

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELCTRIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Automatismes Industriels

Commandes électriques

Thème

**Commande prédictive appliquée aux robots
manipulateurs**

Réalisé Par :

AZEGAGH Melissa

AYOUZ Nassim

Soutenu le 06 /07/ 2022 devant le jury composé de :

Mme. SERIR

President

Mr. TAIB

Examinateur

Mr. Ahmed MELAHI

Encadrant

Année Universitaire 2021-2022

Remerciement

Nous remercions le bon dieu tout puissant qui nous a donné la force et la volonté d'achever ce travail et nous lui rendons grâce.

Nous souhaitons remercier nos chers parents qui nous ont éclairé le chemin et nous ont soutenu tout au long de nos études, nous adressons également nos vifs remerciements à toute notre famille bien aimée et nos amis qui nous ont toujours aidé, motivé et encouragé.

Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de département Génie électrique, en particulier Mr MELAHI Ahmed de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé, nous remercions également tous les membres du jury d'avoir accepté d'assister à la présentation de ce travail.

Nous exprimons aussi notre profonde gratitude à notre encadrant Mr MELAHI Ahmed pour sa collaboration en nous fournissant des données précises et pour toutes les connaissances qu'il nous apporté.

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*

*A l'âme de ma mère la femme qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a
épargné aucun effort pour me rendre heureuse*

A mes sœurs HAYET HABIBA FOUZIA

*qui n'ont pas cessés de me conseiller et encourager
que dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur ;*

A mon frère mon bras droit

Un merci pour ma famille ;

A mes amis OUSSAMA RAMZI BILLAL et SYPHAX

A mes amies NOUMIDA CYLIA LINA LAMIA AHLEM MADJDA

A mon cher binôme NASSIM

*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 ;

AZEGAGH MELISSA

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*

*A la femme qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné
aucun effort pour me rendre heureux*

*A ma sœur qui n'a pas cessés de me conseiller et encourager, que dieu la
protège et lui offre la chance et le bonheur ;*

A mes chers frères

Un merci pour ma famille ;

A ma chère binôme melissa

*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 ;

AYOUZ NASSIM

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Principe de la commande prédictive5

Figure I.2 : Stratégie de la commande prédictive 6

Figure I.3 : Schéma-bloc d'un modèle de prédiction7

Figure I.4 : Principe de la GPC..... 10

Figure I.5 : La méthodologie de la MPC..... 11

Chapitre II

Figure III.1 : Schéma simulink pour robot18

Figure II.2 : Les composants du robot..... 18

Figure II.3 : Symbole de l'articulation rotoïde..... 19

Figure II.4 : Symbole de l'articulation prismatique.....20

Figure II.5 : Robot cartésien protique tecno-840.....25

Figure II.6 : Schéma descriptif du robot.....25

Figure II.7 : Schéma explicatif pour les 3 axes du robot manipulateur.....27

Chapitre III

Figure III.1 : Schéma de bloc de simulation du régulateur PID.....30

Figure III.2 : Bloc robot.....30

Figure III.3 : Schéma bloc de simulation de la commande PID.....32

Figures III.4 : Régulateurs PID..... 33

Figure III.5 : Schéma bloc de simulation de la commande MPC..... 34

Figure III.6 : Schéma pour la génération de trajectoire.....	35
Figure III.7: Schéma de la commande par GPC.....	36
Figure III.8 : Signaux (position, erreur, commande) obtenus par la commande par PID.....	37
Figure III.9: Signaux (position, erreur, commande) obtenus par la commande MPC.....	38
Figure III.10 : Signaux (position, erreur, commande) obtenu par la commande GPC.....	39

Liste des abréviations

MPHC : Model Prédictive Heuristic Control.

MAC : Model Algorithmic Control.

DMC : Dynamic Matrix Control.

PFC : Prédictive functional Control.

MPC : Commande Prédictive à base d'un modèle d'état.

GPC : Commande Prédictive Généralisée.

PID : Proportionnel intégral dérivé.

CARIMA : Controlled Auto Regressive Integrated Moving Average.

Sommaire

SOMMAIRE

Introduction générale..... 1

Chapitre I : généralités sur la commande prédictive

I.1 Introduction..... 3

I.2 Historique de la commande prédictive..... 3

I.3 Commande prédictive 3

I.3.1 la stratégie generale de la commande prédictive 3

I.3.2 Le principe de la commande prédictive 4

I.3.3 Différents types d’horizon 5

I.4 Choix des paramètres de réglage 5

I.5 Eléments de la commande prédictive..... 6

I.5.1 Modèle de prédiction 7

I.5.2 Problème d’optimisation 7

I.5.3 Contraintes 8

I.5.4 Conception de la loi de commande 9

I.6 Intérêt de la commande prédictive 9

I.7 Différents types de la commande prédictive 10

I.7.1 Commande prédictive généralisé 10

I.7.1.1 Le critère à minimiser 11

I.7.2 la commande prédictive à base d’un modèle mathématique 11

I.8 Avantages et inconvénients de la commande prédictive 13

I.9 Conclusion 14

CHAPITRE II : Modélisation des robots manipulateurs

II.1 Introduction 15

II.2 Définition d’un robot 15

II.3 Classification des robots 16

II.3.1. Les manipulateurs 16

II.3.2 Les télémanipulateurs 16

II.3.3 Les robots 17

II.4 Constituants d’un robot 17

II.5 Caractéristique d’un robot 21

II.5.1 Le degré de liberté et la redondance 22

II.5.2 Espace articulation..... 22

II.5.3 Espace opérationel 22

II.6 Modélisation des robots manipulateurs	22
II.6.1 Modèle géométrique directe	22
II.6.2 Modèle géométrique inverse	23
II.6.3Modèle cinématique directe.....	23
II.6.3 Modèle cinématique inverse	23
II.6.4 Modèle cinématique inverse	23
II.6.5 Modèle dynamique direct	23
II.6.6 Modèle dynamique inverse	24
II.6.7 Formalisme d'Euler-Lagrange	24
II.7 Modélisation d'un robot à 3 axes.....	25
II.7.1 Description de robot	25
II.7.2 Modélisation géométrique directe	25
II.7.3 Modélisation géométrique inverse	25
II.7.4 Modélisation cinématique.....	26
II.8 Conclusion.....	29
CHAPITRE III : Application au robot manipulateur	
III.1 Introduction	30
III.2 Définition de régulateur.....	31
III.3 La commande MPC.....	31
III.4 La commande GPC	31
III.5 Simulation sous l'environnement Matlab/Simulink.....	31
III.5.1 Commande par PID	32
III.5.2 Commande par MPC.....	33
III.5.3 Commande par GPC.....	35
III.6 Resultat de Simulation	35
III.6.1 Simulation et interpretation des resultas par le régulateur PID	37
III.6.2 Simulation et interepretation des résultats par la commande MPC.....	38
III.6.3 Simulation et interpretation des résultats pour la GPC	39
III.7 Conclusion.....	40
Conclusion générale	41
Annexes	42
Références Bibliographiques.....	48

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, avec le progrès du développement technologique dans le domaine de la commande il est presque impossible de trouver un secteur qui ne soit pas de près ou de loin touché par ce domaine en pleine expansion.

La robotique est un domaine qui ne fait pas exception à la règle, de nouvelles techniques de commande de plus en plus avancées sont développées chaque jour pour permettre à ce domaine en plein essor de grandir encore plus, les robots manipulateurs industriels en font partie, des structures mécaniques articulées commandées par des outils mathématiques et informatiques pour effectuer des tâches précises et répétitives pour remplacer l'homme et lui éviter des tâches rudes et parfois dangereuses.

Pour commander ce genre de structures mécaniques nous utilisons très souvent la commande prédictive, cette commande est une technique de commande avancée dans le domaine de l'automatique, elle a pour but de commander des systèmes industriels complexes, très souvent utilisés dans le domaine de l'industrie pour ses diverses applications telles que la commande des machines électriques et autres.

La commande prédictive est un terme général qui englobe un ensemble de méthodes différentes telles que (commande prédictive généralisée GPC, commande prédictive à base d'un modèle d'état MPC, commande prédictive fonctionnelle PFC) en sachant que toutes ces techniques différentes partagent la même philosophie et le même principe de fonctionnement.

L'objectif de notre travail s'articule sur la commande prédictive appliquée au robot manipulateur.

Dans le premier chapitre, nous allons aborder des généralités sur la commande prédictive et ses différents types et différentes méthodes de commandes (MPC, GPC).

Dans le second chapitre, nous parlerons de la robotique sa définition, sa structure puis la modélisation d'un robot, par la suite nous nous pencherons sur le robot manipulateur cartésien à 3 ddl.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats obtenus par simulation sous l'environnement Matlab/simulink, nous montrerons les schémas simulink utilisés et les

figures obtenues pour le régulateur PID et les commandes MPC et GPC. Puis nous terminerons par une conclusion générale.

Chapitre I

I.1 Introduction

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel.

I.2 Historique de la commande prédictive

La commande prédictive a été inventée par J. Richalet, en 1978 sous le nom de MPHC (Model Prédictive Heuristic Control), après l'avoir connu plus tard sous le nom de commande algorithmique (MAC-Model Algorithmic Control) [Bruijn et Verbruggen 1984] ou commande matricielle dynamique (DMC- Dynamic Matrix Control).Il fallu attendre 1987, pour voir publier les premiers résultats obtenus par J. Richalet et al, sur des systèmes électromécaniques rapides, tels 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) font partie de cette classe.

I.3 Commande prédictive

I.3.1 La stratégie générale de la commande prédictive

Le principe de base de la commande prédictive consiste de prendre en compte, à l'instant actuel, le comportement futur, par le biais d'utilisation explicite d'un modèle numérique du système dans le but de prédire la sortie dans le futur, sur un horizon fini. Un des intérêts des méthodes prédictives réside dans le fait que, pour une consigne recalculée sur un certain horizon, il est ainsi possible d'exploiter les informations de trajectoires prédéfinies situées dans le futur, étant donné que le but est de faire correspondre la sortie du système avec cette consigne sur un horizon fini.

De manière générale, la loi de commande prédictive est obtenue à partir de la méthodologie suivante :

1. Prédire les sorties futures du processus sur l'horizon de prédiction défini, en utilisant le modèle de prédiction. On dénote $y(t + k/t)$ les sorties prédites, $k = 0 \dots N$ (N l'horizon de prédiction). Ces sorties sont dépendantes des valeurs de sorties et d'entrées du processus à commander connues jusqu'au temps t .
2. Calculer la séquence de signaux de commande, dénotée par $u(t + k/t)$, $k = 0 \dots N-1$ en minimisant un critère de performance afin de mener la sortie du processus vers une sortie de référence. Dénotée par $w(t + k/t)$, $k = 0 \dots N$, D'habitude le critère de performance à minimiser est un compromis entre une fonction quadratique des erreurs entre $y(t + k/t)$ et $w(t + k/t)$ et un coût de l'effort de commande. Par ailleurs, la minimisation d'une telle fonction peut être soumise à des contraintes sur l'état et plus généralement à des contraintes sur la commande.
3. Le signal de commande $u(t)$ est envoyé au processus tandis que les autres signaux de commande sont oubliés. Au temps $t+1$ on acquiert la sortie réelle $y(t + 1)$ et on recommence au premier [2].

I.3.2 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.

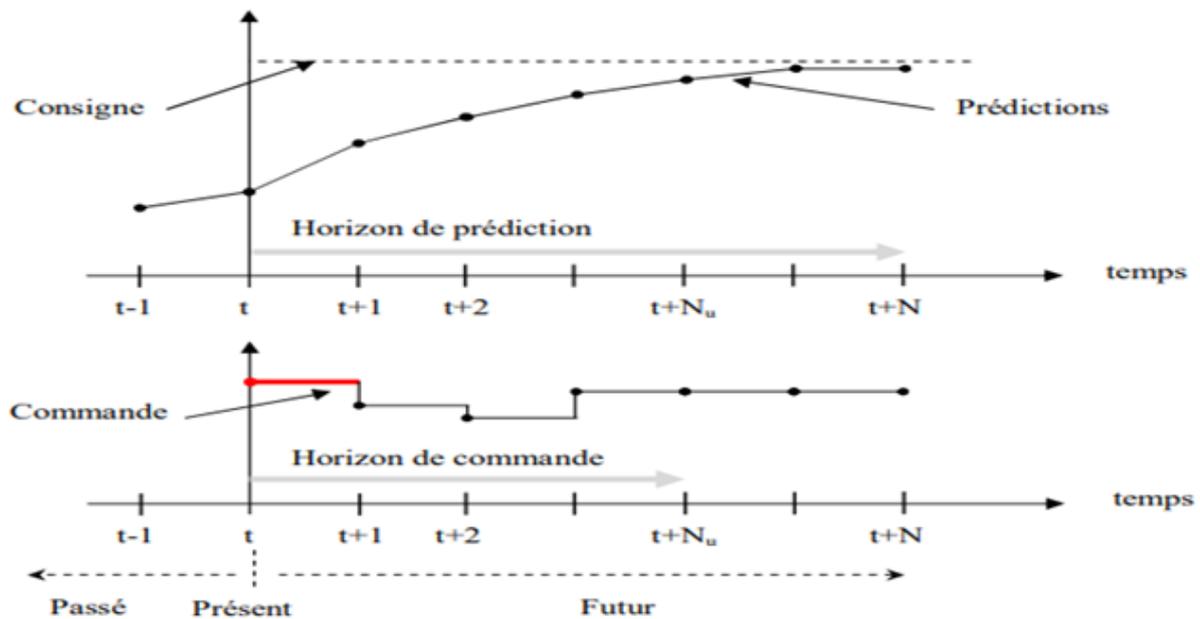


Figure I.1 : Principe de la commande prédictive

I.3.3 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.4 Choix des paramètres de réglage:

La définition du critère quadratique a montré que l'utilisateur doit fixer quatre paramètres de réglage. Ce choix des paramètres s'avère cependant délicat pour une personne qui n'est pas spécialiste, car il n'existe pas des relations empiriques permettant de relier ces paramètres à des indicateurs classiques en automatique.

- **N1** : horizon minimum de prédiction, correspond au retard pur du système, si le retard est connu sinon on convient d'initialiser à 1.
- **N2** : horizon maximum, est choisi de sorte que le produit $N_2 T_e$ soit limité par la valeur du temps de réponse souhaité. En effet augmenter la prédiction au delà du temps de réponse

n'apporte aucune information supplémentaire. Par ailleurs, plus N_2 est grand, plus le système corrigé est stable et lent.

- N_u : horizon de commande, on convient de le choisir égal à 1 et n'excédant pas la valeur deux.
- λ : facteur de pondération de la commande, c'est le paramètre le plus compliqué à régler puisque il influence sur la stabilité du système bouclé. En effet, si λ est très élevé, il permet de pondérer l'influence des commandes dans l'optimisation et ainsi permet de générer un correcteur plus ou moins énergétique donc plus ou moins rapide.

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.

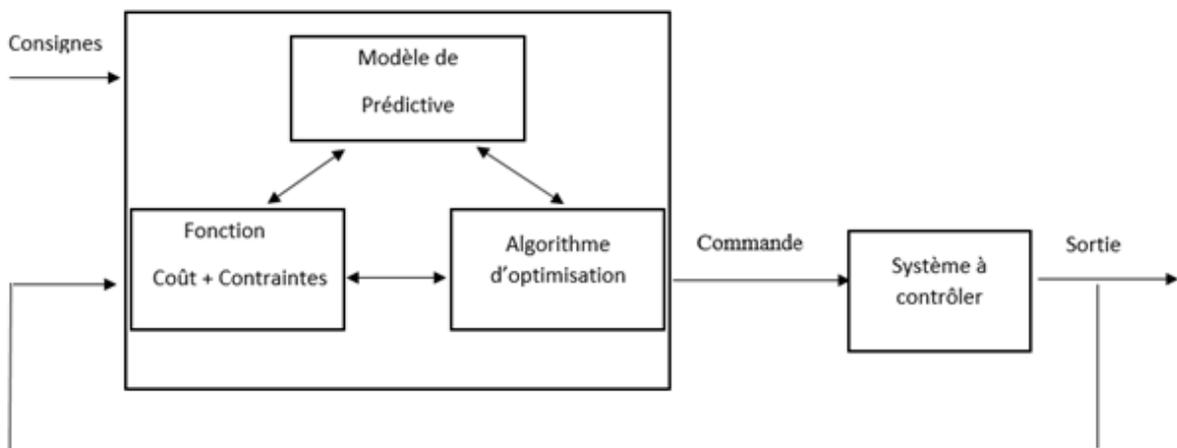


Figure I .2 : Stratégie de la commande prédictive

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.

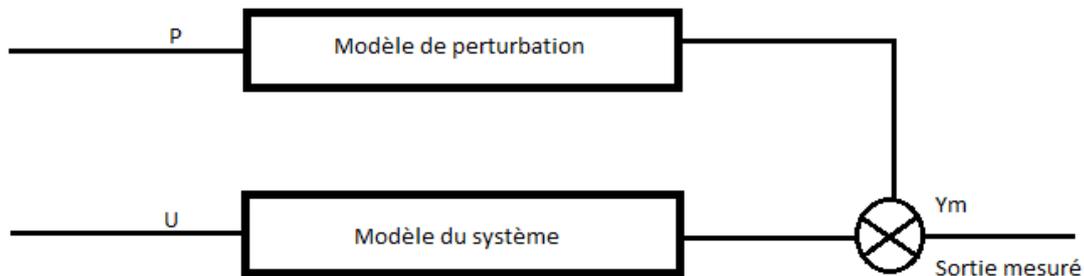


Figure I .3 : Schéma-bloc d'un modèle de prédiction [3].

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).

1.5.2 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 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 l'horizon de prédiction ainsi que la variation de la commande. Cette fonction est donnée par :

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

Avec :

- Q et R sont des matrices de pondération symétriques définies positives.
- Np Horizon de prédiction.
- Nu horizon de commande.
- y^d consigne désirée.
- \hat{y} sortie prédite.

Ce problème est résolu grâce à un algorithme de programmation quadratique qui minimise cette fonction en prenant en compte 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, pendant la phase de synthèse 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 opérationnelle physiques. 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 $j = 1, \dots, Nu$:

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

- 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 $j = 1, \dots, N_p$:

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

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 optimiser 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 intérêt de la commande prédictive :

La plupart des régulations industrielles sont réalisées souvent avec des régulateurs PID analogiques avec une efficacité remarquable et un rapport prix/performance avec lequel il est difficile de les rivaliser. Toutefois, ce type de régulateur ne couvre pas tous les besoins et ses performances souffrent dans un certain champ d'applications dont on cite :

- Les processus difficiles, notamment non linéaires, instables, non stationnaires, à grand Retard purs et aussi multi variables.
- Lorsque les performances sont obtenues par l'utilisateur, notamment : forte atténuation des perturbations, erreur de traînage nulle en poursuite, réponse en temps minimal, ce qui amène à fonctionner sous des contraintes qui affectent soit les variables de commande, soit les variables internes du processus. Ces limitations ont favorisé l'éclosion de la commande prédictive a base de modèle numérique puisque sur le plan technique, l'accessibilité est plus aisée aux calculateurs.

I .7 Différents types de la commande prédictive

I .7.1 Commande Prédictive Généralisée (GPC)

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

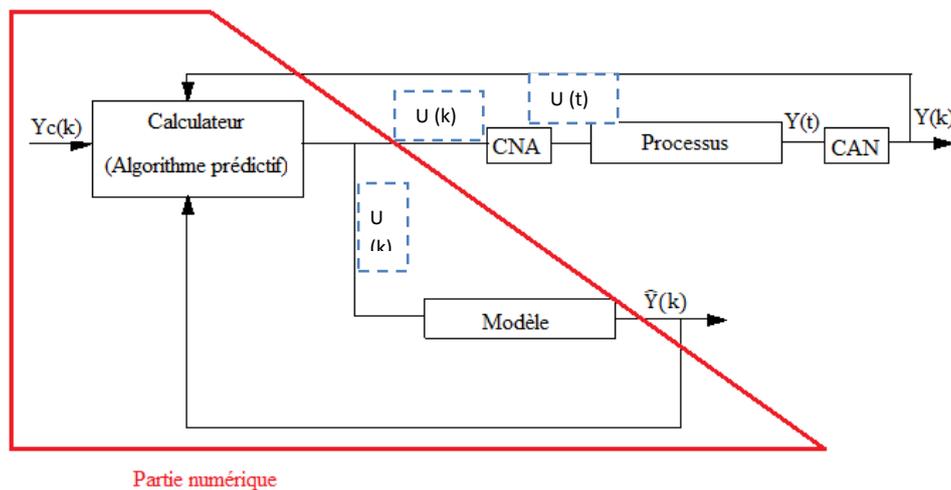


Figure I .3 : Principe du GPC [5].

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 :

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

Avec :

$$A(q^{-1})=1+a_1q^{-1}+a_2q^{-2}+\dots+a_naq^{-na} \tag{I.7}$$

$$B(q^{-1})=b_0+b_1q^{-1}+b_2q^{-2}+\dots+b_n bq^{-nb} \tag{I.8}$$

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

$E(k)$: bruit blanc centré.

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

q^{-1} : opérateur 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 la consigne ou de la perturbation constante.

I .7.1.1 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.

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

Sous l'hypothèse :

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

Quatre paramètres doivent être choisis par l'utilisateur :

λ 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 .7.2 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 .4).

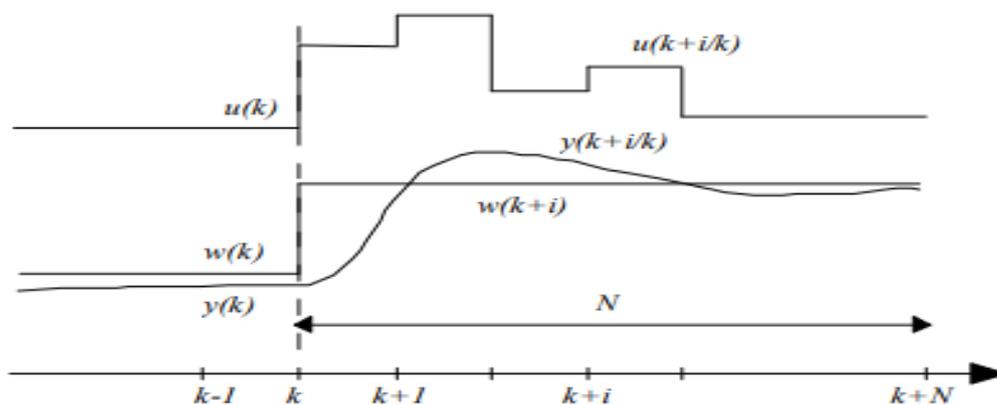


Figure I .4 : La méthodologie du MPC [6].

Où :

k représente le temps discret.

U l'entrée du système au temps k .

w la référence du système au temps k .

y la sortie du système au temps k .

- Formulation du problème d'optimisation : cas général

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

Modèle dynamique du système :

$$u_{k+i} \in X, u_k + i \in U, i = 0:N-1 \quad (\text{I.13})$$

$$u_{k+N} \in X_f \quad (\text{I.14})$$

$$x_k = x(k) \quad (\text{I.15})$$

Modèle du système :

$$x_{k+1} = A x_k + B u_k \quad (\text{I.16})$$

$$y_k = C x + D u_k \quad (\text{I.17})$$

En absence des contraintes

$$u_{k+i} \in X = R^{n+m}, i = 0; N-1 \text{ et } x_{k+n} \in X_f = R^n \quad (\text{I.18})$$

$$u_{k+i} \in U = R^m \quad (\text{I.19})$$

I.8 Avantages et inconvénients de la commande prédictive

Il peut être utile maintenant de considérer l'intérêt de la commande prédictive par rapport aux autres techniques de contrôle couramment utilisées. Bien que l'élégance intrinsèque de la formulation du problème ne puisse être négligée, elle ne saurait justifier une utilisation généralisée de la technique en industrie. Camacho et Bordons (1999) sont d'ailleurs plus éloquents et énumèrent plusieurs avantages de la commande prédictive :

- Elle est particulièrement intéressante pour les ingénieurs n'ayant qu'une connaissance limitée en contrôle parce que les concepts sont très intuitifs et que le réglage est très simple.
- Elle peut être utilisée pour une grande variété de procédés, peu importe la complexité de la dynamique (long retard, phase non minimale, système instable).
- Les cas multi variables peuvent être facilement traités.
- La compensation pour les retards est faite de façon intrinsèque.
- La compensation par anticipation des perturbations mesurées se fait aisément.
- Les contrôleurs linéaires résultants sont faciles à implanter.
- Le traitement des contraintes est conceptuellement simple et il peut être inclus systématiquement lors du processus de conception.
- Elle est très pratique lorsque les consignes futures sont connues (en robotique ou pour les procédés discontinus).
- Numériquement stable [7].
- Il s'agit d'une méthodologie complètement ouverte dont les principes de base permettent des extensions futures [8].

En contrepartie toutefois, ils existent quelques inconvénients pour ces méthodes :

- L'obtention de la loi de commande demande un effort de calcul beaucoup plus grand que dans le cas d'un régulateur PID conventionnel.
- Dans le cas adaptatif, tous les calculs pour obtenir la loi de commande doivent être repris à chaque période d'échantillonnage.
- Lorsque des contraintes d'opération sont prises en considération, la solution devient itérative et les temps de calcul peuvent devenir très importants.

I .8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit la commande prédictive, puis nous avons parlé du principe de fonctionnement de cette dernière et ses éléments. Nous avons aussi observé deux méthodes pour la commande prédictive, la commande prédictive généralisée (GPC) et la commande prédictive a base d'un modèle d'état (MPC).

Dans le chapitre deux nous allons parler sur la modélisation des robots.

Chapitre II

II.1 Introduction

Un robot est un dispositif mécatronique conçu pour accomplir automatiquement des tâches imitant ou reproduisant, dans un domaine précis, des actions humaines. La conception de ces systèmes est l'objet d'une discipline scientifique, branche de l'automatisme nommée robotique. 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.

II.2 Définition d'un robot

Un robot est une machine, dotée d'une mémoire et d'un programme, capable de se mouvoir et d'agir seul, apte à remplacer l'homme dans certains travaux minutieux ou pénibles.

L'Association Française de NORmalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent (à usage multiples), à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un ou plusieurs bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel.

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 [7].

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.

Le robot a les caractéristiques suivantes :

- Modifier physiquement son environnement pour atteindre le but qui lui fixé (la tâche désiré).
- Peut exécuter une tâche donnée de plusieurs manières et/ou des tâches variées (flexibilité).
- Peut s'adapter seule aux variations de son environnement, de telle sorte que la tâches soit correctement exécute en dépit de ces variations.

II.3 Classification des robots

La classification des robots est délicate selon leurs fonctionnalités et leurs potentialités. Les robots peuvent être classés en trois grandes catégories :

II.3.1 Les manipulateurs :

Les manipulateurs sont des systèmes mécaniques destiné à exécuter de manière autonome des tâches répétitives dans un environnement fixe et ordonné et dont les mouvements enregistrés dans une mémoire se répètent de manière cyclique, aucune fonction de décision ne lui permet de réagir dans le cas d'un évènement inattendu, c'est pour ça ils sont appelés (automate). Les domaines d'application des manipulateurs sont : la peinture, le soudage par position, la manipulation des objets. . . .etc.

II.3.2 Les télémanipulateurs :

Le télémanipulateur ou robot de téléportation apparus vers 1945 en USA, est un système mécanique polyarticulé et Multifonctionnel capable d'assister l'homme dans les opérations effectuées en milieu hostile ou supplée un handicap. Il est constitué par deux entités : Un bras maître et un bras esclave. Le bras esclave reproduit instantanément le mouvement imposé par un opérateur a un bras maître. Ce dernier est constitué d'une boîte à boutons, d'une poignée de commande ou d'une structure articulée identique à celle du bras esclave. Malgré la présence indispensable d'un opérateur, ce système est doté de potentialité comparable aux robots évolués :

- Prise de décision lors de vision réduite.
- Retour d'effort vers le bras maître.
- Amplification ou atténuation des mouvements.
- Autonomie de l'esclave pour alléger la charge de travail à l'homme.
- Création de mouvements élémentaires autonomes.

L'application des télémanipulateurs est répandue dans les domaines nucléaires (manipulation des produits radioactifs), spatial (exploration des planètes), sous-marin (forage), militaire (déminage) et médical (prothèse).

II.3.3 Les robots :

Pour cette classe on peut distinguer :

- Les robots manipulateurs industriels :

Un robot manipulateur industriel constitue l'association d'un manipulateur et d'organes apte à acquérir, traiter et gérer des informations issues de l'environnement. Ils sont dotés de sens artificiels (vision, tactile. . .) et de ressources méthodologiques leur permettant de résoudre des problèmes de difficultés toutefois limitées. Ces robots sont essentiellement orientés vers les applications nécessitent une adaptabilité a la tâche : assemblage, soudage à l'arc, vérification, test. . . etc.

- Les robots didactiques :

Sont de version ou format réduite des robots. Ils ont un rôle de formation et d'enseignement, ils peuvent aussi être utilisés pour effectuer des tests de faisabilités d'un poste robotisée.

- Les robots mobiles autonomes :

Les possibilités sont plus vastes, du fait de leur mobilité. Notamment, ils peuvent être utilisés en zone dangereuse (nucléaire, incendie, sécurité civil, déminage...etc), inaccessible (océanographie, spatial), de tels robots font appel à des capteurs et a des logiciels sophistiqués. On peut distinguer deux types de locomotion : les robots marcheurs qui imitent la démarche humaine, et les robots mobiles qui ressemblent plus à des véhiculées [8].

II. 4 Constituants d'un robot

Tous les robots ont trois types de composants:

- Système de contrôle: tel qu'une carte contrôleur.
- Capteurs: ils peuvent lire des informations sur l'environnement ou le robot lui-même.
- Actionneurs: ils produisent un effet sur l'environnement ou le robot.



Figure I I .1 : constitution d'un robot.

On distingue classiquement 4 parties principales dans un robot manipulateur :

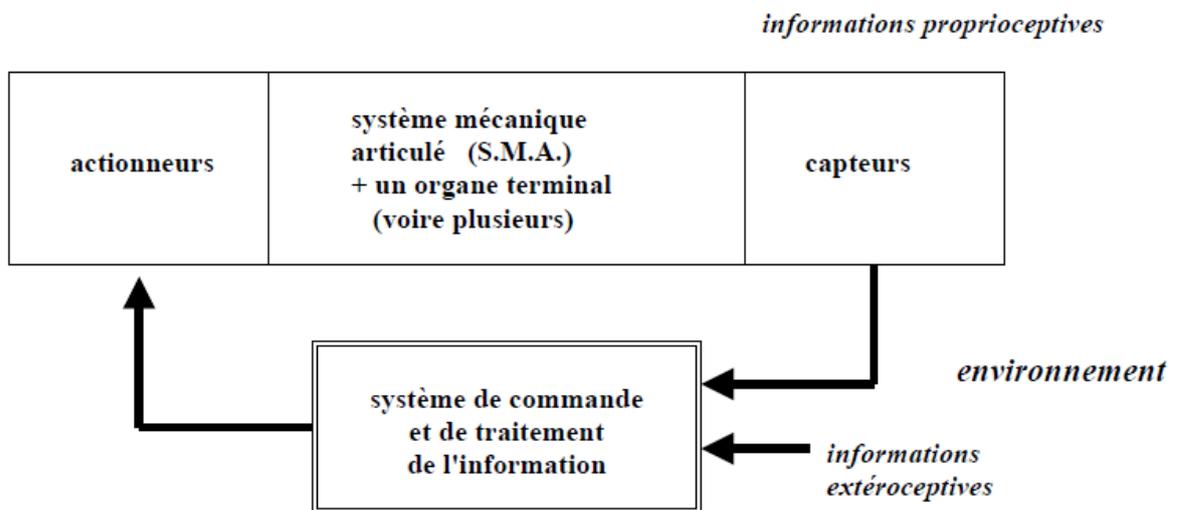


Figure I I .2: Les composants de robot.

Sous le terme organe terminal, on regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, ...), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, ...). En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. Un organe terminal peut être multifonctionnel, au sens où il peut être équipé de plusieurs dispositifs ayant des fonctionnalités différentes. Il peut aussi être monofonctionnel, mais interchangeable. Un robot, enfin, peut-être multi-bras, chacun des bras portant un organe terminal différent. On

utilisera indifféremment le terme organe terminal, préhenseur, outil ou effecteur pour nommer le dispositif d'interaction fixé à l'extrémité mobile de la structure mécanique.

Le système mécanique articulé (S.M.A.) est un mécanisme ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain. Il permet de remplacer, ou de prolonger, son action (le terme "manipulateur" exclut implicitement les robots mobiles autonomes). Son rôle est d'amener l'organe terminal dans une situation (position et orientation) donnée, selon des caractéristiques de vitesse et d'accélération données. Son architecture est une chaîne cinématique de corps, généralement rigides (ou supposés comme tels), assemblés par des liaisons appelées articulations. Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés. Précisons la notion d'articulation: Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit m le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité d'une articulation est telle que :

$$0 \leq m \leq 6 .$$

Lorsque $m = 1$; ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple: soit rotoïde, soit prismatique.

Articulation rotoïde: Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée R , réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe (voir la figure suivante).

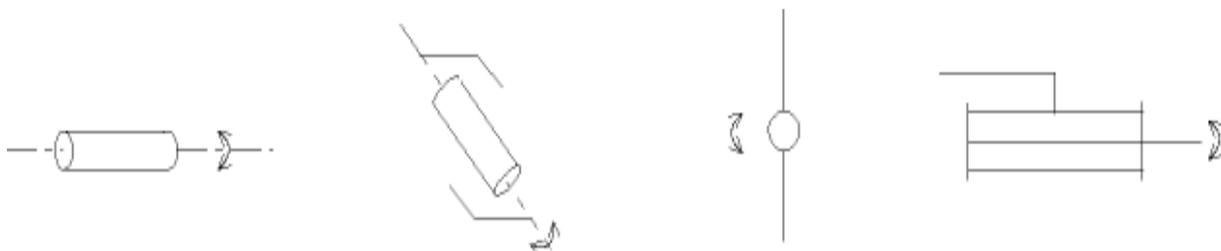


Figure I I .3 : Symbole de l'articulation rotoïde.

Articulation prismatique: Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée P , réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe (voir la figure suivante).



Figure I I .4 : Symbole de l'articulation prismatique.

Remarque : Une articulation complexe, *i.e.*, avec une mobilité supérieure à 1, peut toujours se ramener à une combinaison d'articulations prismatique ou rotoïde. Par exemple, une rotule est obtenue avec trois articulations rotoïdes dont les axes sont concourants.

Pour être animé, le S.M.A. comporte des moteurs le plus souvent avec des transmissions (courroies crantées), l'ensemble constitue les actionneurs. Les actionneurs utilisent fréquemment des moteurs électriques à aimant permanent, à courant continu, à commande par l'induit (la tension n'est continue qu'en moyenne car en général l'alimentation est un hacheur de tension à fréquence élevée ; bien souvent la vitesse de régime élevée du moteur fait qu'il est suivi d'un réducteur, ce qui permet d'amplifier le couple moteur). On trouve de plus en plus de moteurs à commutation électronique (sans balais), ou, pour de petits robots, des moteurs pas à pas. Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérin hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique).

Les actionneurs pneumatiques sont d'un usage général pour les manipulateurs à cycles (robots tout ou rien). Un manipulateur à cycles est un S.M.A. avec un nombre limité de degrés de liberté permettant une succession de mouvements contrôlés uniquement par des capteurs de fin de course réglables manuellement à la course désirée (asservissement en position difficile dû à la compressibilité de l'air).

La perception permet de gérer les relations entre le robot et son environnement. Les organes de perception sont des capteurs dits proprioceptifs lorsqu'ils mesurent l'état interne du robot (positions et vitesses des articulations) et extéroceptifs lorsqu'ils recueillent des informations sur l'environnement (détection de présence, de contact, mesure de distance, vision artificielle).

La partie commande synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs, à partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur. S'ajoutent à cela :

L'interface homme-machine à travers laquelle l'utilisateur programme les tâches que le robot doit exécuter.

Le poste de travail, ou l'environnement dans lequel évolue le robot.

II.5 Caractéristiques d'un robot

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici quelques paramètres à prendre, éventuellement, en compte :

- La charge maximum transportable (de quelques kilos à quelques tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximum).
- L'architecture du S.M.A., le choix est guidé par la tâche à réaliser.
- Le volume de travail, défini comme l'ensemble des points atteignables par l'organe terminal. Tous les mouvements ne sont pas possibles en tout point du volume de travail. L'espace de travail également appelé espace de travail maximal, est le volume de l'espace que le robot peut atteindre via au moins une orientation. L'espace de travail dextre est le volume de l'espace que le robot peut atteindre avec toutes les orientations possibles de l'effecteur (organe terminal). Cet espace de travail est un sous-ensemble de l'espace de travail maximal.
- Le positionnement absolu, correspondant à l'erreur entre un point souhaité (réel) – défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien – et le point atteint et calculé via le modèle géométrique inverse du robot. Cette erreur est due au modèle utilisé, à la quantification de la mesure de position, à la flexibilité du système mécanique. En général, l'erreur de positionnement absolu, également appelée précision, est de l'ordre de 1 *mm*.
- La répétabilité, ce paramètre caractérise la capacité que le robot a à retourner vers un point (position, orientation) donné. La répétabilité correspond à l'erreur maximum de positionnement sur un point prédéfini dans le cas de trajectoires répétitives. En général, la répétabilité est de l'ordre de 0,1 *mm*.
- La vitesse de déplacement (vitesse maximum en élongation maximum), accélération.
- La masse du robot.
- Le coût du robot.
- La maintenance,

II.5.1 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) [9].

II.5.2 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 , 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.5.3 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 décrire la situation de l'organe terminal dans l'espace cartésien [10].

II.6 Modélisation des robots manipulateurs

II.6.1 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 articulaires donnant la position articulaire.

II.6.2 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.6.3 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 jacobienne $J \in R^{n_x \times n_q}$

\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.6.4 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.6.5 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 :

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

Γ : 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.6.6 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.6.7 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 :

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

Avec :

$$L = E_c - E_p$$

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

τ_i : La force ou le couple généralisé à la *i*ème articulation.

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

\dot{q}_i : Le dérivé de la coordonnée généralisée.

L : Lagrangien du système.

E_c : Énergie cinétique totale du système.

E_p : Énergie potentielle totale du système.

II.7 Modélisation d'un robot à 3 axes

II.7.1 Description de robot

Un robot cartésien ou un robot de coordonnées cartésiennes (également connu sous le nom de robot linéaire) est un robot industriel avec trois axes de contrôle principaux qui sont tous linéaires (ce qui signifie qu'ils se déplacent le long d'une ligne droite plutôt que de tourner) et mutuellement perpendiculaires les uns aux autres. Les 3 articulations coulissantes vous permettent de déplacer votre poignet de haut en bas, de va-et-vient et d'avant en arrière. Dans l'espace 3D, il est incroyablement fiable et précis. Il est également utile pour les mouvements horizontaux et l'empilage de bacs en tant que système de coordonnées de robot.



Figure II.5 : Robot cartésien portique tecno-840.

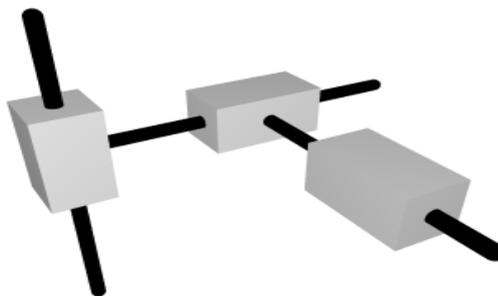


Figure II.6 : Schéma descriptif du robot.

La figure (II.6) représente les trois plans X,Y et Z de robot manipulateur.

II.7.2 Modélisation géométrique directe

La modélisation géométrique directe (MGD) permet le calcul des coordonnées cartésiennes telles que les positions, l'orientation du poignet (l'organe terminale et l'effecteur) en fonctions des véritables articulations, dans ce cas ci la MGD est représenté comme suite :

$$\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (\text{II.8})$$

II.7.3 Modélisation géométrique inverse

Le model géométrique inverse (MGI) est un model mécanique qui permet de déterminer la configuration des liaisons, en fonctions des configurations de l'effecteur d'un robot (positions, orientations) cette modélisation est une dérivé directe de la (MGD). Elle est représenté par cette relation :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} \quad (\text{II.9})$$

II.7.4 Modélisation cinématique

La modélisation cinématique est obtenue en dérivant la transformation de l'espace articulaire a l'espace opérationnel, elle représente la relation entre les vitesses articulaires du robot et les vitesses cartésiennes de l'effecteur.

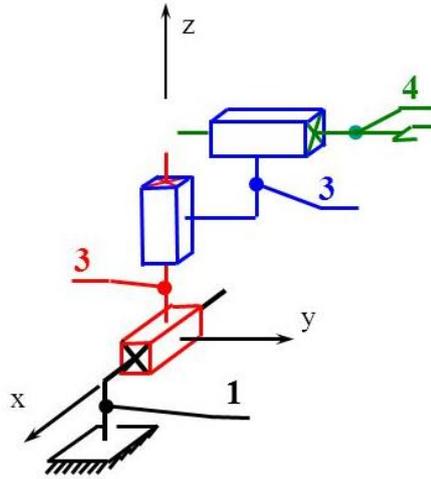


Figure III.7 : Schéma explicatif pour les 3 axes du robot manipulateur

Selon x , la force appliquée est F , on a un moteur qui tourne avec θ et l'objet a une masse m de 10 kg.

On appliquant les équations de newton-Euler :

$$m\ddot{x} = F - f\dot{x} - kx \quad (\text{II.10})$$

F : la force appliqué

f : les coefficients de frottement

k : la raideur de l'arbre

$$m\ddot{x} + f\dot{x} + kx = F \quad (\text{II.11})$$

sachant que

$$x = r \theta \quad (\text{II.12})$$

r : le rapport de passage

L'équation de moteur devient :

$$I_{mot} \ddot{\theta} + f_{mot} \dot{\theta} + k_{mot} \theta = \Gamma - \Gamma_r \quad (\text{II.13})$$

Avec $\Gamma_r = r F$

Γ : le couple

$$I_{mot} \ddot{\theta} + f_{mot} \dot{\theta} + k_{mot} \theta = \Gamma - r F \quad (\text{II.14})$$

$$\text{Et } F = \frac{\Gamma r}{r}$$

$$\text{Et } \theta = \frac{x}{r}$$

Donc remplacent θ par sa valeur dans l'équation (II.14) on aura :

$$I_{mot} \ddot{x} + f_{mot} \dot{x} + k_m x = \Gamma - r(m \ddot{x} + f \dot{x} + kx) \quad (\text{II.15})$$

$$\Gamma = k_m \times u$$

Alors

$$(I_{mot} + r^2 m) \ddot{x} + (f_{mot} + r^2 f) \dot{x} + (f_{mot} + r^2 k) x = r k_m \times u \quad (\text{II.16})$$

Ces équations représentent chacune des trois articulations du notre robot cartésien en fonctions de la modélisation cinématique de ce dernier, elles sont représentées par ses équations ci-dessous :

Equation de l'articulation 1 :

$$(I_{mot1} + r_1 m_1) \ddot{x} + (f_{mot1} + r^2 f_1) \dot{x} + (k_{mot1} + r_1 k_1) x = r_1 k_m u_1 \quad (\text{II.17})$$

Equations de l'articulation 2 :

$$(I_{mot2} + r_2 m_2) \ddot{y} + (f_{mot2} + r^2 f_2) \dot{y} + (k_{mot2} + r_2 k_2) y = r_2 k_m u_2 \quad (\text{II.18})$$

Equation de l'articulation 3 :

$$(I_{mot3} + r_3 m_3) \ddot{z} + (f_{mot3} + r^2 f_3) \dot{z} + (k_{mot3} + r_3 k_3) z = r_3 k_m u_3 \quad (\text{II.19})$$

Donc :

$$(I_{mot} + r m) \ddot{q} + (f_{mot} + r^2 f) \dot{q} + (k_{mot} + r k) q = r k_m u \quad (\text{II.20})$$

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_1 \\ \dot{q}_1 \\ q_2 \\ \dot{q}_2 \\ q_3 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ z \\ \dot{z} \end{pmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Nous avons :

$$x_1 = q_1$$

$$x_2 = \dot{q}_1 = \dot{x}_1$$

$$\dot{x}_1 = x_2$$

De plus

$$(I_{mot} + r m)\ddot{x}_2 + (f_{mot} + r^2 f)\dot{x}_2 + (f_{mot} + r k)x_1 = r \Gamma = r k_m \times u \quad (\text{II.22})$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{I_{mot} + r^2 k} [(k_{mot} + r^2 k)x_1 - (f_{mot} + r^2 f)x_2 + r k_m u] \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{k_{mot} + r^2 k_1}{I_{mot} + r^2 m_1} x_1 - \frac{f_{mot} + r^2 f_1}{I_{mot} + r^2 m_1} x_2 + \frac{r k_m}{I_{mot} + r^2 m_1} u_1 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_{mot} + r^2 k_1}{I_{mot} + r^2 m_1} & \frac{f_{mot} + r^2 f_1}{I_{mot} + r^2 m_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{r k_m}{I_{mot} + r^2 m_1} \end{bmatrix} u_1 \quad (\text{II.25})$$

Les équations des trois articulations deviennent :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\frac{k_{mot1} + r_1^2 k_1}{I_{mot1} + r_1^2 m_1} x_1 - \frac{f_{mot1} + r_1^2 f_1}{I_{mot1} + r_1^2 m_1} x_2 + \frac{r_1 k_{m1}}{I_{mot1} + r_1^2 m_1} u_1 \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = -\frac{k_{mot2} + r_2^2 k_2}{I_{mot2} + r_2^2 m_2} x_3 - \frac{f_{mot2} + r_2^2 f_2}{I_{mot2} + r_2^2 m_2} x_4 + \frac{r_2 k_{m2}}{I_{mot2} + r_2^2 m_2} u_2 \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = -\frac{k_{mot3} + r_3^2 k_3}{I_{mot3} + r_3^2 m_3} x_5 - \frac{f_{mot3} + r_3^2 f_3}{I_{mot3} + r_3^2 m_3} x_6 + \frac{r_3 k_{m3}}{I_{mot3} + r_3^2 m_3} u_3 \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

III.8 Conclusion :

Dans ce chapitre deux, nous avons défini ce qu'est un robot, puis la classification des robots. Nous avons aussi présenté la constitution et les caractéristiques des robots. Ainsi que la modélisation d'un robot de façon générale, pour finir avec la modélisation d'un robot manipulateur industrielle cartésien à 3ddl.

Chapitre III

III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter l'application par la simulation de la commande prédictive sur un robot cartésien à 3 axes ddl et les différentes tests de performances de ces régulateurs (PID, GPC, MPC).

III.2 schéma simulink de robot

La figure ci-dessus illustre le schéma simulink de robot :

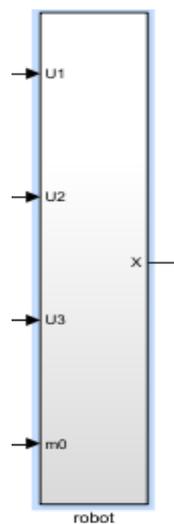


Figure III.1 : schéma simulink pour robot.

Le schéma ci-dessous montre le bloc de robot

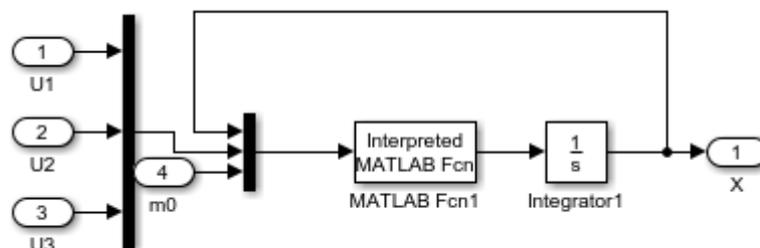


Figure III.2 : bloc robot.

III.3 Régulateur PID

Le régulateur PID est très répandu dans le domaine industriel. Il constitue l'outil standard de la commande de nombreux procédés industriels. Conçu initialement en technologie analogique (hydraulique pneumatique, électronique) par la suite il fut transposé en numérique pour pouvoir être implanté sur ordinateur dans le but d'améliorer les performances des systèmes bouclés en premier (précision, stabilité, rapidité, et sensibilité aux incertitudes du modèle), puis en deuxième lieu pour allonger la période d'échantillonnage.

Les acronymes PID signifient les trois actions de base du régulateur : proportionnelle, intégrateur et dérivée.

III.4 Commande MPC

La MPC est une technologie de commande, elle est compatible dans le fait qu'à chaque temps d'échantillonnage le signal de commande découle de la résolution d'un problème d'optimisation. L'instant qui suit la nouvelle sortie est disponible et en conséquence l'étape une vas se répéter. Nous appelons ceci comme le concept de l'horizon fuyant ou mobile.

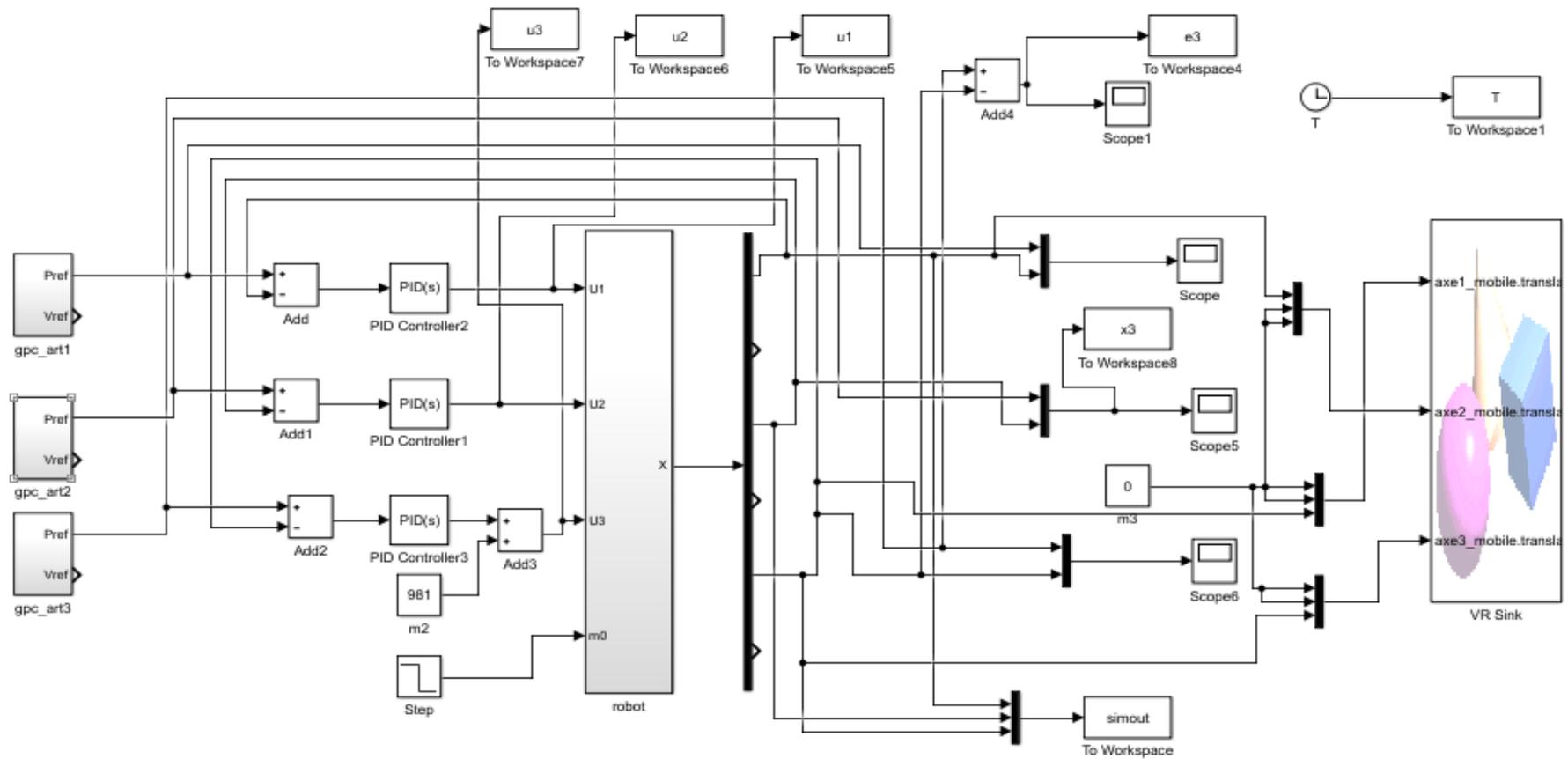
III.5 Commande GPC

La GPC est caractérisée par des paramètres, l'horizon de prédiction, intrinsèque et extrinsèque au système. Sa loi de commande résulte de la minimisation d'un critère quadratique basée sur l'erreur de prédiction entre la sortie choisie et le signal de référence correspondant.

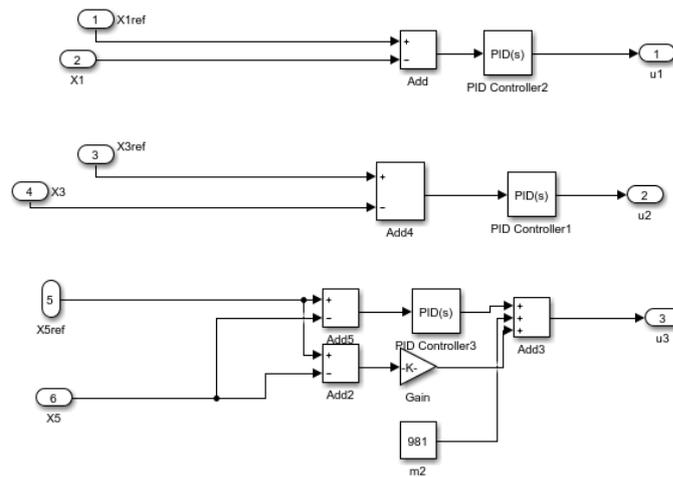
III.6 Simulation sous l'environnement Matlab/Simulink

III.6.1 Commande par PID

Nous utilisons trois régulateurs PID chacun de ses derniers commandent une articulation du robot manipulateur cartésien utilisé. Comme montré dans la figure suivante :



Figures III.1 : Schéma de bloc avec régulateurs PID.



Figures III.4 : Régulateurs PID.

Le schéma ci-dessous montre le bloc qui relie le régulateur PID et la sortie du système.

III.6.2 Commande par MPC

La différence notable qui se trouve entre la commande MPC et la commande GPC est que la première prend en considération les contraintes sur les entrées c'est-à-dire elle prend en compte les références, les sorties (la commande), et les perturbations des systèmes, pour l'application de cette commande sur le robot manipulateur industriel cartésien à 3 ddl, nous avons utilisé le Toolbox Model Predictive Control sous Matlab/Simulink.

Pour utiliser cette méthode nous avons besoin de connaître précisément le modèle de chaque sous systèmes pour pouvoir déterminer le régulateur adéquat. Dans ce cas de figure nous avons trois régulateurs MPC et chacun d'entre eux est utilisé pour commander une des trois articulations du robot manipulateur.

Pour faire la synthèse avec le ToolBox Model Prédictive Control nous avons suivie les étapes suivantes :

1. Nous avons déterminé les systèmes à contrôler dans le Workspace de MATLAB, dans notre cas nous n'avons qu'un seul sous-système.
2. Créé les contrôleurs MPC (MPC1, MPC2, MPC3) dans le workspace.
3. Chargé les contrôleurs sur le bloc des paramètres.

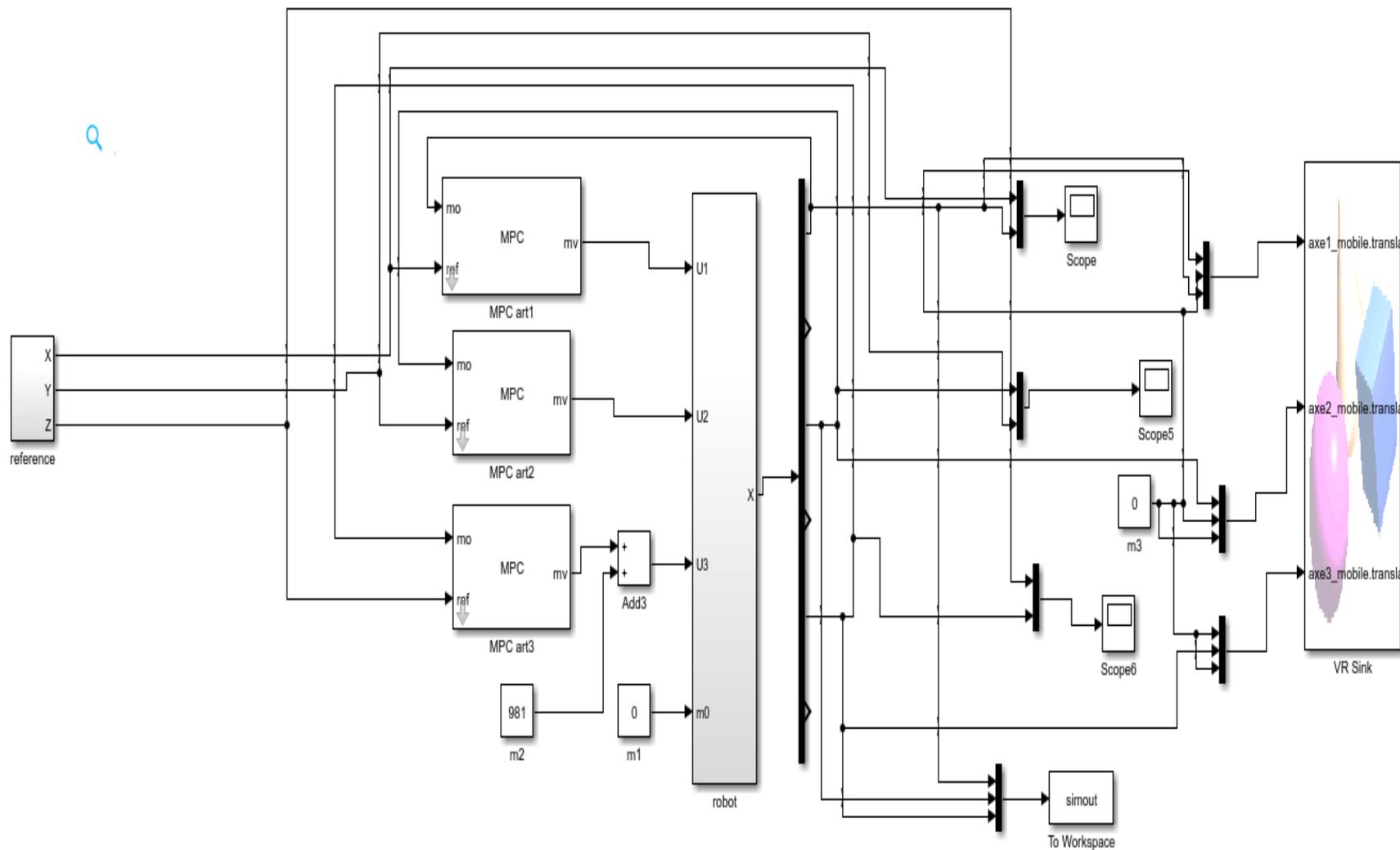


Figure III.4 : Schéma du bloc de simulation de la commande MPC.

III.6.3 Commande par GPC

Ici nous allons voir le schéma simulink de la commande GPC utilisée pour commander les trois articulations du robot. La figure III.3 (page 32) illustre la commande GPC

La trajectoire qui est un mouvement oint-à-point est générée par le schéma bloc ci-après.

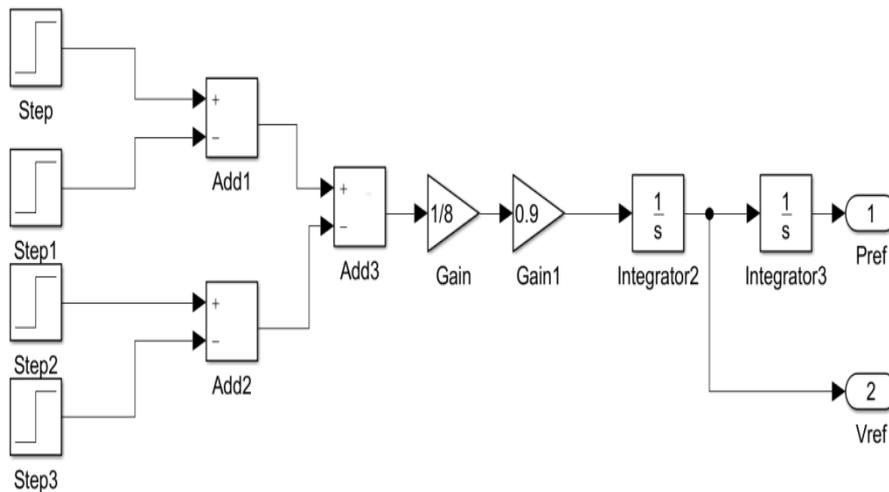


Figure III.6 : Schéma pour la génération de trajectoire.

Dans cette figure nous vous présentons le sous-système de la GPC, après avoir retiré les blocs de la MPC nous introduisons les sous systèmes de la GPC crée a cette effet pour commander le système.

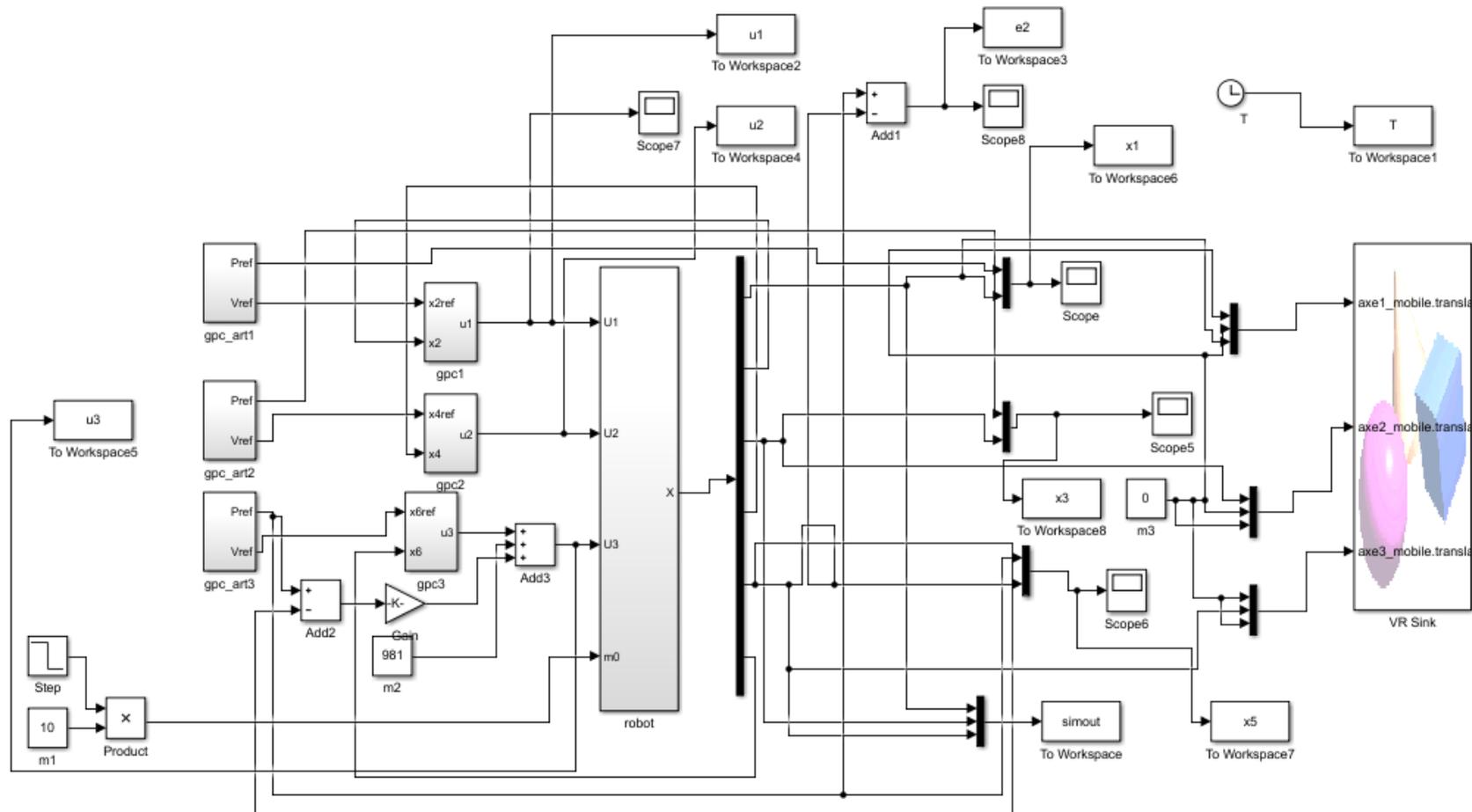


Figure III.4 : Schéma du bloc de simulation de la commande GPC.

III.7 Résultat de simulation

La durée de simulation est de 12 s ou le robot passe d'un point à autre selon un profil bien défini. Le robot prend une masse de 10 kg de 0 s à 5. Cette masse tombe à $t = 5$ s et le robot continue sa trajectoire de 5 s à 12 s.

III.6.1 Simulation et interprétation des résultats pour le régulateur PID

La figure suivante présente les résultats obtenus dans le cas de commande par PID.

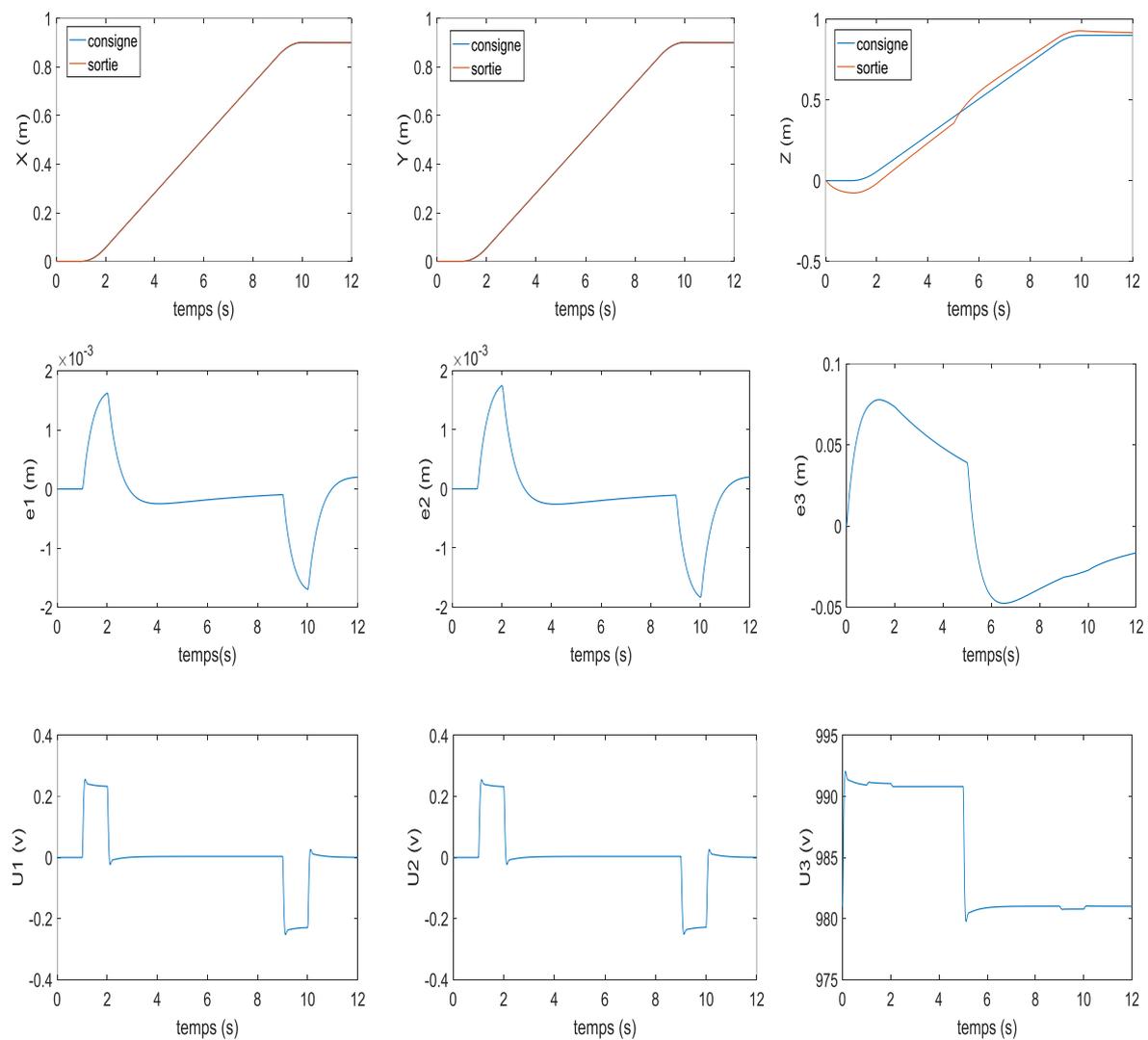


Figure III.8 : Signaux (position, erreur, commande) obtenus par la commande par PID.

La figure (III.8) présente les consignes et les réponses en fonction de temps ainsi que les erreurs de la poursuite et la commande, on remarque que la poursuite est assurée avec des erreurs de l'ordre $-2 * 10^{-3} m$ et $-2* 10^{-3} m$ dans le plan X et Y et 0.1 dans le plan Z. Ces erreurs sont dues à la présence de la masse de 10 kg puisqu'en fait les régulateurs PID sont dimensionnés sans la considération de cette masse.

III.7.2 Simulation et interprétation des résultats pour le régulateur MPC

La figure suivante présente les résultats obtenus dans le cas de commande par MPC.

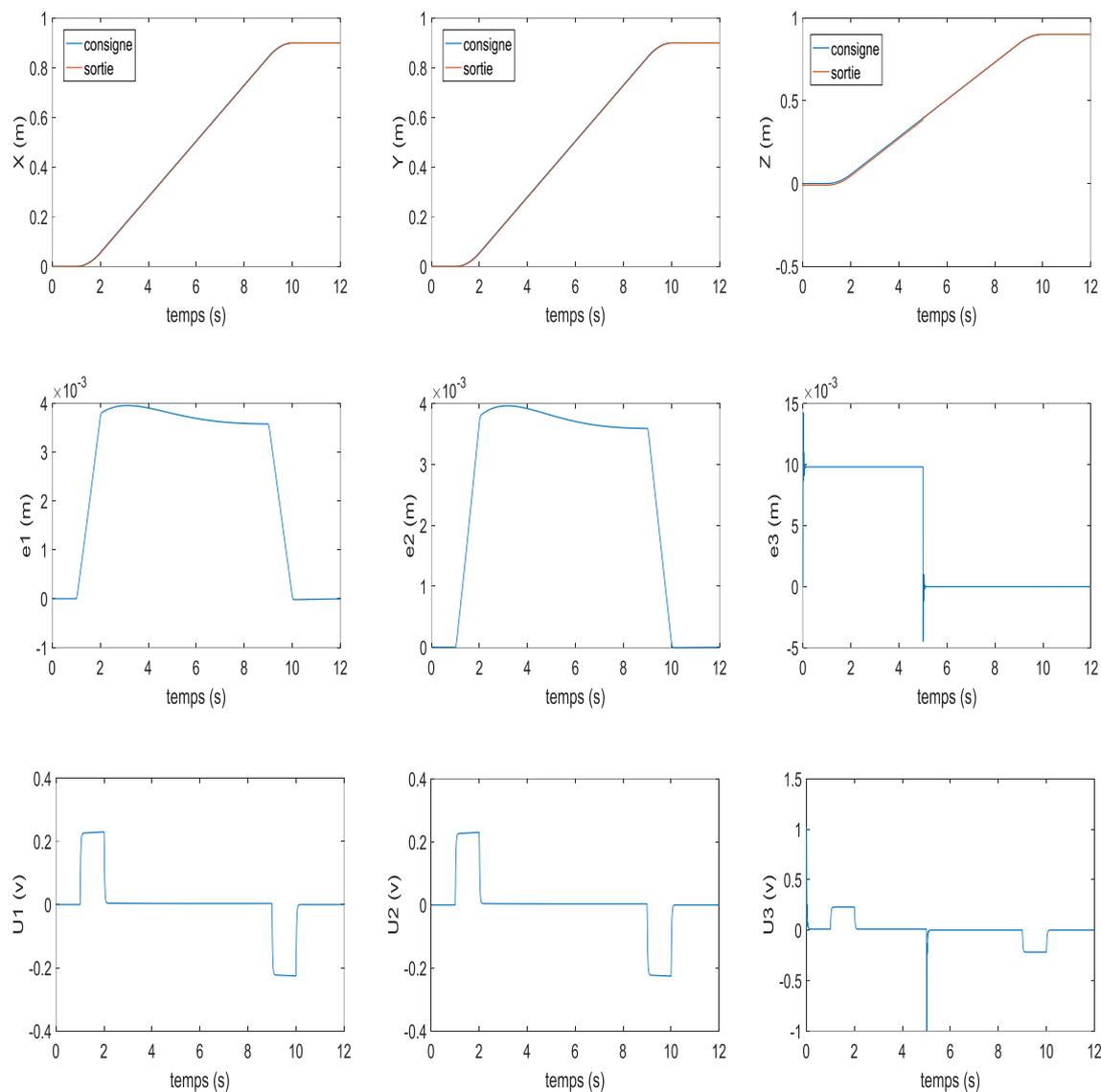


Figure III.9 : Signaux (position, erreur, commande) obtenus par la commande MPC

La figure (III.9) présente respectivement la position, l'erreur et la commande en fonction de temps. On remarque que la réponse des trajectoires suit sa référence avec des erreurs d'ordre $4 \cdot 10^{-3}$ pour l'axe X et Y et $15 \cdot 10^{-3}$ pour l'articulation Z. il y a une amélioration par rapport à la commande PID.

III.7.3 Simulation et interprétation des résultats pour le régulateur GPC

La figure suivante présente les résultats obtenus dans le cas de commande par GPC.

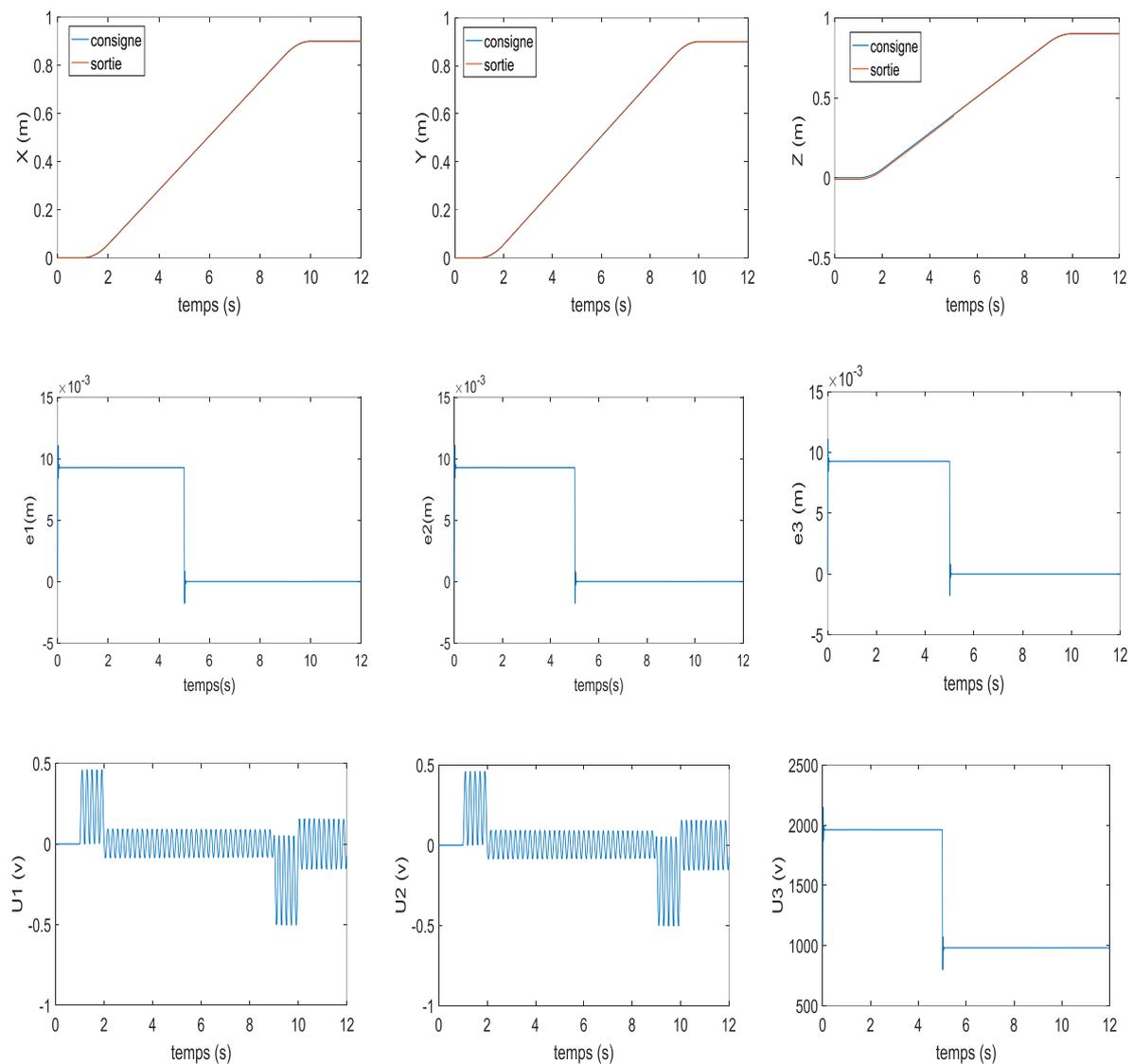


Figure III.10 : signaux (position, erreur, commande) obtenu par la commande GPC.

La figure (III.10) représente la position, l'erreur et la commande en fonctions de temps pour les trois articulations du robot x, y et z. On remarque que la sortie suit parfaitement la consigne avec une faible erreur qui s'annule rapidement dans le temps. Nous constatons aussi que l'erreur sur l'axe Z diminue par rapport à la MPC.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué trois méthodes de la commande sur le robot, le PID, la commande prédictive généralisée GPC et la commande prédictive par modèle d'état MPC dans le but de comparer les résultats de ces trois commandes, les résultats de simulation obtenus montrent que les deux méthodes donnent des résultats satisfaisants.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons présenté trois techniques différentes de la commande prédictive appliquées sur un robot manipulateur cartésien à 3 ddl.

Après avoir présenté le principe de la commande prédictive puis nous avons défini ses différentes techniques de commande (MPC, GPC), ces techniques exploitent des prédictions sur le comportement futur d'un système et un certain critère à minimiser.

Nous avons aussi parlé de certaines notions de base pour l'étude d'un robot manipulateur, nous avons défini sa structure sa modélisation. Par la suite nous avons utilisé un régulateur PID pour contrôler les articulations du robot manipulateur et simuler sous l'environnement Matlab/simulink nous avons ensuite retiré le régulateur PID et nous l'avons remplacé par la commande MPC puis GPC pour comparer les résultats obtenus, nous avons constaté que la commande GPC donne des résultats satisfaisants, elle est plus robuste par comparaison avec les deux autres.

En perspective, nous proposons d'étendre ce travail par l'utilisation de la commande guidée par les données ou le calcul des paramètres de la GPC sera remplacé par des techniques basées sur les données concernant le système sous commande.

Annexes

ANNEXE A

Les paramètres de robot que nous avons utilisés dans les simulations sont :

```
function dX= robot (XUM)
X= XUM(1:6);
U= XUM(7:9);
m0= XUM(10);

g=9.81;

masse1 =10 ;
masse2 =10 ;
masse3 =10 ;

m1= masse2 + masse3 + m0 ;
m2= masse3 + m0 ;
m3= masse3 + m0 ;

Imot1=0.2;
Imot2=0.2;
Imot3 =0.2;

r1 = 0.01;
r2 = 0.01;
r3 = 0.01;

Km1 = 10;
Km2 = 10;
Km3 = 10;

Kmot1 = 0;
Kmot2 = 0;
Kmot3 = 0;

k1 = 0;
k2 = 0;
k3 = 0;
```

```
Fmot1= 0;
Fmot2= 0;
Fmot3= 0;
f1 = 30;
f2 = 30;
f3 = 30;

dX(1)= X(2);
dX(2)= 1/(Imot1+r1^2*m1)*(-(Kmot1+r1^2*k1)*X(1)-
(Fmot1+r1^2*f1)*X(2)+(r1*Km1*U(1)));
dX(3)= X(4);
dX(4)= 1/(Imot2+r2^2*m2)*(-(Kmot2+r2^2*k2)*X(3)-
(Fmot2+r2^2*f2)*X(4)+(r2*Km2*U(2)));
dX(5)= X(6);
dX(6)= 1/(Imot3+r3^2*m3)*(-(Kmot3+r3^2*k3)*X(5)-
(Fmot3+r3^2*f3)*X(6)+(r3*Km3*U(3)-m3*g));

end
```

ANNEXE B

Programme sous matlab gpc_1 :

```
function du = gpc1(ryu)
global hh1
r= ryu(1);
y= ryu(2);
dup= ryu(3);

N=10;
Nu =3;
lambda=0.001;

a0=0.9999;
b0=0.00495;

h=hh1(2:N+1);
H = tril(toeplitz(h));
HH = H(:,1:Nu);

w=r*ones(N,1);
rho=zeros(N+1,1);

rho(1)=y;
dy_=0;
du_=dup;

for i=2:N+1
    dy_=-a0*dy_+b0*du_;
    rho(i)=rho(i-1)+dy_;

    du_=0;
end

dU = (lambda*eye(Nu)+HH'*HH)\(HH'*(w-rho(2:end)));
du = dU(1);
end
```

Programme sous matlab gpc_2 :

```
function du = gpc2(ryu)
global hh2
r= ryu(1);
y= ryu(2);
dup= ryu(3);

N=10;
Nu =3;
lambda=0.001;

a0=0.9999;
b0=0.00495;

h=hh2(2:N+1);
H = tril(toeplitz(h));
HH = H(:,1:Nu);

w=r*ones(N,1);
rho=zeros(N+1,1);

rho(1)=y;
dy_=0;
du_=dup;

for i=2:N+1
    dy_=-a0*dy_+b0*du_;
    rho(i)=rho(i-1)+dy_;

    du_=0;
end

dU = (lambda*eye(Nu)+HH'*HH)\(HH'*(w-rho(2:end)));
du = dU(1);
end
```

Programme sous matlab gpc_3 :

```
function du = gpc3(ryu)
global hh3
r= ryu(1);
y= ryu(2);
dup= ryu(3);

N=10;
Nu =3;
lambda=0.000;

a0=0.9999;
b0=0.00495;

h=hh3(2:N+1);
H = tril(toeplitz(h));
HH = H(:,1:Nu);

w=r*ones(N,1);
rho=zeros(N+1,1);

rho(1)=y;
dy_=0;
du_=dup;

for i=2:N+1
    dy_=-a0*dy_+b0*du_;
    rho(i)=rho(i-1)+dy_;

    du_=0;
end

dU = (lambda*eye(Nu)+HH'*HH)\(HH'*(w-rho(2:end)));
du = dU(1);
end
```

Programme sous matlab gpc_init :

```
global hh
num= [0.4950];
den= [1 0.0149];
G=tf(num,den);
te = 0.01;
Gd = c2d(G,te);
t = 0:te:1;
hh = step(G,t);
```

Programme sous matlab gpc_init :

```
global hh
num= [0.4950];
den= [1 0.0149];
G=tf(num,den);
te = 0.01;
Gd = c2d(G,te);
t = 0:te:1;
hh = step(G,t);
```

Références bibliographiques

- [1] **Klaoua Fares**, « Commande prédictive généralisée », mémoire fin d'étude Master, Université Mohamed Khider, Biskra, promotion 2014.
- [2] « commande prédictive » mémoire de master Université de Biskra.
- [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. Tufts**, "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] **L. MATOUG** « modélisation et commande prédictive d'une station de production d'eau glacée basée sur un compresseur scroll » Mémoire De Magistère, université Badji-Mokhtar Annaba 2008.
- [8] **J. BOUCHARD** « commande prédictive basée sur la simulation Application a la flottation en colonne » thèse de doctorat, université Laval Québec, 2007.
- [9] **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.
- [10] **Kerraci Abdelkader**. «Synthese des commandes robustes des robots manipulateurs rigides ». Thèse de magistère, Université d'Oran, promotion 2004.