

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Université A.MIRA-BEJAIA**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Electrique**



**جامعة بجاية**  
**Tasdawit n Bgayet**  
**Université de Béjaïa**

## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en électrotechnique

Option : Automatismes industriels

**Thème**

**Commande prédictive de moteurs pas à pas utilisées  
dans un robot à deux degrés de liberté**

Présenté par :

**Mm.AOUINANE Monia**

**Mr. AHFIR Syphax**

Encadre par :

**Mr.MELAHI Ahmed**

**Année universitaire : 2020/2021**

# Remerciements

*Nous remercions tout d'abord notre créateur Allah, Grand et Miséricordieux, le tout puissant pour le courage qu'il nous a données durant toutes ses années d'étude et pour mener ce travail à terme.*

*On commence par exprimer nos profondes reconnaissances et nos vifs remerciements à notre promoteur **Mr.MELAHI AHMED** pour ses orientations, encouragements, ses conseils et sa disponibilité. Merci de nous avoir guidé avec patience et professionnel et d'avoir consacré autant d'heures pour notre travail ; On ne peut, Monsieur, que sincèrement vous exprimer notre respect et notre gratitude.*

*Nos remerciements vont enfin à toutes les personnes qui ont contribués de près ou de loin à la réalisation de ce travail et on souhaite que cette recherche puisse être un support assez valorisant et profitable pour ceux qui auront à l'utiliser.*

# Dédicaces

*Je dédie ce Modest travail à*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon*

*respect : mon cher père AOUINANE Slimane ;*

*A la femme qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun*

*effort pour me rendre heureuse : ma mère AROUCHE betitra ;*

*A mes sœurs Silia, Taous et Fatiha et à mes deux frères Mohamed et*

*Abderrahmane qui n'ont pas cessés de me conseiller et encourager, que dieu les*

*protège et leur offre la chance et le bonheur ;*

*A mon cher fiancé Khaled Pour tout l'encouragement, le respect et l'amour qui*

*m'as offert et pour son éternel soutien et optimisme ;*

*A mes amis de la promotion, tant de souvenir gardés tout au long de mon*

*parcours universitaire ;*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin ;*

**AOUINANE Monia**

# Dédicaces

*Je dédie ce Modest travail à*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon*

*respect : mon cher père AHFIR Djilali ;*

*A la femme qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun*

*effort pour me rendre heureux : ma mère Remila Khokha ;*

*A mes petites sœur Lydia et Manel qui n'ont pas cessés de me conseiller et*

*encourager, que dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur ;*

*Un merci pour ma famille ;*

*A mes amis de la promotion, tant de souvenir gardés tout au long de mon*

*parcours universitaire ;*

*A tous les enseignants qui m'ont aidé de près ou de loin ;*

**AHFIR Syphax**



---

# **Table des matières**

---



Liste des figures  
 Liste des tableaux

Introduction générale.....	1
Chapitre I la commande prédictive.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Bref historique de la commande prédictive.....	3
I.3 Principe de la commande prédictive.....	3
I.4 Différents types d'horizon.....	4
I.5 Eléments de la commande prédictive.....	4
I.5.1 Modèle de prédiction.....	5
I.5.2 Problème d'optimisation.....	6
I.5.3 Contraintes.....	6
I.5.4 Conception de la loi de commande.....	7
I.6 Différents types de la commande prédictive.....	7
I.6.1 Commande Prédictive Généralisée (GPC).....	7
I.6.1.1 Critère à minimiser.....	8
I.6.2 Commande prédictive à base d'un modèle d'état (MPC).....	9
I.7 Conclusion.....	11
Chapitre II Moteur pas à pas et Modélisation d'un bras manipulateur.....	12
II.1 Moteur pas à pas.....	12
II.1.1 Introduction.....	12
II.1.2 Définition et principe de fonctionnement du MPP.....	12
II.1.3 Différentes types des moteurs pas à pas.....	13
II.1.3.1 Moteur pas à pas à aimants permanents.....	13
a) Moteurs unipolaires.....	14
b) Moteurs bipolaires.....	15
II.1.3.1.1 Caractéristiques du moteur pas à pas à aimants permanents.....	16
II.1.3.2 Moteur pas à pas à réluctance variable.....	16
II.1.3.2.1 Caractéristiques du moteur pas à pas à réluctance variable.....	17
II.1.3.3 Moteur pas à pas hybride.....	17
II.1.3.3.1 Caractéristiques de moteur pas à pas hybride.....	18
II.1.4 comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas.....	18
II.2 Modélisation d'un robot manipulateur.....	19
II.2.1 Définition d'un robot.....	19
II.2.2 Généralités sur les robots.....	19
II.2.2.1 Constituants mécaniques de robot.....	19

II.2.2.2 Degré de liberté et la redondance.....	19
II.2.2.3 Espace articulaire .....	20
II.2.2.4 Espace opérationnel .....	20
II.2.3.Modélisation des robots manipulateurs.....	20
II.2.3.1.Modèle géométrique direct.....	20
II.2.3.2.Modèle géométrique inverse.....	20
II.2.3.3.Modèle cinématique direct .....	21
II.2.3.4.Modèle cinématique inverse .....	21
II.2.3.5.Modèle dynamique direct .....	21
II.2.3.6 Modèle dynamique inverse.....	21
II.2.3.7 Formalisme d'Euler-Lagrange.....	22
II.2.4 Modélisation d'un robot SCARA .....	22
II.2.4.1 Définition du robot SCARA .....	22
II.2.4.2 Structure de SCARA .....	23
II.2.4.3 Modèle géométrique .....	23
II.2.4.4 Modèle cinématique .....	24
II.2.4.5 Modèle dynamique.....	25
II.3 Conclusion .....	28
Chapitre III Application de la commande Prédictive au MPPAP.....	29
III.1 Introduction.....	29
III.2 Présentation du modèle du système étudié .....	29
III.2.4 Synthèse des Régulateurs.....	30
III.2.5 MPC avec quatre régulateurs .....	30
III.3 Simulation et interprétation des résultats.....	30
III.3.1 Simulation sans intégrateur .....	31
III.3.1.1 Résultats de simulation à vide .....	32
III.3.1.2 Résultats de simulation sans intégrateur et avec découplage .....	33
III.3.1.3 Résultats de simulation sans intégrateur et sans découplage .....	34
III.3.1.4 Résultats de simulation sans intégrateur avec découplage et avec perturbation mesurée	35
III.3.2 Simulation avec intégrateur .....	36
III.3.2 .1 Résultats de simulation avec intégrateur et avec découplage. ....	36
III.3.2.2 Résultat de simulation avec intégrateur et sans découplage.....	37
III.3.2.3 Résultats de simulation avec intégrateur, découplage et perturbation mesurée.....	38
III.4 Conclusion .....	40

Chapitre IV Application de la commande Prédictive au robot SCARA.....	41
IV.1 Introduction .....	41
IV.2 Structure du régulateur sous Matlab .....	41
IV.3 Simulation .....	42
IV.3.1 Résultats de simulation en utilisant les régulateurs PI :.....	42
IV.3.2 Résultats de simulation pour la première trajectoire .....	44
IV.3.3 Résultats de simulation pour la deuxième trajectoire .....	47
IV.3.4 Résultats de simulation pour la troisième trajectoire.....	50
IV.3.5 Résultats de simulation pour la quatrième trajectoire .....	53
IV.4 Conclusion.....	56
Conclusion générale.....	57
Références bibliographiques.....	58
Annexes	



---

## Liste des figures

---



**Chapitre I**

**Figure I.1** Principe de la commande prédictive.....4

**Figure I.2** Stratégie de la commande prédictive.....5

**Figure I.3** Schéma-bloc d'un modèle de prédiction .....5

**Figure I.4** Principe du GPC .....8

**Figure I.5** La méthodologie du MPC.....9

**Chapitre II**

**Figure II.1** Structure d'un moteur pas à pas à aimant permanent.....14

**Figure II.2** Schéma d'un moteur pas à pas unipolaire.....14

**Figure II.3** Moteur pas à pas bipolaire.....15

**Figure II.4** Principe d'un moteur pas à pas à réluctance variable.....17

**Figure II.5** Moteur hybride unipolaire et bipolaire.....17

**Figure II.6** Les éléments d'un robot.....19

**Figure II.7** Schéma représentatif d'un robot SCARA.....23

**Figure II.8** La structure de base du robot SCARA .....23

**Figure II.9** Modélisation géométrique d'un robot SCARA à deux degrés de liberté.....24

**Chapitre III**

**Figure III.1** Model Predictive control(Matlab).....30

**Figure III.2** Evolution de couple, courant, vitesse et de la tension à vide.....32

**Figure III.3** Evolution de couple, courant, vitesse et de la tension en charge .....33

**Figure III.4** Résultats de simulation de MPC sans intégrateur sans découplage.....34

**Figure III.5** Résultats de simulation de MPC sans intégrateur avec découplage et avec perturbation mesurées.....35

**Figure III.6** Résultats de simulation de MPC avec intégrateur avec découplage.....36

**Figure III.7** Résultats de simulation de MPC avec intégrateur sans découplage.....37

<b>Figure III.8</b> Résultats de simulation de MPC avec intégrateur avec découplage et avec perturbation mesurées.....	38
--	----

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1</b> Schéma de bloc de simulation.....	41
<b>Figure IV.2</b> Schema de l'ensemble Régulateurs-machines-robot.....	41
<b>Figure IV.3</b> Génération de trajectoire dans le plan (X, Y).....	42
<b>Figure IV.4</b> Génération des trajectoires pour les deux articulations(dans l'espace articulaire)	42
<b>Figure IV.5</b> Schéma bloc de simulation illustrant l'équivalence entre le système et un système d'ordre 1 suivi d'un intégrateur.....	43
<b>Figure IV.6</b> Evolution de la position en fonction de temps.....	43
<b>Figure IV.7</b> Trajectoire dans le plan( X,Y)(consignes et reponses).....	44
<b>Figure IV.8</b> Evolution temporelle de X et Y et l'erreur de poursuite de la trajectoire.....	44
<b>Figure IV.9</b> Evolution des signaux de commandes en fonction de temps.....	45
<b>Figure IV.10</b> Evolution des courants et de couple électromagnétique en fonction de temps....	46
<b>Figure IV.11</b> Trajectoire dans le plan (X ,Y).....	47
<b>Figure IV.12</b> Evolution de X et Y et les erreurs de poursuite de la trajectoire.....	47
<b>Figure IV.13</b> Evolution de la position et les signaux de commandes en fonction de temps.....	48
<b>Figure IV.14</b> Evolution des courants et de couple électromagnétique en fonction de temps....	49
<b>Figure IV.15</b> Trajectoire dans le plan (X, Y).....	50
<b>Figure IV.16</b> Evolution de X et Y et les erreurs de poursuite de la trajectoire.....	50
<b>Figure IV.17</b> Evolution de la position et les signaux de commandes en fonction de temps.....	51
<b>Figure IV.18</b> Evolution des courants et de couple électromagnétique en fonction de temps....	52
<b>Figure IV.19</b> Trajectoire dans le plan (X ,Y).....	53
<b>Figure IV.20</b> Evolution de X et Y et les erreurs de poursuite de la trajectoire.....	53
<b>Figure IV.21</b> Evolution de la position et les signaux de commandes en fonction de temps.....	54
<b>Figure IV.22</b> Evolution des courants et de couple électromagnétique en fonction de temps....	55



---

## Liste des tableaux

---



<b>TableauII.1</b> : Mode d'alimentation de chaque demi-enroulement.....	14
<b>TableauII.2</b> : Mode d'alimentation de deux demi-enroulements .....	14
<b>TableauII.3</b> : Mode d'alimentation d'un seul enroulement à la fois.....	15
<b>TableauII.4</b> : Mode d'alimentation de deux enroulements à la fois.....	16
<b>TableauII.5</b> : Comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas.....	18



---

# **Introduction générale**

---



# Introduction générale

Ces dernières années, il y'a beaucoup de thèmes de recherche sur la robotique industrielle. Le robot est un outil industriel programmable pour effectuer des tâches automatiques. Il remplace l'homme dans certaines tâches difficiles et dangereuses. Le robot industriel nous permet d'augmenter la productivité et d'améliorer la qualité du produit.

C'est avec le développement technologique de l'électronique et de l'informatique que la robotique a progressé.

Le moteur pas à pas est un moteur qui fait une rotation en fonction de l'impulsion électrique reçue dans ses bobinages. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électrique s'appelle un pas. Un moteur se caractérise par le nombre de pas par tour.

En effet, une commande électronique agit sur la performance et est toujours associée aux moteurs pas à pas.

Les moteurs pas à pas ont pris une place importante parmi les actionneurs utilisés dans la robotique. Ce qui donne une meilleure qualité à la production des industries au niveau mondial et cela encourage les automaticiens de s'intéresser beaucoup plus à ce type de moteur.

Dans les industries de nos jour, on cherche de techniques de commande meilleurs pour satisfaire la robustesse d'un côté et le coût d'un autre côté. Des systèmes réels ont une dynamique variable dans le temps.

Pour réaliser un asservissement en vitesse du moteur pas à pas, nous avons utilisé la commande prédictive, pour assurer une commande avec les performances souhaitées.

La commande prédictive utilise des modèles internes, pour prédire le comportement du système à commander pour avoir une meilleure réponse.

L'objectif de notre travail est d'appliquer la commande prédictive au moteur pas à pas à aimants permanents.

Notre travail est subdivisé en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons donné des généralités sur la commande prédictive et ses différentes variantes. Nous avons présenté les différents éléments qui constituent le régulateur prédictif comme le modèle de prédiction, ...etc.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les moteurs pas à pas, leur modélisation ainsi que leur principe de fonctionnement. Ensuite, nous présenterons les robots manipulateurs ainsi que la modélisation et différents types de modèle.

Dans le chapitre trois, nous allons appliquer la commande prédictive MPC en utilisant le toolbox « MPC » de Matlab. La simulation et l'interprétation des résultats seront données pour vérifier et valider les performances de la commande prédictive appliquée au MPPAP.

Dans le quatrième chapitre, nous nous servons des moteurs pas à pas asservis en vitesse par MPC pour motoriser un robot SCARA. Ce dernier sera asservi en position en utilisant des régulateurs PI. L'ensemble des régulateurs PI et MPC assure un comportement adéquat du robot en améliorant les performances en poursuite de trajectoires et de positionnement ainsi qu'une bonne robustesse vis-à-vis les perturbations externes et les incertitudes sur les paramètres internes.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale ainsi que des perspectives.

# **Chapitre I**



---

## **Commande prédictive**

---



## I.1 Introduction

La commande prédictive est une technique de commande avancée, elle fait partie des techniques de contrôle à base d'un modèle interne (IMC : Internal Model Controller).

La commande prédictive est basée sur l'utilisation d'un modèle interne, afin de prédire le comportement du système à commander sous un certain nombre de contraintes. Grâce à son aspect prédictif et ses performances, elle s'adapte à tout type de systèmes.

Généralement elle est utilisée beaucoup plus dans les systèmes robotiques, la commande numérique, l'industrie chimique et les raffineries de pétrole.

Ce chapitre consiste à présenter la stratégie et le principe de base de la commande prédictive. Surtout la commande prédictive généralisée (GPC) et la commande prédictive à base de modèle d'état (MPC).

## I.2 Bref historique de la commande prédictive

La Commande prédictive a été inventée par un Français, J. Richalet, en 1978 sous le nom de MPHIC (Model Prédictive Heuristic Control), au plus tard sous le nom de commande algorithmique (MAC-Model Algorithmic Control) [Bruijn et Verbruggen 1984] ou commande matricielle dynamique (DMC- Dynamic Matrix Control) [Culter et Ramaker 1980]. Il a fallu attendre 1987, pour les premiers résultats obtenus par J. Richalet et al, sur des systèmes électromécaniques rapides, tel que des commandes d'axes d'un robot [1].

La commande prédictive généralisée par D.W.Clarke en 1987 en accord avec de grands groupes industriels aux États-Unis et en Europe (Shell et Adersa) et la commande prédictive fonctionnelle (PFC-Prédictive Functional Control) [Richalet 1993] font partie de cette classe.

## I.3 Le principe de la commande prédictive

L'idée principale de la commande prédictive se résume à « l'utilisation d'un modèle qui permet d'évaluer la dynamique future du système à commander tout en respectant les contraintes et de choisir la meilleure décision au sens d'un certain coût ».

Le principe de la commande prédictive est illustré dans la Figure I.1. A chaque instant d'échantillonnage grâce au modèle interne et la future loi de commande calculée, un calcul des prédictions des variables contrôlées est effectué jusqu'à un horizon de temps  $N$  (horizon de prédiction), à appliquer sur les variables manipulées jusqu'à un horizon temporel  $N_u$  (horizon de commande), en minimisant un critère de performances. A la période d'échantillonnage suivante, seul le premier élément de la séquence optimale de la loi de commande est appliqué

sur le système. Cette procédure est ensuite répétée : c'est le principe de l'horizon fuyant. Ainsi à chaque période d'échantillonnage, un problème d'optimisation doit être résolu en temps réel.

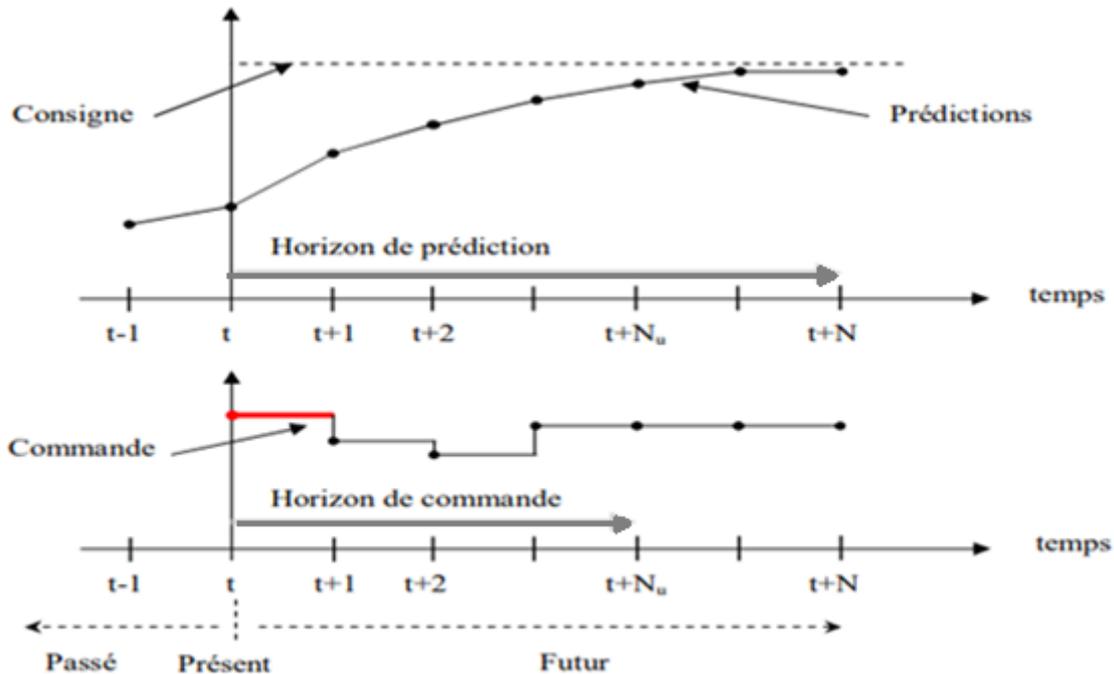


Figure I.1 Principe de la commande prédictive [2].

#### I.4 Différents types d'horizon

Une idée importante de la commande prédictive est la notion d'horizon :

- L'horizon de commande ( $N_u$ ) est le nombre d'actions successives sur l'entrée du procédé (ou variable manipulée) pour atteindre la sortie désirée.
- L'horizon de prédiction ( $N_p$ ) est l'horizon sur lequel on prédit la sortie du procédé et sur lequel on cherche à lui faire suivre une consigne donnée, et ceci en faisant  $N_u$  actions sur la variable d'entrée.

#### I.5 Eléments de la commande prédictive

Les éléments de base de la commande prédictive sont :

- Un modèle interne pour réaliser les prédictions.
- Une fonction coût à minimiser plus les contraintes.
- Un algorithme d'optimisation (pour calculer la commande future).

Différentes options peuvent être considérées pour chaque élément, ce qui donne une variété d'algorithmes de commande prédictive [2].

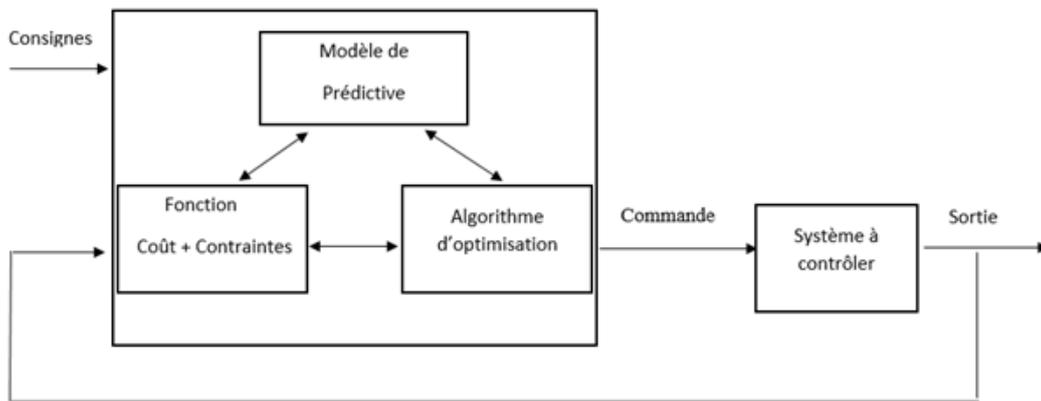


Figure I.2 Stratégie de la commande prédictive [2].

### I.5.1 Modèle de prédiction

Le modèle de prédiction comprend généralement deux parties principales, le modèle du système et le modèle de perturbation.

Il intervient directement dans la stratégie de la commande prédictive pour traduire l'évolution prévisible du comportement du procédé en fonction des entrées appliquées.

$P$  : perturbation.

$U$  : commande.

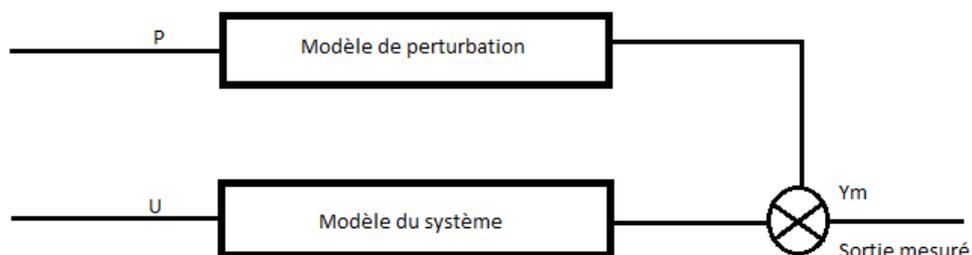


Figure I.3 Schéma-bloc d'un modèle de prédiction [3].

Le modèle du système représente les relations entrées/sorties et le modèle de perturbation est utilisé pour représenter la perturbation ou pour approximer les erreurs de modélisation.

Comme la commande prédictive est une commande numérique, le modèle utilisé est donc de nature discrète.

Suivant la façon dont la perturbation est supposée intervenir, on obtient de très nombreuses structures de modèles. On se limite dans ce qui suit, à la présentation de la structure la plus

couramment utilisée en commande prédictive, le modèle **CARIMA** (Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average).

### I.5.2 Problème d'optimisation

Le problème de commande prédictive revient à déterminer la loi de commande qui permet de minimiser le critère de performance  $J$  appelé également fonction objectif ou fonction coût. Pour ce critère, l'objectif est :

- D'assurer la poursuite : faire coïncider la sortie prédite à la consigne désirée sur un horizon futur fini,
- De minimiser l'effort ('énergie) nécessaire pour l'application de la commande.

L'expression générale de la fonction coût contient les erreurs entre la consigne future désirée et les prédictions sur un horizon de prédiction ainsi que la variation de la commande. Cette fonction est donnée par :

$$J = \sum_{j=1}^{Np} Q(j) \hat{y}(t+j|j) - y^d(t+j))^2 + \sum_{j=1}^{Nu} R(j) (\Delta u(t+j-1))^2 \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$Q$  et  $R$  sont des matrices de pondération symétriques définies positives.

$Np$  : Horizon de prédiction.

$Nu$  : Horizon de commande.

$y^d$  : Sortie désirée.

$\hat{y}$  : Sortie prédite.

Ce problème est résolu grâce à un algorithme de programmation qui minimise cette fonction en tenant comptes les différentes contraintes sur les différentes variables.

### I.5.3 Contraintes

Dans la pratique, les processus sont sujets à des contraintes qui doivent être prises en compte dans le problème d'optimisation afin d'obtenir des commandes admissibles. Les techniques de la commande prédictive intègrent les contraintes pendant la phase de synthèse sont présentées et d'implantation du contrôleur. Les contraintes d'une façon directe de sorte que l'algorithme trouve automatiquement la meilleure solution admissible.

Les restrictions en sortie sont principalement dues à des raisons de sécurité opérationnelles, et doivent être contrôlées à l'avance puisqu'elles peuvent endommager les équipements

physiques et causer des pertes dans la production. Les variables d'entrée peuvent toujours être bornées dans leurs limites permises en fonction des mécanismes de saturation.

Les contraintes généralement imposées sont :

- Contraintes sur les amplitudes des commandes pour  $j = 1, \dots, N_u$  :

$$u_{min} \leq U(t + j) \leq u_{max} \quad (I.2)$$

- Contraintes sur la variation de la commande pour  $j = 1, \dots, N_u$  :

$$u_{min} \leq \Delta u(t + j) \leq \Delta u_{max} \quad (I.3)$$

- Contraintes sur la sortie prédite : pour  $j = 1, \dots, N_p$  :

$$y_{min} \leq \hat{Y}(t + j) \leq y_{max} \quad (I.4)$$

## I.5.4 Conception de la loi de commande

Dans la commande prédictive, le modèle est utilisé pour prédire l'évolution future des sorties du système. Ces prédictions seront utilisées par la suite pour la résolution de la fonction coût et pour déterminer la loi de commande, puis on applique au système seulement la première composante de  $\Delta u(t)$  avec

$$U(t) = u(t - 1) + \Delta u(t) \quad (I.5)$$

## I.6 Différents types de la commande prédictive

### I.6.1 Commande Prédictive Généralisée (GPC)

La commande GPC utilise pour la prédiction du comportement un modèle entrée/sortie par fonction de transfert de type CARIMA (Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average) [4], qui permet l'annulation de toute erreur statique vis-à-vis d'une consigne ou d'une perturbation constante.

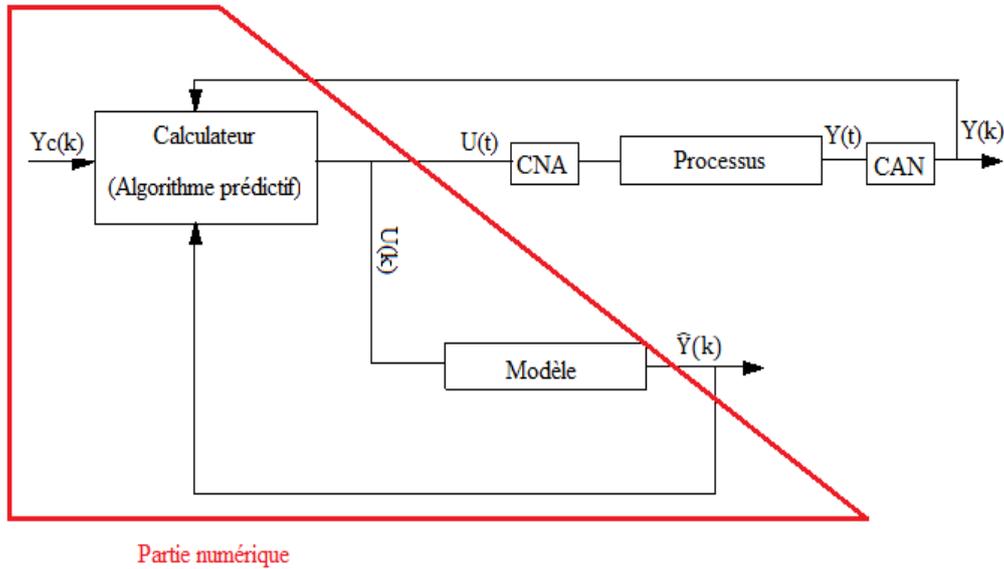


Figure I.4 Principe du GPC [5]

Où  $y_c(k)$  représente la consigne,  $y(k)$  : la sortie du processus,  $\hat{y}(k)$  : la sortie prédite, et  $u(k)$  est la commande à appliquer sur le système. Définition du modèle sous forme CARIMA :

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-1) + \frac{C(q^{-1})E(k)}{\Delta(q^{-1})} \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \quad (\text{I.7})$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b} \quad (\text{I.8})$$

$$\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1} \quad (\text{I.9})$$

$E(k)$  : bruit blanc centré.

$C(q^{-1})$  : polynôme de perturbation.

$q^{-1}$  : Operateur retard temporel.

Cette structure apporte un terme intégrateur dans la loi de commande et garantit l'annulation de toute erreur statique vis à vis de consigne ou de perturbation constante.

### I.6.1.1 Le critère à minimiser

Le critère à minimiser compare des termes portant sur les erreurs de prédiction dans le futur et les incréments de commandes futures.

$$J = \sum_{i=N_1}^{N_2} (\hat{y}(k+i) - y_d(k+i))^2 + \lambda \sum_{i=1}^{N_u} (\Delta u(k+i-1))^2 \quad (\text{I.10})$$

Sous l'hypothèse :

$$\Delta u(k+i) = 0 \text{ Pour } i \geq N_U \quad (\text{I.11})$$

Quatre paramètres doivent être choisis par l'utilisateur

$\lambda$  Facteur de pondération sur la commande.

$N_U$  Horizon de prédiction sur la commande.

$N_2$  Horizon de prédiction supérieur.

$N_1$  Horizon de prédiction inférieur.

## I.6.2 La commande prédictive à base d'un modèle d'état (MPC)

Dans sa formulation la plus générale, la méthodologie concernant l'approche du MPC peut s'illustrer sur le schéma représenté dans (figure I.5).

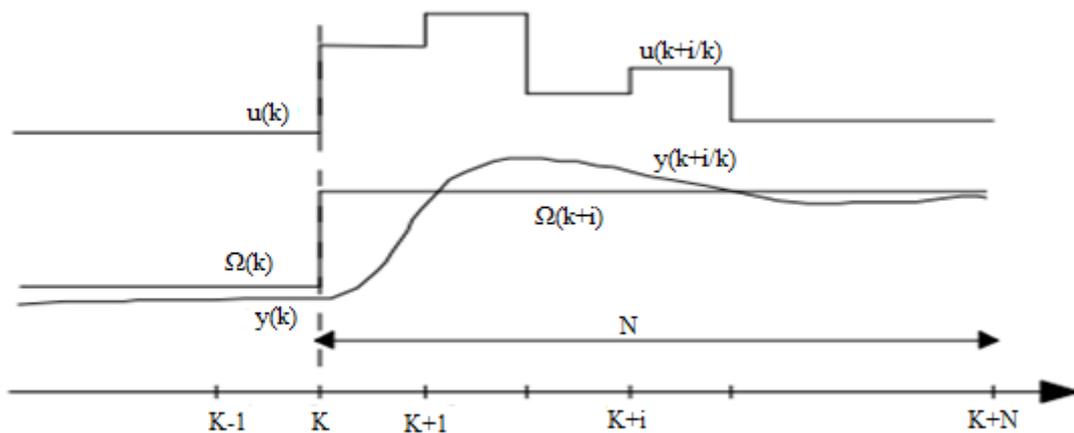


Figure I.5 La méthodologie du MPC [6].

Où  $k$  représente le temps discret.

$u(k)$  : l'entrée du système au temps  $k$ .

$\Omega(k)$  : la référence du système au temps  $k$ .

$y(k)$  : la sortie du système au temps  $k$ .

- Formulation du problème d'optimisation : cas général

$$u_{k,opt}(x_k) := \operatorname{argmin} J(x_k, u_k) \quad (\text{I.12})$$

Sujet à : modèle dynamique du système

$$x_{k+i} \in X, \quad u_{k+i} \in U, \quad i = 0, \dots, N - 1$$

$$x_{k+N} \in X_f$$

Le modèle du système est un modèle d'état comme présenté ci-après :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k + Du_k \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

En absence des contraintes, on prend :

$$X = R^n, \quad X_f = R^n \text{ et } U = R^m$$

Avec

$x_k$  : le vecteur d'état de dimension  $n$ ,

$u_k$  : l'entrée de dimension  $m$ ,

$X$  : une partie de l'espace d'état où les contraintes sur  $x$  sont vérifiées,

$X_f$  : une partie de l'espace d'état où la contrainte sur la valeur finale de  $x$  est vérifiée,

$U$  : une partie de l'espace de signal de commande où les contraintes sur  $u$  sont vérifiées.

## I.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la commande prédictive, on a introduit le principe de fonctionnement de la commande prédictive et les éléments et ce qui suit (Différentes types d'horizon, Modèle, problème d'optimisation, Les contraintes et la loi de commande).

On a présenté deux méthodes de commande prédictive qui sont : la commande prédictive généralisée (GPC) et la commande prédictive à base d'un modèle d'état (MPC).

Dans le chapitre suivant nous nous intéresserons au moteur pas à pas (MPP) utilisé en robotique

# **Chapitre II**



---

## **Moteur pas à pas et Modélisation d'un robot manipulateur**

---



## II.1 Moteur pas à pas

### II.1.1 Introduction

Parmi les actionneurs électriques les plus utilisés pour réaliser des déplacements mécaniques tels qu'un déplacement ou un positionnement où on doit contrôler simplement la position ou la vitesse d'un système en boucle ouverte, on rencontre les moteurs pas à pas (MPP).

Le moteur pas à pas est un moteur électrique synchrone et il est plus simple à commander, asservissement soit en vitesse ou en position. Ce convertisseur électromécanique est destiné à transformer un signal électrique (impulsion ou un train d'impulsions de pilotage) en déplacement mécanique (angulaire ou linéaire).

Ces moteurs présentent une très grande précision et une durée de vie quasi illimitée, un couple potentiellement important et l'usure mécanique étant pratiquement inexistante (absence de frottement), grâce à ses performances, ils sont très utilisés en robotique (déplacement d'un axe, vitesse variable du robot), en informatique (déplacement d'une tête de lecture d'une imprimante, avance du papier pour les imprimantes...), antenne satellite, télescope...etc.

### II.1.2 Définition et principe de fonctionnement du MPP

Un moteur pas à pas est un moteur synchrone simple biphasé (deux phases) sans balai contenant un rotor segmenté aimanté et un stator constitué d'un nombre déterminé de bobines électromagnétiques. Lorsqu'elles sont excitées, ces bobines créent des pôles nord et sud qui repoussent ou attirent le rotor segmenté aimanté pour le faire tourner. Les dents fines sont espacées uniformément sur l'ensemble du diamètre et fournissent la rotation angulaire incrémentale qui produit le mouvement mécanique.

Dans tous les types de moteurs, on positionne le rotor en modifiant la direction d'un champ magnétique créé par les bobinages du stator, ils nécessitent un circuit de commande qui comporte une partie logique et un circuit de puissance. La partie logique détermine pour chaque pas quelles sont les bobines alimentées et le sens de rotation. La fréquence de l'horloge du circuit logique détermine la vitesse de rotation.

### II.1.3 Différentes types des moteurs pas à pas

Il existe trois types principaux de types de moteurs pas à pas, ils sont classés en fonction du nombre de bobines et de la manière dont elles sont alimentées ainsi que de la nature du rotor qui soit un barreau de fer doux (moteur a réluctance variable), soit un rotor avec aimant permanent (moteur à aimant permanent), soit un rotor a plusieurs dents aimantés (moteur hybride).

#### II.1.3.1 Moteur pas à pas à aimants permanents

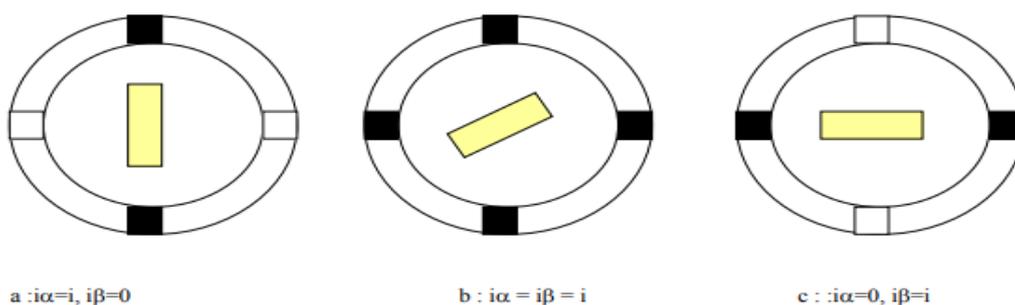
Le principe de fonctionnement du moteur à aimant permanent se situe au niveau du rotor, qui par la présence d'aimants, à tendance à s'aligner sur le champ statorique si les bobines sont alimentées, la figure II.1 représente la structure d'un moteur pas à pas diphasé. Le moteur comporte quatre plots au stator portant les deux phases  $\alpha$  et  $\beta$ .

L'alimentation d'une phase oblige le rotor, par la loi du flux maximum, à s'orienter face au rôle correspondant à cette phase comme représenté par les figures (II.1.a) et (II.1.c).

L'alimentation simultanée des deux phases permet de définir des positions stables intermédiaires figure (II.1.b), appelées demi pas [7].

Ce modèle des moteurs se subdivisent en deux types :

- a. Les moteurs unipolaires.
- b. Les moteurs bipolaires.

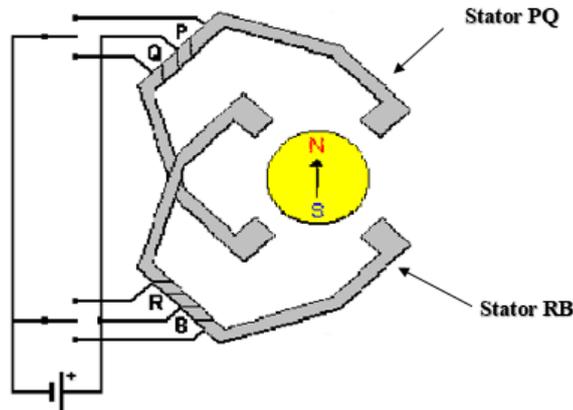


**Figure II.1** Structure d'un moteur pas à pas à aimants permanents [7].

**a. Les moteurs unipolaires**

Le moteur pas à pas unipolaire comporte 4 bobines (deux pour chaque pôle du stator), toutes alimentées dans le même sens. La commande de ces moteurs est donc unipolaire (d'où le nom donné à ce type de moteur). Chaque bobine peut être pilotée à partir d'une sortie numérique par un seul transistor.

Les moteurs unipolaires sont plus faciles à piloter que les moteurs bipolaires, mais il y a moins de modèles disponibles sur le marché (pour les petits moteurs) [8].



**FigureII.2** Schéma d'un moteur pas à pas unipolaire.

On alimente successivement chaque demi-enroulement comme l'indique ce tableau :

Séquences	IP	IQ	IR	IB	Angle
1	1	0	0	0	45°
2	0	0	0	1	135°
3	0	1	0	0	225°
4	0	0	1	0	315°

**TableauII.1** Mode d'alimentation de chaque demi-enroulement.

Dans ce mode on alimente successivement deux demi-enroulements comme l'indique ce tableau :

Séquences	IP	IQ	IR	IB	Angle
1	1	0	1	0	0°
2	1	0	0	1	90°
3	0	1	0	1	180°
4	0	1	1	0	270°

**TableauII.2** Mode d'alimentation de deux demi-enroulements.

On constate que pour chaque bobinage les signaux de contrôle de deux phases son complémentaires.

**b. Les moteurs bipolaires**

Le moteur bipolaire fonctionne avec deux polarités, positives et négatives, le courant doit changer du sens dans les enroulements à chaque pas.

En inversant les polarités des enroulements statoriques, on inverse les pôles nord et sud du stator.

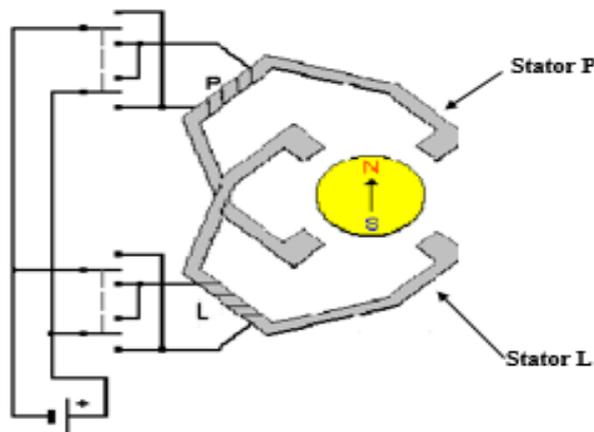


Figure II.3 Moteur pas à pas bipolaire.

La rotation de ce moteur pas à pas s'effectue en quatre étapes selon deux modes d'alimentations.

On aliment un seul enroulement à la fois, ce qui nous donne les séquences ci-dessus :

Séq	IP1	IP2	IP3	IP4	IL1	IL2	IL3	IL4	P.R
1	0	1	0	1	0	0	0	0	45°
2	0	0	0	0	1	0	1	0	135°
3	1	0	1	0	0	0	0	0	225°
4	0	0	0	0	0	1	0	1	315°

Tableau II.3 Mode d'alimentation d'un seul enroulement à la fois.

On alimente deux enroulements à la fois de façon à ce que le rotor se positionne entre deux pôles.

Séq	IP1	IP2	IP3	IP4	IL1	IL2	IL3	IL4	P.R
1	0	1	0	1	0	1	0	1	0°
2	0	1	0	1	1	0	1	0	90°
3	1	0	1	0	1	0	1	0	180°
4	1	0	1	0	0	1	0	1	270°

**Tableau II.4** Mode d'alimentation de deux enroulements à la fois.

Ce dernier mode de commande est celui qui offre un couple plus élevé.

### II.1.3.1.1 Les caractéristiques du moteur pas à pas à aimants permanents

- Inertie élevée du moteur.
- Nombre de pas par tour plus faible, dû à la difficulté de loger les aimants du rotor.
- Couple moteur élevé, dû à la puissance des pôles aimantés (Couple proportionnel au courant).
- Sens de rotation liée à l'ordre d'alimentation des bobines et au sens du courant dans les bobines.
- Performances affectées par la variation des caractéristiques des aimants.
- Simple construction se traduit par un prix modéré du moteur avec une résolution plutôt basse.

### II.1.3.2 Moteur pas à pas à réluctance variable

Le principe des machines à réluctance variable (MRV) est basé sur celui de l'électroaimant.

En fait, il s'agit de la plus ancienne méthode de conversion électromécanique. Toute machine à réluctance variable est constituée de deux parties en mouvement relatif dont l'une est électriquement active (stator) et l'autre passive (rotor).

La première comprend un circuit magnétique denté muni de bobinages, la seconde est simplement un circuit ferromagnétique, lui aussi denté, mais sans aucun conducteur ni aimant [11].

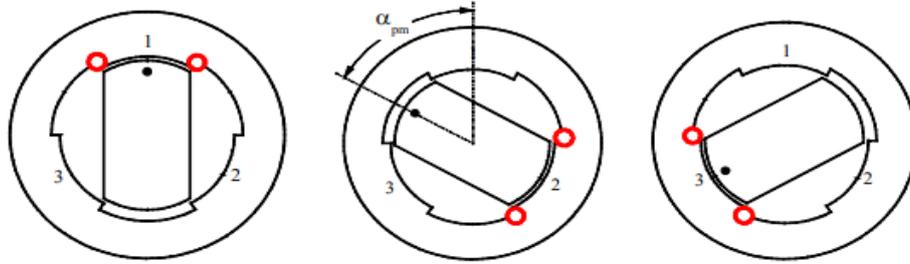


Figure II.4 Principe d'un moteur pas à pas à réluctance variable [12].

**II.1.3.2.1 Les caractéristiques du moteur pas à pas à réluctance variable**

- Une faible résolution et un faible couple.
- Facile à contrôler à Rendement faible.
- Fonctionne à des fréquences élevées.
- Possibilité d'utilisation à haute fréquence.
- Pas de couple résiduel en l'absence d'alimentation.
- Moteur affecté par des phénomènes de résonance.

**II.1.3.3 Moteurs pas à pas hybride**

Ce moteur superpose le principe de fonctionnement des moteurs à aimant permanent et à réluctance variable et combine leurs avantages. Le rotor est constitué de 2 disques dentés décalés mécaniquement à fin d'obtenir une bonne résolution avec un couple moteur assez élevé. Entre ces 2 disques est inséré un aimant permanent. La structure du stator reste la même [13].

Lorsqu'on alimente une bobine, le rotor place les dents Nord et Sud de telle façon à ce que le flux traversant le rotor soit maximal [14].

Ce type de moteur existe en deux modèles : – unipolaire et bipolaire.

- Séquence en unipolaire : 1a - 2a - 1b - 2b - 1a (120°).
- Séquence en bipolaire :  $\uparrow$  -2 $\uparrow$ -1-2- $\downarrow$ (120°).  $\uparrow$

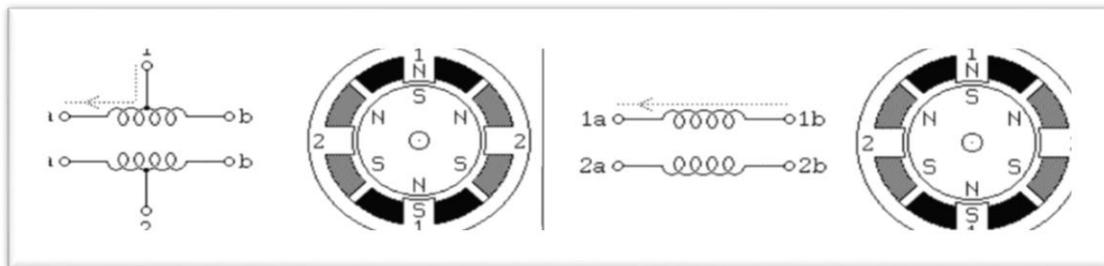


Figure II.5 Moteur hybride unipolaire et bipolaire.

### II.1.3.3.1 Le moteur pas à pas hybride présente les caractéristiques suivantes :

- Grande résolution.
- Risque de résonance à certaines vitesses.
- Une inertie élevée (pour les moteurs à aimant rotorique).
- Une grande précision du positionnement.
- Couple résiduel en l'absence d'alimentation.

## II.1.4 comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas

Ce tableau représente la comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas [7].

Type de moteur	Moteur à aimants permanents	Moteur à réluctance variable	Moteur hybride
Résolution (Np de pas/tour)	Moyenne	Bonne	Elevée
Couple moteur	Elevé	Faible	Elevé
Sens de rotation	Il dépend : - du sens du courant pour le moteur bipolaire  - L'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend uniquement de l'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend : - du sens du courant pour le moteur bipolaire  - L'ordre d'alimentation n des bobines
Fréquence de travail	Faible	Grande	Grande

**Tableau II.5** Comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas [7].

## II.2 Modélisation d'un robot manipulateur

### II.2.1 Définition d'un robot

Un robot est un appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable.

Un robot industriel est un manipulateur automatique asservi en position, polyvalent, reprogrammable, capable de positionner et d'orienter des matériaux, des pièces, des outils ou des dispositifs spécialisés au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution de tâches variées. Un robot est composé de plusieurs segments articulés permettant de piloter un organe dit terminal ou effecteur. L'organe terminal ou effecteur est le dispositif avec lequel les objets peuvent être pris ou soumis à d'autres actions. La position et l'orientation de cet élément sont contrôlées et repérées par leurs coordonnées généralisées qui sont les coordonnées d'un point particulier de l'organe terminal exprimées dans le repère de base.

Le secteur d'activité des systèmes robotiques s'est élargi de façon importante en particulier dans le domaine médical, spatial, industriel, militaire et dans le domaine de l'agriculture [10].

Nous nous sommes intéressés au robot de type SCARA à deux degré de liberté (2ddl) en nous focalisant sur sa structure, sa flexibilité, et sa modélisation.

### II.2.2 Généralités sur les robots

#### II.2.2.1 Constituants mécaniques de robot

Dans un robot industriel on trouve : Base, axe (articulation), Actionneur, corps, organe terminal, effecteur.

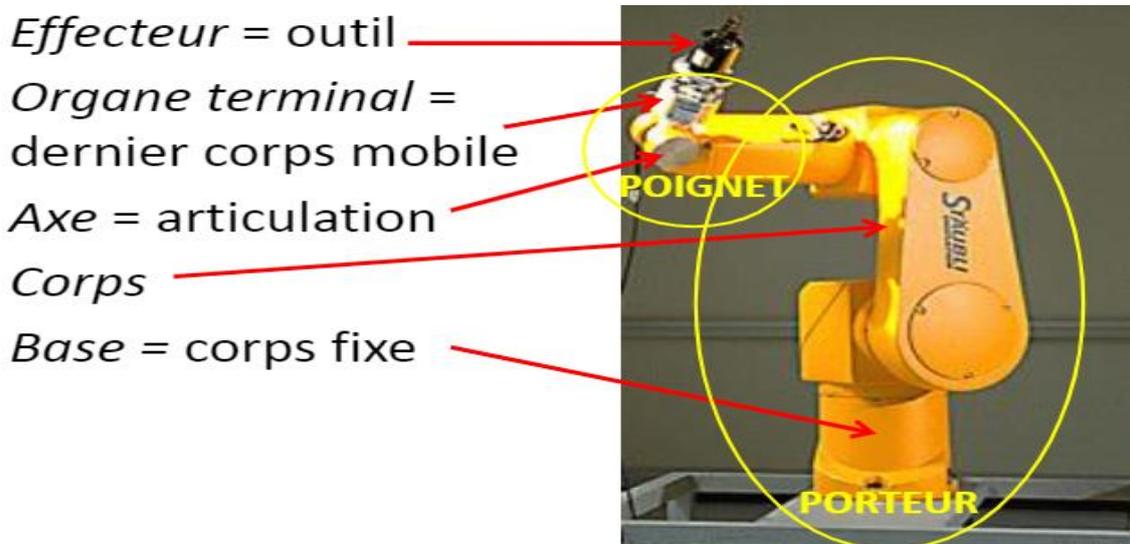


Figure II.6 Les éléments d'un robot.

### II.2.2.2 Le Degré de liberté et la redondance

Le nombre de degrés de liberté (ddl) d'un mécanisme est le nombre de coordonnées généralisées indépendantes nécessaires pour définir la configuration d'un mécanisme. Il décrit aussi le nombre de mouvements indépendants que peut réaliser l'organe terminal d'un mécanisme. Ces mouvements sont décrits au maximum par trois translations et trois rotations selon des axes particuliers.

Un robot est dit redondant si le nombre d'articulations est supérieur au nombre de degrés de liberté de la tâche à réaliser (espace opérationnel) [11].

### II.2.2.3 Espace articulaire

L'espace articulaire (coordonnées généralisées) représente la quantité définissant le mouvement relatif du corps (segment)  $C_i$  par rapport au corps  $C_{i-1}$ , on note la variable articulaire  $q_i$ , elle peut être un angle autour d'un axe (liaison de rotation). L'ensemble  $q_i$ , permet de définir les différentes configurations d'un robot manipulateur.

### II.2.2.4 Espace opérationnel

L'espace opérationnel est celui dans lequel la situation de l'organe terminal est représentée. La solution la plus simple consiste à utiliser les coordonnées cartésiennes. Soit  $R_m$  cet espace. La valeur  $m$  constitue donc le nombre de degré de liberté maximum que peut avoir l'organe terminal, égale au nombre de paramètres indépendants nécessaire pour d'écrire la situation de l'organe terminal dans l'espace cartésien [12].

## II.2.3. Modélisation des robots manipulateurs

### II.2.3.1. Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct (MGD) permet de calculer la relation mathématique entre les coordonnées articulaires et les coordonnées opérationnelles, pour exprimer la situation de l'organe terminal.

Le modèle géométrique du robot est représenté par la relation suivante :

$$X = F(q) \quad (\text{II.1})$$

$X$ : Vecteur de coordonnées opérationnelles donnant la position de l'organe terminal.

$q$ : Vecteur des coordonnées opérationnelles donnant la position articulaire.

### II.2.3.2. Modèle géométrique inverse

Le modèle géométrique inverse (MGI) permet de calculer les variables articulaires en fonction des variables géométriques, il est constitué par la fonction inverse ou réciproque de F.

$$q = F^{-1}(X) \quad (\text{II.2})$$

### II.2.3.3. Modèle cinématique direct

Le modèle cinématique direct (MCD) nous permet le calcul de la relation entre les vitesses articulaires et opérationnelles.

Ce modèle est donné par l'équation suivante :

$$\dot{X} = J(q)\dot{q} \quad (\text{II.3})$$

Avec la jacobéenne  $J \in R^{n_x \times n_q}$  .

$\dot{X}$  : Vecteur de position et d'orientation de l'organe terminal.

$\dot{q}$ : Vecteur de la vitesse généralisée (vitesse des actionneurs).

Le MCD est utilisé comme le MGD pour la commande dans l'espace opérationnel afin de calculer l'écart de vitesse.

### II.2.3.4. Modèle cinématique inverse

Le modèle cinématique inverse (MCI) permet de calculer les vitesses articulaires en fonction des vitesses opérationnelles. Il est donné sous la forme suivante :

$$\dot{q} = J^{-1}(q)\dot{X} \quad (\text{II.4})$$

### II.2.3.5. Modèle dynamique direct

Le modèle dynamique est la relation entre les couples (et/ou forces) appliqués aux actionneurs et les positions, vitesses et accélérations articulaires.

Il est alors représenté par la relation suivante :

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q}, \Gamma, f_e) \quad (\text{II.5})$$

$\Gamma$ : Vecteur des couples des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde ou prismatique.

$q$  : Vecteur des positions articulaires.

$\dot{q}$  : Vecteurs des vitesses articulaires.

$\ddot{q}$  : Vecteurs des accélérations articulaires.

$f_e$  : Vecteurs représentant l'effort extérieur qu'exerce le robot sur l'environnement.

### II.2.3.6 Modèle dynamique inverse

Le modèle dynamique inverse permet de trouver la relation entre le vecteur de couple et la position, vitesse et l'accélération articulaire. Par l'équation suivante :

$$\Gamma = f(q, \dot{q}, \ddot{q}, f_e) \quad (\text{II.6})$$

### II.2.3.7 Formalisme d'Euler-Lagrange

Le formalisme d'Euler-Lagrange amène à un algorithme qui consiste à présenter les équations dynamiques de mouvement, elle sert à modéliser et à présenter la dynamique du robot à travers les équations du mouvement. L'approche d'Euler-Lagrange est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i \quad (\text{II.7})$$

Avec :  $L = E_c - E_p$  ;

$E_d$  : L'énergie de dissipation en cas de présence de frottement visqueux.

$\tau_i$  : La force généralisée appliquée à la  $i^{eme}$  articulation.

$q_i$  : La coordonnée généralisée de l'articulation  $i$ .

$\dot{q}_i$  : La dérivée de la coordonnée généralisée.

$L$  : Lagrangien du système.

$E_c$  : Énergie cinétique total du système.

$E_p$  : Énergie potentielle totale du système.

## II.2.4 Modélisation d'un robot SCARA

### II.2.4.1 Définition du robot SCARA

Un robot SCARA est défini dans la norme ISO 8373 : 1994, No.3.15.6, en tant que « robot comporte deux liaisons pivots parallèles pour fournir conformément à un plan sélectionné » Il peut être considérée comme un cas particulier d'un robot cylindrique. «SCARA» signifie «Selective Compliance Arm for Robot Assembly». (Autre interprétation comprend « Selective Compliance Articulated for Robot Assembly ».). Le robot SCARA est un robot manipulateur à 2 axes rotatifs (RR). L'enveloppe de travail cylindrique permet une utilisation maximale de l'espace de travail [13].

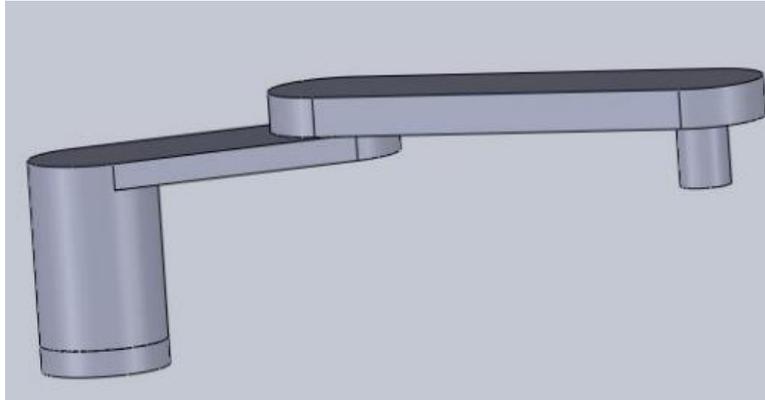


Figure II.7 Schéma représentatif d'un robot SCARA [13].

### II.2.4.2 Structure de SCARA

La structure de base du robot SCARA est une chaîne d'éléments (bras) rigides reliés par des liaisons articulées (pivot) parallèles, à axes verticaux. Voir (Figure II.8).

La structure à axes parallèles de SCARA le rend flexible ou conforme dans les directions X et Y et rigide dans la direction verticale ou Z. Le nom de SCARA n'est dérivé de cette manière qu'en étant sélectivement conforme. Une telle structure rend le robot SCARA adapté aux opérations de pick-and-insert utilisées principalement dans l'assemblage de circuits et de dispositifs électroniques.

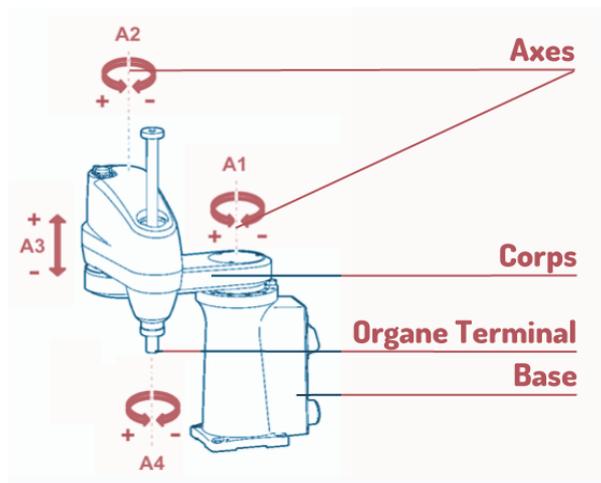


Figure II.8 La structure de base du robot SCARA [14]

### II.2.4.3 Modèle géométrique

Le modèle MGD du robot est donné par la relation suivante :

$$X = L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2) \quad (\text{II.8})$$

$$Y = L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2) \quad (\text{II.9})$$

Le modèle MGI du robot est donné par la relation suivante :

$$q_2 = \pm \cos^{-1} \left( \frac{X^2 + Y^2 - (L_1^2 + L_2^2)}{2L_1L_2} \right) \quad (\text{II.10})$$

$$\tan(q_1) = \frac{Y(L_1 + L_2 \cos(q_2)) - XL_2 \sin(q_2)}{X(L_1 + L_2 \cos(q_2)) + YL_2 \sin(q_2)} \quad (\text{II.11})$$

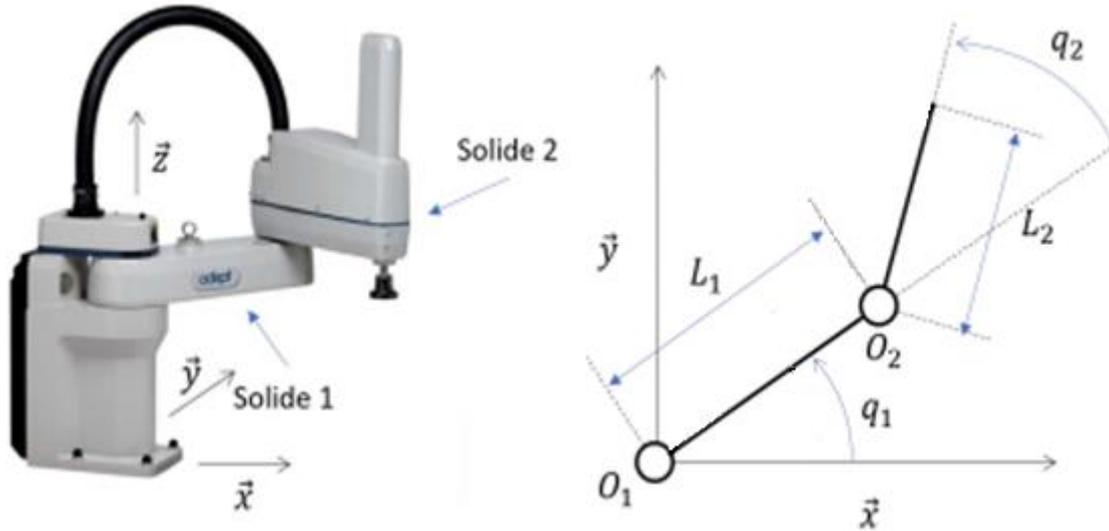


Figure II.9 Modélisation géométrique d'un robot SCARA à deux degrés de liberté

#### II.2.4.4 Modèle cinématique

Le modèle MCD du robot est donné par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = J(q) \cdot \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

D'où :

$$J(q) = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(q_1) - L_2 \sin(q_1 + q_2) & -L_2 \sin(q_1 + q_2) \\ L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2) & L_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

On remplace la formule de  $J(q)$  dans le modèle MCD

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_1 \sin(q_1) - L_2 \sin(q_1 + q_2) & -L_2 \sin(q_1 + q_2) \\ L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2) & L_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Le MCI est obtenu par l'inversion de la matrice  $J(q)$

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = J(q)^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

### II.2.4.5 Modèle dynamique

Dans ce modèle On utilise le formalisme d'Euler-Lagrange pour définir l'équation qui d'écrit le modèle dynamique du robot

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_i} = \tau_i \quad (\text{II.16})$$

Avec :  $L = E_c - E_p$  ;

$E_p = 0 \Rightarrow L = E_c$

$E_d$  : L'énergie de dissipation en cas de présence de frottement visqueux.

$E_p$  : Énergie potentielle.

$E_c$  : Énergie cinétique total du système.

L'énergie cinétique du système est donnée par l'équation suivante :

$$E_c = E_{c_1} + E_{c_2} + E_{c_0} + E_{c_m} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$E_{c_1}$  : L'énergie cinétique de la 1<sup>ère</sup> d'articulation.

$E_{c_2}$  : L'énergie cinétique de la 2<sup>ème</sup> d'articulation.

$E_{c_0}$  : L'énergie cinétique de la masse, portée par l'organe terminal, (effecteur).

$E_{c_m}$  : L'énergie cinétique des deux moteurs.

L'énergie cinétique de la 1<sup>ère</sup> d'articulation :

$$E_{c_1} = \frac{1}{2} I_1 \dot{q}_1^2 \quad (\text{II.18})$$

Avec le moment d'inertie  $I_1$  donnée par :

$$I_1 = \frac{1}{3} m_1 L_1^2 \quad (\text{II.19})$$

L'énergie cinétique de la 2<sup>ème</sup> d'articulation

$$E_{c_2} = \frac{1}{2} m_2 \left[ \left( \overline{L_1 \cos(q_1) + \frac{1}{2} L_2 \cos(q_1 + q_2)} \right)^2 + \left( \overline{L_1 \sin(q_1) + \frac{1}{2} L_2 \sin(q_1 + q_2)} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} I_2 \dot{q}_2^2 \quad (\text{II.20})$$

C'est-à-dire :

$$E_{c_2} = \frac{1}{2} m_2 \left[ \left( -L_1 \sin(q_1) \dot{q}_1 - \frac{1}{2} L_2 \sin(q_1 + q_2) * (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \right)^2 + \left( -L_1 \cos(q_1) \dot{q}_1 - \frac{1}{2} L_2 \cos(q_1 + q_2) * (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \right)^2 \right] + \frac{1}{2} I_2 \dot{q}_2^2 \quad (\text{II.21})$$

Où le moment d'inertie  $I_2$  est donnée par

$$I_2 = \frac{1}{3} m_2 L_2^2 \quad (\text{II.22})$$

L'énergie cinétique de la masse  $m_0$  est donnée par l'équation suivante :

$$E_{c_0} = \frac{1}{2} m_0 \left[ \left( \overline{L_1 \cos(q_1) + L_2 \cos(q_1 + q_2)} \right)^2 + \left( \overline{L_1 \sin(q_1) + L_2 \sin(q_1 + q_2)} \right)^2 \right] \quad (\text{II.23})$$

$$E_{c_0} = \frac{1}{2} m_0 \left[ \left( -L_1 \sin(q_1) \dot{q}_1 - L_2 \sin(q_1 + q_2) * (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \right)^2 + \left( -L_1 \cos(q_1) \dot{q}_1 - \frac{1}{2} L_2 \cos(q_1 + q_2) * (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \right)^2 \right] \quad (\text{II.24})$$

L'énergie cinétique pour les deux moteurs

$$E_{c_m} = \frac{1}{2} n_1^2 I_{m_1} \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} n_2^2 I_{m_2} \dot{q}_2^2 \quad (\text{II.25})$$

L'énergie de dissipation en cas de présence de frottement visqueux est

$$E_d = \frac{1}{2} f_{v_1} \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} f_{v_2} \dot{q}_2^2 \quad (\text{II.26})$$

De plus, on calcule  $\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}$  comme suit

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} = \frac{\partial E_c}{\partial \dot{q}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_c}{\partial \dot{q}_1} \\ \frac{\partial E_c}{\partial \dot{q}_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_{c_1}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial E_{c_2}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial E_{c_0}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial E_{c_m}}{\partial \dot{q}_1} \\ \frac{\partial E_{c_1}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial E_{c_2}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial E_{c_0}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial E_{c_m}}{\partial \dot{q}_2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

En appliquant le formalisme de Lagrange, on trouve :

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_{c1}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_{c2}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_{c0}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_{cm}}{\partial \dot{q}_1} \\ \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_{c1}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_{c2}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_{c0}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial E_{cm}}{\partial \dot{q}_2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\partial E_{c1}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial E_{c2}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial E_{c0}}{\partial \dot{q}_1} + \frac{\partial E_{cm}}{\partial \dot{q}_1} \\ \frac{\partial E_{c1}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial E_{c2}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial E_{c0}}{\partial \dot{q}_2} + \frac{\partial E_{cm}}{\partial \dot{q}_2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_1} \\ \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Avec

$\tau_1, \tau_2$  : Les couples mécaniques générés par les deux moteurs et appliqués aux articulations du robot.

$m_1, m_2, m_0$  : Masses de la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> liaison et de la charge portée par l'effecteur respectivement.

$L_1, L_2$  : Longueurs de la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> liaison.

$f_{v1}, f_{v2}$  : Coefficient du frottement visqueux.

$n_1, n_2$  : Rapports de réduction de vitesse des deux moteurs.

## II.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la définition, le principe de fonctionnement du moteur pas à pas et les différents types de moteurs pas à pas, les caractéristiques de chaque type ainsi que leur comparaison, nous avons parlé sur la robotique particulièrement les robots SCARA ainsi que ces caractéristiques.

Dans le chapitre suivant il sera question de s'intéresser à l'application de la commande prédictive sur le moteur pas à pas.

## **Chapitre III**



---

# **Application de la Commande Prédicative au MPPAP**

---



### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons appliquer la commande prédictive au moteur pas à pas à aimants permanents, qui est basé sur l'utilisation d'un modèle interne, afin de prédire le comportement du système à commander, pour cela nous allons utiliser des régulateurs MPC dans des différents essais afin de simuler cette technique de commande et voir le résultat de son efficacité.

### III.2 Présentation du modèle du système étudié

Le système est présenté sous forme de trois sous-systèmes

- Partie concernant le courant  $I_{ds}$  et la tension  $U_{ds}$ .

$$I_{ds} = \frac{1}{L_s + R} (U_{ds} + N_r L_w I_{qs}) \quad (\text{III.1})$$

$$U_{ds} = I_{qs} (L_s + R) - N_r L_w I_{qs} \quad (\text{III.2})$$

- Partie concernant le courant  $I_{qs}$  et la tension  $U_{qs}$ .

$$I_{qs} = \frac{1}{L_s + R} (U_{qs} - N_r L_w I_{ds} - K_w) \quad (\text{III.3})$$

$$U_{qs} = I_{qs} (L_s + R) + N_r L_w I_{ds} + K_w \quad (\text{III.4})$$

- L'équation de couple électromagnétique est donnée par la relation suivante :

$$C_e = K * I_q \quad (\text{III.5})$$

- L'équation mécanique est donnée comme suite :

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} (C_e - fw - C_r) \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$C_e$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple résistant.

$w$  : La vitesse mécanique de rotation.

$J$  : Le moment d'inertie.

$f$  : Le coefficient de frottement.

### III.2.4 Synthèse des Régulateurs

Pour la régulation et la linéarisation de notre système on a utilisé la technique de commande MPC qui prend en considération les différentes contraintes sur l'entrée (référence), la perturbation, les sorties à réguler et la sortie du régulateur (la commande). Pour l'application de cette commande on a utilisé le Toolbox Model Predictive Control de MATLAB.

La configuration des paramètres de régulateur MPC est donné dans l'annexe A.

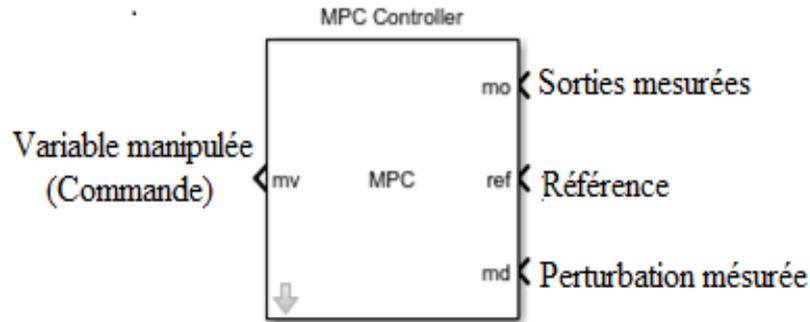


Figure III.1 Model Predictive Control(Matlab).

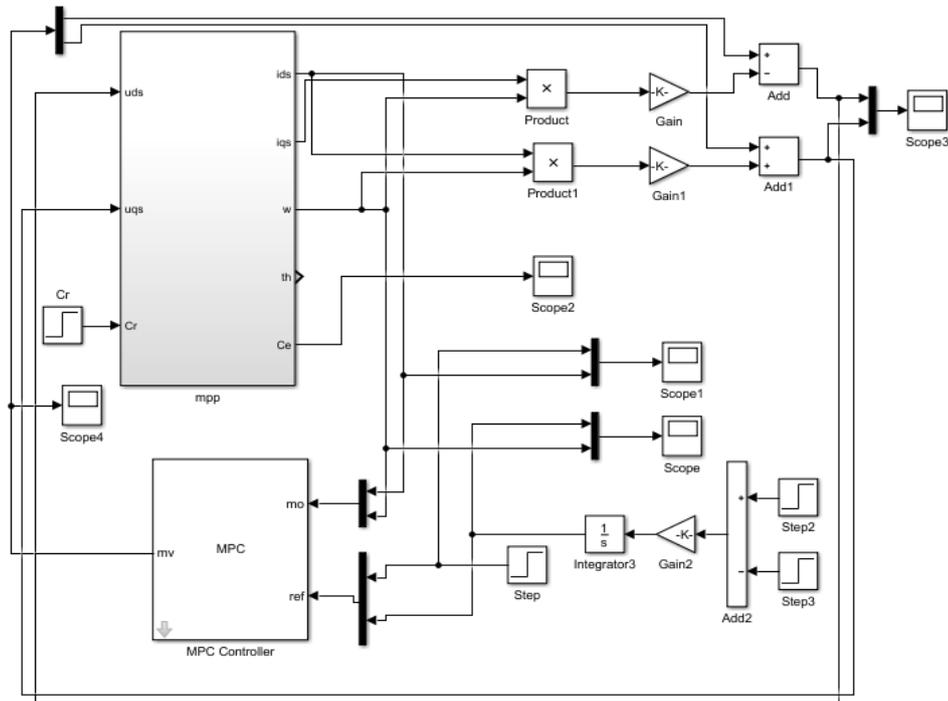
### III.2.5 MPC avec quatre régulateurs

Dans notre cas nous avons utilisé quatre régulateurs différents, qui sont les suivants :

- «MPC\_mpp» : utilisé dans l'essai sans intégrateur.
- «MPC\_mpp\_integ» : utilisé dans l'essai avec intégrateur.
- «MPC\_mpp\_meas\_disturb» : utilisé dans l'essai sans intégrateur avec perturbation mesurée.
- «MPC\_mpp\_integ\_meas\_disturb» : utilisé dans l'essai avec intégrateur et avec perturbation mesurée.

## III.3 Simulation et interprétation des résultats

La simulation de la commande prédictive par modèle (MPC) appliquée au moteur pas à pas à aimants permanents est présentée par le schéma bloc suivant :



**Figure III.2** schéma bloc de moteur pas à pas avec le régulateur MPC.

Afin d'obtenir les résultats désirés, on simule le système premièrement, en boucle ouverte puis sans intégrateur (avec ou sans découplage) ensuite avec intégrateur (avec ou sans découplage) enfin avec la perturbation mesurée (avec et sans intégrateur).

La différence entre le cas de simulation avec ou sans intégrateur c'est que dans l'essai avec intégrateur on a récupéré l'erreur de vitesse ( $w-w^*$ ) puis on la fait passer par intégrateur.

Dans le cas de découplage on a multiplié les produits ( $I_{ds} \cdot w$  et  $I_{qs} \cdot w$ ) par le gain «  $Nr \cdot L$  », alors que dans l'essai sans découplage le gain est nul.

Pour le cas de régulateur MPC avec perturbation mesurée on prend en considération la perturbation (le couple résistant «  $Cr$  ») dans le régulateur MPC (comme une entrée appelée  $Md$  « *Mesure disturbance* »).

### III.3.1 Simulation sans intégrateur

Ces essais consistent à étudier le comportement de la commande prédictive MPC appliquée au moteur pas à pas à aimants permanents sans intégrateur à vide puis en charge (avec et sans découplage). Dans cette partie, on utilise le régulateur «  $MPC\_mpp$  » et le régulateur «  $MPC\_mpp\_meas\_disturb$  » pour le cas avec perturbation mesurée.

III.3.1.1 Résultats de simulation à vide

Les résultats de simulation à vide ( $C_r = 0$ )

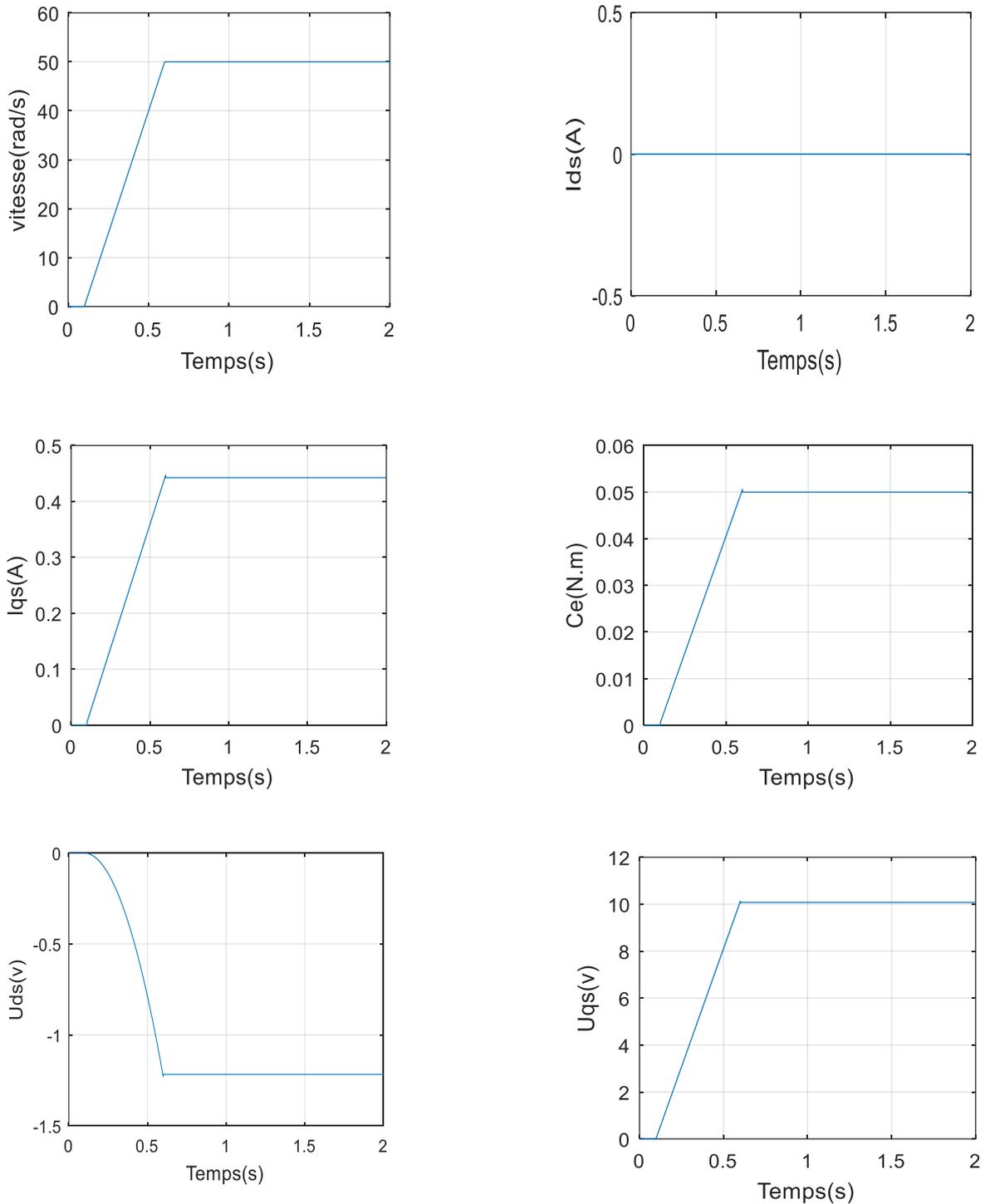
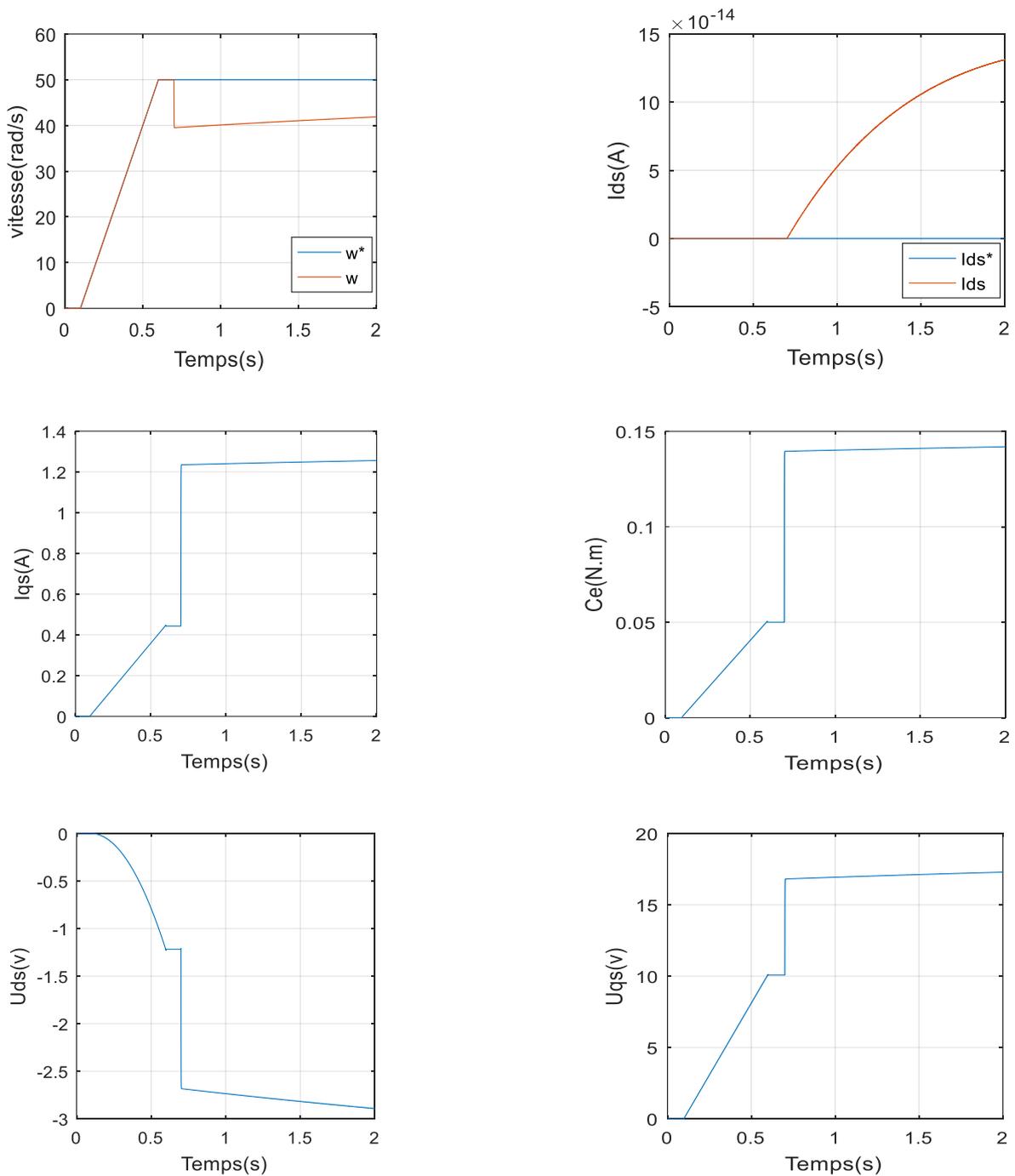


Figure III.3 Evolution de couple, courant, vitesse et de la tension à vide.

D’après les résultats obtenus, on constate que la vitesse suit la référence avec un temps de réponse petit. Le courant ( $I_{ds}$ ) suit parfaitement la référence, ce qui nous permet de déduire que le régulateur MPC est robuste.

### III.3.1.2 Résultats de simulation sans intégrateur et avec découplage

On applique un couple de charge  $C_r = 0.1 N.m$  à l'instant  $t = 0.7s$ , les résultats de simulation sont donnés comme suite :

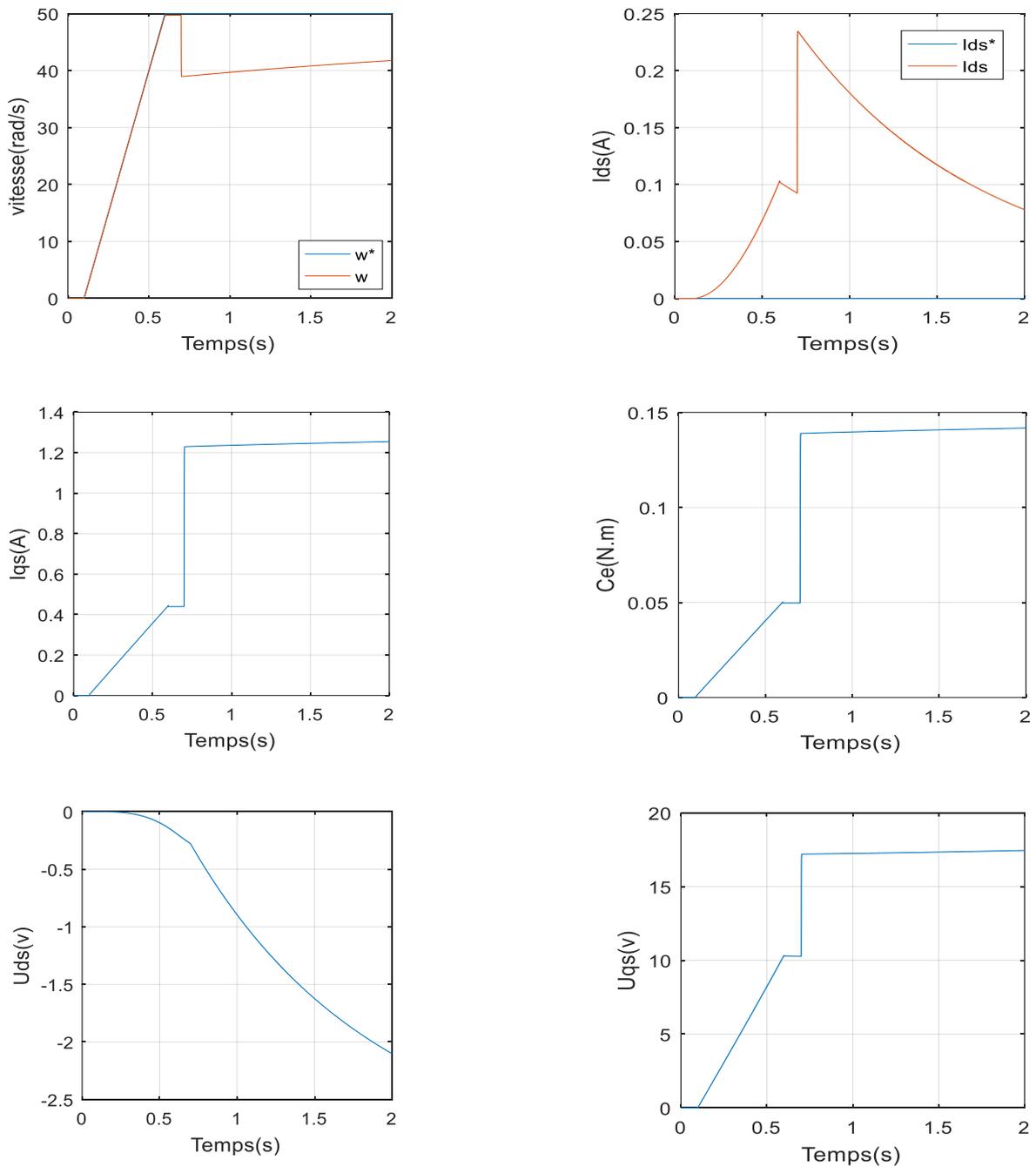


**Figure III.4** Evolution du couple, courant, vitesse et de la tension en charge

Les résultats de la simulation en charge (application de couple résistant  $C_r = 0.1N.m$  à l'instant  $t=0.7s$  nous montrent que la vitesse est influencée par la perturbation, et le courant  $Ids$  suit sa références avec une erreur très faible(de l'ordre de  $10^{-14}A$ ). Le couple électromagnétique augmente (à l'instats  $t=0.7s$ ) afin de compenser le couple résistant.

### III.3.1.3 Résultats de simulation sans intégrateur et sans découplage

Dans ce qui suit, on enlève le découplage. Les résultats sont donnés par les figures suivantes :

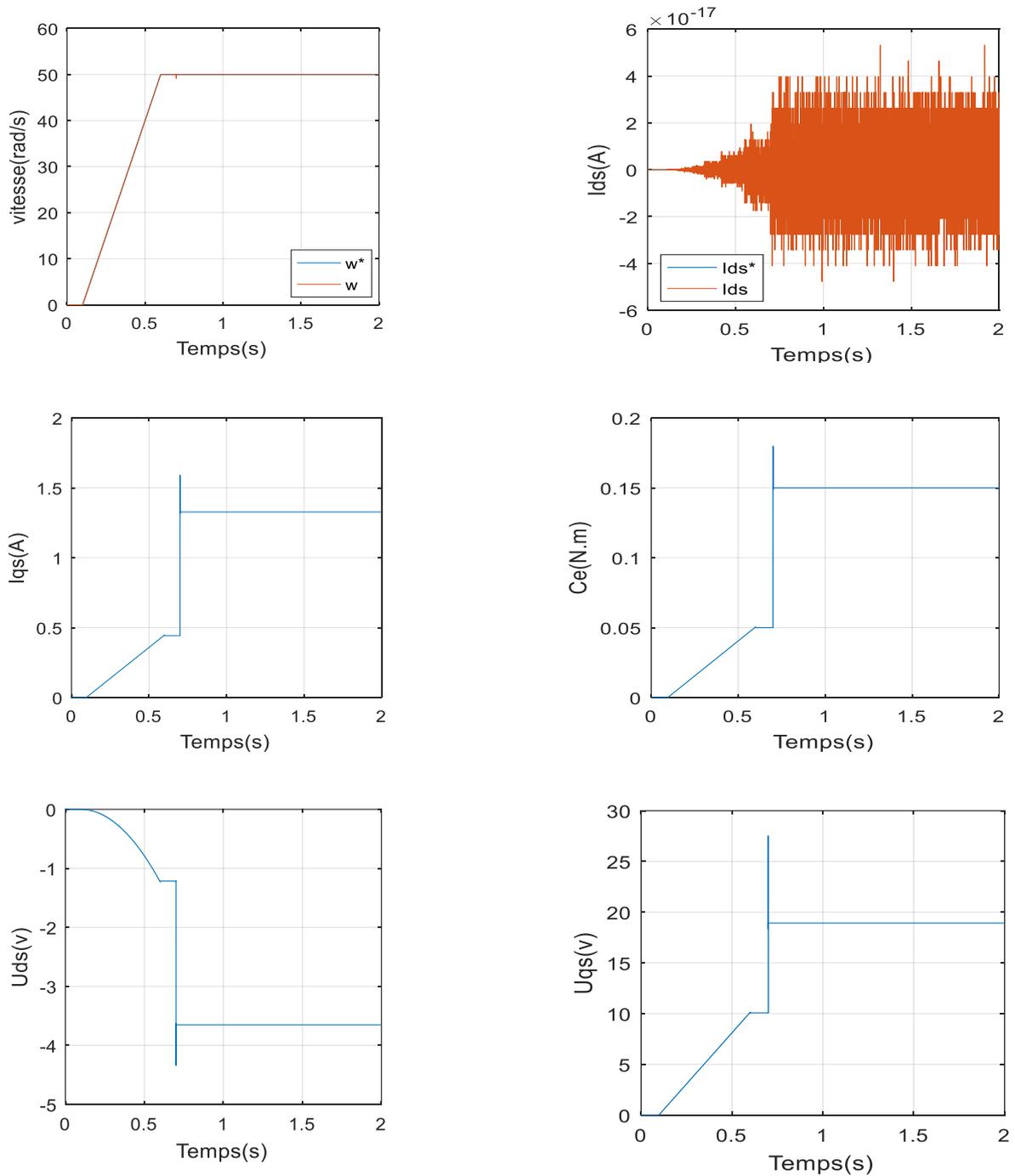


**Figure III.5** Résultats de simulation de MPC sans intégrateur sans découplage

On remarque que pour le comportement du couple électromagnétique et de la vitesse est le même que celui qu'avec découplage, contrairement pour le courant ( $I_{ds}$ ) on trouve que la valeur de l'erreur est augmentée (de 0.24A), donc on peut dire que sans ou avec découplage la commande prédictive est toujours robuste (pas de rejette de perturbation dans les deux cas).

### III.3.1.4 Résultats de simulation sans intégrateur avec découplage et avec perturbation mesurée

Dans cet essai, on utilise le régulateur «MPC\_mpp\_meas\_disturb».



**Figure III.6** Résultats de simulation de MPC sans intégrateur avec découplage et avec perturbation mesurée.

Les résultats de cette simulation montrent que la vitesse la perturbation est rejetée rapidement (dans 0.001s). Le courant ( $I_{ds}$ ) suit sa référence avec une erreur nulle ( $10^{-17}$  A).



III.3.2 .1 Résultats de simulation avec intégrateur et avec découplage.

On applique à l' instant  $t=0.7s$  un couple résistant  $C_r=0.1$  N.m.

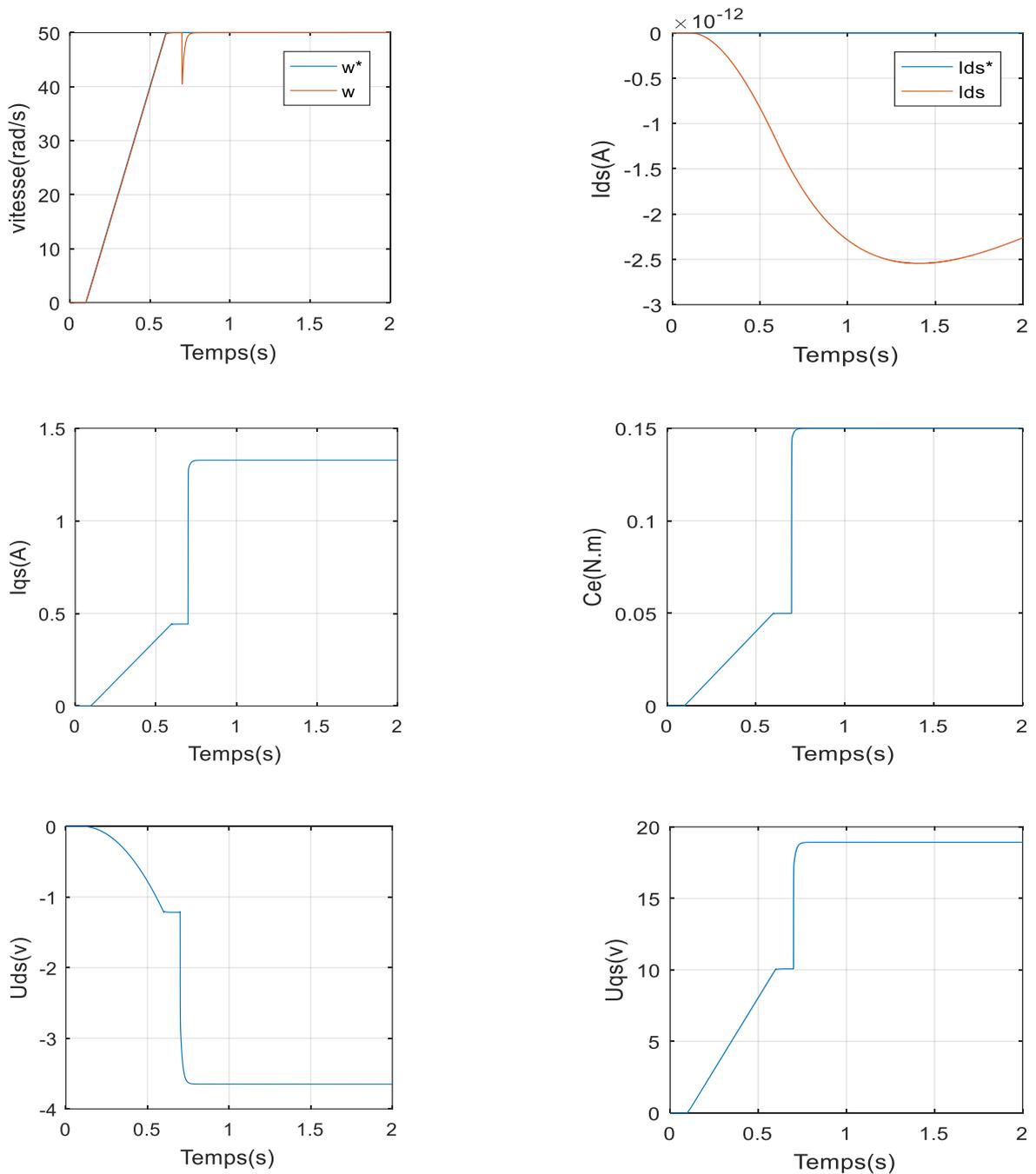
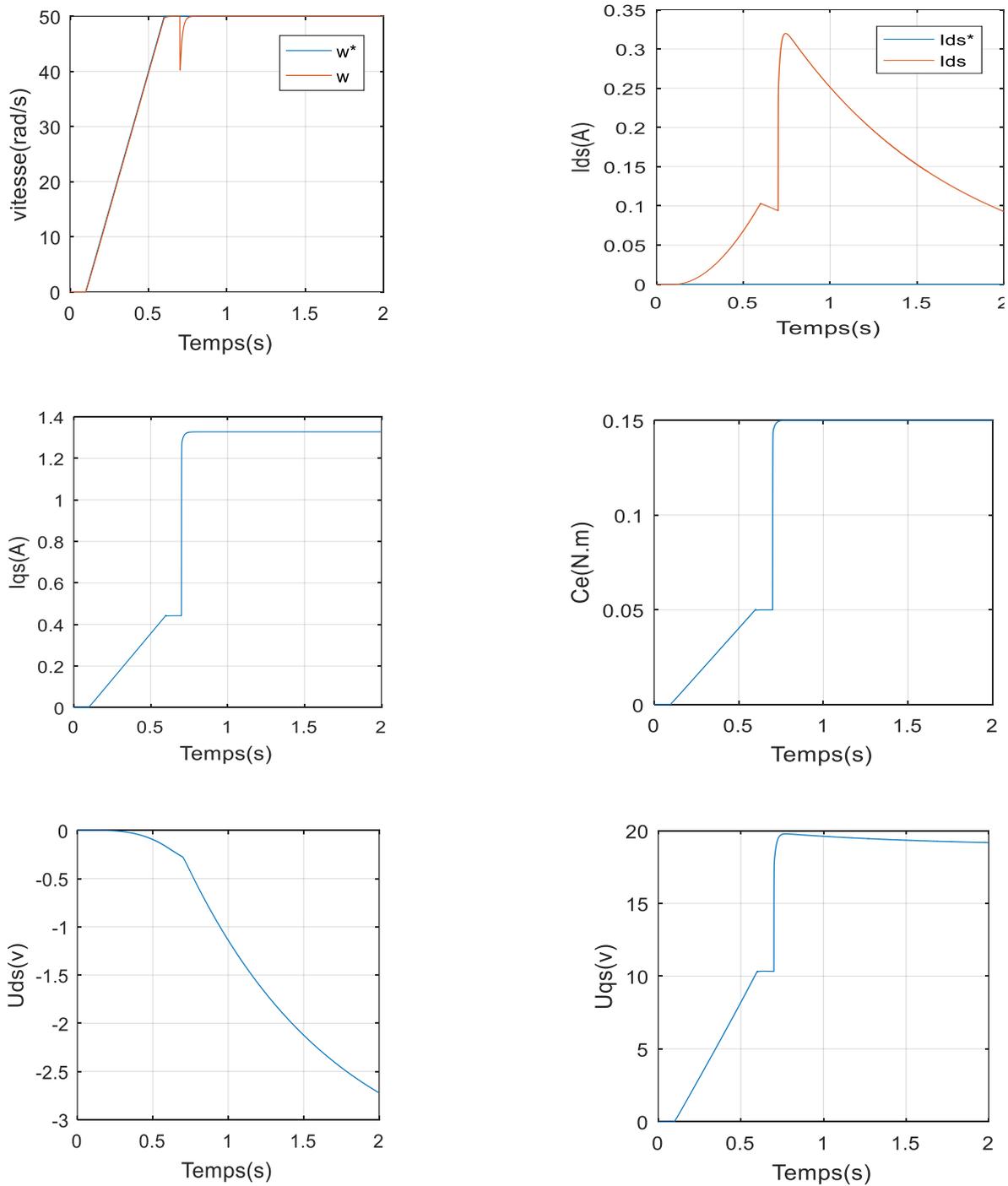


Figure III.8 Résultats de simulation de MPC avec intégrateur avec découplage.

On remarque que pour le comportement du couple électromagnétique et de la vitesse est le même que celui qu'avec découplage, donc on peut dire que sans ou avec découplage la commande prédictive est toujours robuste (rejette la perturbation dans les deux cas ).

### III.3.2.2 Résultat de simulation avec intégrateur et sans découplage

Dans cet essai, on utilise le régulateur «MPC\_mpp\_integ ». On enlevé le découplage. Les résultats sont comme suit :

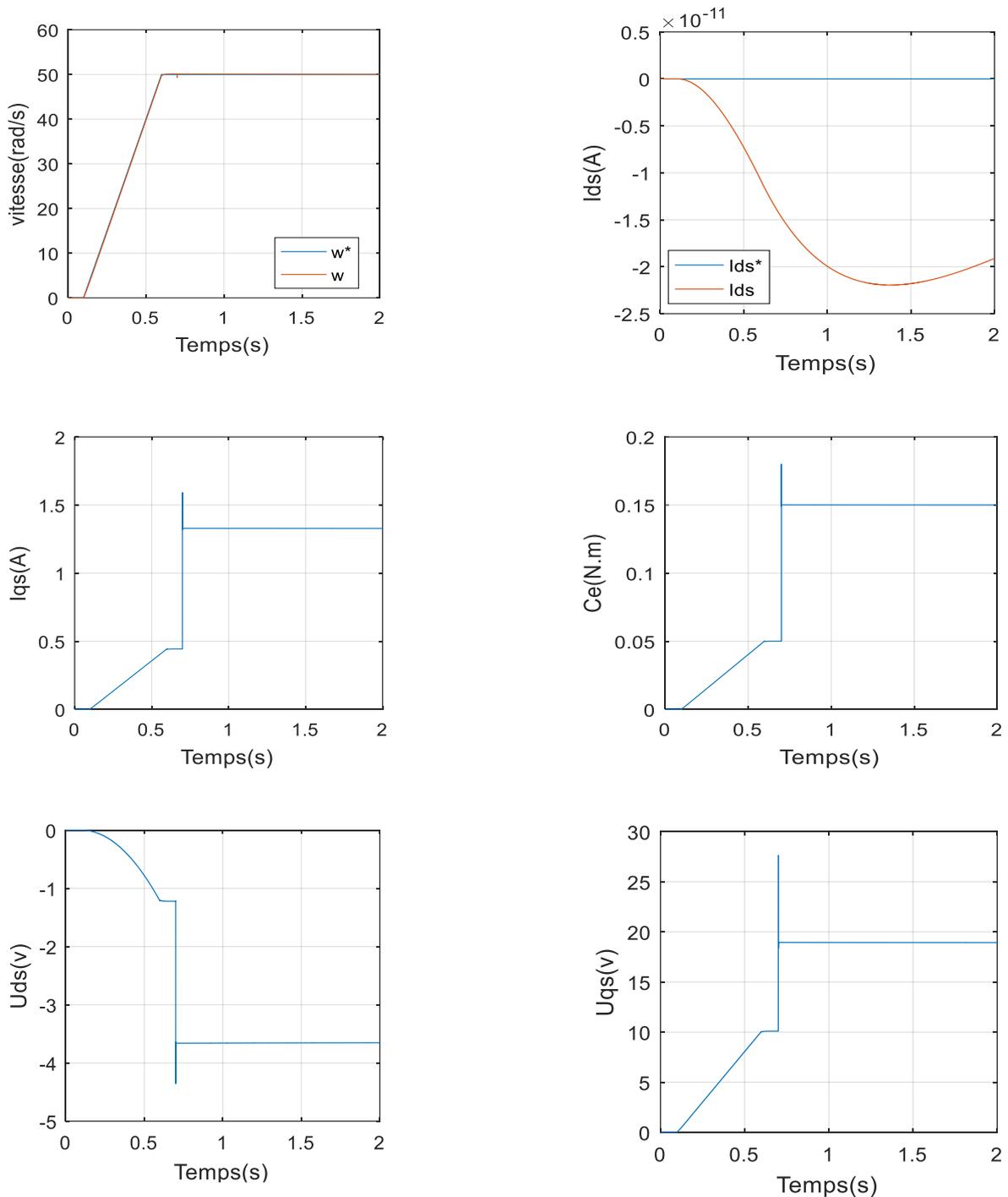


**Figure III.9** Résultats de simulation de MPC avec intégrateur sans découplage.

D’après les résultats obtenus, on constate qu’avec ou sans découplage le comportement du système est presque le même sauf pour le courant  $Ids$ .

### III.3.2.3 Résultats de simulation avec intégrateur, découplage et perturbation mesurée

Dans cet essai on utilise le régulateur «MPC\_mpp\_integ\_meas\_disturb».



**Figure III.10** Résultats de simulation de MPC avec intégrateur avec découplage et avec perturbation mesurées.

D'après les résultats obtenus, on remarque que la vitesse suit parfaitement sa référence. Le couple électromagnétique compense rapidement la valeur du couple résistant et le courant ( $I_{ds}$ ) suit sa référence avec une erreur très faible (de l'ordre de  $-10^{-11}$  A).

### III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons appliqué la commande prédictive au moteur pas à pas à aimants permanents. Nous avons débuté par l'introduction et la présentation du modèle de MPPAP), puis nous sommes passé à la simulation. Les résultats obtenus sont satisfaisants en termes de stabilité du système et de bonne poursuite de références. Nous concluons que la commande prédictive est efficace performante et robuste.

## **Chapitre IV**



---

# **Application de la Commande Prédicative au robot SCARA**

---



## IV.1 Introduction

Dans notre travail, nous allons faire la commande en position du robot SCARA.

Dans ce chapitre nous allons appliquer des régulateurs PI au robot SCARA motorisé par deux moteurs pas à pas à aimants permanents asservis en vitesse par des régulateurs MPC.

## IV.2 Structure du régulateur sous Matlab

Le schéma suivant représente la structure de la commande d'un robot SCARA. Il regroupe trois blocs, dont le premier et le deuxième sont utilisés pour générer la trajectoire de consigne et le troisième bloc représente l'ensemble Régulateurs-machines-robot.

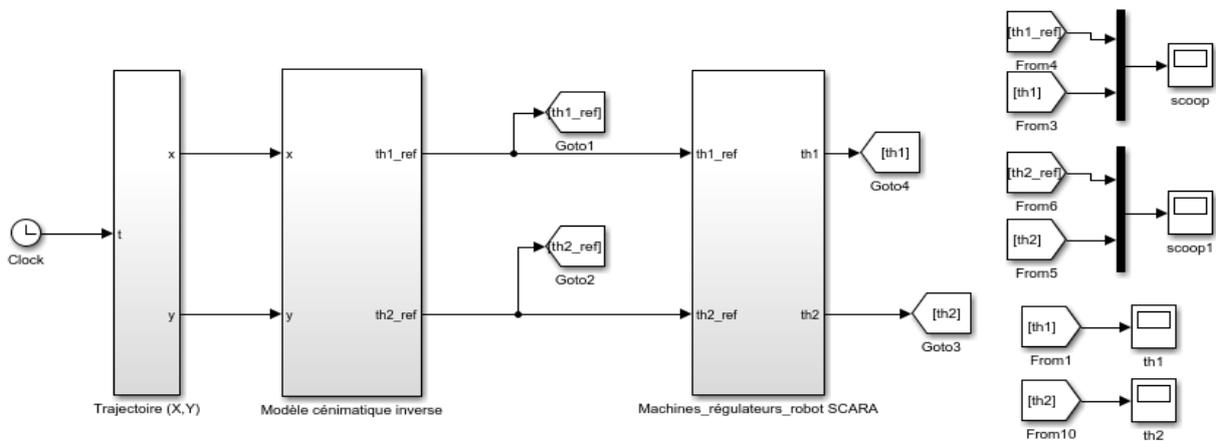


Figure IV.1 Schema de bloc de simulation.

La figure suivante représente un schéma Simulink qui englobe l'ensemble Machines avec leurs MPC et les Régulateurs de position du robot.

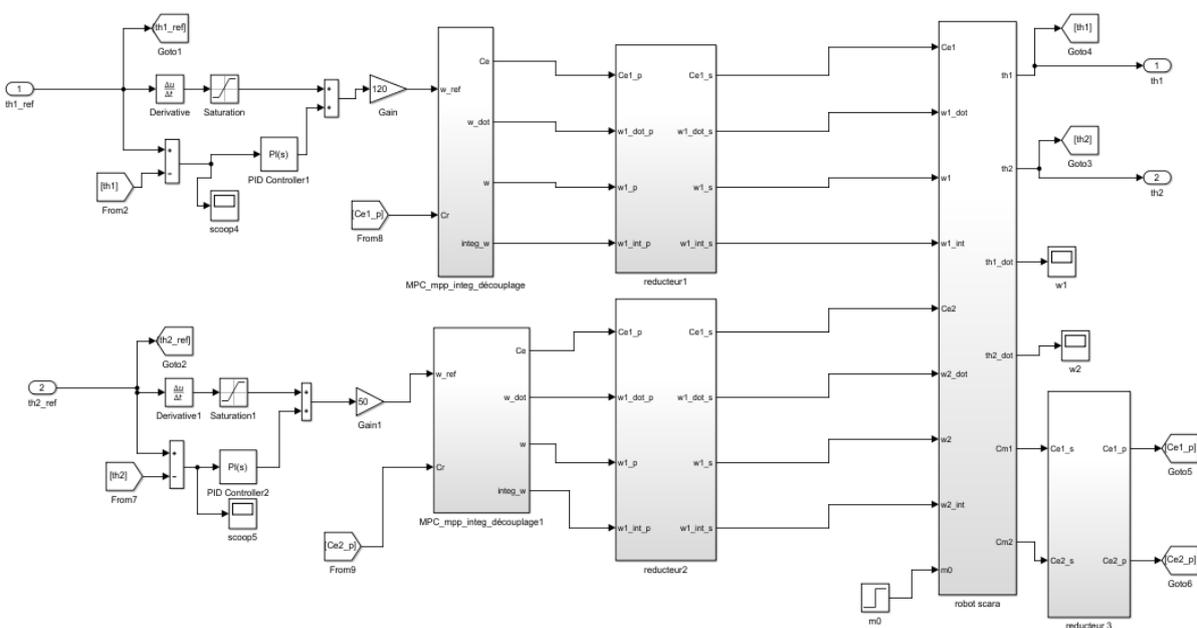


Figure IV.2 Schema de l'ensemble Régulateurs-machines-robot.

La figure suivante représente la génération de la trajectoire dans le plan (X, Y).

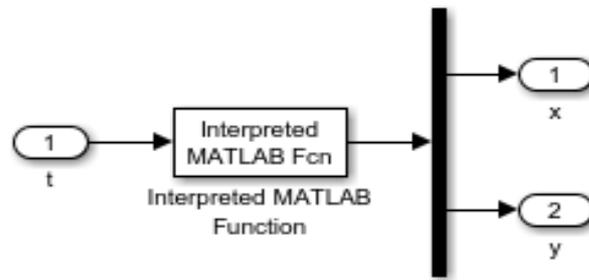


Figure IV.3 Génération de trajectoire dans le plan (X, Y).

Dans le schéma suivant on représente la structure du bloc qui nous, par l'utilisation de Modèle Cinématique Inverse(MCI), de générer les consignes dans l'espace articulaire à partir des consignes dans l'espace opérationnel.

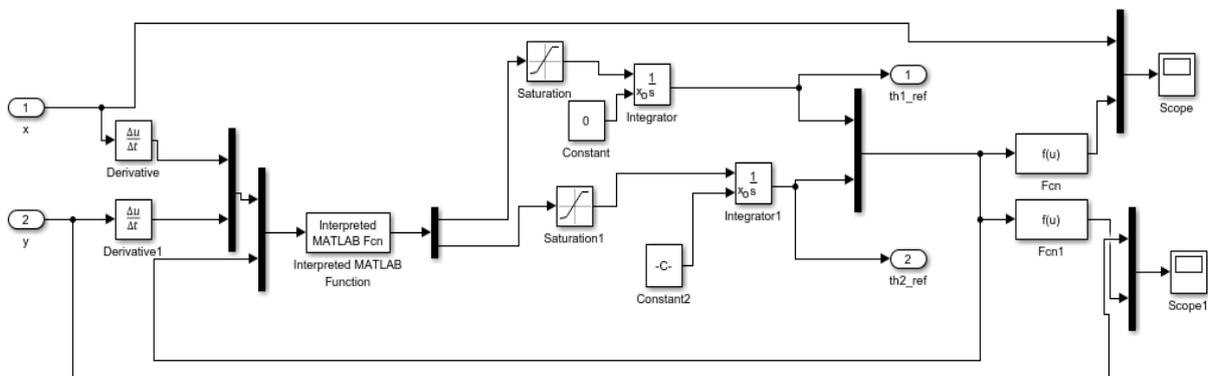


Figure IV.4 Génération des trajectoires pour les deux articulations(dans l'espace articulaire).

### IV.3 Simulation

Pour tester le bon fonctionnement des régulateurs, on a utilisé quatre trajectoires différentes. La première trajectoire est un mouvement entre deux points (point à point). La deuxième trajectoire est un cercle. La troisième est un carré et pour la quatrième est une spirale logarithmique.

#### IV.3.1 Résultats de simulation en utilisant les régulateurs PI :

Il existe plusieurs méthodes pour réguler le système (robot). On a opté pour l'utilisation de régulateurs PI vu que le comportement global est proche d'un système d'ordre 1 suivi d'un intégrateur (car l'entrée est une vitesse et la sortie est une position) et ce pour les deux articulations du robot comme le montre la (figure IV.5).

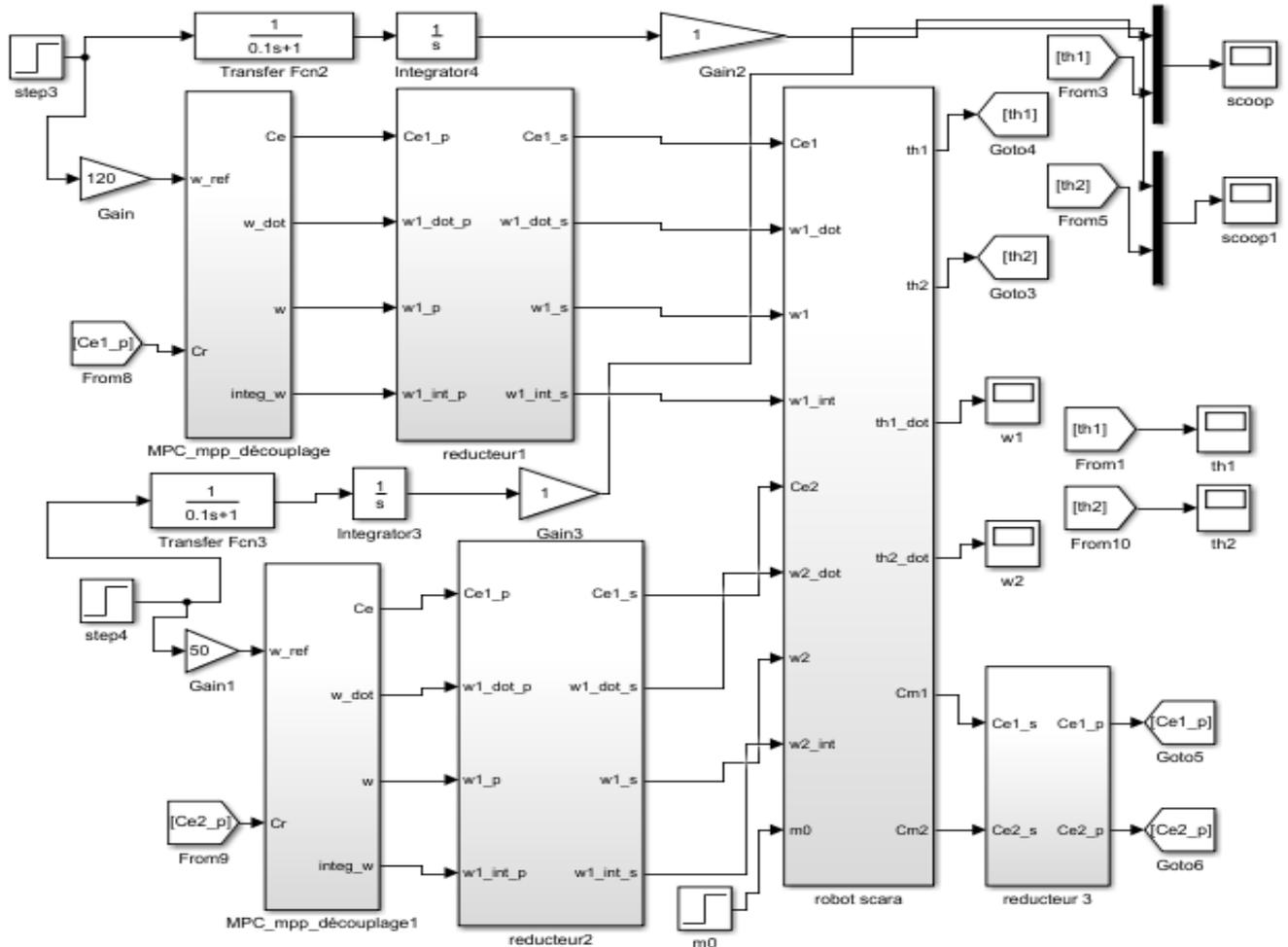


Figure IV.5 Schéma bloc de simulation illustrant l'équivalence entre le système et un système d'ordre 1 suivi d'un intégrateur.

La figure suivante présente les sorties du modèle équivalent (th1-modèle, th2-modèle) comparées avec celles du robot (th1-robot, th2-robot).

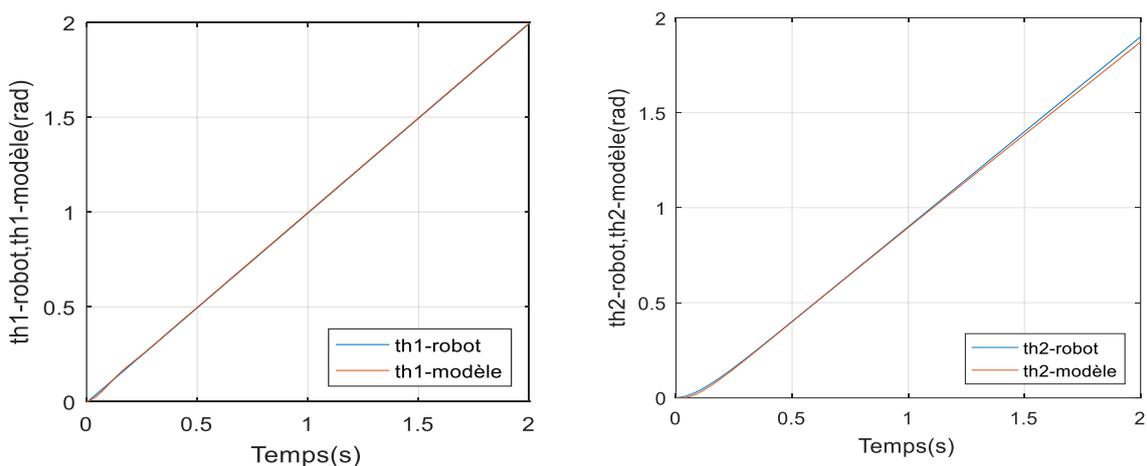
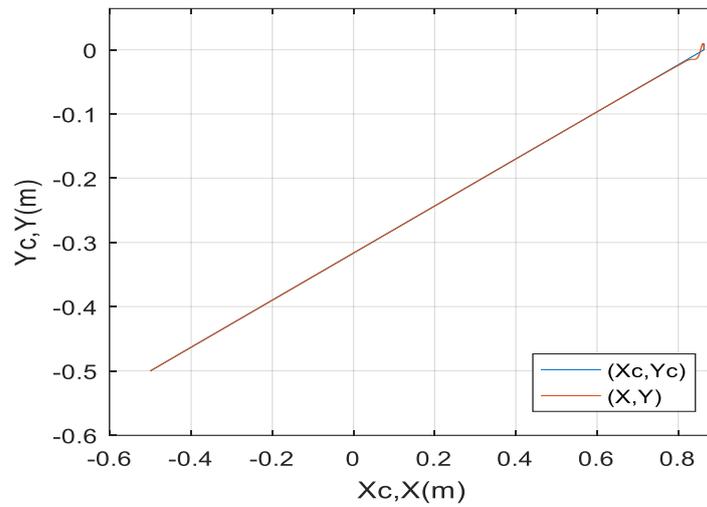


Figure IV.6 Evolution de la position en fonction de temps.

On remarque que les sorties sont proches et d'après ce résultat, on peut utiliser le système équivalent (système d'ordre 1 suivi d'un intégrateur) pour trouver les paramètres des régulateurs PI utilisés pour l'asservissement en position du robot SCARA.

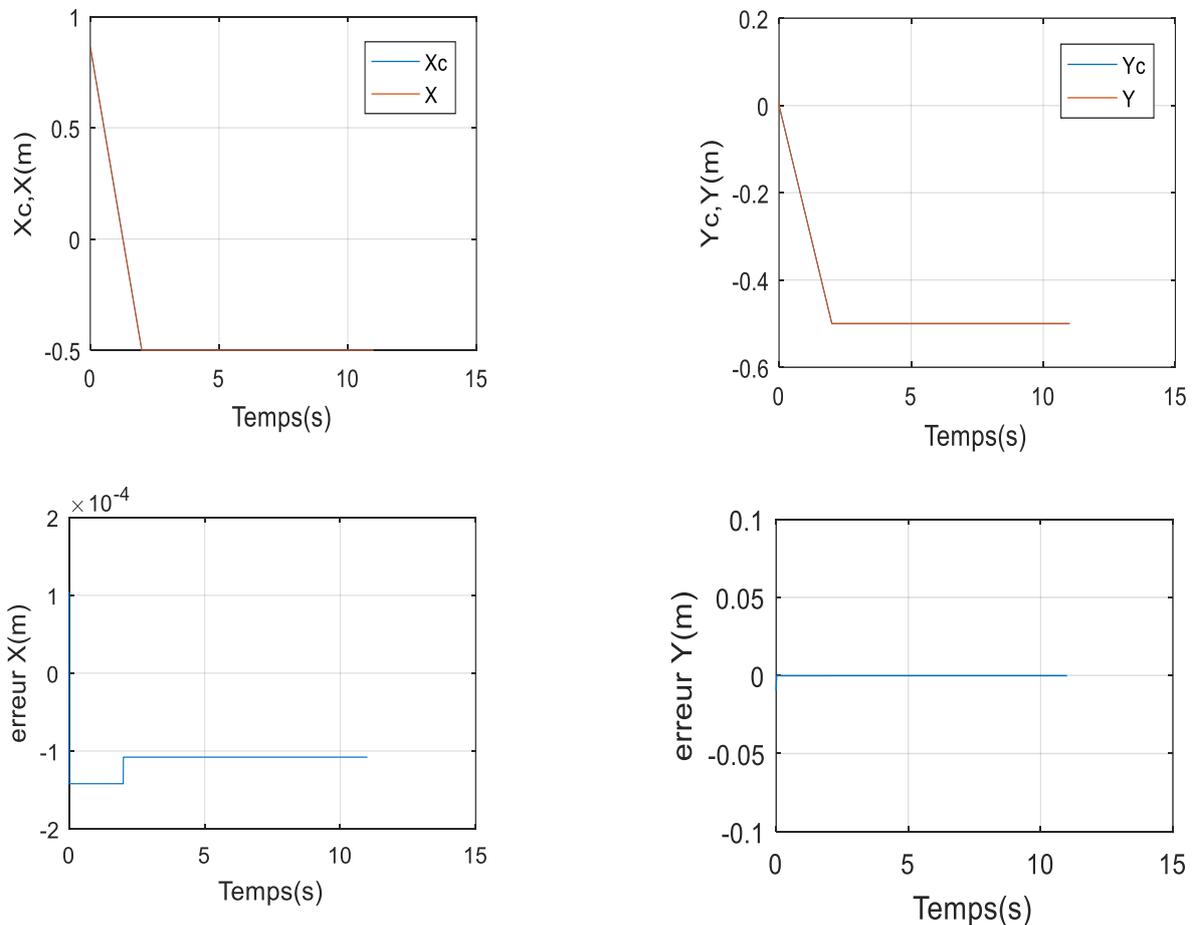
### IV.3.2 Résultats de simulation pour la première trajectoire

Dans cette partie on utilise le modèle de régulateur « MPC\_mpp » sans intégrateur.

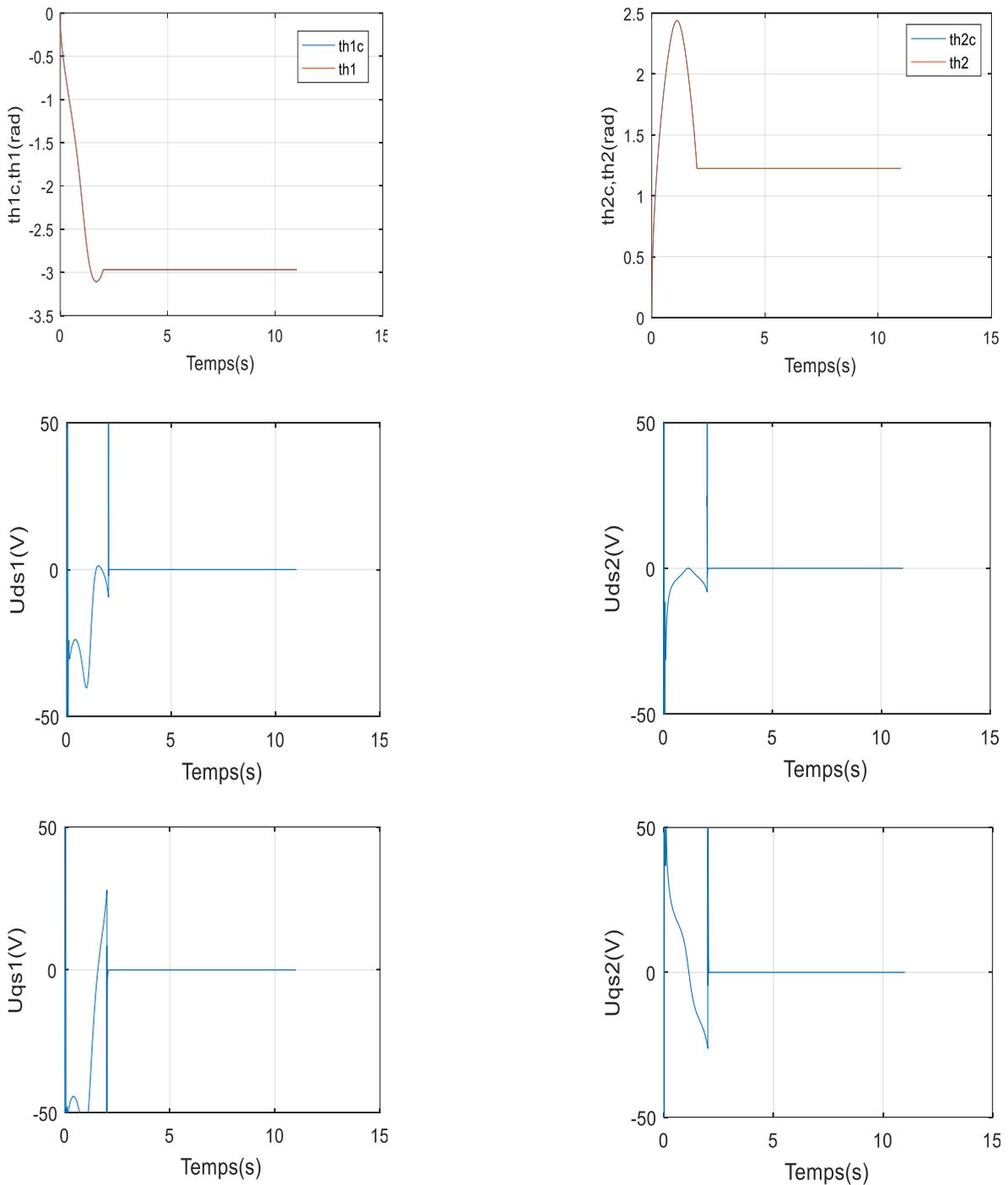


**Figure IV.7** Trajectoire dans le plan( X, Y)(consignes et reponses).

On remarque que les régulateurs PI arrivent à assurer la poursuite dans les deux axes avec des erreurs très faible vu que les deux MPP sont bien asservis en vitesse par les régulateurs MPC.



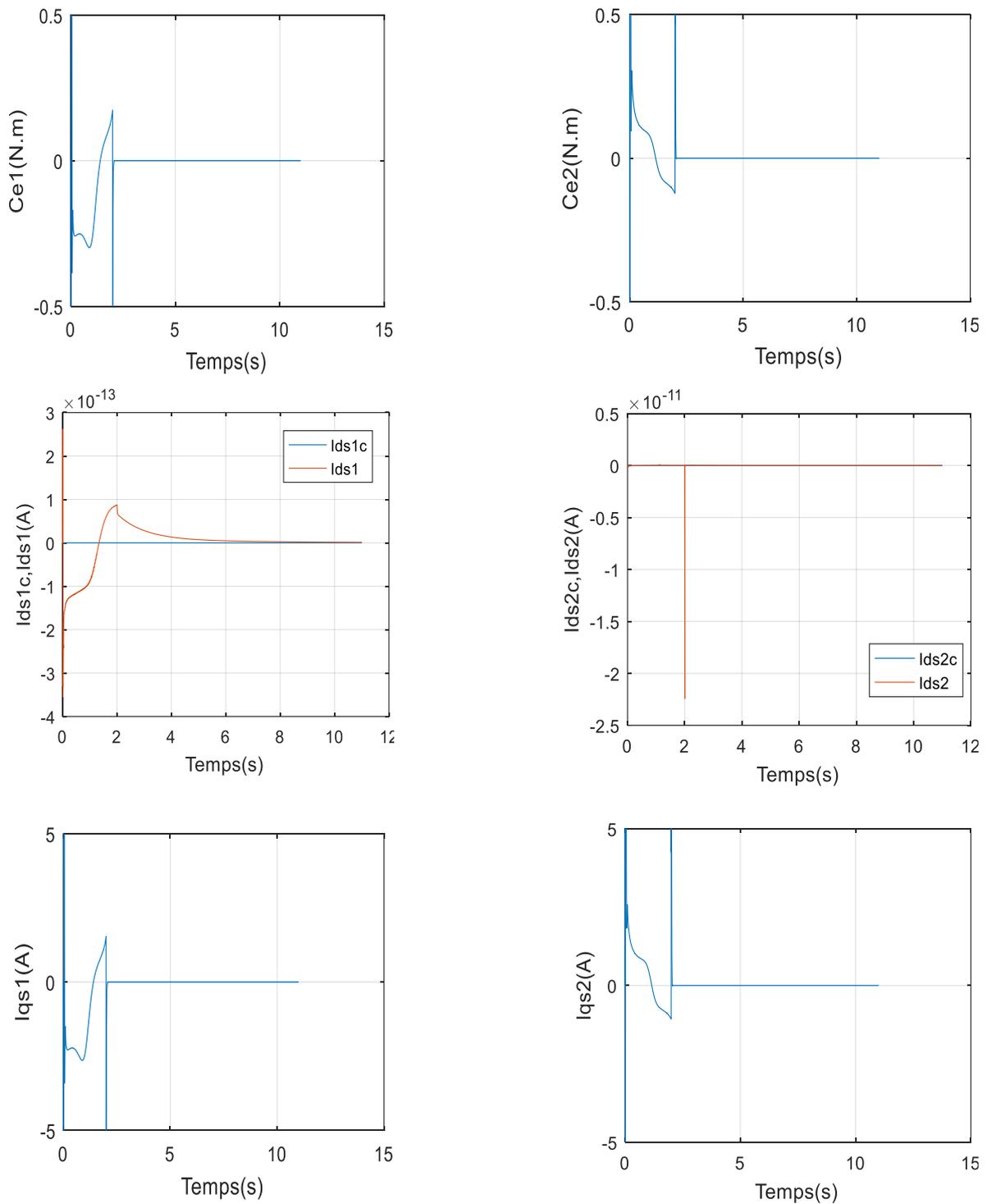
**Figure IV.8** Evolution temporelle de X et Y et l'erreur de poursuite de la trajectoire.



**Figure IV.9** Evolution des signaux de commandes en fonction de temps.

La figure (IV.8) présente les consignes et les réponses de la trajectoire en fonction de temps ainsi que les erreurs de la poursuite, on remarque que la poursuite est assurée avec des faibles erreurs dans le plan X et Y.

La figure (IV.9) présente respectivement les positions (consignes et réponses) en fonction de temps, ainsi que les signaux de commande des deux articulations, on constate que la poursuite est assurée avec des erreurs qui s'annulent avec le temps pour les deux régulateurs.



**Figure IV.10** Evolution des courants et de couple électromagnétique en fonction de temps.

La figure (IV.10) présente respectivement le couple électromagnétique en fonction de temps et l'évolution des courants dans le temps. On remarque que le courant ( $I_{ds}$ ) suit sa référence avec des erreurs d'ordre  $10^{-13} A$  et  $10^{-10} A$  pour les deux articulations respectivement

### IV.3.3 Résultats de simulation pour la deuxième trajectoire

Dans cette partie on utilise le modèle de régulateur ‘MPC\_mpp\_meas\_disturb’ sans intégrateur avec perturbation mesurée (couple résistant (Cr)).

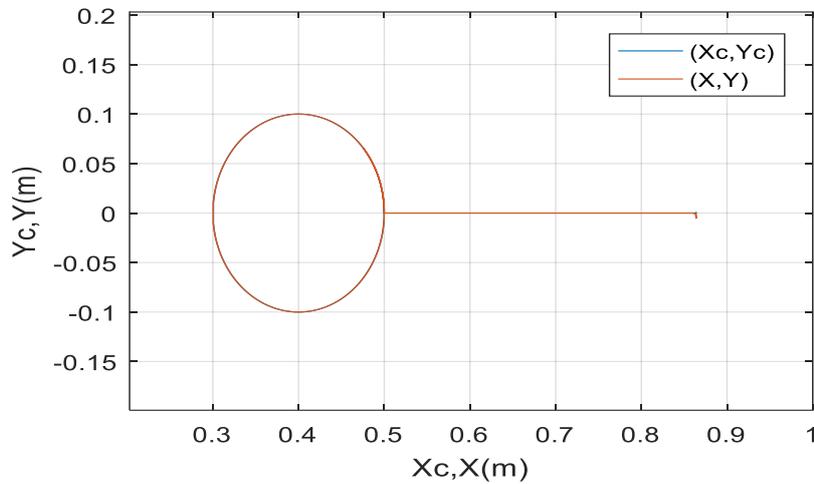


Figure IV.11 Trajectoire dans le plan (X ,Y)

D’après la trajectoire obtenue on constate que la poursuite est assurée avec des erreurs qui s’annulent avec le temps pour les deux articulations, donc la commande prédictive est robuste.

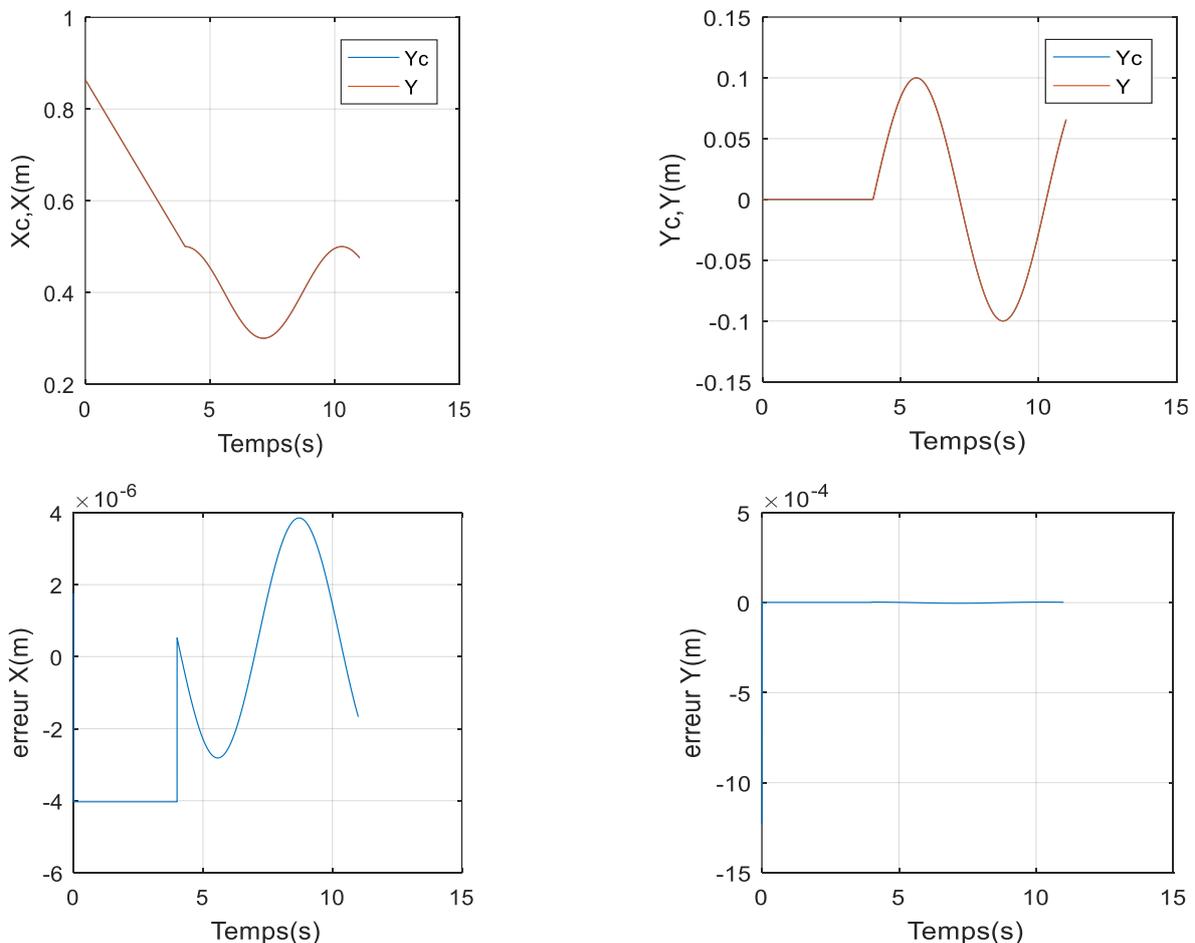
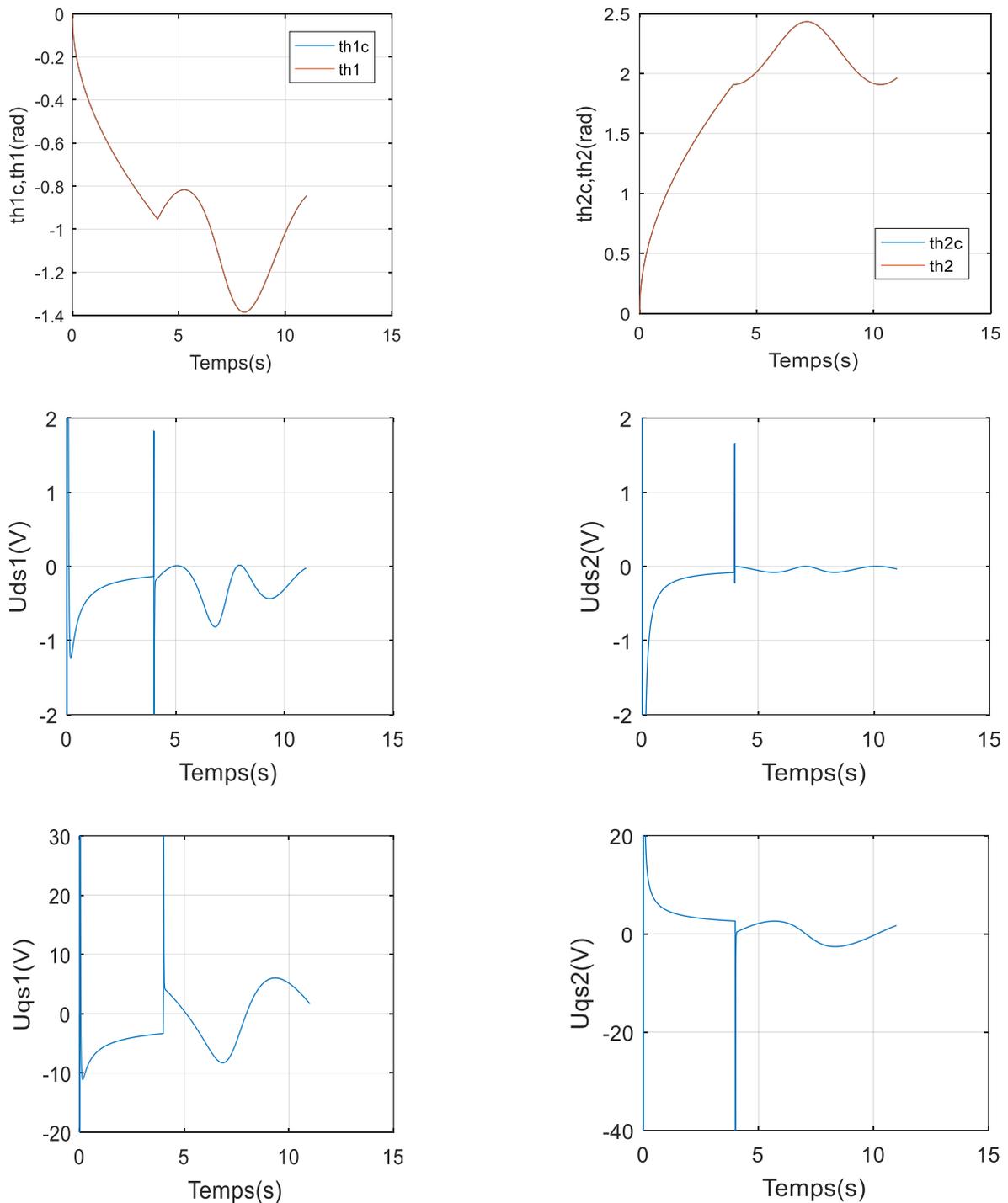


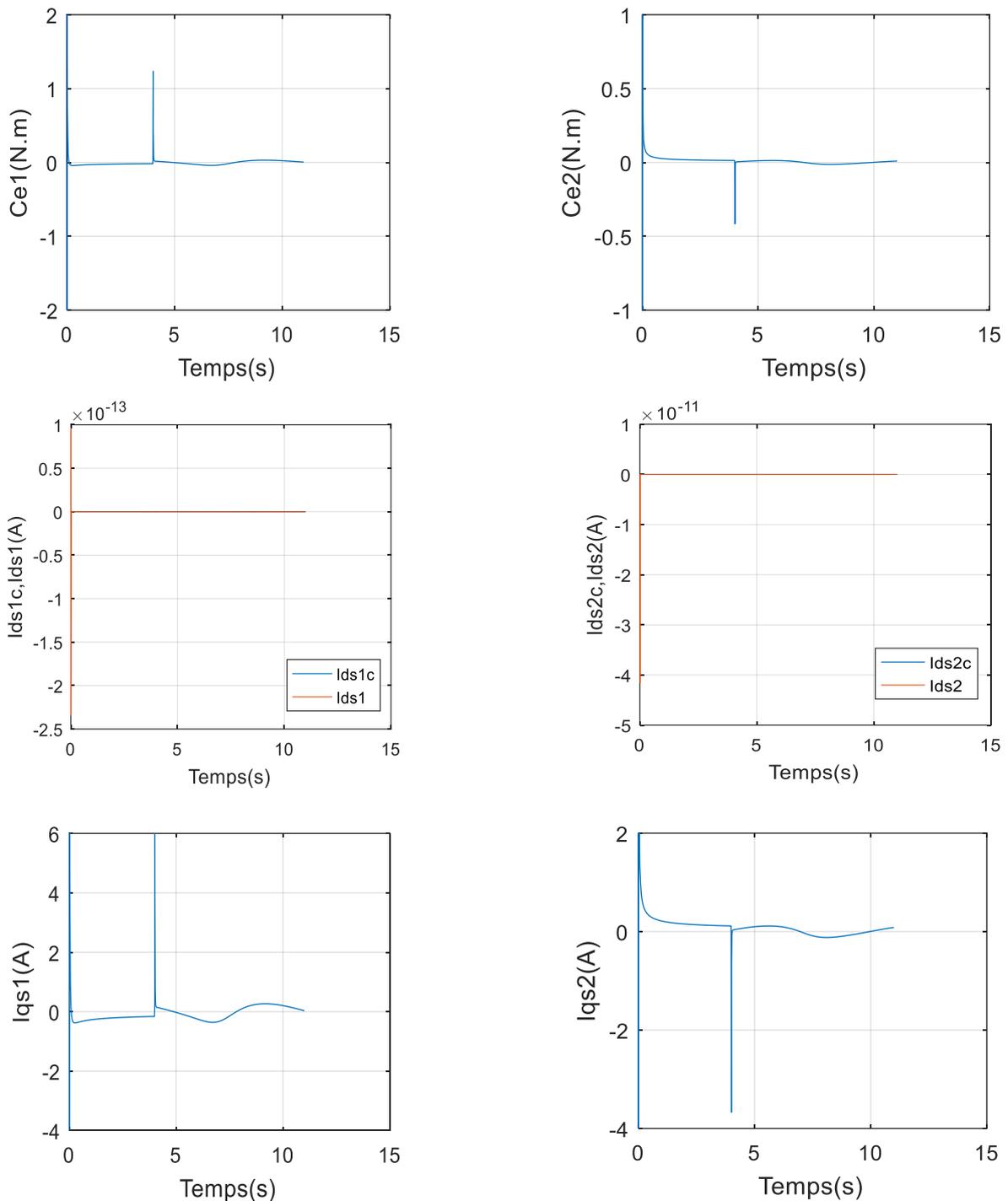
Figure IV.12 Evolution de X et Y et les erreurs de poursuite de la trajectoire.



**Figure IV.13** Evolution de la position et les signaux de commandes en fonction de temps.

La figure (IV.12) présente les consignes et les réponses de la trajectoire en fonction de temps ainsi que les erreurs de la poursuite, on remarque que la poursuite est assurée avec des faibles erreurs dans le plan X et Y.

La figure (IV.13) présente respectivement les positions (consignes et réponses) en fonction du temps, ainsi que les signaux de commande des deux articulations et d'après les résultats obtenus on constate que la poursuite est assurée avec des erreurs qui s'annulent avec le temps pour les deux régulateurs.

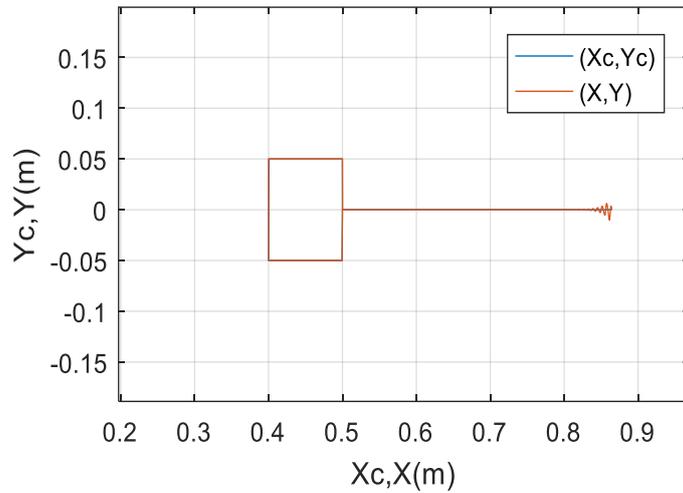


**Figure IV.14** Evolution des courants et de couple électromagnétique en fonction de temps.

La figure (IV.14) présente respectivement le couple électromagnétique en fonction de temps ainsi que l'évolution des courants dans le temps. On remarque que le courant ( $Ids$ ) suit sa référence avec des erreurs d'ordre  $10^{-13}A$  et  $10^{-11}A$  pour les deux articulations respectivement.

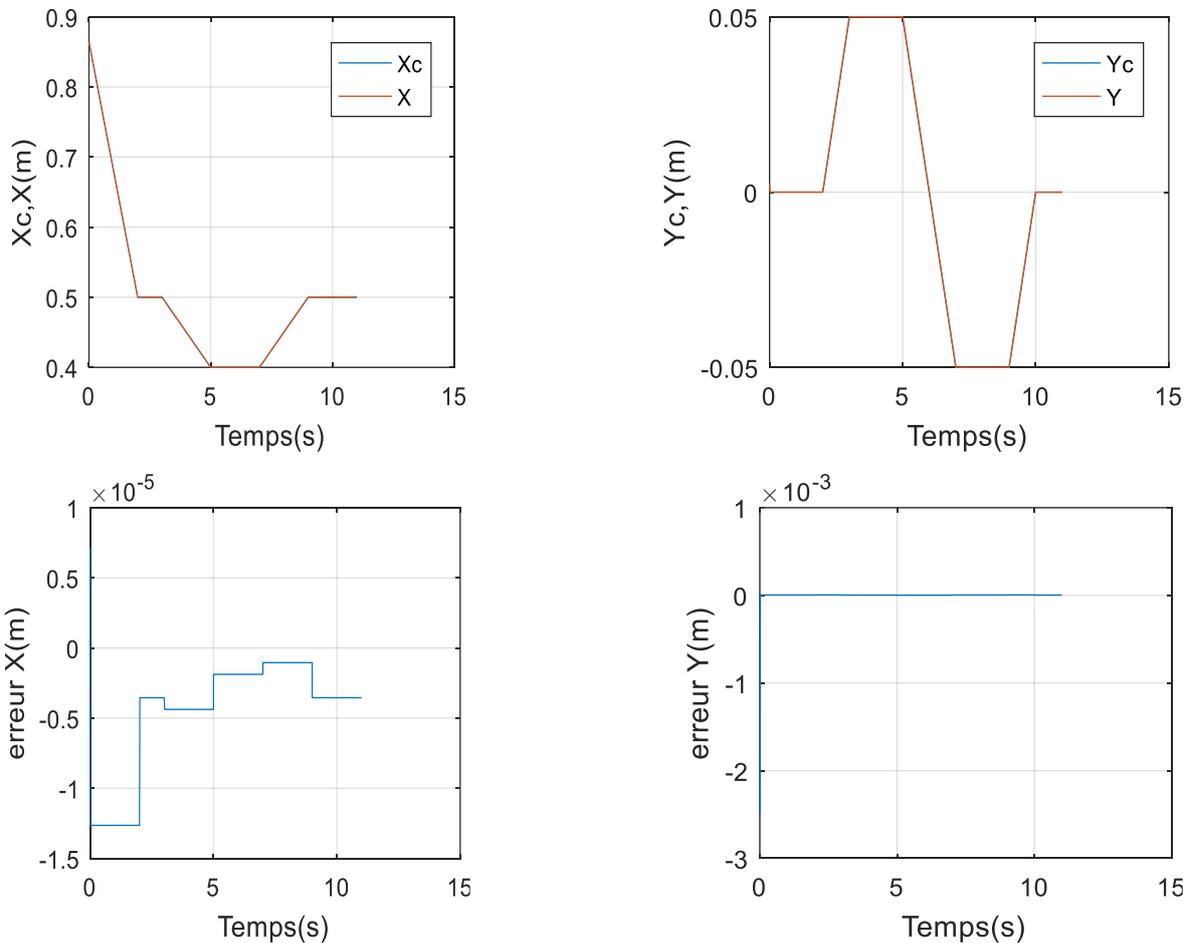
### IV.3.4 Résultats de simulation pour la troisième trajectoire

Dans cette partie on utilise le modèle de régulateur « MPC\_mpp\_Integ » Avec intégrateur.

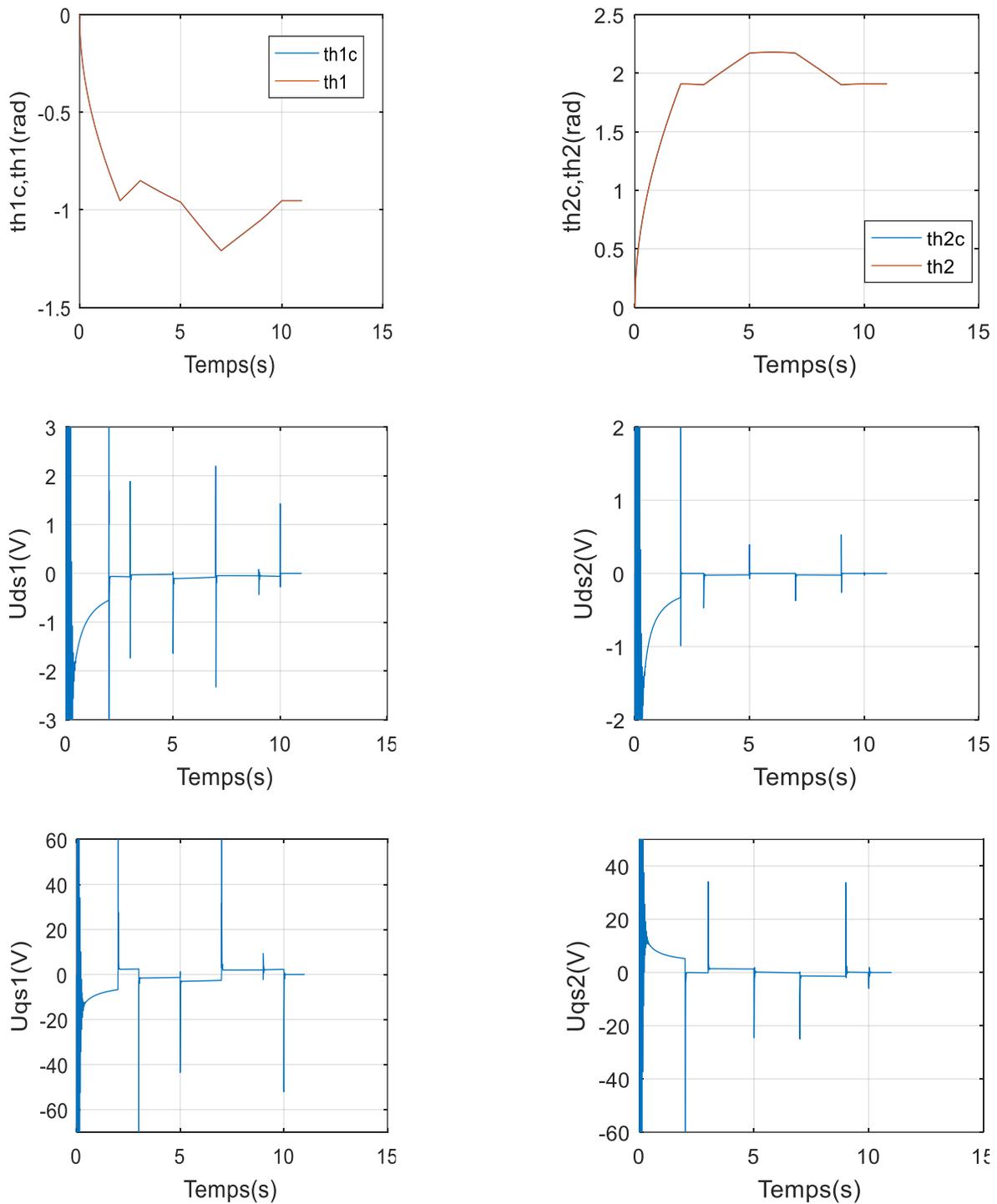


**Figure IV.15** Trajectoire dans le plan (X, Y).

D’après la réponse obtenue on constate que la poursuite est assurée avec des erreurs qui s’annulent avec le temps pour les deux articulations,



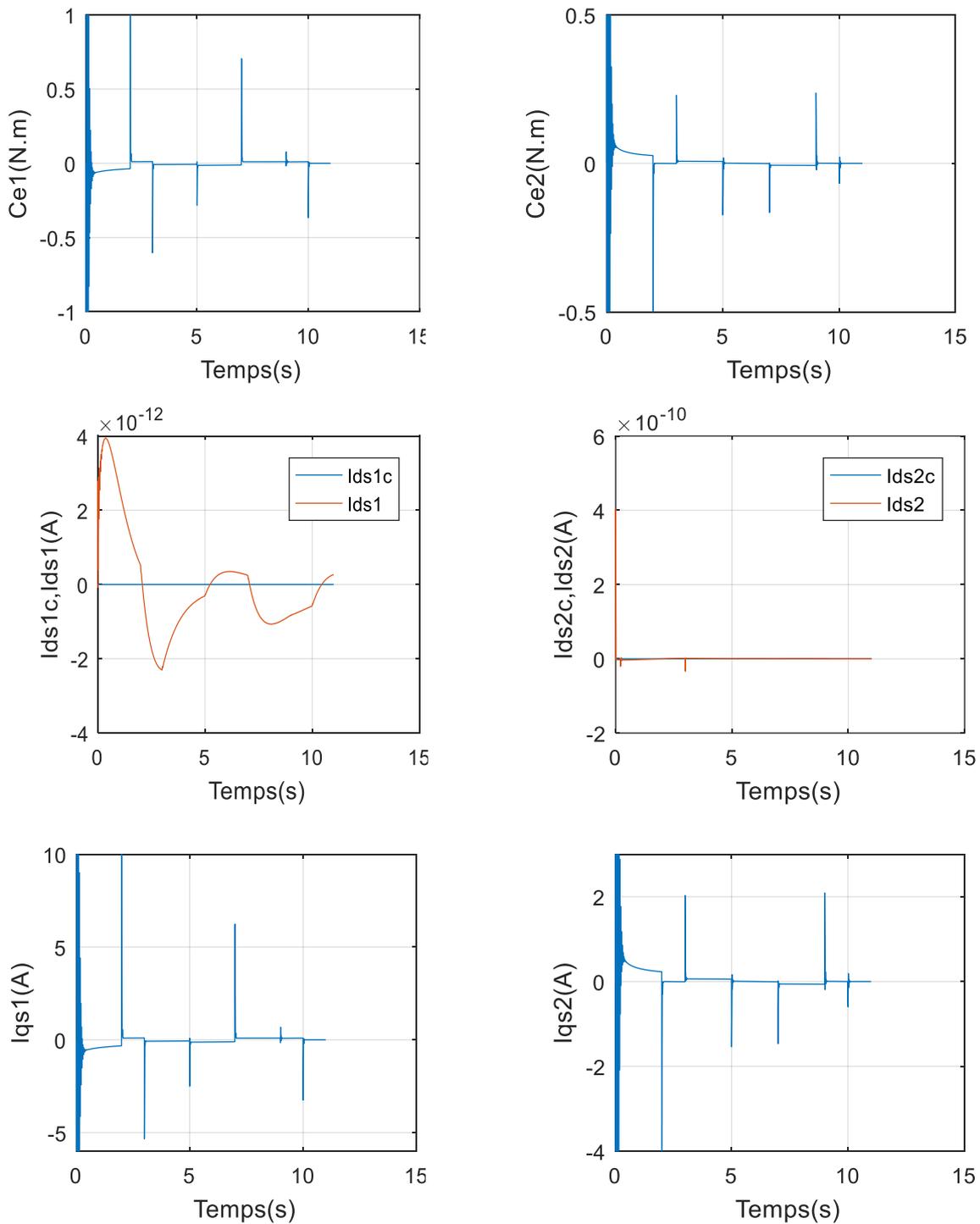
**Figure IV.16** Evolution de X et Y et les erreurs de poursuite de la trajectoire.



**Figure IV.17** Evolution de la position et les signaux de commandes en fonction de temps.

La figure (IV.16) présente les consignes et les réponses de la trajectoire en fonction de temps ainsi que les erreurs de la poursuite, on remarque que la poursuite est assurée avec des erreurs de l'ordre  $-1.25 * 10^{-5}m$  et  $-2.5 * 10^{-3}m$  dans le plan X et Y.

La figure (IV.17) présente respectivement les positions (consignes et réponses) en fonction de temps, ainsi que les signaux de commande des deux articulations, on constate que la poursuite est assurée avec des erreurs qui s'annulent avec le temps pour les deux régulateurs.



**Figure IV.18** Evolution des courants et de couple électromagnétique en fonction de temps.

La figure (IV.16) présente respectivement le couple électromagnétique en fonction de temps et l'évolution des courants dans le temps. On remarque que le courant ( $I_{ds}$ ) suit sa référence avec des erreurs d'ordre  $10^{-12} A$  et  $10^{-10} A$  pour les deux articulations respectivement.

Pour le couple électromagnétique on remarque qu'il suit le couple désiré avec une faible erreur qui s'annule rapidement dans le temps pour les deux régulateurs.

### IV.3.5 Résultats de simulation pour la quatrième trajectoire

Dans cette partie on a utilisé le modèle de régulateur « MPC\_mpp\_integ\_meas\_disturb » sans intégrateur avec perturbation mesurée ( $C_r$ ).

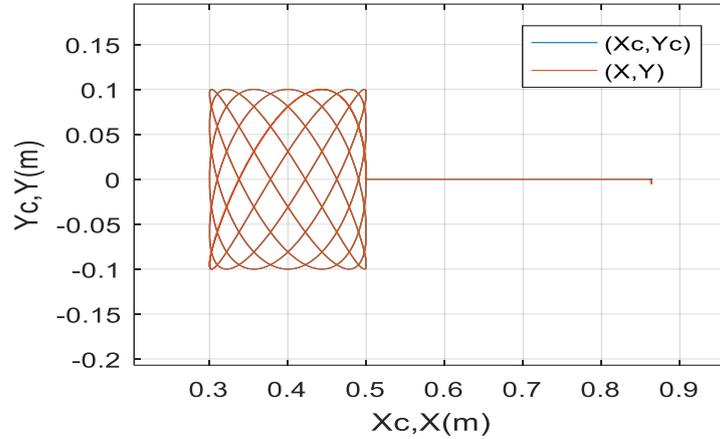


Figure IV.19 Trajectoire dans le plan (X, Y).

D'après la trajectoire obtenue on constate que la poursuite est assurée avec des erreurs qui s'annulent avec le temps pour les deux articulations, donc la commande prédictive est robuste.

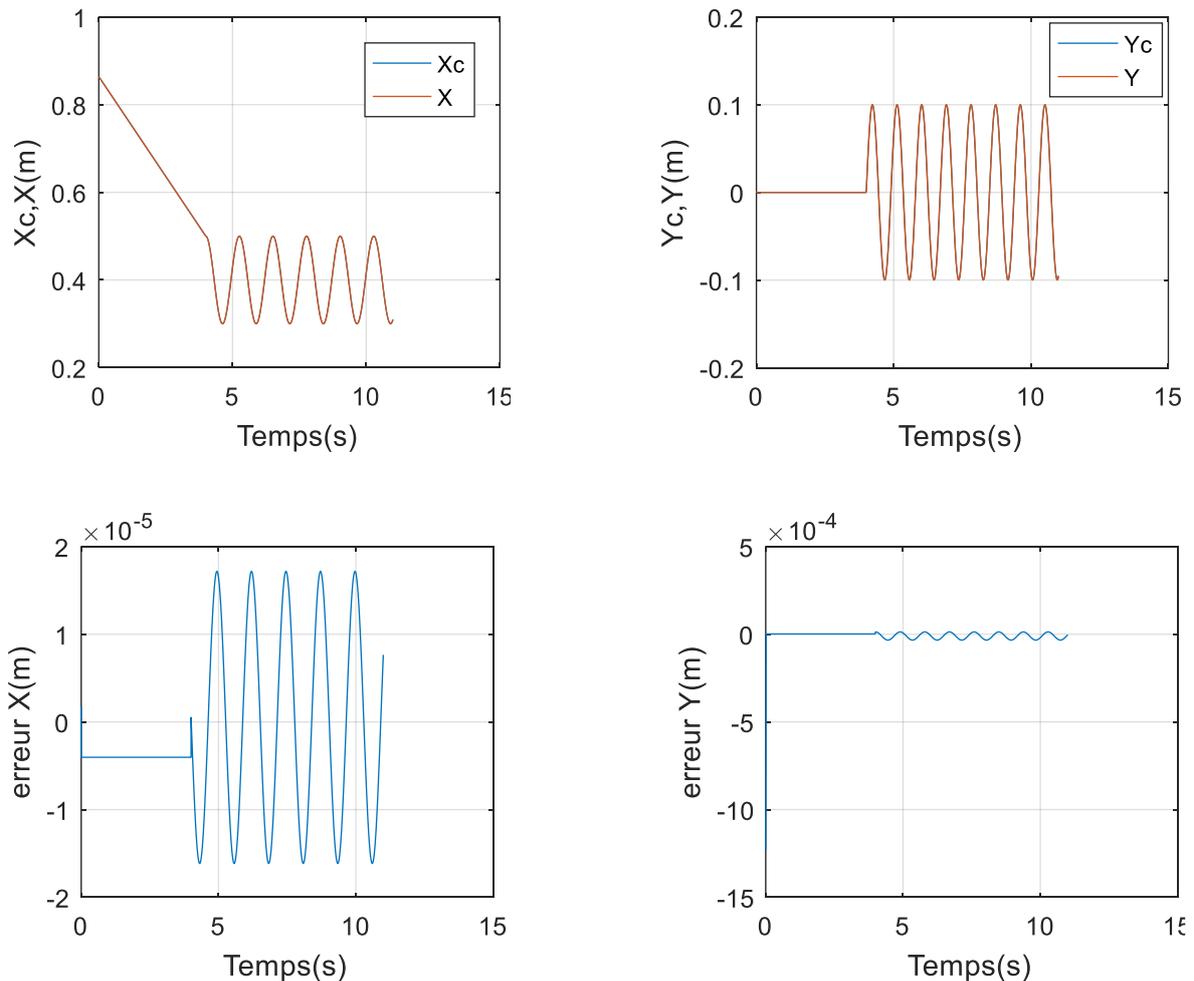
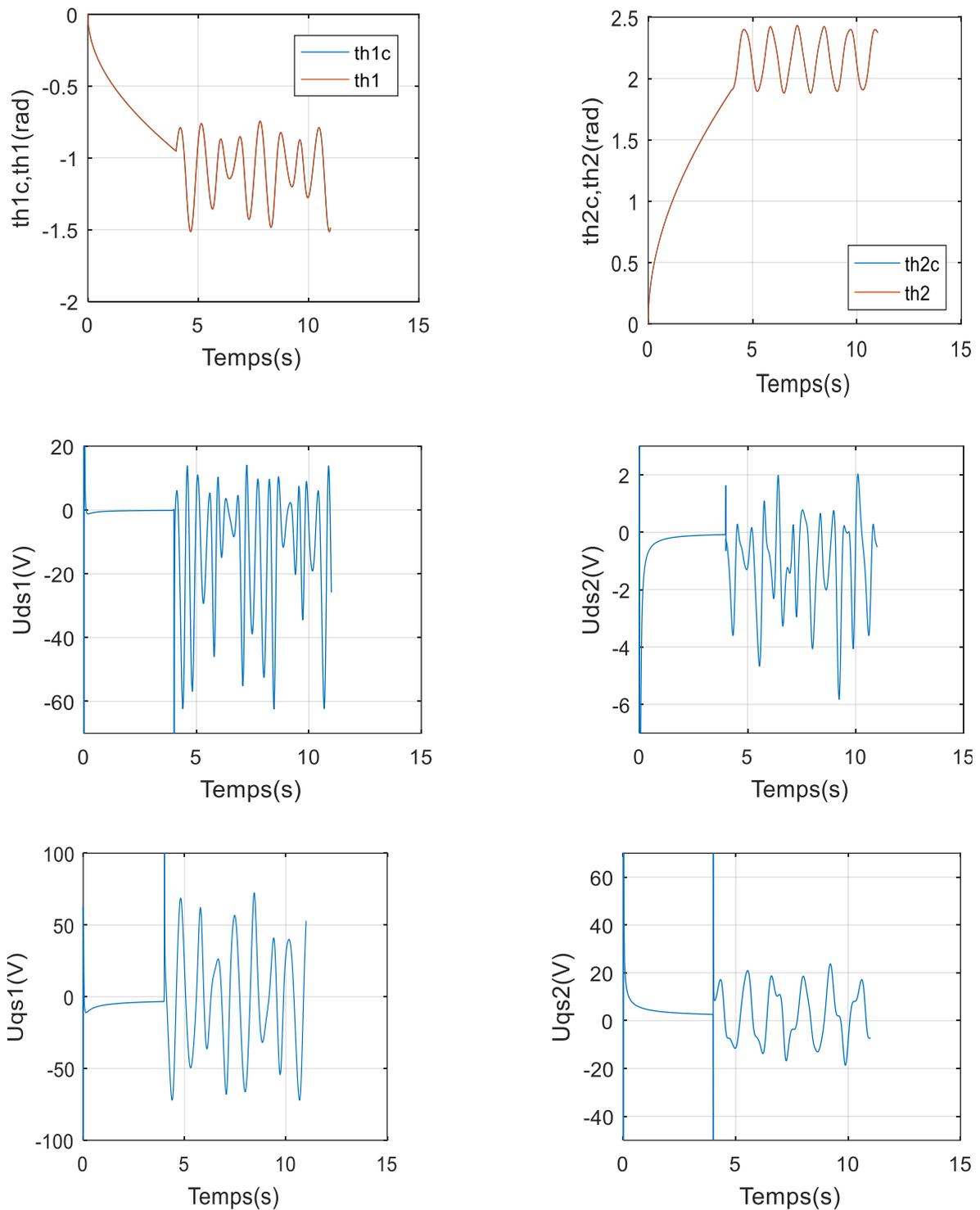


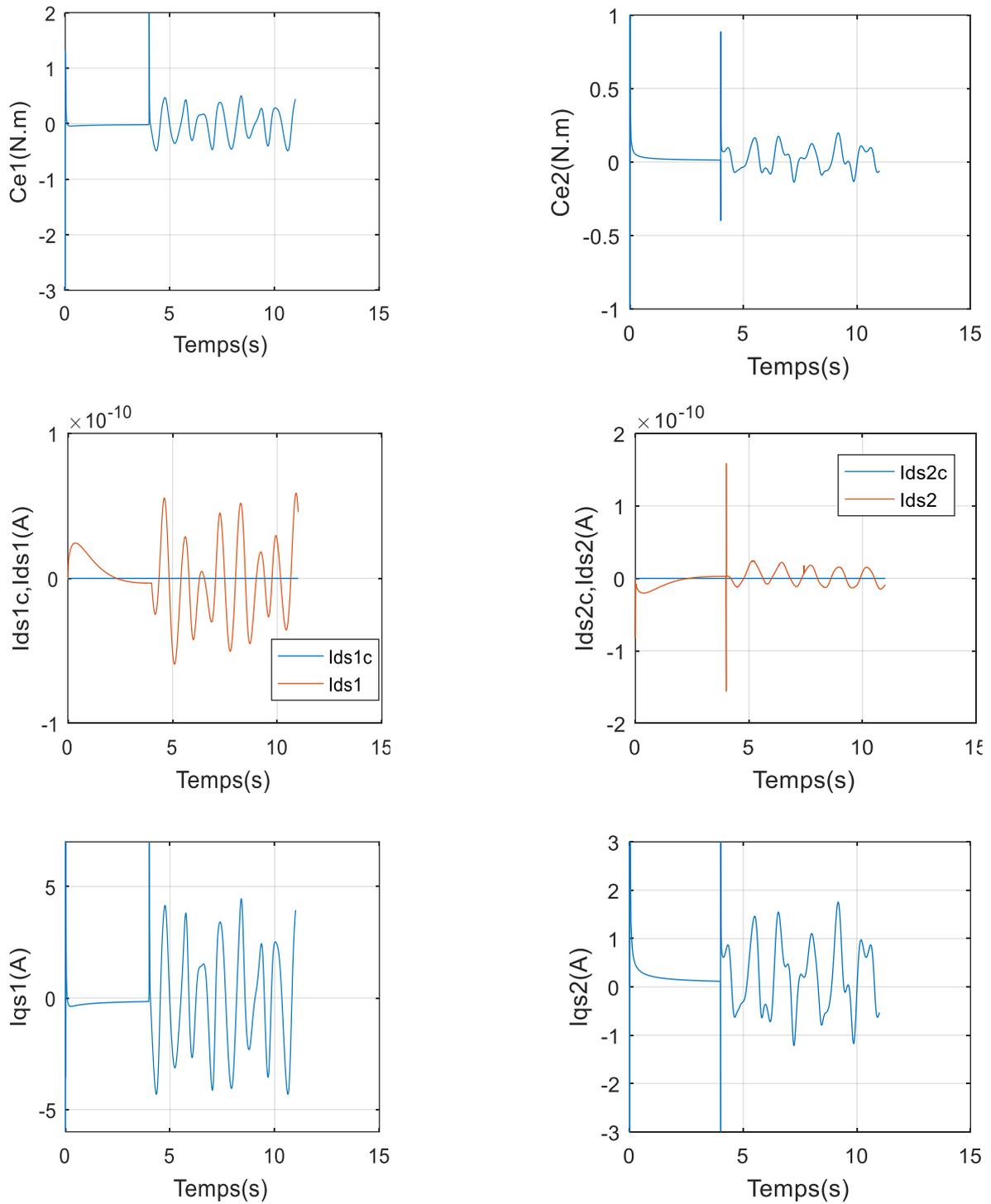
Figure IV.20 Evolution de X et Y et les erreurs de poursuite de la trajectoire.



**Figure IV.21** Evolution de la position et les signaux de commandes en fonction de temps.

La figure (IV.20) présente les consignes et les réponses de la trajectoire en fonction de temps ainsi que les erreurs de la poursuite, on remarque que la poursuite est assurée avec des erreurs de l'ordre  $-0.4 \times 10^{-5}m$  et  $-11.7 \times 10^{-4}m$  dans le plan X et Y respectivement

La figure (IV.21) présente respectivement les positions (consignes et réponses) en fonction de temps, ainsi que les signaux de commande des deux articulations, on remarque que la poursuite est assurée pour les deux régulateurs.



**Figure IV.22** Evolution des courants et de couple électromagnétique en fonction de temps.

La figure (IV.22) présente respectivement le couple électromagnétique en fonction de temps et l'évolution des courants dans le temps. On remarque que le courant ( $I_{ds}$ ) suit sa référence avec des très faibles erreurs d'ordre  $10^{-10}A$  et  $10^{-10}A$  pour les deux articulations respectivement.

## IV.4 Conclusion

La commande (prédicative+PI) appliquée au robot SACARA nous a montré son efficacité. Nous avons testé la simulation avec quatre trajectoires, ce qui nous a montré que les régulateurs MPC arrivent à suivre les consignes avec des erreurs négligeables et qui donne des résultats très satisfaisants.



---

## **Conclusion générale**

---



L'application d'une commande avancée à un système complexe doit répondre aux exigences accrues en matière de robustesse et de performance.

Ce travail porte sur l'application d'une commande avancée (commande prédictive) sur un système composé d'un robot manipulateur de type SCARA motorisé par deux moteurs pas à pas à aimants permanents.

En premier lieu nous avons présenté la commande utilisée (la commande prédictive) qui permet de définir la future dynamique d'un système. Dans notre cas nous avons distingué la commande prédictive à base d'un modèle d'état MPC grâce à ses performances.

Puis, nous avons défini les éléments du système étudié qui sont le moteur pas à pas et le bras manipulateur de type SCARA. Premièrement nous avons donné un aperçu général sur le moteur pas à pas, son principe de fonctionnement ainsi que les différents types utilisés. Après on a évoqué le bras manipulateur. Nous avons présenté des généralités sur les robots manipulateurs ainsi que leur modélisation. Nous nous sommes concentrés en particulier sur le robot SCARA à deux degrés de liberté.

Ensuite, nous avons appliqué la commande prédictive sur le moteur pas à pas à aimants permanents pour l'asservir en vitesse tout en rejetant les perturbations. Ce moteur asservi sera utilisé pour motoriser le robot SCARA (deux moteurs).

Enfin, nous avons synthétisé des régulateurs PI afin de commander le robot SCARA en position. Ceci était possible à cause de l'utilisation des MPP avec leurs MPC. La simulation a montré l'efficacité de l'approche utilisée et nous avons obtenu un résultat satisfaisant. Ce résultat prouve que cette approche de la commande permet en effet de répondre aux exigences de performances et de garantir la robustesse en prenant en compte les incertitudes possibles.

Comme perspective, nous pouvons citer l'implémentation de cette commande sur un robot SCARA réel (banc d'essais), en plus de l'appliquer sur d'autres types de robots manipulateurs et d'étudier ses différentes variantes.



---

## **Références bibliographiques**

---



- [1] **Klaoua Fares**, « Commande prédictive généralisée », mémoire fin d'étude Master, Université Mohamed Khider, Biskra, promotion 2014.
- [2] **Boumaza Hamza**, « Commande prédictive approximant », Thèse de Magister, université Constantine1, promotion 2013.
- [3] **Farida BACHENE**, « Commande prédictive généralisée d'un système à retard », mémoire de fin d'étude de Master Académique, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, promotion 2018.
- [4] **Clarke D.W., C. Mohtadi and P. S. Tufs**, "Generalized predictive control, Part I. The basic algorithm," Automatica, vol. 23, pp. 137-148, 1987.
- [5] **P. Boucher D. Dumur**, « La commande prédictive », édition technip, 1996.
- [6] **YACIA Sofiane, Taouinet Rafik**, «Commande Prédictive d'un Redresseur à MLI Triphasé », mémoire de fin d'études, Université Abderrahmane Mira, Bejaïa, promotion 2013.
- [7] **Kercha Mébarka** , « Commande par mode de glissement d'un moteur pas à pas à aimants permanents », Thèse de magister, université de Batna ,14/12/05.
- [8] **Frédéric le grand**, « Commande d'un moteur pas à pas unipolaire sur Arduino », <https://www.flegrand.fr/scidoc/docmml/sciphys/arduino/paspasunipol/paspasunipol.html> , consulté le 19/05/2021.
- [9] **M. A. Haller**, « Contribution à la modélisation et l'indentification d'un moteur pas à pas hybride et de son alimentation », Thèse Docteur Ingénieur. I.N.P.L. Nancy 1981.
- [10] **Fodil Rosa, Sayah Kenza**, « Réalisation et Commande d'un Bras Manipulateur à Quarte Degrés de Liberté » mémoire de master, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, promotion juin 2017.
- [11] **Bétemps M, Jutard A**, « Analyse et modélisation des robots manipulateurs ».
- [12] **Kerraci Abdelkader**. «Synthese des commandes robustes des robots manipulateurs rigides ». Thèse de magistère, Université d'Oran, promotion 2004.
- [13] **Hocine TAKHI** Université Amar Telidji - Instrumentation 2014.
- [14] <https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/robotique/les-robots-scara-rapides,-flexibles-pour-l-emballage,-mise-en-lot-et-assemblages>. Consulté le 20/05/2021.
- [15] **M. Zribi, J. Chainson**, « Position Control of a PM Stepper Motor by Exact Linearization », IEEE Trans. Aut. Cont., Vol. 36, N° 5, May 1991.



---

# **Annexes**

---



---

**Annexe A**

Les paramètres des moteurs pas à pas à aimants permanents que nous avons utilisés dans les simulations sont [15] :

$$R=10 \Omega$$

$$L=0.0011 H$$

$$N_r = 50$$

$$J=5.7 * 10^{-6} Kg.m^2$$

$$F_v = 0.001 N.m.s/rad$$

$$K_m = 0.113 N.m/A$$

Les paramètres des régulateurs MPC

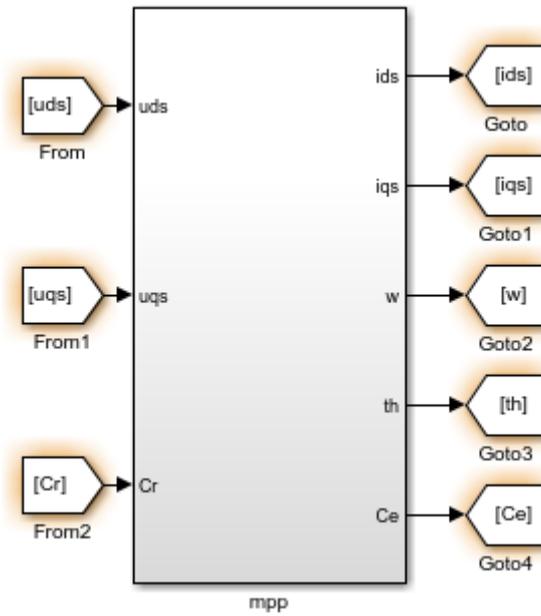
La période d'échantillonnage  $T_e=10^{-3}$

L'horizon de prédiction  $N_p=10$

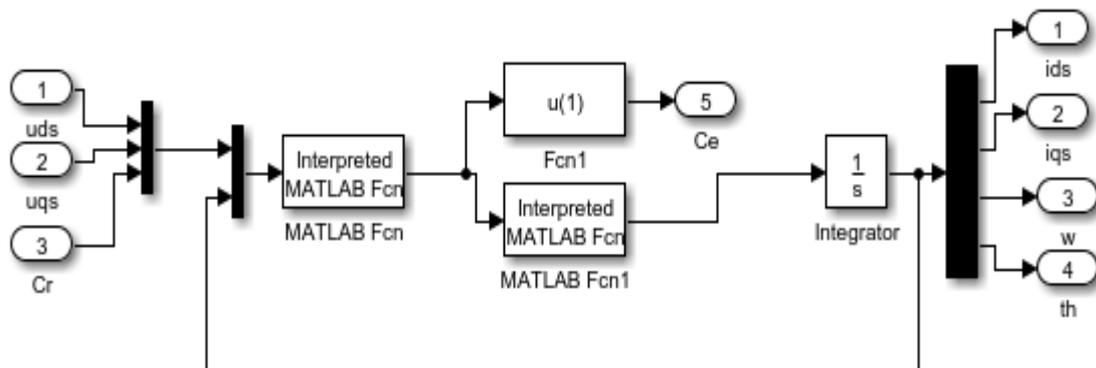
Horizon de commande  $N_u=2$

## Annexe B

Le bloc de simulation du MPPAP est donné par :



Avec :



## Configuration des paramètres des régulateurs MPC

**MPC Structure**

0 Measured Disturbances  
2 Manipulated Variables  
0 Unmeasured Disturbances

0 Unmeasured  
3 Measured

Controller Sample Time  
Specify MPC controller sample time (default sample time in the MPC block): 0.0001

Simulink Operating Point  
Choose an operating point at which plant model is linearized and nominal values are computed: Model Initial Condition

Simulink Signals for Plant Inputs

Selected	Type	Block Path
<input checked="" type="radio"/>	Manipulated Variables (MV)	SCARA/MPC.mpp.integ.découplage1/MPC.m

Simulink Signals for Plant Outputs

Selected	Type	Block Path
<input checked="" type="radio"/>	Measured Outputs (MO)	mppscara.mpp.integ.traj.z/variables/regulateur/SCARA/MPC.mpp.integ.découplage1/MPC.m

MPC Block Signal Sizes

Description

Default signal dimensions used by MPC Controller block are defined in the "Default Conditions" tab of the MPC Controller block dialog.

If they are not applicable to your use case, specify correct dimensions below. It will update MPC Controller block before linearization starts.

Assign plant i/o channels to desired signal types:

Number of manipulated variables (MV): 2  
 Number of measured disturbances (MD): Not Available  
 Number of unmeasured disturbances (UD): 0  
 Number of measured outputs (MO): 3  
 Number of unmeasured outputs (UO): 0

Programme sous Matlab du moteur pas à pas à aimants permanents :

```
function sorties=mpp1 (entrees)
R=10 ;
L=0.0011 ;
Nr=50 ;
B=0.001 ;
J=5.7e-6 ;
Km=0.113 ;

uds=entrees(1) ;
uqs=entrees(2) ;
Cr=entrees(3) ;
ids=entrees(4) ;
iqs=entrees(5) ;
w=entrees(6) ;
th=entrees(7) ;

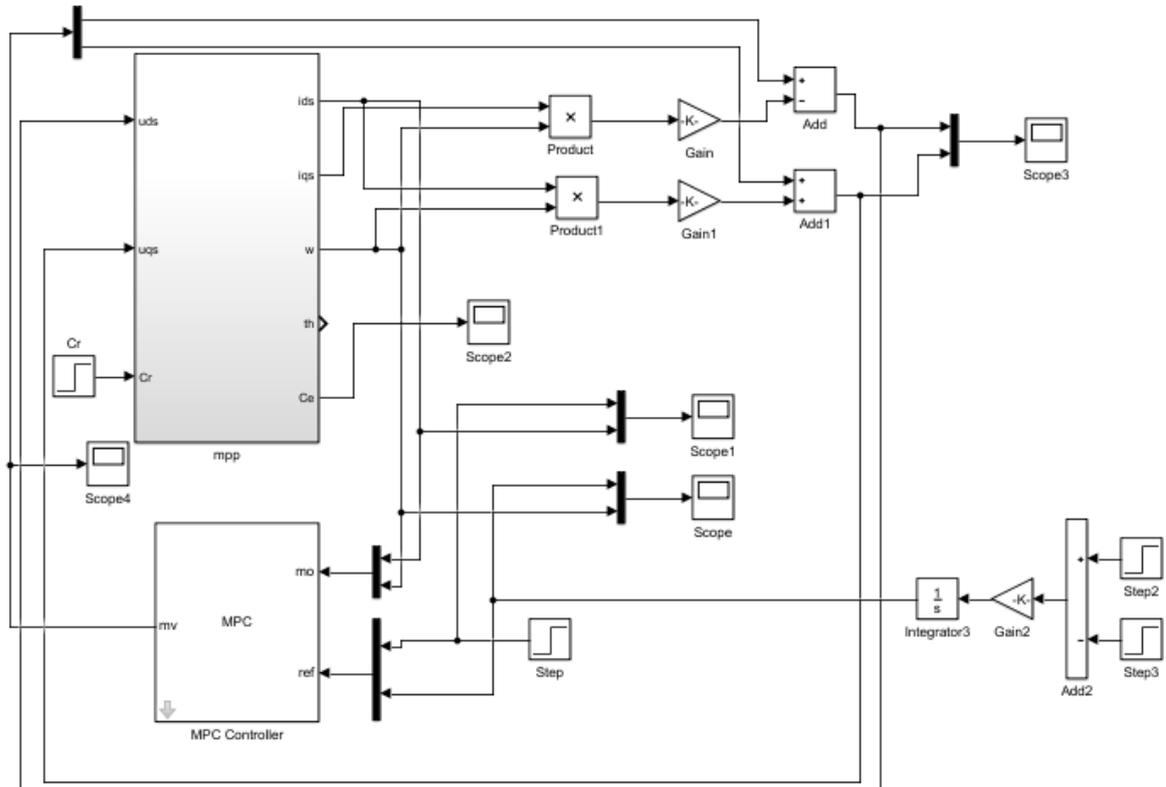
Ce=Km*iqs ;

dids= (uds-R*ids+Nr*L*w*iqs)/L ;
diqs= (uqs-R*iqs-Nr*L*w*ids-Km*w)/L ;
dw= (Ce-B*w-Cr)/J ;
dth=w ;
sorties= [Ce dids diqs dw dth] ;
return

function y=dstate(u)
y=u (2:5) ;
```

## Annexe C

Schémas bloc de simulation de la commande prédictive :



## Annexe D

Programme sous Matlab du robot SCARA :

```
function twc=programmescara_2 (m120)
mpp1=m120 (1:4) ;
mpp2=m120 (5:8) ;
m0=m120(9) ;

Ce1    = mpp1(1) ;
w1_dot = mpp1(2) ;
w1     = mpp1(3) ;
w1_int = mpp1(4) ; th1=w1_int ;

Ce2    = mpp2(1) ;
w2_dot = mpp2(2) ;
w2     = mpp2(3) ;
w2_int = mpp2(4) ; th2=w2_int ;

%%paramètres du robot
m1=15.91 ; m2=11.36 ;
l1=0.432 ; l2=0.432 ;
fv1=0.0085 ; fv2=0.0085 ;
fs1=0.000 ; fs2=0.000 ;
im1=0.0048*0 ; im2=0.0048*0 ;
%n1=120 ; n2=50 ;
n1=0 ; n2=0 ;

%%les calcules
i1=m1*l1^2/3 ;

i2=m2*l2^2/3 ;

%im= [n1^2*im1 0 ; 0 n2^2*im2] ;
im= [0 0 ; 0 0] ;

j= [-l1*sin (th1)-l2*sin (th1+th2) -l2*sin (th1+th2) ;
    l1*cos (th1) +l2*cos (th1+th2) l2*cos (th1+th2)] ;

jpx= [-l1*w1*cos (th1)-l2*(w1+w2)*cos (th1+th2) -l2*(w1+w2)*cos (th1+th2) ;
      -l1*w1*sin (th1)-l2*(w1+w2)*sin (th1+th2) -l2*(w1+w2)*sin (th1+th2)] ;
jpy=j'*jpx ;
jy=j'*jy ;
m= [i1+i2+m2*l1^2+m2*l1*l2*cos (th2) i2+0.5*m2*l1*l2*cos (th2) ;
    i2+0.5*m2*l1*l2*cos (th2) i2] ;
a=m+im+m0*jy ;
%det=det(a) ;

n= [-m2*l1*l2*sin (th2)*((w1+w2) +0.5*w2^2) ; m2*l1*l2*sin
(th2)*w1^2/2] ;

%h= [n1^2*(fv1*w1+fs1*sign (w1)) ; n2^2*(fv2*w2+fs2*sign (w2))] ;
h= [0 ; 0] ;

nh=n+h ;
jpx=jpx*[w1 ; w2] ;

%%dx % det * w1_dot - (-m0*a(2,2)*jpx(1) +m0*a(1,2)*jpx(2)-a(2,2)*nh(1)
+a(1,2)*nh(2)) = (a(2,2)*Ce1-a(1,2)*Ce2) ;
```

```
% deta * w2_dot - (m0*a(2,1)*jjpx(1)-m0*a(1,1)*jjpx(2) +a(2,1)*nh(1)-
a(1,1)*nh(2)) = (-a(2,1)*Ce1+a(1,1)*Ce2) ;
```

```
Ce = a*[w1_dot ; w2_dot] + m0*jjpx+nh ;
twc= [th1 ; th2 ; w1 ; w2 ; Ce] ;
```

```
end
```

- La fonction Matlab pour la 1<sup>ere</sup> trajectoire :

```
function xy = trajectory_1(t)
persistent ti tf xi xf yi yf x y
```

```
t0 = 2 ;
t1 = 3 ;
t2 = 5 ;
t3 = 7 ;
t4 = 9 ;
t5 = 10 ;
```

```
if t==0
    ti = 0 ;
    tf = t0 ;
    xi = 0.864 ;
    xf = 0.5 ;
    yi = 0 ;
    yf = 0 ;
end
```

```
if (t==t0)
    ti = t0 ;
    tf = t1 ;
    xi = x ;
    xf = x ;
    yi = y ;
    yf = 0.05 ;
end
```

```
if (t==t1)
    ti = t1 ;
    tf = t2 ;
    xi = x ;
    xf = 0.4 ;
    yi = y ;
    yf = y ;
end
```

```
if (t==t2)
    ti = t2 ;
    tf = t3 ;
    xi = x ;
    xf = x ;
    yi = y ;
    yf = -0.05 ;
end
```

```
if (t==t3)
    ti = t3 ;
```

```

    tf = t4 ;
    xi = x ;
    xf = 0.5 ;
    yi = y ;
    yf = y ;
end
if (t==t4)
    ti = t4 ;
    tf = t5 ;
    xi = x ;
    xf = x ;
    yi = y ;
    yf = 0 ;
end

if (t==t5)
    ti = t5 ;
    tf = t5+1 ;
    xi = x ;
    xf = x ;
    yi = y ;
    yf = y ;
end

x = xi + (t-ti)*(xf-xi)/ (tf-ti) ;
y = yi + (t-ti)*(yf-yi)/ (tf-ti) ;

xy = [x ; y] ;
end

```

- La fonction Matlab pour la 2<sup>ème</sup> trajectoire :

```

function xy = trajectory_2(t)
persistent x y xc yc r1 r2
t0 = 4 ;

if (t<t0)
    ti = 0 ;
    tf = t0 ;
    xi = 0.864 ;
    xf = 0.5 ;
    yi = 0 ;
    yf = 0 ;

    x = xi + (t-ti)*(xf-xi)/ (tf-ti) ;
    y = yi + (t-ti)*(yf-yi)/ (tf-ti) ;
end

if t==t0
    xc = 0.4 ;
    yc = 0 ;
    r1 = abs(x-xc) ;
    r2 = r1 ;
end

if (t>=t0)
    x = xc + r1*cos (1*(t-t0)) ;
    y = yc + r2*sin (1*(t-t0)) ;
end

```

```
xy = [x ; y] ;
end
```

- La fonction Matlab pour la 3<sup>ème</sup> trajectoire :

```
function xy = trajectory_3(t)
persistent ti tf xi xf yi yf x y
```

```
t0 = 2 ;
t1 = 3 ;
```

```
if t==0
    ti = 0 ;
    tf = t0 ;
    xi = 0.864 ;
    xf = -0.5 ;
    yi = 0 ;
    yf = -0.5 ;
end
```

```
if (t==t0)
    ti = t0 ;
    tf = t1 ;
    xi = x ;
    xf = x ;
    yi = y ;
    yf = y ;
end
```

```
x = xi + (t-ti)*(xf-xi)/ (tf-ti) ;
y = yi + (t-ti)*(yf-yi)/ (tf-ti) ;
```

```
xy = [x ; y] ;
end
```

- La fonction Matlab pour la 4<sup>ème</sup> trajectoire :

```
function xy = trajectory_2(t)
persistent x y xc yc r1 r2
t0 = 4 ;
```

```
if (t<t0)
    ti = 0 ;
    tf = t0 ;
    xi = 0.864 ;
    xf = 0.5 ;
    yi = 0 ;
    yf = 0 ;

    x = xi + (t-ti)*(xf-xi)/ (tf-ti) ;
    y = yi + (t-ti)*(yf-yi)/ (tf-ti) ;
end
```

```
if t==t0
```

```
xc = 0.4 ;
yc = 0 ;
r1 = abs(x-xc) ;
r2 = r1 ;
end

if (t>=t0)

    x = xc + r1*cos (5*(t-t0)) ;
    y = yc + r2*sin (7*(t-t0)) ;
end

xy = [x ; y] ;
end
```