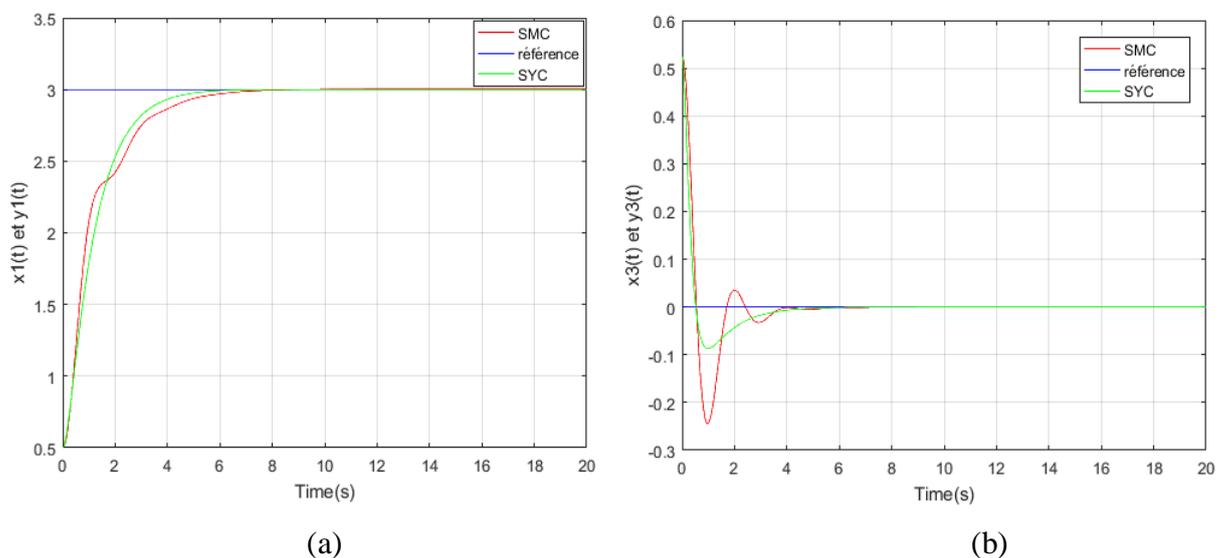


Figure 4.38 : Les réponses du système ($y1$ (a) et $y3$ (b)).

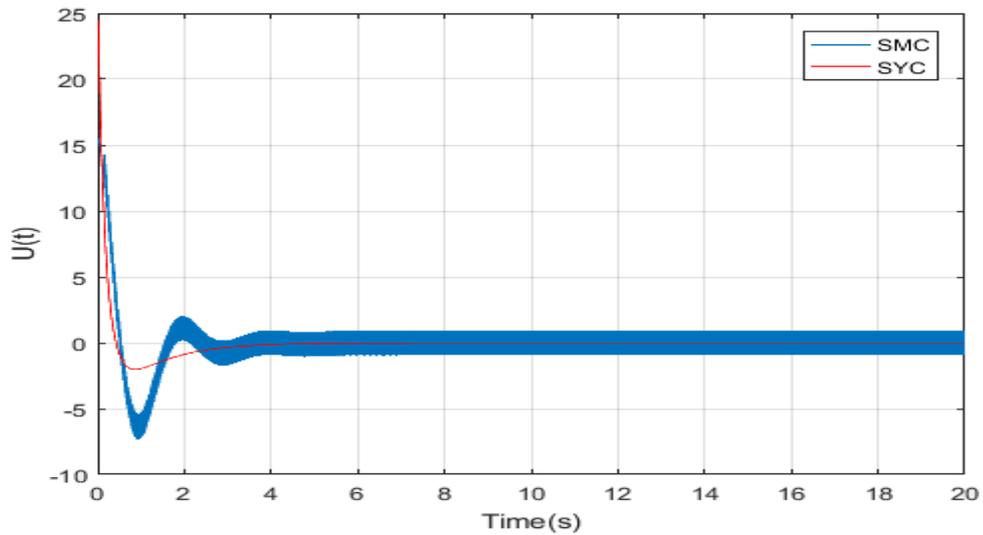


Figure 4.39 : Les signaux des commandes.

4.6.2. Comparaison entre la commande synergétique et la commande synergétique sans phase de convergence (cas sans perturbation)

La figure (4.40) représente les réponses du système (y_1 et y_3) pour les deux commandes synergétique (SYC) et synergétique sans phase de convergence (SYC-WRP). On voit que pour les deux commandes, le système a pu suivre ses références, mais avec une amélioration au niveau du temps de réponse pour la commande synergétique sans phase de convergence, tout en gardant presque la même qualité du signal de commande, comme le montre la figure (4.41).

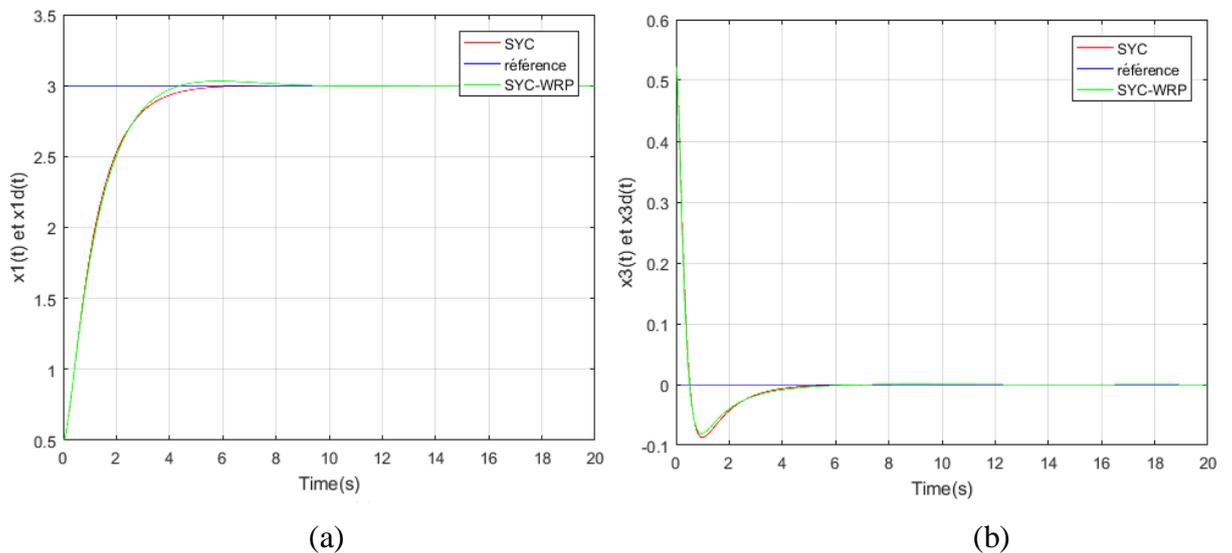


Figure 4.40 : Les réponses du système (y_1 (a) et y_3 (b)).

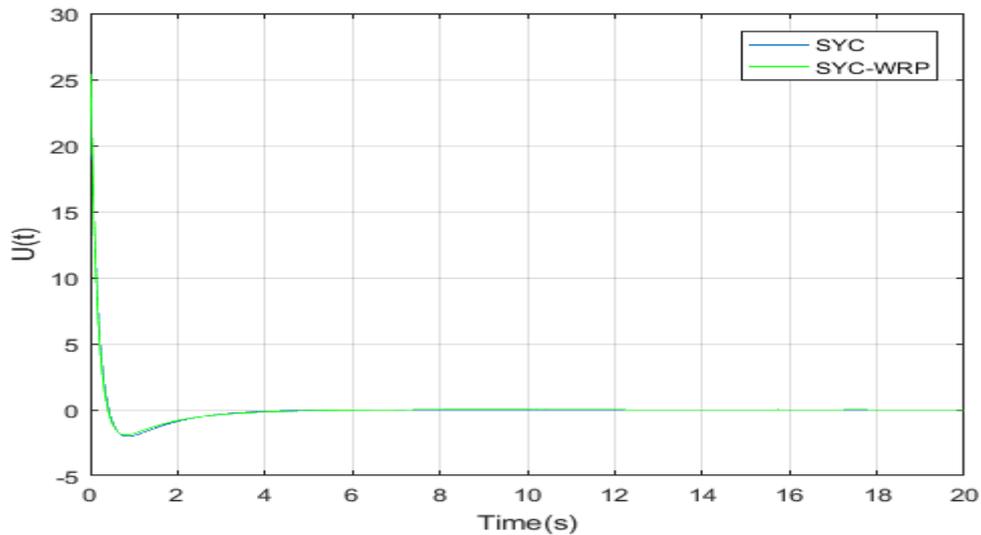


Figure 4.41 : Les signaux des commandes.

4.6.3. Comparaison entre la commande synergétique et la commande synergétique sans phase de convergence (cas avec perturbation)

Les figures (4.42) et (4.43) comparent la commande synergétique à la commande synergétique sans phase de convergence dans le cas avec perturbations. D'après la figure (4.42) on voit que les perturbations affectent le système, le faisant d'abord diverger avant de converger, mais avec un temps de réponse considérablement plus long lors de l'utilisation de la commande synergétique simple (SYC). Cette limitation est corrigée en appliquant la commande synergétique sans phase de convergence (SYC-WRP), où le temps de réponse est réduit de plus de 50% par rapport à celui de la commande synergétique (SYC). La figure (4.43), représente les signaux des deux commandes, où on voit presque même qualité du signal.

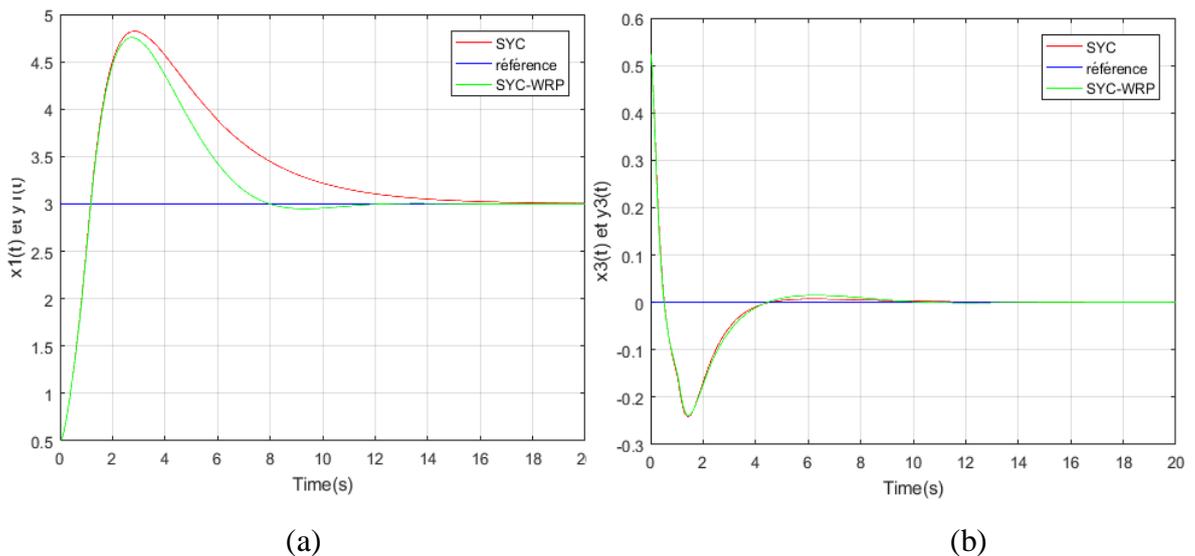


Figure 4.42 : les réponses du système (y_1 (a) et y_3 (b)).

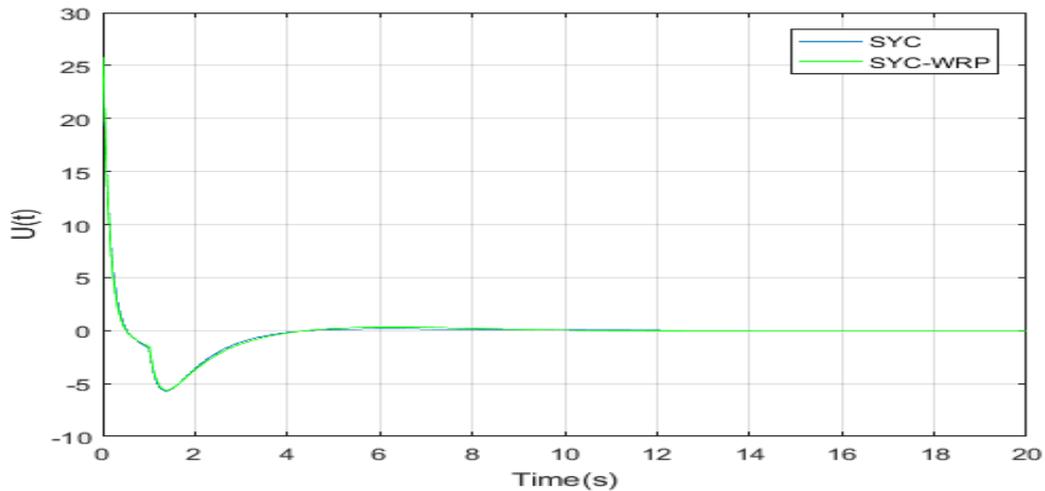


Figure 4.43 : Les signaux des commandes.

4.7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a développé la commande par mode de glissant (SMC), la commande synergétique (SYC) et la commande synergétique sans phase de convergence (SYC-WRP), pour un système sous actionné d'ordre deux qui est le pont roulant.

Les lois de contrôle sont synthétisées et une étude de la stabilité est considérée pour chaque type de commande.

La commande synergétique (SYC) a permis d'éliminer le problème du chattering de la commande par mode glissant (SMC), et la commande synergétique sans phase de convergence (SYC-WRP) a permis d'éviter le problème de la perturbation, qui peut affecter le système en le déstabilisant dans la phase de convergence.

Pour montrer la différence entre les approches proposées, une application sur le système pont roulant est faite. Les résultats de simulation de la commande synergétique (SYC) ont été très satisfaisants pour la stabilisation et la robustesse du système, par rapport aux autres approches.

Conclusion générale

Dans ce mémoire de fin d'étude, nous avons traité le problème de la commande des systèmes non linéaires et sous-actionnés en utilisant des approches innovantes : la commande par mode glissant et la commande synergétique avec et sans phase de convergence, ces techniques de commande ont été utilisées entant que commandes robustes afin de faire une étude comparative et montrer celle qui donne les meilleurs résultats en terme de stabilité et de robustesse ,en présence de incertitudes et des perturbations.

Dans le premier chapitre, nous avons examiné les caractéristiques des systèmes non linéaires et les défis associés à leur commande. Nous avons constaté que les approches traditionnelles de commande peuvent être inefficaces pour ces systèmes en raison de leur complexité et de leur imprévisibilité.

Le deuxième chapitre est consacré à la commande par mode glissant, une approche couramment utilisée pour la commande des systèmes non linéaires. Nous avons présenté les principes fondamentaux de cette méthode, y compris la construction de la surface de glissement et la conception du contrôleur correspondant. Cependant, nous avons souligné que la commande par mode glissant classique souffre du problème de broutement (chattering) qui peut exciter les hautes fréquences et détériorer le système à commander ainsi que les actionneurs, ce qui implique une implémentation difficile de cette commande.

Pour résoudre ce problème, nous avons introduit la commande synergétique dans le troisième chapitre. Nous avons expliqué comment cette commande, permet de prendre en compte l'incertitude et la non-linéarité du système, en améliorant ainsi leurs performances, notamment la robustesse, mais cette dernière reste limitée, dans le cas de présence des perturbations, spécifiquement dans la phase initiale de la commande.

Afin d'améliorer les caractéristiques de la commande synergétique, on a fait une étude et un développement théorique de cette dernière, en éliminant la phase de convergence vers le champ des macro-variables, ainsi nous avons conçu un contrôleur robuste et performant, même sans avoir un modèle exact du système à commander et avec l'existence des perturbations externes.

Enfin, dans le quatrième chapitre, nous avons réalisé des simulations pour évaluer toutes les commandes présentées dans ce mémoire et démontrer l'efficacité de la commande synergétique sans phase de convergence par rapport aux autres commandes. Différents scénarios ont été pris en considération, et les résultats des simulations ont montré que la commande synergétique sans phase de convergence a permet d'obtenir des performances plus améliorées, une meilleure stabilité et une plus grande robustesse.

Références bibliographiques

Références :

- [1] Mukhtar Ullah, Said Ghani Khan, Baizid Khelifa, “Nonlinear Engineerin” journal de Gruyter 2017, volume 6(4): 301–312.
- [2] BORNE, Pierre. “ Analyse et régulation des processus industriels régulation continue ”. Editions Technip, 1993.
- [3] Limita Abdallah, “ systèmes non linéaires ”, (cours), université Echahide Chikh larbi tebessa,202/2023.
- [4] Launay Frédéric, “ Commande Robuste et Systèmes Non Linéaires ”, (cours), Université de Poitiers, 2011.
- [5] Birinda Afaf, “ Existence du contrôle optimal pour les EDSRs linéaires de type champ moyen ”, Mémoire, UNIVERSIT MOHAMED KHIDER, BISKRA, 2018
- [6] Dib Karima, “Synchronisation des systèmes chaotiques”, mémoire, Universitaire Abd Elhafid Boussouf, 2021/2022.
- [7] H. K. Khalil, “Nonlinear Systems, Macmillan” Publishing Company, 1992.
- [8] Khalil, H. K. “Control of nonlinear systems”, Prentice Hall, New York, NY, 2002.
- [9] Emira NECHADI, “ SYSTEMES NON LINEAIRES ”, thèse de doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 1, 21 / 03 / 2013.
- [10] GHERBI Aida, “ Stabilité Globale d’un modèle épidémique SVEI avec vaccination et temps de latence ”, Mémoire, Université Larbi Tébessa – Tébessa, 2020.
- [11] Ourida Chabour, “ Stabilisation des système non linéaire ”, thèse de doctorat, Université Paul Verlaine, 2000.
- [12] Dounya Boukheche, “ Systèmes dynamiques non linéaires ”, Mémoire, Universitaire Abd Elhafid Boussouf, 2021/2022.
- [13] Haddad, N. K., Chemori, A., & Belghith, S, October “External disturbance rejection in IDA-PBC controller for underactuated mechanical systems: From theory to real time experiments”, 2014.
- [14] Liu, Y., & Yu, H. “A survey of underactuated mechanical systems”. IET Control Theory & Applications, 7(7), 921-935, 2013.
- [15] SAIBI Hayat, “ Commande par mode glissant d’ordre fractionnaire d’un réseau électrique ”, Mémoire, Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, 2018.
- [16] KEDJOUTI. Seddiki, MESSAOUDI, Chouaib, “ Réglage des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone a doublé alimentation par des régulateurs en mode glissant ”, Mémoire, Université de M’SILA JUIN 2005.
- [17] BELALA – Fateh, “ La commande par mode glissant basée sur technique de réseau de neurones ”, Mémoire, Université Larbi Tébessi– Tébessa, 2022.
- [18] AYACHE Mohamed Fethi et BEN MADDAH Youcef, “ commande par mode glissant de machine synchrone aimant permanent ”, Mémoire, center universitaire Belhadj Bouchaib Ain T’émouchent institut des sciences et de la technologie, 2019-2020.
- [19] TALHAOUI Hicham, “ Contrôle par mode glissant : Observation et estimation paramétrique d’une machine à induction avec défauts ”, Mémoire, Université Mohamed Khider – Biskra), 28/01/2016.
- [20] Massissilia OUKHENNICHE, “ Commande par mode glissant des systèmes linéaires à retards ”, Mémoire, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [21] Baddou Salim, “ Commande par mode glissant de la machine asynchrone à double cage ”, Mémoire, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2022.

- [22] Soukkou Haroune, “ Commande par mode glissant de la machine asynchrone ”, Mémoire, Université Mohamed Seddik Benyahia – Jijel, 2020.
- [23] Aurélien D, “ Etude de systèmes différentiels fractionnaires ”, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 2010.
- [24] MAOUCHE Youce, “ Commande par mode Glissant d’une Machine Asynchrone ”, Mémoire, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2023.
- [25] A.L. NEMMOUR, “ Contribution à la Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone a doublé alimentation ”, thèse de Magister, Université de Batna Avril, 2002.
- [26] Hocine AMIMEUR, “ Contribution à la Commande d’une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement ”, Mémoire, Université de Batna, 2008.
- [27] ABDELLI Houria, “ Commande par Mode de Glissement d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation ”, Mémoire, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran-Mohamed Boudiaf ,2011.
- [28] Hadji abd elmelek et Amirat Boudjemaa, “ commande des systèmes non linéaires par mode glissant ”, Mémoire, UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGL, 2019 -2020.
- [29] BOUNABI Othmane, “ Commande par mode glissant sans phase de convergence d’un système non linéaire ”, Mémoire, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2023.
- [30] Triki Djihad, “ Commande par mode glissant d’ordre deux d’une machine synchrone à aimants permanents ”, Mémoire, Université Echahid Hamma Lakhdar d’El-Oued Faculté de Technologie ,2016-2017.
- [31] Baleh Liticia, “ Commande synergétique d’un convertisseur Statique ”, Mémoire, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2011.
- [32] Ould Sass Mohamed, “ Commande synergétique d’un moteur asynchrone ”, Mémoire de Magister, Université d’Annaba, 2008.
- [33] Y. Abdenour, “ contribution à la Commande robuste synergétique et à structures variables floue d’un moteur asynchrone à cage ”, thèse de Magister, l’USTHB, 2011.
- [34] FITAH Lahcen, “ Commande synergétique et modélisation floue de type takagi-Sugeno appliquées aux systèmes hyperchaotiques ”, Mémoire, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021/2022.
- [35] Mebarki Ilyas, “ Commande robuste et optimale d’un système sous-actionné ”, Mémoire, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2021/2022.
- [36] ATTOUI Hadjira, “ Contribution à la synthèse de nouvelles stratégies de commande des systèmes d’énergie renouvelable ”, Thèse de Doctorat Sciences, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF 1, 2018.
- [37] Deghboudj Imen, “Commande des systèmes non linéaires par mode glissant d’ordre supérieur ”, Mémoire, Université Frères Mentouri Constantine, 2017.
- [38] Boumaza, H., & Belarbi, K. “ Approximation de la commande prédictive par un système d’inférence flou ”, thèse de Magister, Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2022.

Résumé :

Ce mémoire de fin d'étude se concentre sur l'élaboration d'une approche innovante pour la commande des systèmes non linéaires, en particulier ceux appartenant à la classe des systèmes sous-actionnés. Une étude comparative entre la commande par mode glissant, et la commande synergétique pour les deux cas avec et sans phase de convergence est faite. Cette comparaison a montré l'efficacité de la commande synergétique sans phase de convergence par rapport aux autres techniques élaborées, où plusieurs performances du système ont été améliorées, notamment en ce qui concerne la convergence de l'erreur vers zéro, la rapidité de réponse, la stabilité et la robustesse face aux perturbations et aux incertitudes paramétriques. Les stratégies de commandes proposées ont été illustrées et validées par des simulations réalisées sur le système du pont roulant.

Mot clé : systèmes non linéaires, systèmes sous-actionnés, commande par mode glissant, commande synergétique, stabilité, robustesse.

Abstract:

This final thesis focuses on developing an innovative approach for controlling nonlinear systems, particularly those belonging to the class of underactuated systems. A comparative study is carried out between the sliding mode control and the synergetic control with and without reaching phase cases. This comparison has shown the effectiveness of the synergetic control without reaching phase, regarding to the other elaborated techniques, where the system's performances have been enhanced, especially those concerning the convergence of the error to zero, the rapidity of the response, the stability and the robustness in the face of disturbances and parametric uncertainties. The proposed controls strategies have been illustrated and validated through simulations conducted on the crane system.

Keywords: nonlinear systems, underactuated systems, sliding mode control, synergetic control, stability, robustness.

ملخص:

تركز هذه الأطروحة على تطوير نهج مبتكر للتحكم في الأنظمة غير الخطية، ولا سيما تلك التي تنتمي إلى فئة الأنظمة غير النشطة. تم إجراء دراسة مقارنة بين التحكم في وضع الانزلاق والتحكم التآزري لكلا الحالتين مع وبدون مرحلة التقارب. أظهرت هذه المقارنة فعالية التحكم التآزري دون مرحلة التقارب مقارنة بالتقنيات المتقدمة الأخرى، حيث تم تحسين أداء العديد من الأنظمة، لا سيما فيما يتعلق بتقارب الخطأ نحو الصفر، وسرعة الاستجابة والثبات والمتانة في مواجهة الاضطرابات والقيم البارامترية الغير ثابتة. تم توضيح استراتيجيات التحكم المقترحة والتحقق من صحتها من خلال عمليات المحاكاة التي أجريت على نظام الرافعة.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة غير الخطية، الأنظمة قليلة الفعلية، التحكم في الوضع المنزلق، التحكم التآزري، الثبات، المتانة.