

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire AbdelhafidBoussouf -Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Sciences et Technologie

N° Réf :



Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Spécialité : électromécanique.

Commande adaptative d'un système électromécanique

Réalisé par :

-BOULKHTOUT Radhia
-BOULKROUCH Hadjer

Soutenu devant le jury :

Dr. MEDJANI Farida
Dr. TIAR Mourad
Dr. BENSLIMENE Hocine

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Nous tenons à remercier, tout d'abord, le dieu le plus puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour achever ce travail. Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre promoteur, **Hocine BENSLIMANE** pour sa patience, son orientation et ses remarques constructives.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de notre travail. Nous remercions aussi tous les enseignants de département de sciences et technologie qui ont participé à notre formation.

Dédicace

Nous dédions ce travail à :

Ce travail qui marque la fin de mes études pour l'obtention de mon diplôme de master 02, c'est le moment pour moi de partager cette joie avec les êtres qui me sont les plus chers dont beaucoup sont des guides pour la réussite de mes études.

Les plus chères à mon cœur mes parentes, ma mère et mon père qui m'ont en courage au cours de ma formation, mes chers frère, et sœurs, et à tous ceux qui nous sont chers ma famille.

Radhia

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Anes chères parents, ma mère Djamaa et mon père Hammoud, ainsi que mes chers frère Dahman, Tarik, Fouzi, et mes chères sœurs Hamida, Wafa, Nessrine.

Hudjer

Résumé

Actuellement, les systèmes dynamiques non-linéaires décrivent un grand nombre de phénomènes scientifiques et d'engineering. Cette théorie a été appliquée pour une gamme de problèmes en physique, chimie, mathématique, biologie, médecine, économie et autres. La stabilité a été l'un des problèmes les plus difficiles dans l'étude des systèmes dynamiques non-linéaires.

La commande adaptative est un ensemble de technique utilisé pour l'ajustement automatique en ligne, lorsque les paramètres de régulateur sont inconnus, varient dans le temps et incertains.

L'objectif principale de notre travail est d'appliquer la commande adaptative par Backstepping sur un système non linéaire sous forme triangulaire inférieure paramétrique (bras manipulateur) pour obtenir la loi de commande, et l'étude de la stabilité.

تلخيص

نظرية الأنظمة الديناميكية اللاخطية قد تطورت منذ القرن التاسع عشر أما الآن فان هذه الأنظمة الديناميكية اللاخطية تستعمل لتمثل عددا كبيرا من الظواهر العلمية والهندسية. هذه النظرية مطبقة بصفة واسعة في المصاعب المتواجدة في الفيزياء، الكيمياء، الرياضيات، البيولوجيا، الطب، الاقتصاد واختصاصات كثيرة في ميدان الهندسة. الاستقرار هو أحد المشاكل الأصعب في دراسة الأنظمة الديناميكية اللاخطية، لهذا السبب لجأ إلى استعمال التحكم التكيفي.

التحكم التكيفي عبارة عن مجموعة من التقنيات المستخدمة للضبط التلقائي في الحط عندما تكون إعدادات المنظم غير معروفة متغيرة في الوقت وغير مؤكدة.

الهدف الرئيسي لعملنا هذا هو تطبيق التحكم التكيفي عن طريق Backstepping على نظام غير خطي على شكل مثلثي سفلي حدودي للحصول على قانون التحكم وتحقيق استقرار النظام.

Table de matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes dynamiques.....	3
I.1. Introduction	4
I.2. Définition du système	4
I.3. Classe des systèmes	5
I.3.1. Systèmes mono variable	5
I.3.2. Système multi variable	5
I.3.3. Système continue et Système discret	5
I.3.4. Système linéaire et non linéaire	5
I.3.4.1. Système linéaire.....	5
I.3.4.2. Système non linéaire	5
I.4. Modélisation du système	6
I.4.1. Fonction de transfert.....	6
I.4.2. Représentation d'état.....	6
I.4.2.1. Représentation d'état non linéaire	7
I.4.2.2. Représentation d'état linéaire	7
I.5. Performances des systèmes	8
I.5.1. Rapidité	8
I.5.2. Précision	8
I.5.3. Stabilité.....	8
I.6. Analyse de stabilité des systèmes.....	8
I.7. Notion de stabilité.....	9
I.7.1. Définitions.....	9
I.7.1.1. Équilibre	9
I.7.1.2. Stabilité.....	9
I.7.1.2.1. Stabilité locale.....	10
I.7.1.2.2. Stabilité globale	10

I.7.1.2.3.	Stabilité asymptotique.....	11
I.7.1.2.4.	Stabilité exponentielle.....	11
I.7.1.2.5.	Stabilité de Lyapunov	11
I.8.	Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes non linéaires.....	12
I.8.1.	Première méthode de Lyapunov (Méthode Direct).....	12
I.8.2.	Deuxième méthode de Lyapunov (Méthode Indirect)	13
I.9.	Commande par fonction de Lyapunov.....	15
I.10.	Conclusion	16
Chapitre II : Généralités sur la commande adaptative		17
II.1.	Introduction.....	18
II.2.	Historique.....	18
II.3.	Commande adaptative.....	18
II.4.	Objectif de la commande	19
II.5.	Principe de bas de commande adaptative	19
II.6.	Tâches typiques de la commande adaptative	20
II.7.	Domaines d'utilisation de la commande adaptative	20
II.8.	Pourquoi la commande adaptative	21
II.9.	Approches de commande adaptative	21
II.9.1.	Commande adaptative indirecte.....	21
II.9.2.	Commande adaptative directe	22
II.9.3.	Commande adaptative à modèle de référence.....	23
II.9.4.	Commande auto-ajustable (STR).....	25
II.10.	Synthèse de la Commande adaptative.....	26
II.10.1.	Commande par Backstepping.....	26
II.10.1.1.	Principe de l'approche du Backstepping.....	26
II.10.1.2.	Algorithme de base	27
II.11.	Conclusion	31
Chapitre III : Commande adaptative d'un robot manipulateur actionné par un moteur à courant continu.....		32
III.1.	Introduction.....	33

III.2.	Description du system.....	33
III.3.	Modélisation du système.....	33
III.4.	Représentation d'état du système.....	34
III.5.	Synthèse de la commande adaptative	34
III.6.	Résultats de simulation	36
III.7.	Conclusion	40
	Conclusion générale.....	42
	Bibliographie.....	43

Liste des symboles

t : Variable de temps

$U(s)$: Une entrée d'un système

$Y(s)$: Une sortie d'un système

$H(s)$: Fonction de transfert

S : Variable de Laplace

x : vecteur d'état

u : vecteur de commande

y : vecteur de sortie

$[A]$: la matrice d'état

$[B]$: la matrice de commande

$[C]$: la matrice de sortie

$[D]$: la matrice de transmission

V : Fonction de Lyapunov

MARC : Commande adaptative au modèle de référence.

θ : Vecteur des paramètres du système

$z(t)$: Erreur de poursuite

Π_1, Π_2 : la puissance

$y_m(t)$: Vecteur de sortie du modèle de référence

$r(t)$: Consigne de commande

f, h : vecteur de fonction non linéaire

ε : Erreur de l'écart

Liste des figures

Figure I.1 : Le schéma général d'un système.	4
Figure I.2 : Les différentes formes de modélisation d'un système.	6
Figure I.3 : Représentation par schéma bloc d'un modèle d'état.	8
Figure I.4 : Illustration de la définition intuitive de la stabilité.	10
Figure I.5 : Stabilité asymptotique.....	11
Figure II.1 : principe d'un système de commande adaptative.	19
Figure II.2 : commande adaptative indirect.	22
Figure II.3 : commande adaptative direct.	23
Figure II.4 : Commande adaptative à modèle de référence.	23
Figure II.5 : MRAC Direct.	24
Figure II.6 : MRAC indirect.	25
Figure II.7 : Commande auto-ajustable avec gains.....	26
Figure III.1 : Schéma du système	33
Figure III.2 : Signaux des variables d'état.....	37
Figure III.3 : Trajectoires de sortie du système et la sortie désirée.....	37
Figure III.4 : Signal d'erreur de poursuite.....	38
Figure III.5 : Evolution des estimations paramétriques (theta2).	38
Figure III.6 : Evolution des estimations paramétriques (theta3).	39
Figure III.7 : Signal de commande.	39

Introduction générale

Introduction générale

Plusieurs approches de commande ont été développées pour répondre à la demande croissante sur les performances de commande et ont été appliquées avec succès à une large classe de systèmes. Cependant, des difficultés demeurent lorsqu'il s'agit de systèmes complexes, dont les paramètres incertains, inconnus ou variant dans le temps et qui comportent bien souvent des non linéarités. Pour ce type de système, une modélisation précise est difficile à obtenir et la loi de commande synthétisée peut conduire à un niveau de performance insuffisant.

La commande adaptative apparue comme une alternative afin de résoudre le problème de commande des systèmes dynamique à paramètres incertains, inconnus ou variant dans le temps. Parmi les stratégies de commande adaptative on distingue en générales les méthodes directes, dans laquelle les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel à partir de comparaison entre performance réelle et performance désirées, et les méthodes indirectes, qui suppose une estimation des paramètres du système par une procédure d'identification.

Parmi les nombreuses techniques de synthèse des lois de commande non-linéaire, la technique de Backstepping convient parfaitement à la synthèse des lois de commande pour les systèmes non-linéaires triangulaires inférieures. L'idée de base de la commande par le Backstepping est de rendre les systèmes bouclés équivalents à des sous-systèmes d'ordre un en cascade stable au sens de Lyapunov, ce qui leur confère des qualités de robustesse et une stabilité globale asymptotique. En d'autres termes, c'est une méthode multi-étapes. A chaque étape de la synthèse, une commande virtuelle est ainsi générée pour assurer la stabilité et la convergence du système vers son état d'équilibre.

Le projet de fin d'étude est organisé en trois chapitres qui peuvent être résumé comme suit:

Le premier chapitre est dédié à la présentation des notions préliminaires et les méthodes d'analyse des systèmes dynamiques. En effet, une présentation générale et claire sur les systèmes dynamique est donnée ainsi que les méthodes d'analyse de performances et de l'analyse de stabilité en utilisant la méthode de Lyapunov.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des notions préliminaires et les méthodes de synthèse de la commande adaptative. En effet, une présentation générale et claire sur cette méthode de commande est donnée ainsi que nous formulons le problème de synthèse de commande, en utilisant la méthode par Backstepping.

Le troisième chapitre est consacré à la synthèse et l'application d'une commande adaptative en un système électromécanique. Dans ce chapitre, nous avons synthétisées une loi de commande adaptative en utilisant la procédure de Backstepping. L'application de cette loi à un bras manipulateur de degré un actionné par un moteur à courant continu est effectuée par simulation.

Enfin, nous terminerons par une conclusion générale englobant les perspectives et les investigations futures à poursuivre.

Chapitre I :
Généralités sur les systèmes
dynamiques

I.1. Introduction

Ce chapitre sera consacré à des généralités sur les systèmes dynamiques, nous avons abordé en première temps la définition d'un système en automatique et ses différentes classes, et en deuxième temps nous avons expliqués les performances d'un système, la précision, la rapidité et la stabilité. Nous avons présenté les différents types de stabilité, stabilité globale et locale, stabilité exponentiel, stabilité asymptotique et nous avons présentés aussi la méthode d'analyse de stabilité au sens de Lyapunov, et en fin nous avons donné un exemple de la commande par la méthode de Lyapunov.

I.2. Définition du système

Le système est une organisation logique d'un ensemble d'objets assemblés pour effectuer une tâche bien définie. Le système interagit avec son environnement extérieur à travers ses entrées et ses sorties [1].

Un système se caractérise par ses grandeurs d'entrées et de sorties et il peut être représenté par le schéma suivant :

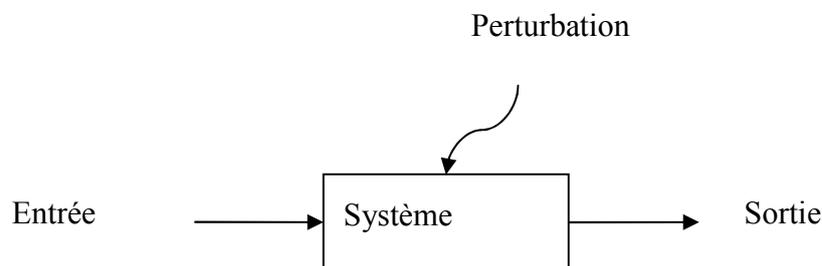


Figure I.1 : Le schéma général d'un système.

Pour un système donné, on distingue :

- Signal d'entrée : indépendant du système, c'est une des grandeurs indépendantes du système mais qui agissent sur son état en tant que cause. On trouvera :
 - Les signaux de commande qui permettent d'agir sur le système et de le piloter vers un but spécifique.
 - Les signaux de perturbations qui affectent le système. Généralement, on ne pourra pas agir sur celles-ci car leur mode d'action sera difficile.

- Signal de sortie : Ce sont les effets des grandeurs d'entrée que l'on peut observer généralement à la moyenne d'un capteur.

I.3. Classes des systèmes

La classification des systèmes peut se faire par rapport à plusieurs concepts : la nature de la variable temps « t », le type d'équations, le nombre des entrées/sorties, la nature de ces paramètres [2].

I.3.1. Systèmes mono variable

Un système mono variable possède une seule entrée $u(t)$ et une seule sortie $y(t)$.

I.3.2. Système multi variable

Un système possédant plusieurs grandeurs d'entre et/ou de sortie est dit multi variable.

I.3.3. Système continue et Système discret

Dans un système continu, les grandeurs caractérisant ce système sont présentées à tout instant. Par ailleurs, dans un système discret une grandeur au moins n'est connue que pour certaines valeurs du temps (instants d'échantillonnage). On rencontre cette dernière classe de systèmes dès que l'on insère un calculateur numérique dans une boucle de commande [3].

I.3.4. Système linéaire et non linéaire

Les systèmes sont classés selon la nature de leurs équations : équations linéaires ou non linéaires.

I.3.4.1. Système linéaire

Les systèmes linéaires les systèmes physiques représentés par des équations différentielles linéaires à coefficients constants, l'hypothèse de linéarité équivaut au principe de superposition [4].

I.3.4.2. Système non linéaire

Les systèmes non linéaires, par opposition aux systèmes linéaires, sont des systèmes physiques qui ne sont pas régis par des équations linéaires. Autrement dit, le principe de superposition ne peut leur être appliqué [4].

I.4. Modélisation du système

Tous système linéaire peut être représenté de plusieurs manières comme le montre le schéma suivant :

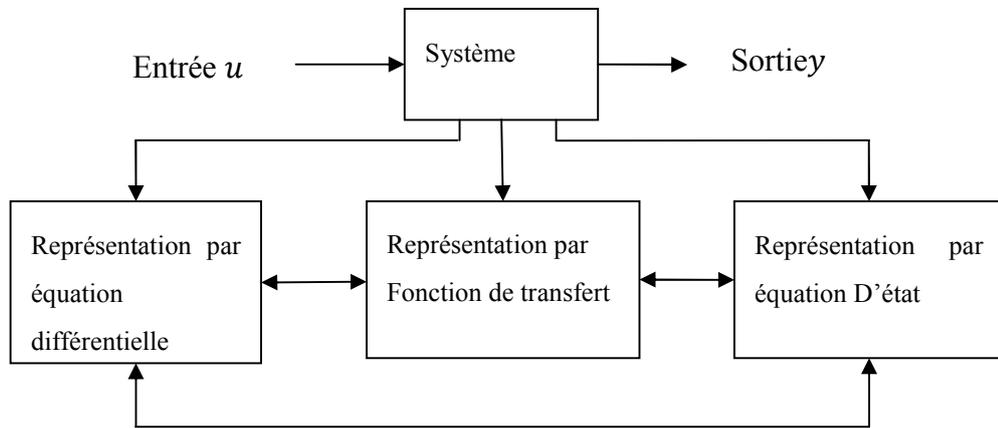


Figure I.2 : Les différentes formes de modélisation d'un système.

En automatique, la modélisation des systèmes est une étape nécessaire pour leur analyse et leur commande. Cette phase se décompose en trois étapes : définir les phénomènes physiques du système à commander, faire le bilan des variables mesurables et identifier l'origine des phénomènes principaux (électrique, mécanique, hydrauliques). Il existe plusieurs différentes formes de modélisation d'un système [2]:

I.4.1. Fonction de transfert

La fonction de transfert d'un système est le rapport entre la transformée de Laplace de la sortie du système et celle de son entrée, en considérant des conditions initiales nulles.

La fonction de transfert décrit par équation différentielle de la forme [5] :

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

I.4.2. Représentation d'état

Il est obtenu à partir des modèles de connaissance ou de comportement, sachant que ces derniers sont donnés sous forme d'équations différentielles. En général, tous les systèmes

(linéaire, non linéaire, continu, discret, variable dans le temps, invariable dans temps, ...) peuvent être représentés par un modèle d'état.

Le modèle d'état est composé par deux systèmes d'équations :

- Equations d'état : système d'équations différentielles du premier ordre linéairement indépendantes.
- Equations d'observations ou compagne de sortie : système d'équations algébriques linéairement indépendantes [2].

I.4.2.1. Représentation d'état non linéaire

Tout système dynamique peut être représenté par ses équations d'état définies comme un ensemble d'équations différentielles du premier ordre appelées équations dynamiques et un ensemble d'équations algébriques appelées équations de sortie ou de mesure :

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \quad \text{Equation dynamique d'état}$$

$$y(t) = h(x(t), u(t), t) \quad \text{Equation de mesure de sortie}$$

Où $x(t) \in R^n$ est le vecteur d'état, $u(t) \in R^m$ est le vecteur commande et $y(t) \in R^p$ est le vecteur de sortie. f Et h sont vecteur de fonction non linéaire [6].

I.4.2.2. Représentation d'état linéaire

Une classe particulièrement importante de modèles d'état est celle des modèles d'état linéaires. En effet, même si aucun système physique naturel ou artificiel ne peut vérifier strictement la propriété de linéarité [6].

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

Avec : $x(n \times 1)$ le vecteur d'état, $u(m \times 1)$ le vecteur d'entrée, $y(p \times 1)$ le vecteur de sortie, $A(n \times n)$ la matrice d'état, $B(n \times m)$ la matrice de commande, $C(p \times n)$ la matrice de sortie et $D(p \times m)$ la matrice de transmission direct (nulle dans la réalité des systèmes physiques).

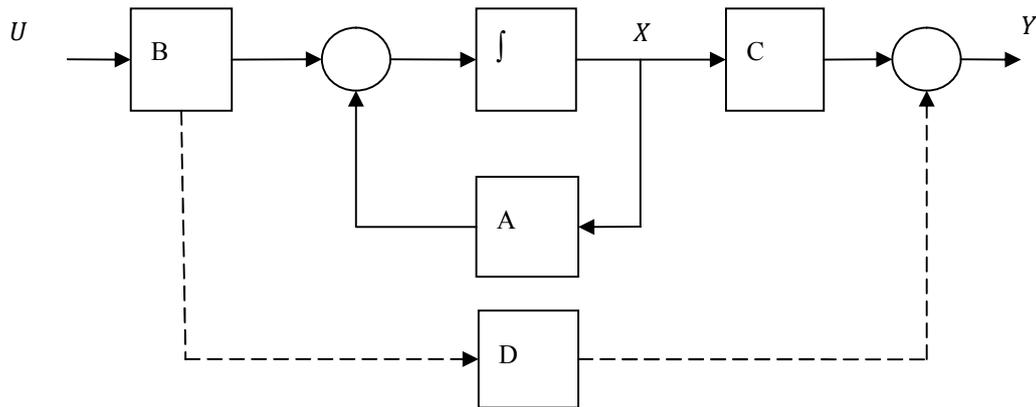


Figure I.3 : Représentation par schéma bloc d'un modèle d'état.

I.5. Performances des systèmes

I.5.1. Rapidité

Le critère standard de rapidité utilisé est le temps de réponse à 5% de la sortie lorsque le système est soumis à une entrée en échelon. Pour un système bouclé, l'entrée est la consigne $y_c(t)$ et la sortie est la mesure $y(t)$ [7].

I.5.2. Précision

La précision est définie à partir du signal d'erreur \mathcal{E} . $\mathcal{E}(t) = y_c(t) - y(t)$ Elle caractérise l'aptitude d'un système à atteindre la valeur de sortie souhaitée l'écart entre la consigne et la sortie se caractérise. Le système est d'autant plus précis que l'erreur en régime permanent et proche de 0. $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathcal{E}(t) \rightarrow 0$ [7].

I.5.3. Stabilité

Un système est dit stable si à une variation bornée du signal d'entrée correspond une variation bornée du signal de sortie. Une variation d'un signal est dite bornée lorsqu'elle est constante en régime permanent [7].

I.6. Analyse de stabilité des systèmes

Quelques définitions relatives à la stabilité des systèmes non linéaires seront données. Les méthodes d'analyses seront brièvement présentées. On parlera surtout des méthodes de

Lyapunov, et l'accent sera, plus particulièrement, mis sur la deuxième méthode de Lyapunov, qui constitue l'élément central de la méthode design adoptée, i.e. le Backstepping [8].

I.7. Notion de stabilité

I.7.1. Définitions

I.7.1.1. Équilibre

Physiquement, un système est en équilibre quand il conserve son état en absence de forces externes. Mathématiquement, cela équivaut à dire que la dérivée \dot{x} de son état est nul. Pour un système.

$$\dot{x} = f(t) \quad (\text{I.1})$$

L'état (ou les états) d'équilibre x_e est la solution (les solutions) de l'équation algébrique

$$f(x) = 0$$

Pour les systèmes linéaires, on a $f(x) = Ax$ ce qui implique que $x = 0$ est un point d'équilibre pour les systèmes linéaires deux cas différents peuvent se présenter :

- Si A est régulière, alors l'origine est le seul point d'équilibre.
- Si A est singulière ce qui définit un sous-espace où $Ax = 0$, alors il existe une région d'équilibre.

Pour les systèmes non linéaires, la solution n'est pas aussi évidemment l'équilibre ne se trouve pas toujours à l'origine. Les régions d'équilibre peuvent être constituées de domaine continu ou de points isolés et /ou la combinaison des deux [4].

I.7.1.2. Stabilité

Il existe plusieurs définitions de la stabilité dans le domaine d'automatique, parmi ces définitions.

Définition 1

On dit qu'un système est stable si, déplacé de sa position d'équilibre, il tend à y revenir ; instable, s'il tend à s'en écarter davantage.

Définition 2

Un système est stable si en réponse à une entrée bornée, la sortie du système est bornée.

Définition 3

Un point d'équilibre x_e est dit stable si $\forall \sigma > 0$, il existe $r(\sigma) > 0$ tel que :

$$\|x_0 - x_e\| \leq r \text{ Alors } \|x(t) - x_e\| \leq \sigma, \forall \sigma \geq 0.$$

Définition 4

Si le système est initialement "légèrement" perturbé de son point d'équilibre le système reste "proche" de ce point d'équilibre [9].

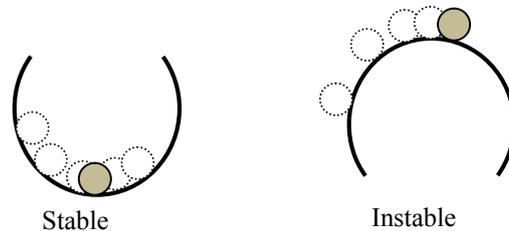


Figure I.4 : Illustration de la définition intuitive de la stabilité.

I.7.1.2.1. Stabilité locale

La stabilité locale concerne simplement la position d'équilibre considérée, sans rien préjuger sur le domaine de validité de cette stabilité. C'est une condition nécessaire, mais non suffisante à la stabilité du système dans un certain domaine, contenant cette position d'équilibre [9].

I.7.1.2.2. Stabilité globale

On parle de stabilité globale lorsque le système est stable pour toutes les valeurs que peuvent prendre les variables du système. La stabilité globale possède un intérêt pratique beaucoup plus considérable que la stabilité locale. Elle ne dépend pas seulement du système, mais aussi des valeurs que peuvent prendre les variables dans le problème considéré. Ainsi, le même système est stable ou instable globalement, suivant le domaine de variables auquel on s'intéresse.

I.7.1.2.3. Stabilité asymptotique

La stabilité asymptotique exige l'existence d'un voisinage de l'équilibre tel que toute trajectoire ayant pour condition initiale un point de ce voisinage converge vers le point d'équilibre. En somme, on aimerait que le système revienne et s'arrête au point d'équilibre lorsqu'il en est légèrement perturbé [9].

Point d'équilibre $x_e = 0$ est asymptotique stable s'il est stable et attractif, c.-à-d. s'il existe

$$r > 0 \text{ Tel que } \forall \omega_0 \in B(x_e, r), \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0.$$

I.7.1.2.4. Stabilité exponentielle

Nous connaissons la stabilité asymptotique : $x(t) \rightarrow 0$ lorsque $t \rightarrow \infty$ Cependant on veut garantir plus [9] :

On dit que l'origine est un point d'équilibre exponentiellement stable s'il existe un voisinage de l'origine noté : $u(0)$, $\exists \alpha > 0$ et $\exists \lambda > 0$ tel que

$$\|x(t)\| \leq \alpha \|x(0)\| e^{-\lambda(t-t_0)}, \forall x_0 \in u(0), \forall t \geq t_0 \geq 0$$

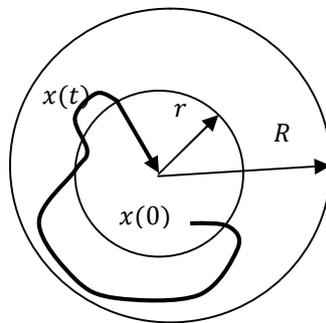


Figure I.5 : Stabilité asymptotique

Dans le cas, la constante λ est appelée le taux ou aussi la vitesse de convergence. L'origine $x = 0$ est un point d'équilibre globalement exponentiellement stable si $u(0) = R_n$.

I.7.1.2.5. Stabilité de Lyapunov

Soit un système dont l'état est défini par le vecteur x qui possède la position d'équilibre x_e . Ecarté de cette position, et abandonné à lui-même au temps $t = t_0$ avec les conditions

initiales $x(t_0)$, le système aura comme état $x(t)$. On dit que la position d'équilibre du système est stable, si pour tout $\varepsilon > 0$, il existe $\delta(\varepsilon) > 0$ tel que si

$$\|x(t_0) - x_e\|^2 \leq \delta_1$$

On soit certain qu'on aura après un certain temps t et pour toutes les valeurs $t = t_0$

$$\|x(t_0) - x_e\|^2 \leq \varepsilon_1$$

Dans le cas contraire (i.e. s'il existe au moins un ε tel que l'on ne puisse pas trouver δ correspondants qui satisfasse aux inégalités) on dit que l'équilibre est instable.

I.8. Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes non linéaires

L'étude de la stabilité des systèmes non linéaires est très complexe. L'approche de Lyapunov est l'approche la plus utilisée pour étudier ce problème. Cette approche a été introduite au 19^{ième} siècle par le mathématicien russe Alexandre Mikhaïlovitch Lyapunov dans son travail intitulé, "The général problème of the motion stabilité".

On distingue deux méthodes de Lyapunov pour l'analyse de la stabilité : La méthode de linéarisation et la méthode directe [9].

I.8.1. Première méthode de Lyapunov (Méthode Direct)

Pour un système non linéaire, on s'intéresse souvent à son comportement au voisinage des points singuliers. Si la dynamique est linéarisée au tour d'un point d'équilibre, peut-on se prononcer sur la stabilité locale du système ? La réponse est donnée par le théorème de stabilité locale de Lyapunov, connu sous le nom de première méthode. Soit le cas du système décrit par :

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= ax_1 + bx_2 + \Pi_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= cx_1 + dx_2 + \Pi_2(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (I.2)$$

D'après Lyapunov, la stabilité de la position d'équilibre de ce système peut s'étudier sur la version Linéarisée, obtenue en négligeant les termes Π_1 et Π_2 qui contiennent des puissances supérieures ou égales à deux en x_1 et x_2 . [9].

Théorème I.1 :

- Si le système linéarisé est asymptotiquement stable, il y a stabilité asymptotique.
- Si le système linéarisé est instable, il y a instabilité.
- Si le système linéarisé est stable sans l'être asymptotiquement, on ne peut se prononcer.

C'est le cas critique de Lyapunov. La stabilité ou l'instabilité dans ce cas dépend des termes de degré supérieur à un, négligés dans l'approximation.

Du point de vue pratique, ce théorème a cependant une importance limitée. D'une part, il ne permet d'étudier que la stabilité du point singulier (stabilité locale), et ne donne aucune information sur le domaine de stabilité (stabilité globale). D'autre part, il suppose que l'approximation du premier degré existe, autrement dit, que les développements en séries des seconds membres des équations comportent des termes du premier degré. Cette hypothèse exclut un certain nombre de cas importants (organe avec zone morte, plus-ou-moins, etc.).

I.8.2. Deuxième méthode de Lyapunov (Méthode Indirect)

Son objectif, est de définir une méthode permettant d'analyser la stabilité d'un système non linéaire sans connaître explicitement les solutions des équations différentielles qui le décrivent. La philosophie de cette méthode n'est que l'extension mathématique d'un phénomène physique observé, car les systèmes mécaniques et électriques perdent de l'énergie pour se stabiliser au point d'équilibre.

La méthode directe de Lyapunov (ou la méthode des fonctions de Lyapunov) est dérivée du critère énergétique de stabilité. En appliquant ce critère indépendamment du concept d'énergie, on remplace alors l'énergie du système par une fonction de Lyapunov qui est définie positive (comme l'énergie).

Soit le système autonome :

$$\dot{x} = f(x)$$

$$x_e = 0$$

Ce système aura un point d'équilibre x_e globalement asymptotiquement stable, s'il existe une fonction scalaire $V(x)$ continue avec une dérivée partielle par rapport au temps $\dot{V}(x)$ continue ayant les propriétés suivantes [9] :

- $V(0) = 0$.
- $V(x) > 0, \forall x \neq 0$.
- $\lim_{\|x\| \rightarrow \infty} V(x) = \infty$ (Radialement non borné).
- $\dot{V}(x) < 0, \forall \dot{x} \neq 0$.

Théorème I.2. Stabilité asymptotique

S'il est possible de trouver une fonction $V(x)$ de signe défini positive avec ($V(0) = 0$) dans un domaine D comprenant la position d'équilibre, et dont la dérivée totale par rapport au temps \dot{V} soit définie et de signe opposé dans le même domaine, l'équilibre sera asymptotiquement stable dans ce domaine.

Théorème I.3. Instabilité

S'il est possible de trouver une fonction V dont la dérivée est de signe défini dans un domaine D comprenant l'origine et que \dot{V} soit :

- Définie de même signe que \dot{V} .
- Indéfinie en signe l'équilibre est instable.

Théorème I.4. Stabilité simple

S'il est possible de trouver une fonction V de signe défini dans un domaine D et dont la dérivée totale soit semi-définie et de signe opposé dans le même domaine, l'équilibre est (simplement) stable dans ce domaine [9].

Exemple I.1:

Considérons le système décrit par une équation différentielle ordinaire non- linéaire :

$$\ddot{x}(t) - \gamma x^2(t)\dot{x} = 0.$$

Sous forme d'état, avec les définitions $x_1 = x, x_2 = \dot{x}$, nous obtenons:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_1 + \gamma x_1^2 x_2 \end{cases}$$

Il est possible de vérifier que cet oscillateur avec une fonction d'amortissement non-linéaire a un état d'équilibre à l'origine

$$(x_1, x_2) = (0, 0).$$

Pour l'analyse de la stabilité nous choisirons la fonction de Lyapunov candidate suivante :

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2), \quad (\text{I.3})$$

Ce choix est fondé sur une considération physique : c'est une intégrale première (énergie mécanique totale) du système idéalement conservatif obtenu pour, le calcul de donne :

$$\dot{V}(x_1, x_2) = x_1\dot{x}_1 + x_2\dot{x}_2 = \gamma x_1^2 x_2^2 \quad (\text{I.4})$$

Donc V est une fonction définie positive qui est strictement décroissante le long de toutes les trajectoires du système si $\gamma < 0$.

D'après les théorèmes précédents :

- Pour $\gamma = 0, \dot{V} = 0$, ceci implique que l'origine est stable ;
- Pour $\gamma < 0, \dot{V} < 0$, ceci implique que l'origine est asymptotiquement stable ;
- Pour $\gamma > 0, \dot{V} > 0$, ceci implique que l'origine est instable.

Dans cet exemple, l'analyse est complète car elle a permis de caractériser la stabilité globale du système. Ce n'est pas toujours le cas et cela dépend de la fonction de Lyapunov candidate.

I.9. Commande par fonction de Lyapunov

Soit le système :

$$\dot{x} = y(x)u + f(x) \quad (\text{I.5})$$

$$y = h(x)$$

Où $x \in R^n$ vecteur d'état, $u \in R$ et $y \in R$ sont l'entrée et la sortie du système respectivement $f(x)$, $g(x)$ et $h(x)$ sont des fonctions non linéaires.

La question qui se pose est : comment trouver u de telles sortes que le système soit stable. La réponse est telle que : supposons que $V(x)$ est une fonction de Lyapunov candidate

$$V(x) = \frac{1}{2} x^T x \quad (\text{I.6})$$

La dérivée de $V(x)$ est :

$$\dot{V}(x) = x^T \dot{x} = x^T (g(x)u + f(x)) \quad (\text{I.7})$$

Si on choisit la commande comme suite

$$u = \frac{1}{g(x)} (-kx - f(x)) \quad (\text{I.8})$$

Alors $\dot{V}(x)$ devient

$$\dot{V}(x) = -kx^2 \leq 0. \quad (\text{I.9})$$

I.10. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à quel que rappels sur les propriétés générales des systèmes non linéaires, les outils d'analyse de la stabilité des systèmes non linéaires, et les différents types de la stabilité, stabilité globale et locale, stabilité exponentielle et stabilité asymptotique. Nous avons étudiés les deux méthodes de Lyapunov et d'autres théorèmes de cette dernière.

Chapitre II :
Généralités sur la commande
adaptative

II.1. Introduction

La commande adaptative est un ensemble des techniques utilisées pour l'ajustement automatique des régulateurs pour assurer les performances voulues quand les paramètres du système à contrôler sont inconnues et /ou variaient avec le temps.

La commande adaptative par Backstepping offre une méthode itérative et systématique, qui permet, pour des systèmes non linéaires de tout ordre, de construire récursivement les trois parties indispensables à une commande adaptative basée sur Lyapunov : la loi de commande, la loi d'adaptation et la fonction de Lyapunov.

Dans ce chapitre, nous présente on les principes de la commande adaptative est ses différents approches tel que, commande adaptative directe et indirect, ... etc. De plus, en utilisant la méthode du Backstepping, nous avons présentés une procédure de synthèse des lois de commandes adaptative pour une classe de système non linéaire incertain à structure triangulaire inférieur.

II.2. Historique

Le problème de la commande adaptative des systèmes linéaires à paramètres inconnus a été résolu dans les années 1970 et 1980 avec plusieurs techniques célèbres. Ensuite, à la fin des années 1980, la Commande adaptative des systèmes non linéaires a connu un grand essor avec la première version de la linéarisation entrée-sortie adaptative. Plus tard, Peter Kokotović, Ioannis Kanellakopoulos, et Miroslav Krstić ont proposé une nouvelle conception systématique des contrôleurs adaptatifs dans lesquels est introduite la technique du «Backstepping », qui est applicable, sur une classe des systèmes triangulaires non linéaires paramétrés. En 1999 de nouveaux algorithmes prometteurs ont été obtenus grâce à une combinaison : observateurs et commandes en mode glissants [8].

II.3. Commande adaptative

La commande adaptative joue un rôle très important dans les applications industrielles, qui est comme son nom l'indique, elle consiste à adapter le régulateur en ligne aux variations du système régulé pour assurer une qualité constante des performances, quand les paramètres du procédé à commander sont inconnus où varient dans le temps.

En principe, un système de commande adaptative mesure un certain indice de performance

(IP) du système à commander à partir de l'écart entre la sortie de système désirée et la sortie mesurée. Le mécanisme d'adaptation commande certains paramètres du système ajustable ou introduit un signal supplémentaire de commande d'après une certaine stratégie afin de minimiser l'IP [10].

Le principe de mise en œuvre d'un système de commande adaptative est représenté sur la figure II.1

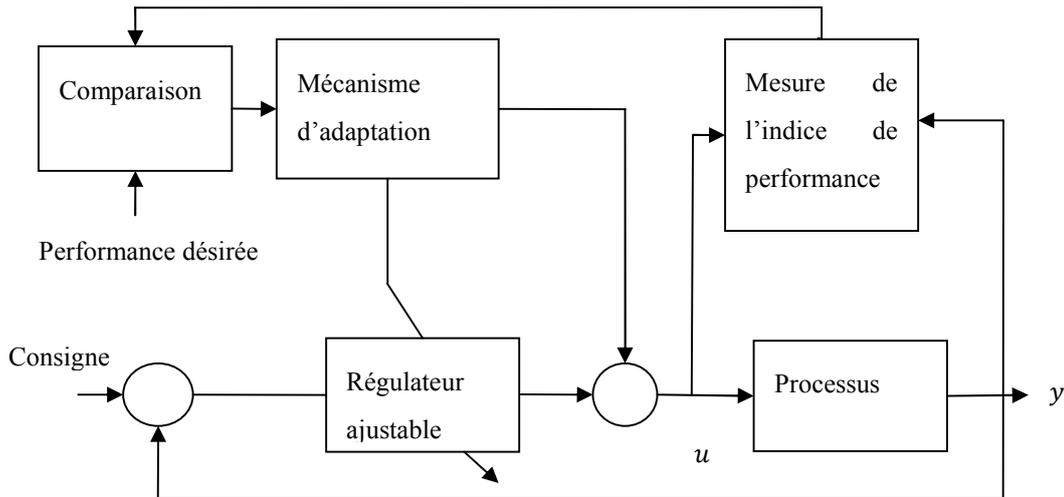


Figure II.2 : Principe d'un système de commande adaptative.

II.4. Objectif de la commande

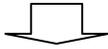
- Calculer et ajuster les paramètres du régulateur.
- Maintenir les indices des performances en présence de perturbations paramétriques.
- Ajustement automatique en ligne et en temps réel des régulateurs.
- Réaliser un niveau continu des performances quand les paramètres du système à commander varient dans le temps.

II.5. Principe de base de commande adaptative

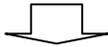
Les modèles réels des systèmes physiques ne sont pas linéaires et habituellement caractérisés par des paramètres inconnus (masses, inerties, perturbations....) qui dépendent

d'un petit changement d'environnement. Si ces paramètres varient dans un intervalle important ou si un défaut est appa rit dans un système, il serait préférable d'employer une loi d'adaptation pour estimer les paramètres du système ou le défaut [11].

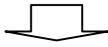
- Quand les paramètres d'un système sont inconnus, varient dans le temps ou incertains



- Besoin d'une loi de commande qui s'adapte dans de telles conditions



- Estimation en ligne des paramètres



- Elle n'a pas besoin d'informations préalables sur les limites sur ces paramètres [12].

II.6. Tâches typiques de la commande adaptative

Les tâches qui incombent au mécanisme d'adaptation sont les suivantes :

- Ajustement automatique des régulateurs et optimisations de leurs paramètres en les divers points de fonctionnement du système :
- Maintenance des performances exigées en cas de variation des paramètres du système.
- Détection des variations anormales des caractéristiques du système (pouvant éventuellement avoir pour origine des perturbations structurelles) [13].

II.7. Domaines d'utilisation de la commande adaptative

La commande adaptative est utilisée quand c'est techniquement nécessaire et économiquement rentable.

Les techniques de la commande adaptative ont été utilisées avec succès pour un grand nombre d'applications : commande des moteurs électriques, des robots manipulateurs, des réacteurs chimiques, des colonnes à distiller, des machines à papier, des régulations de Ph, des échangeurs de chaleur, des systèmes d'armes, ... etc.

L'utilisation des systèmes de commande adaptative connaît aujourd'hui un essor certain, d'une part, à cause de leur complexité raisonnable et, d'autre part, à cause du développement des cartes à micro- processeurs pouvant servir de support pour leur mise en œuvre.

En ce qui concerne la rentabilité, les éléments suivants sont à prendre en compte : Amélioration de la qualité des produits, augmentation de la production, économie d'énergie, Espacement des arrêts d'entretien et détection précoce des anomalies [14].

II.8. Pourquoi la commande adaptative

Dans de nombreuses situations, la commande adaptative s'avère utile, parmi ces situations, nous citons :

- Les caractéristiques du système et les perturbations sont inconnues ou variante de temps ou incertain
- Le comportement non linéaire comme dans le cas de réactions des complexes chimiques ou biochimiques.

II.9. Approches de commande adaptative

Il existe plusieurs type de schéma de commande adaptative mais seulement Ceux qui ont une boucle de contre réaction sur la mesure des performances sont réellement des schémas de système de commande adaptative le développement de ces approches est largement basé sur une bonne compréhension des aspects des différentes stratégies de commande linéaire trois approches ont été essentiellement considérées pour le développement des stratégies de commande adaptative destinées aux procédés à paramètres inconnus et/ou variables dans le temps [17]:

- Commande adaptative direct et indirect.
- Commande adaptative à modèle de référence.
- Système de commande auto-ajustable.

II.9.1. Commande adaptative indirecte

La commande adaptative indirecte, qui suppose une estimation des paramètres du processus par une procédure d'identification (c'est le cas des régulateurs auto-ajustables). Ce dernier type de commande adaptative qui tient compte des caractéristiques d'évolution du processus, est en fait plus utilisé que le précédent. Le schéma de principe de ce type de commande est illustré dans figure II.2 [14]:

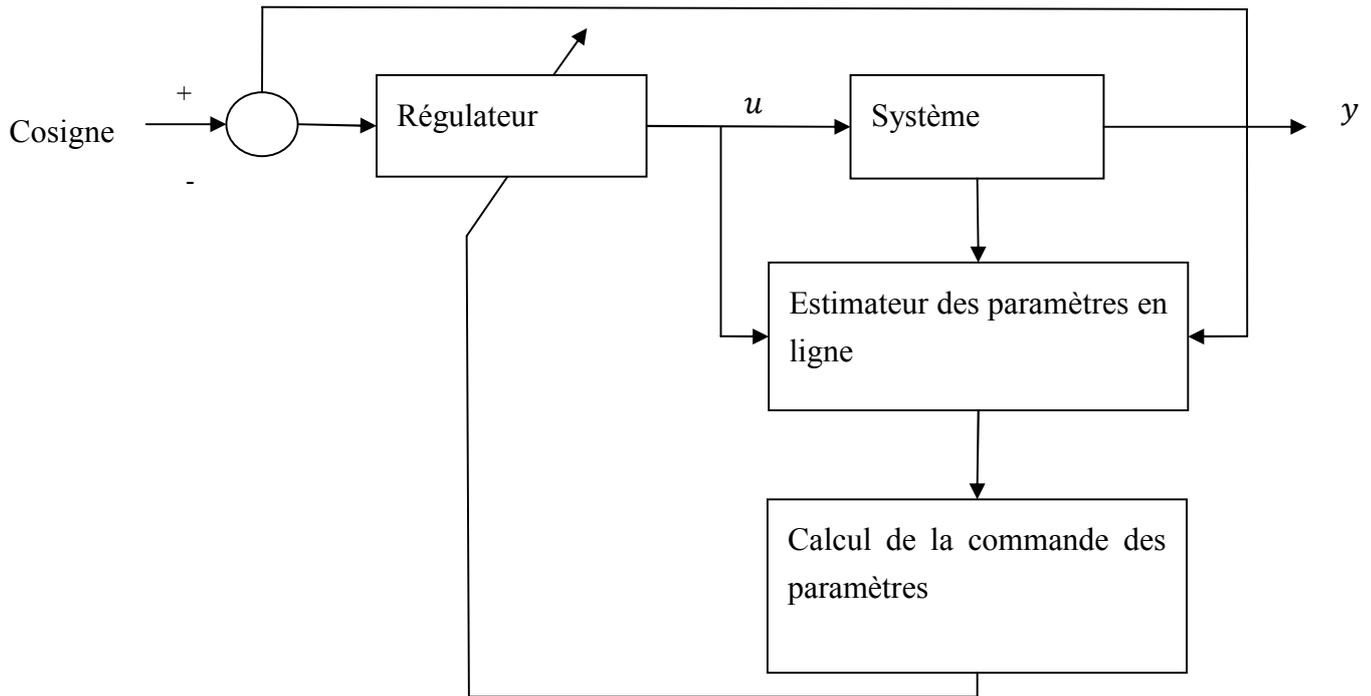


Figure II.3 : Commande adaptative indirecte.

II.9.2. Commande adaptative directe

La commande adaptative directe, dans laquelle les paramètres du régulateur sont ajustés directement et en temps réel à partir de comparaison entre performances réelles et performances désirées (c'est le cas en particulier de commande adaptative à modèle de référence).

Le schéma de la Figure II.4 illustre ce type de commande, pour laquelle les performances de la boucle fermée sont spécifiées par l'intermédiaire d'un modèle de référence choisi par l'utilisateur de façon cohérente avec les possibilités intrinsèques du système [14].

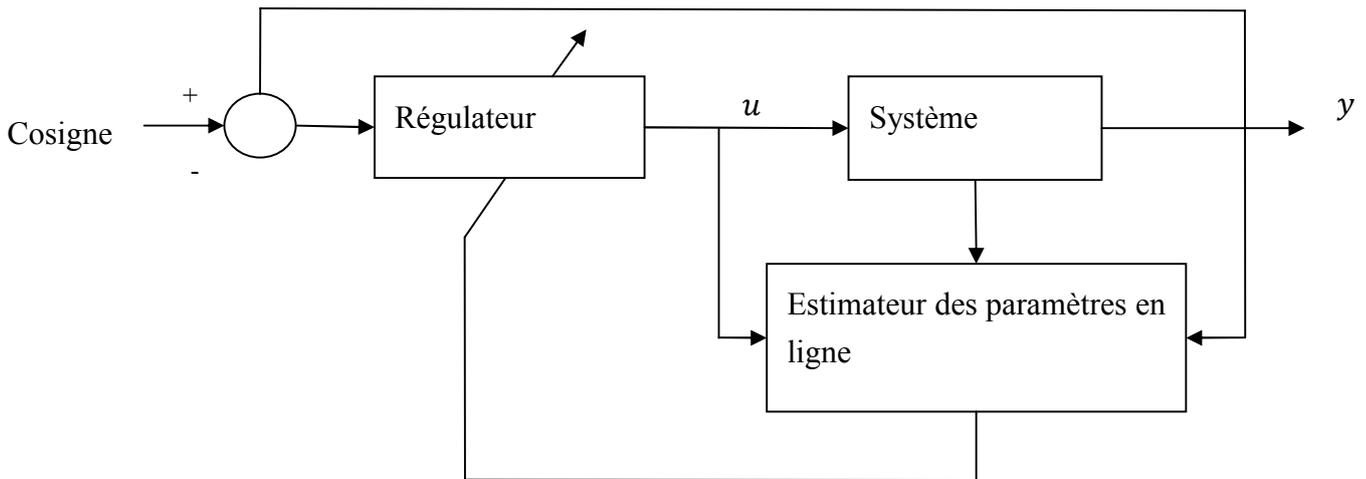


Figure II.5 : Commande adaptative direct.

II.9.3. Commande adaptative à modèle de référence

La commande adaptative à modèle de référence (MRAC: Modèle Référence Adaptative Control) est une commande adaptative les plus connus. Cette approche de commande a été originalement proposée pour résoudre un problème dans lequel les spécifications de performances sont données en termes d'un modèle de référence. Ce modèle de référence donne une indication sur comment la sortie du système doit idéalement répondre à un signal de commande. Son principe de base consiste à adapter les paramètres du contrôleur en fonction de l'erreur entre le système et le modèle de référence [12].

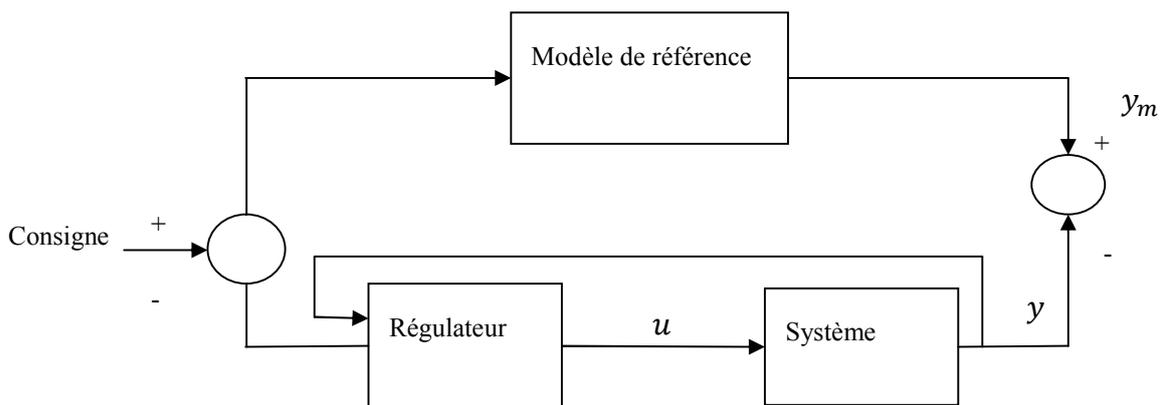


Figure II.6 : Commande adaptative à modèle de référence.

Il existe deux types de Commande adaptative à modèle de référence sont : MRAC directe et MRAC indirecte [15].

- MRAC directe

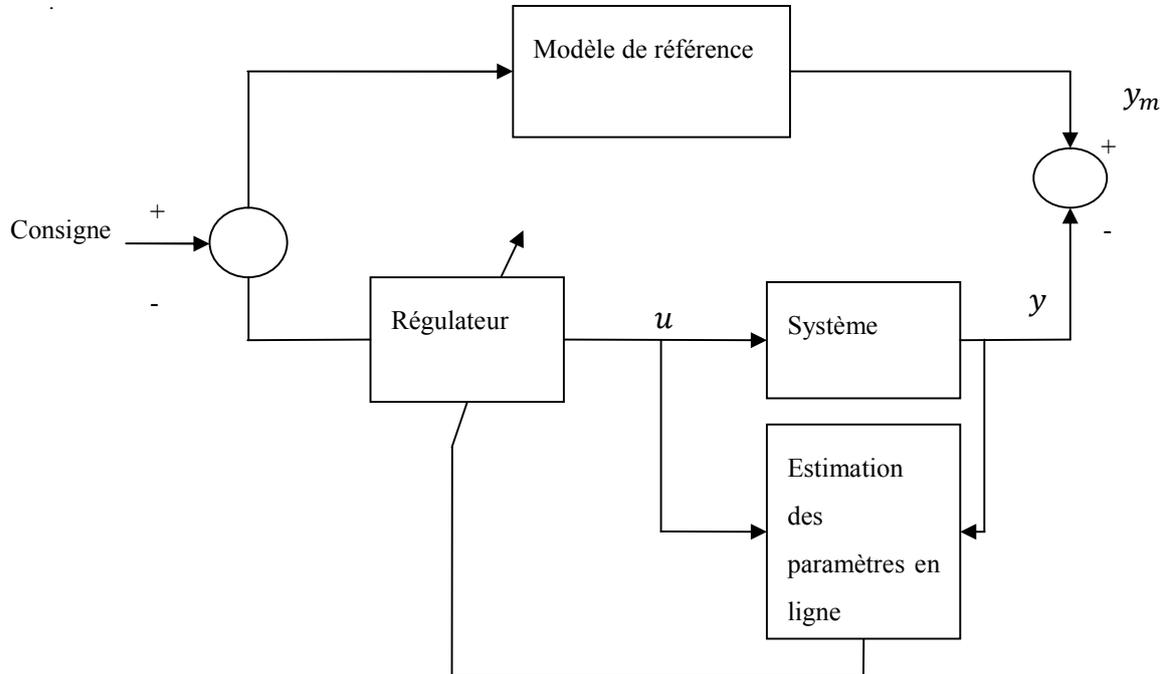


Figure II.7 :MRAC Direct.

- MRAC indirecte

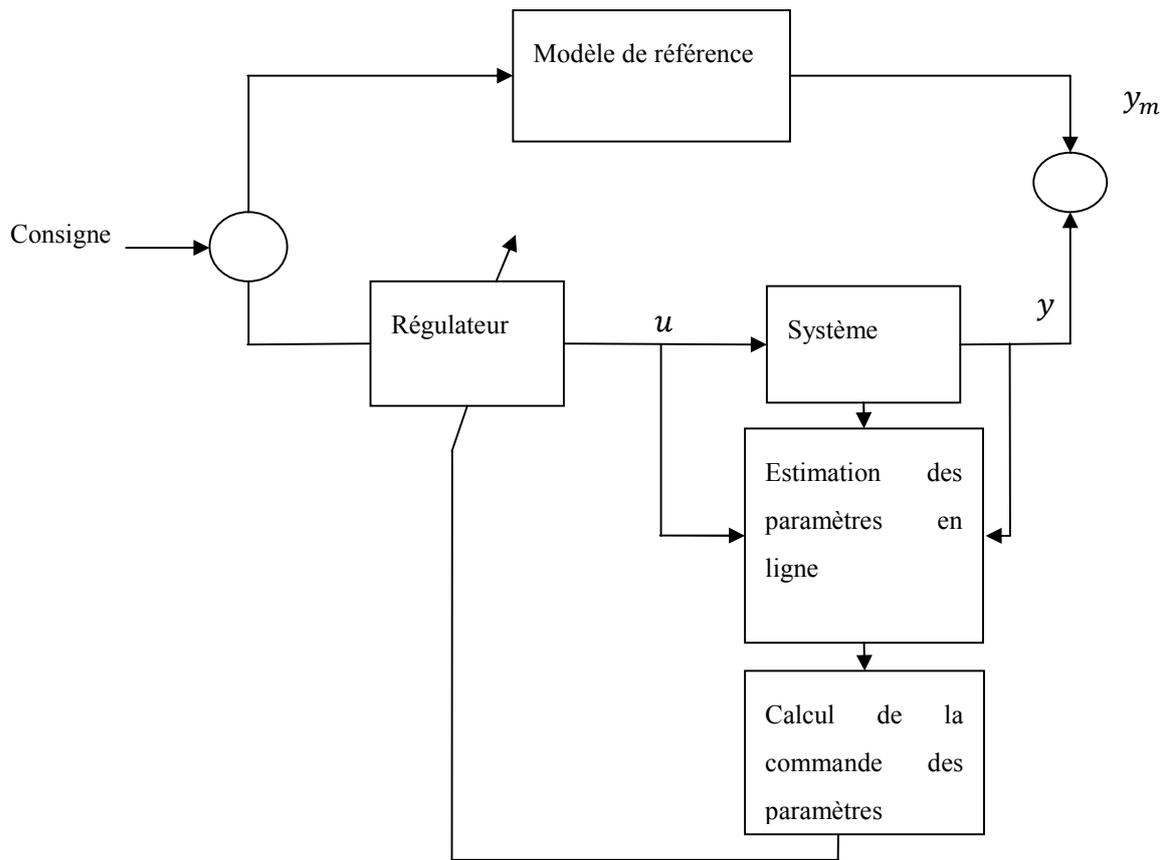


Figure II.8 : MRAC indirect.

II.9.4. Commande auto-ajustable (STR)

Cette commande fait partie des commandes adaptatives indirectes. Les paramètres du système sont estimés et utilisés dans le calcul des paramètres du contrôleur. L'architecture de commande contient deux boucles : une boucle interne du contrôleur et une boucle externe d'ajustement de ses paramètres. Cette commande est appelée ainsi à cause du fait que le contrôleur ajuste automatiquement ses paramètres afin d'obtenir les propriétés désirées en boucle-fermée. Cette approche est très flexible dans le choix du contrôleur et l'estimateur, c'est ainsi que plusieurs combinaisons ont vu le jour (PID-STR, LQR-STR, etc.)[12].

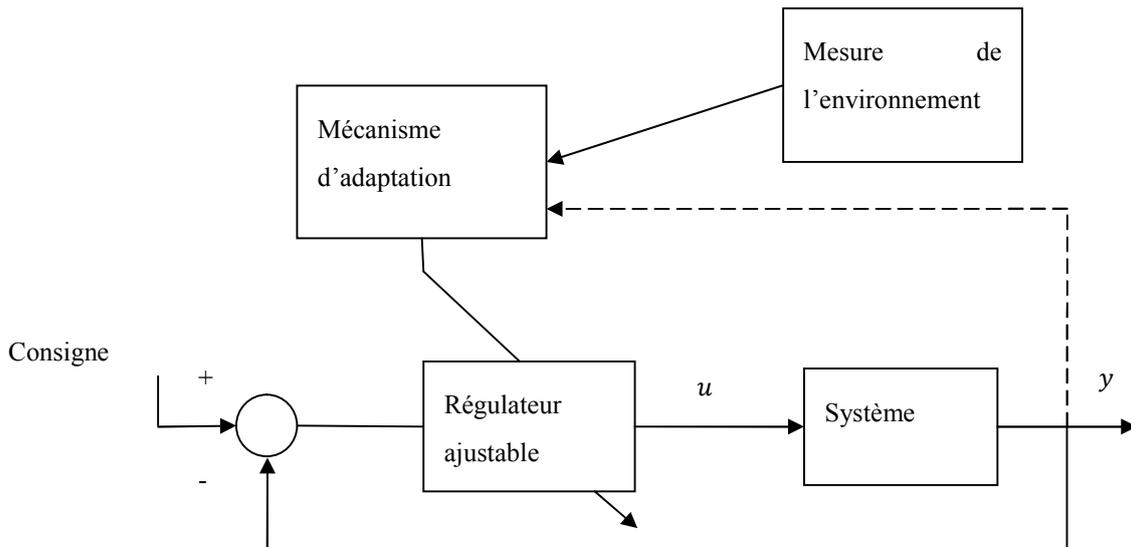


Figure II.9 : Commande auto-ajustable avec gains.

II.10. Synthèse de la Commande adaptative

Pour étudier l'analyse des performances des différents contrôleurs, vous avez présenté que la 1^{er} une synthèse des trois techniques de commande : sont la méthode du Backstepping, mode de glissante et Backstepping mode de glissant.

Dans cette partie, nous avons utilisé la technique de commande adaptative par Backstepping [16].

II.10.1. Commande par Backstepping

La partie suivante présentera d'abord une brève présentation de la technique de Backstepping. Le Backstepping a été développé par Kanellakopoulos et al. Et inspiré par les travaux de Feurer&Morse d'une part et Tsinias, et Kokotović&Sussmann d'autre part. Elle offre une méthode systématique pour effectuer le design d'un contrôleur pour les systèmes non linéaires.

L'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir que la dérivée d'une certaine fonction (de Lyapunov) soit définie positive et que sa dérivée soit toujours négative [4].

II.10.1.1. Principe de l'approche du Backstepping

Le Backstepping adaptative offre une méthode itérative et systématique, qui permet, pour

des systèmes non linéaires de tout ordre, de construire récursivement les trois parties, indispensables à une commande adaptative basée sur Lyapunov.

- **La loi de commande** : permet de répondre aux spécifications désirées, quant au comportement du système à commander.
- **La loi d'adaptation** : détermine la dynamique d'estimation des paramètres inconnus. Elle doit garantir leur convergence vers leurs valeurs réelles, sans affecter le bon fonctionnement surtout la stabilité en boucle fermée.
- **La fonction de Lyapunov** : permet le choix adéquat des deux précédentes lois et garantit la convergence et la stabilité du système en boucle fermée, en tout temps [16].

La stratégie de commande envisagée suppose les points suivants:

- Certains paramètres du système peuvent être inconnus, incertains ou variable avec le temps.
- Les fonctions non linéaires du modèle.
- Le système est sujet à des incertitudes et des perturbations externes.

II.10.1.2. Algorithme de base

Considérons le système du troisième ordre suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \theta_1^T f_1(x_1) \\ \dot{x}_2 = x_3 + \theta_2^T f_2(x_1, x_2) \\ \dot{x}_3 = u + \theta_3^T f_3(x_1, x_2, x_3) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Où $x = [x_1, x_2, x_3] \in \mathcal{R}^3$ est le vecteur d'état. $y \in \mathcal{R}$ et $u \in \mathcal{R}$ sont la sortie et l'entrée du système, respectivement. θ_1, θ_2 et θ_3 sont des vecteurs des paramètres inconnus et f_1, f_2 et f_3 sont les de fonctions non linéaires connues.

L'objectif de la commande est de synthétiser une loi de commande adaptative assuré la stabilité du système en boucle fermée et la convergence d'erreur de poursuite vers zéro. Le système étant du 3^{ème} ordre, la conception par le Backstepping est donc réalisée en trois étapes [16].

Etape 1

Pour le premier sous-système, l'état x_2 est choisit comme commande virtuelle de l'état x_1
On considère l'erreur entre la variable x_1 et la grandeur de référence y_r :

$$z_1 = x_1 - y_r \quad (\text{II.2})$$

La première fonction de Lyapunov est :

$$V_1 = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2T_1}\tilde{\theta}_1^T \hat{\theta}_1 \quad (\text{II.3})$$

Où $\tilde{\theta}_1 = \theta_1 - \hat{\theta}_1$ est l'erreur paramétrique tel que $\hat{\theta}_1$ est l'estimation paramétrique.

La dérivée de (II.3) est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= z_1 \dot{z}_1 - \frac{1}{T_1} \tilde{\theta}_1^T \dot{\hat{\theta}}_1 \\ &= z_1 (\dot{x}_1 - \dot{y}_r) - \frac{1}{T_1} \tilde{\theta}_1^T \dot{\hat{\theta}}_1 \\ &= z_1 (\dot{x}_2 + \hat{\theta}_1 f_1 - \dot{y}_r) - \frac{1}{T_1} \tilde{\theta}_1^T \dot{\hat{\theta}}_1 \\ &= z_1 (z_2 + \alpha_1 + \hat{\theta}_1 f_1 + \tilde{\theta}_1 f_1 - \dot{y}_r) - \frac{1}{T_1} \tilde{\theta}_1^T \dot{\hat{\theta}}_1 \\ &= z_1 (z_2 + \alpha_1 + \hat{\theta}_1 f_1 - \dot{y}_r) - \tilde{\theta}_1^T (\dot{\hat{\theta}}_1 - z_1 f_1) \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Choisissant la loi de commande virtuelle α_1 et la loi d'adaptation correspondant comme suite :

$$\alpha_1 = -k_1 z_1 - \hat{\theta}_1 f_1 - \dot{y}_r \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Alors : } \dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (\text{II.6})$$

Etape 2

Considérons l'erreur z_2 définie par l'équation :

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (\text{II.7})$$

la deuxième fonction de Lyapunov

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}z_2^2 + \frac{1}{2T_2}\tilde{\theta}_2^T \hat{\theta}_2 \quad (\text{II.8})$$

La dérivée de V_2 est :

$$\begin{aligned}
\dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 z_2 - \frac{1}{T_2} \tilde{\theta}_2 \dot{\hat{\theta}}_2 \\
&= -k_1 z_2^2 + z_1 z_2 + z_2 (\dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1) \frac{1}{T_2} \tilde{\theta}_2 \dot{\hat{\theta}}_2 \\
&= -k_1 z_2^2 + z_1 z_2 + z_2 (x_3 + \theta_2 f_2 - \dot{\alpha}_1) \frac{1}{T_2} \tilde{\theta}_2 \dot{\hat{\theta}}_2 \\
&= -k_1 z_2^2 + z_2 (x_3 + \theta_2 f_2 - \dot{\alpha}_1 + z_1) - \tilde{\theta}_2 \left(\frac{1}{T_2} \dot{\hat{\theta}}_2 - z_2 f_2 \right)
\end{aligned}$$

$$\dot{V}_2 = -k_1 z_1^2 + k_2 z_2^2 \quad (\text{II.9})$$

Choisissant la loi de commande virtuelle α_2 et la loi d'adaptation correspondant comme suite :

$$\alpha_2 = -k_2 z_2 - \theta_2 f_2 - \ddot{\alpha}_1 \quad (\text{II.10})$$

Etape 3

C'est l'étape finale. L'erreur z_3 est donnée par :

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (\text{II.11})$$

On choisit la fonction de Lyapunov suivante:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2T_3} \tilde{\theta}_3^T \dot{\hat{\theta}}_3 \quad (\text{II.12})$$

Sa dérivée de (II.12) :

$$\begin{aligned}
\dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 + \frac{1}{T_3} \tilde{\theta}_3 \dot{\hat{\theta}}_3 \\
&= -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_3 \dot{z}_3 - \tilde{\theta}_3 \left(\frac{1}{T_3} \dot{\hat{\theta}}_3 - z_3 f_3 \right) \\
&= -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_3 (\dot{x}_3 - \dot{\alpha}_2) - \tilde{\theta}_3 \left(\frac{1}{T_3} \dot{\hat{\theta}}_3 - z_3 f_3 \right) \\
&= -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_3 (u + \theta_3 f_3 - \dot{\alpha}_2) - \tilde{\theta}_3 \left(\frac{1}{T_3} \dot{\hat{\theta}}_3 - z_3 f_3 \right)
\end{aligned}$$

$$\dot{V}_3 = -k_1 z_1^2 + k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2 \quad (\text{II.13})$$

Il faut choisir la commande U tel que :

$$U = -k_3 z_3 - z_2 - \theta_3 f_3 + \dot{\alpha}_2 \quad (\text{II.14})$$

Système d'ordre n

Dans cette partie, on essaiera de généraliser l'application de l'approche du Backstepping pour des systèmes d'ordre n :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + \theta_1^T f_1(x_1) \\ \dot{x}_2 = x_3 + \theta_2^T f_2(x_1, x_2) \\ \vdots \\ \dot{x}_n = u + \theta_n^T f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

où $x = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \mathcal{R}^n$ est le vecteur d'état, $y \in \mathcal{R}, u \in \mathcal{R}$ sont la sortie et l'entrée du système, respectivement. θ_1, θ_2 et θ_n sont des vecteurs des paramètres inconnues et f_1, f_2, \dots, f_n sont des vecteurs de fonctions non linéaire connues.

L'objectif de la commande est synthétisé une loi de commande adaptative assuré la stabilité du système et la convergence d'erreur de poursuite.

En général, la conception, par le principe du Backstepping, de la loi de commande u est exécutée en n étapes. A la $i^{\text{ème}}$ étape, un sous système du $i^{\text{ème}}$ ordre est stabilisé par rapport à une fonction de Lyapunov V_i par la conception d'une fonction stabilisante α_i . La loi de commande est alors établie à l'étape finale [16].

Les commandes virtuelles sont telles que :

$$\alpha_1 = -k_1 z_1 - \hat{\theta}_1^T f_1 - \dot{y}_r \quad (\text{II.16})$$

$$\alpha_i = -k_i z_i - z_{i-1} - \hat{\theta}_i^T f_i - \dot{\alpha}_{i-1}, i = 2, \dots, n - 1 \quad (\text{II.17})$$

$$\alpha_n = -k_n z_n - z_{n-1} - \hat{\theta}_n^T f_n - \dot{\alpha}_{n-1} \quad (\text{II.18})$$

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$u = \alpha_n \quad (\text{II.19})$$

Les lois d'adaptations paramétriques sont telles que

$$\dot{\theta}_i = T_i z_i f_i, i = 2, \dots, n - 1 \quad (\text{II.20})$$

II.11. Conclusion

Ce chapitre a été consacré d'une part à quelques rappels sur les notions générales de la commande adaptative des systèmes dynamique, les principales approches existant de la commande adaptative, et la méthode de synthèse la plus utilisée pour la commande adaptative des systèmes non linéaires d'autre part, on parle sur la technique de commande par Backstepping.

Chapitre III :
Commande adaptative d'un
robot manipulateur actionné
par un moteur à courant
continu

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré en première temps à la synthèse d'une loi de commande adaptative par la méthode du Backstepping pour un système électromécanique et en deuxième temps l'application par simulation de cette loi de commande sur le même système.

III.2. Description du system

Le système utilisé dans ce chapitre pour appliquer la loi de commande qui nous allons synthétiser à la suite est un bras manipulateur de degré un actionné par un moteur à courant continu comme le montre la figure (III.1) la sortie du système est la position angulaire du bras et l'entrée du système est la tension électrique appliqué au borne du moteur [16].

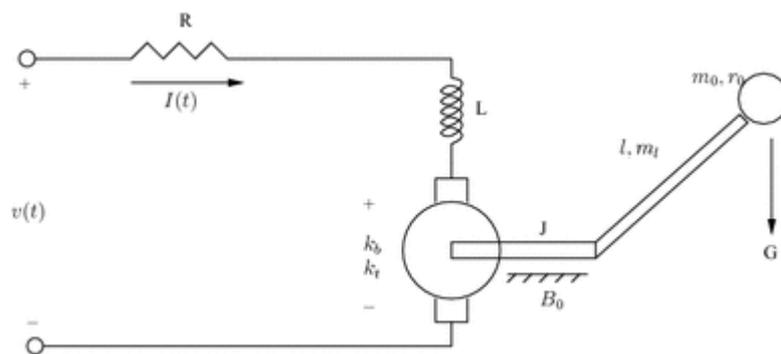


Figure III.1 : Schéma du système.

III.3. Modélisation du système

Le modèle dynamique du bras manipulateur de degré un actionné par un moteur à courant continu et donné comme suit [9]:

$$\begin{cases} D\ddot{q} + B\dot{q} + N\sin q = I \\ M\dot{I} + HI = V - K_m\dot{q} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Où q , \dot{q} , et \ddot{q} désignent la position angulaire, la vitesse angulaire, et accélération angulaire, respectivement. I est le courant du moteur, V est tension de commande et D, B, N, H et K_m sont des constants.

Les valeurs des paramètres avec des unités appropriées sont données par :

$$D = 1, B = 1, N = 10, M = 0.05, H = 0.5, K_m = 10$$

III.4. Représentation d'état du système

Choisissons les variables d'état comme suit :

$$\begin{cases} x_1 = q \\ x_2 = \dot{q} \\ x_3 = \frac{I}{D} \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Le modèle dynamique (III.1) devient :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 - \frac{B}{D}x_2 - \frac{N}{D}\sin(x_1) \\ \dot{x}_3 = \frac{V}{DM} - \frac{H}{M}x_3 - \frac{K_m}{DM}x_2 \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Le système d'équations (III.3) peut réécrite comme suite :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + \theta_2^T f_2(x_1, x_2) \\ \dot{x}_3 = \frac{V}{DM} + \theta_3^T f_3(x_2, x_3) \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

Où $\theta_2 = \left[\frac{B}{D} \frac{N}{D} \right]$ et $\theta_3 = \left[\frac{K_m}{DM} \frac{H}{M} \right]$ sont des vecteurs des paramètres supposé inconnus. $f_2 = \begin{bmatrix} -x_2 \\ -\sin(x_1) \end{bmatrix}$ Et $f_3 = \begin{bmatrix} -x_2 \\ -x_3 \end{bmatrix}$ Sont des vecteurs des fonctions non linéaires connus. La sortie du système est la position articulaire du bras $y = q = x_1$. Le signal de référence est choisi donc sous la forme

$$y_r = \sin^3(t) .$$

Le système étant du 3^{eme} ordre, la conception par le Backstepping est exécutée en trois étapes.

III.5. Synthèse de la commande adaptative

Dans cette section, nous allons synthétisés une loi de commande adaptative par la méthode de Backstepping assurant la stabilité globale du système en boucle fermé et la convergence de l'erreur de poursuite vers zéros. La procédure de synthèse comporte 3 étapes, chaque étape basée sur le changement des coordonnées suivant :

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - y_r \\ z_2 = x_2 - \alpha_1 \\ z_3 = x_3 - \alpha_2 \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

Où α_1 et α_2 sont les commandes virtuelles.

Étapes 1 : Dans cette étape la commande virtuelle α_1 est synthétisée. Considérons la première fonction de Lyapumov suivante :

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (\text{III.6})$$

Sa dérivée en considérant (III.6) est :

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 (\dot{x}_1 - \dot{y}_r) = z_1 (x_2 - \dot{y}_r) = z_1 (\alpha_1 + z_2 - \dot{y}_r)$$

En choisissant la commande virtuelle α_1 comme suite :

$$\alpha_1 = -k_1 z_1 + \dot{y}_r \quad (\text{III.7})$$

Ce qui rend (III.8) comme suite :

$$\dot{V}_1 = -k_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (\text{III.8})$$

Le terme $z_1 z_2$ est éliminé à la prochaine étape

Étapes 2 : Dans cette étape la commande virtuelle α_2 est synthétisée. Considérons la deuxième fonction de Lyapumov suivante :

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2T_2} \tilde{\theta}_2^T \tilde{\theta}_2 \quad (\text{III.9})$$

Où $T_2 > 0$ est un paramètre de design et $\tilde{\theta}_2 = \theta_2 - \hat{\theta}_2$ est l'erreur paramétrique.

La dérivée de V_2 en considérant (III.9) et (III.10) est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 - \frac{1}{T_2} \tilde{\theta}_2^T \dot{\hat{\theta}}_2 \\ &= \dot{V}_1 + z_2 (x_3 + \theta_2^T f_2(x_1, x_2) - \dot{\alpha}_1) - \frac{1}{T_2} \tilde{\theta}_2^T \dot{\hat{\theta}}_2 \\ &= -k_1 z_1^2 + z_2 (z_3 + z_1 + \alpha_2 + \hat{\theta}_2^T f_2(x_1, x_2) - \dot{\alpha}_1) - \tilde{\theta}_2^T \left(\frac{1}{T_2} \dot{\hat{\theta}}_2 - f_2(x_1, x_2) z_2 \right) \end{aligned} \quad (\text{III.10})$$

En choisissant la commande virtuelle α_1 et la loi d'adaptation correspondant comme suite :

$$\alpha_1 = -k_2 z_2 - z_1 - \hat{\theta}_2^T f_2(x_1, x_2) + \dot{\alpha}_1 \quad (\text{III.11})$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = T_2 f_2(x_1, x_2) z_2 \quad (\text{III.12})$$

Ce qui rendre (III.10) comme suite :

$$\dot{V}_2 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_2 z_3 \quad (\text{III.13})$$

Le terme $z_1 z_2$ est éliminé à la prochaine étape

Etape 3 : Dans cette étape la commande virtuelle α_2 est synthétisée. Considérons la troisième fonction de Lyapumov suivante :

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2 + \frac{1}{2T_3} \tilde{\theta}_3^T \tilde{\theta}_3 \quad (\text{III.14})$$

Où $T_3 > 0$ est un paramètre de design et $\tilde{\theta}_3 = \theta_3 - \hat{\theta}_3$ est l'erreur paramétrique.

La dérivée de V_2 en considérant (III.6) et (III.16) est :

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 - \frac{1}{T_3} \tilde{\theta}_3^T \dot{\tilde{\theta}}_3 \\ &= \dot{V}_2 + z_3 (u + \theta_3^T f_3(x_2, x_3) - \dot{\alpha}_2) - \frac{1}{T_3} \tilde{\theta}_3^T \dot{\tilde{\theta}}_3 \\ &= -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 + z_3 (u + z_2 + \hat{\theta}_3^T f_3(x_2, x_3) - \dot{\alpha}_2) - \tilde{\theta}_3^T \left(\frac{1}{T_3} \dot{\tilde{\theta}}_3 - f_3(x_2, x_3) z_3 \right) \end{aligned} \quad (\text{III.15})$$

En choisissant la commande réelle u et la loi d'adaptation correspondant comme suite :

$$u = -k_2 z_2 - z_1 - \hat{\theta}_2^T f_2(x_1, x_2) + \dot{\alpha}_1 \quad (\text{III.16})$$

$$\dot{\hat{\theta}} = T_2 f_2(x_1, x_2) z_2 \quad (\text{III.17})$$

Ce qui rendre (III.18) comme suite :

$$\dot{V}_3 = -k_1 z_1^2 - k_2 z_2^2 - k_3 z_3^2 \quad (\text{III.18})$$

Qui est bien définie négative.

III.6. Résultats de simulation

Cette section est réservée à l'application de la loi de commande synthétisé au-dessus à un système robotique d'ordre un actionné par un moteur à courant continu.

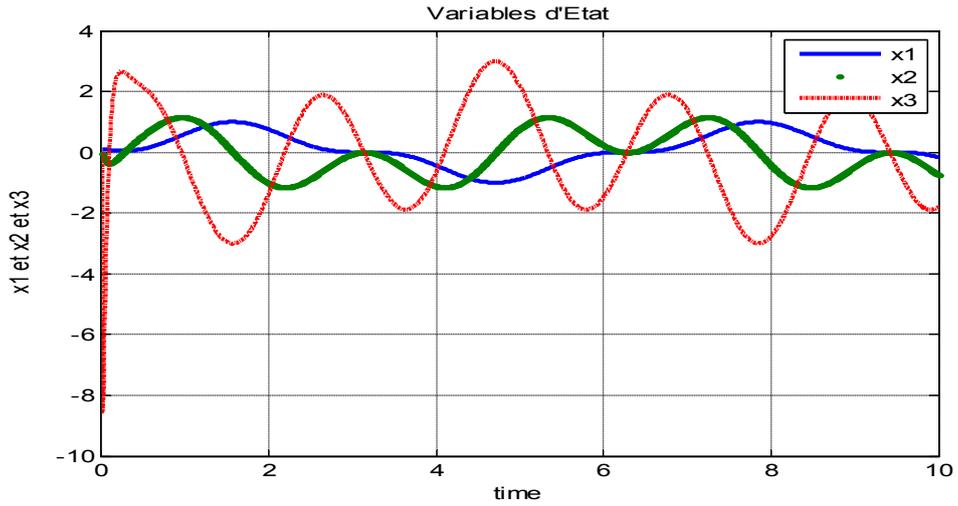


Figure III.2 : Signaux des variables d'état.

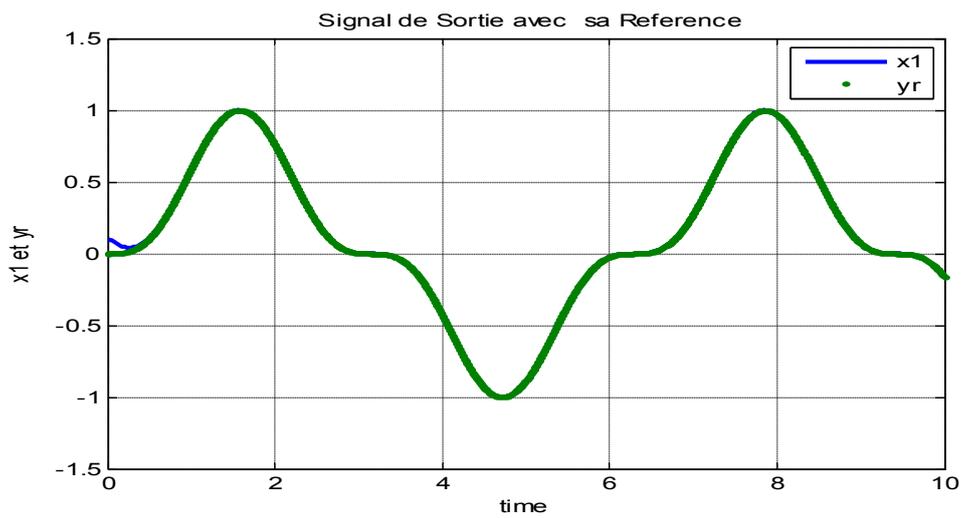


Figure III.3 : Trajectoires de mon claire du système et la sortie désirée.

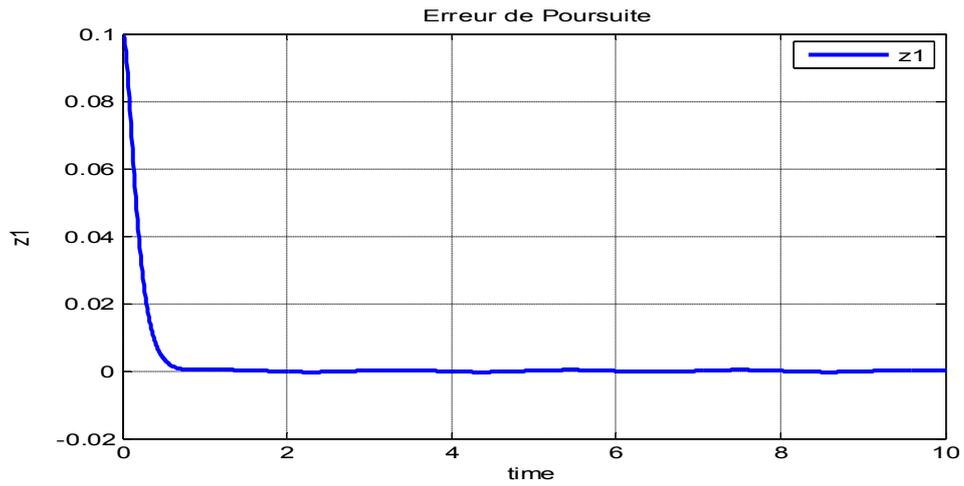


Figure III.4 : Signal d'erreur de poursuite.

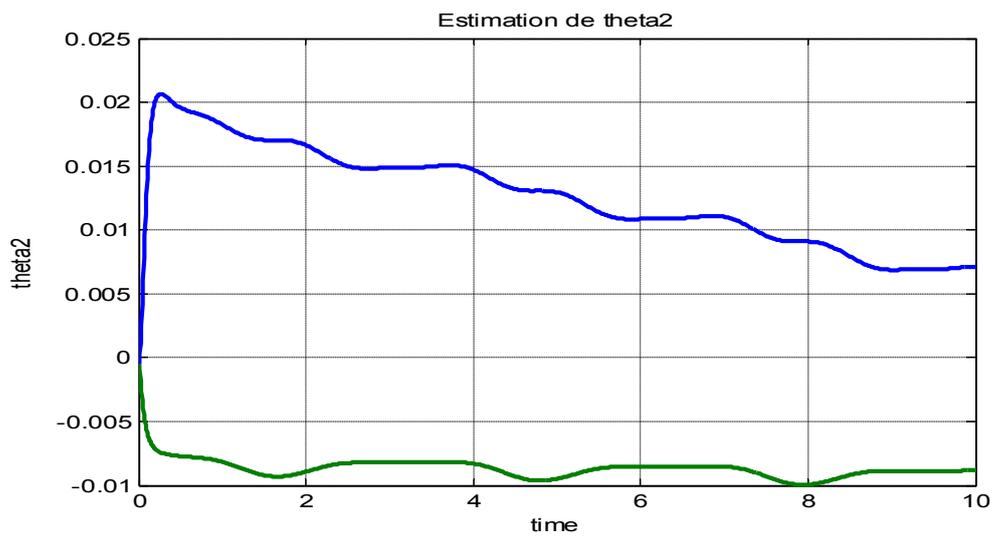


Figure III.5 : Evolution des estimations paramétriques (θ_2).

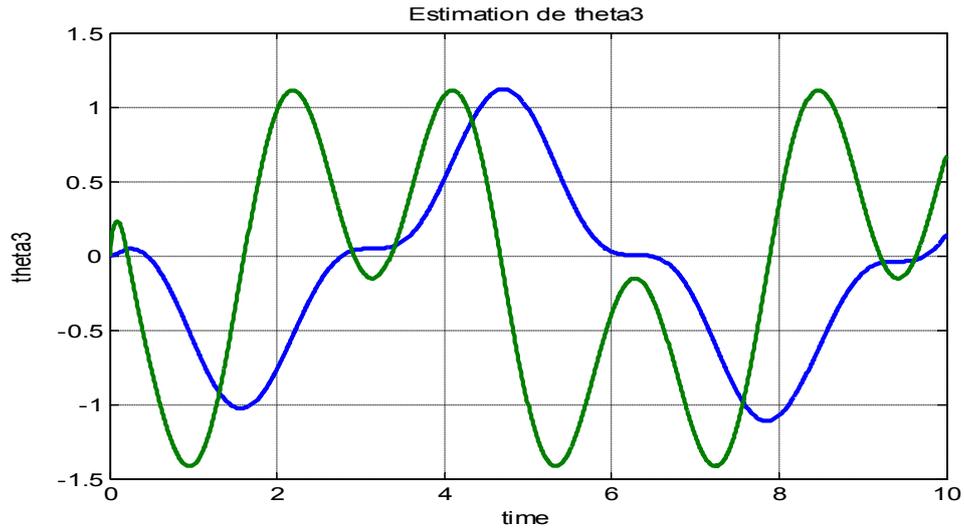


Figure III.6 : Evolution des estimations paramétriques (theta3).

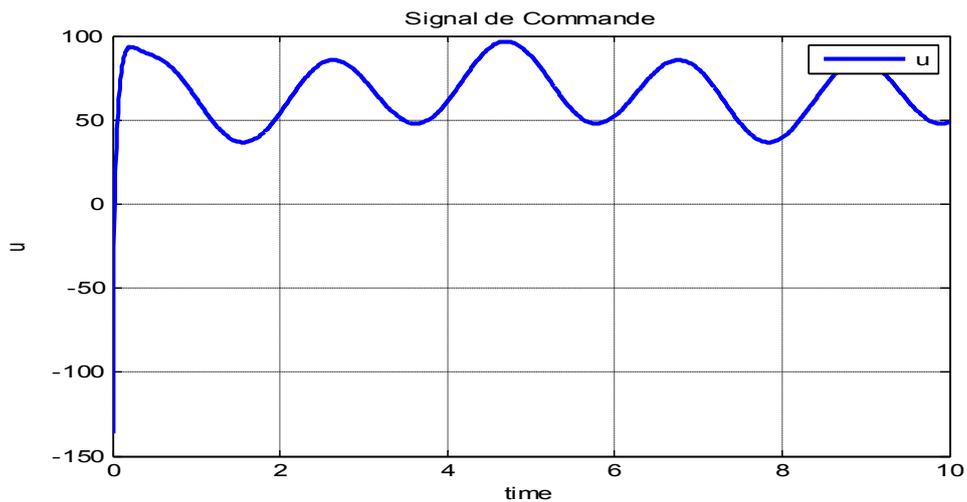


Figure III.7 : Signal de commande.

Les résultats de simulation sont présentés dans les figures (III.2) , (III.3), (III.4), (III.5), (III.6), (III.7). On remarque de la figure (III.2) la bournitude des variables d'états (x_1, x_2, x_3)se qui prouve la stabilité du système en boucle fermée. Les figures (III.3) et (III.4) montrent bien la convergence de l'erreur de poursuite z_1 . La stabilité du système est encore prouvée par les figures (III.5) et (III.6) présentant l'évolution des estimations paramétrique. En fin, la figure (III.7) montre le signal de commande qui est bien continu et bournée.

En résumé, les résultats de simulation montrent bien l'efficacité de la loi de commande adaptative synthétisée par la technique du Backstepping.

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné le modèle dynamique d'un robot manipulateur de degré un actionné par un moteur à courant continu et leur représentation d'état. Ensuite, nous avons résolu le problème de poursuite de trajectoires de ce robot manipulateur. Ceci est obtenu en synthétisant un schéma de commande adaptative par la technique de Backstepping adaptative. Les résultats de simulation montrent bien la stabilité du système en boucle fermée et la convergence de poursuite ce qui prouve l'efficacité de ce schéma de commande.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail consiste à synthétiser des lois de commande adaptative basées sur la méthode du Backstepping pour la commande des systèmes non linéaires à paramètres incertains, inconnus ou variable dans le temps.

Nous avons abordé dans la première partie, les principales définitions mathématiques relatives aux systèmes physiques, notamment des notions préliminaires pour l'analyse de stabilité du système au sens de Lyapunov.

La deuxième partie du travail est consacré aux définitions relatives à la commande adaptative, où on a donné les concepts sur la commande adaptative, les principes, les approche, les méthodes de synthèse notamment la méthode de Backstepping.

Dans la troisième partie une loi de commande adaptative est synthétisée par la méthode de Backstepping puis appliqué par simulation sur un système électromécanique.

Bibliographie

- [1] Hocine Lazouzi, Fouchal Razika Commande adaptative des systèmes à paramètres localisées : application à la régulation insuline-glucose, Mémoire de MASTER, Faculté De Génie Electrique Et D'informatique DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE, Faculté De Génie Electrique Et D'informatique DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE, 2018.
- [2] Dr. K. LABADI. Généralités sur les systèmes Linéaires Cours d'automatique (2008/2009) (1^{ère} année l'ingénieur).
- [3] Sofiane Masri, Systèmes dynamiques discret, Mémoire de Master en mathématique, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER, BISKRA, Faculté des Sciences Exactes et des Sciences de la Nature et de la Vie, D2PARTEMENT DE MATH2MATIQUES.
- [4] M^{elle} AZOUI NAWAL, stratégies de commande avancées pour le suivi de trajectoires, Mémoire Magister en électronique de l'université de Batna, 2009. UNIVERSIT2 DE BATNA FACULTE DE TECHNOLOGIE, DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE, 2013/2014.
- [5] Mr. Si Brahim Madjid, Mr. Djadane Mustapha, Etude et Modélisation sous MATLAB-SIMULINK d'une Commande d'un système HYDRAULIQUE ET VALIDATION SUR UNE MAQUETTE EXPERIMENTALE. Master Académique En Electrotechnique, UNIVERISTE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'ELECTROTECHNIQUE 2010.
- [6] Mr. SAYAH. ABDE LKADER, commande en réseau des systèmes retardés avec observateur linéaire et simulation sur un moteur électrique <<CD>>, mémoire de magister en automatique d'Université d'Oran ES-Seina, Institut de Maintenance et de sécurité Industrielle, Département Maintenance en Instrumentation 2011/2012.
- [7] Mr. SI BRAHIM MADJID, Mr. DJADANE MUSTAPHA, Etude ET MODELISATION SOUS MATLAB-SIMULINK d'une Commande d'un système HYDRAULIQUE ET VALIDATION SUR UNE MAQUETTE EXPERIMENTALE. MASTER ACADEMIQUE En Electrotechnique, UNIVERISTE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'ELECTROTECHNIQUE 2010.
- [8] MESSAADI MOUNA, Commande Backstepping appliquée à la machine synchrone a aimants permanents, Magister EN ELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE HADJ LAKHDAR – BATNA, FACULTE DE TECNOLOGIE, DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE,

2005/2006

- [9] Khalid Boulouf, Issam Madi, Commande Adaptative par Backstepping des Systèmes Non-Linéaire Incertains, mémoire de master, UNIVERSITÉ DE JIJEL Faculté des Sciences et de la Technologie Département d'Automatique 2015/216.
- [10] Yassine BENSALIA. Utilisation des filtres fractionnaires pour la conception de régulateurs adaptative robustes. Doctorat en science automatique. Université du 20 Aout 1955 Skikda. Département de Génie électrique.
- [11] Mell BOUSSADIA Halima, application de technique Backstepping adaptatif pour la commande d'attitude des satellites, Mémoire Magister, Université des Science et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, Faculté de Génie électrique, département d'électronique, 2015/2016.
- [12] A. Chemori (Systèmes robotiques pour l'assistance à la mobilité) Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de MontpellierLIRMM, Université Montpellier 2 - CNRSUPEC – Master 2 ScTIC – 2015/2016.
- [13] I. D Landau et L Dugard. Commande Adaptative Aspects Pratiques et Théoriques. Masson, New York, 1986.
- [14] HADJI Chaabane, Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double étoile, DOCTORAT EN SCIENCES, Université Mohamed Boudiaf- M'sila, Faculté de technologie, département de génie électrique, 2019/2020.
- [15] Ding, Z. (2013). Nonlinear and adaptive control systems. The Institution of Engineering and Technology.
- [16] Ioannou, J. A., & Sun, J. (2012). Robust adaptive control. Dover publications.
- [17] Krstic, M., Kanellakopoulos, I., & Kokotovic, P. (n.d.). Nonlinear and adaptive control design. John Wiley and Sons, Inc \$1 995.