

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMARI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme

de MASTER ACADEMIQUE EN AUTOMATIQUE
OPTION : COMMANDE DES SYSTEMES

Thème

**Commandes en Force-Position-
Orientation du PUMA 560 dans
l'Espace Opérationnel**

Proposé par : M Amar HAMACHE

Présentée par : Melle Lila KACI

Dirigé par :

M Amar HAMACHE
M Saïd DJENNOUNE

Soutenu le : / /2013

Promotion 2013

Dieu merci

Je remercie Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné la santé, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles, qui se sont hissés au travers de mon chemin, durant toutes mes années d'études.

Remerciements

Tout d'abord je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma profonde gratitude à Mr A.HAMACHE Maître Assistant à l'UMMTO pour le soutien et l'encadrement parfait qu'il m'a assuré et les précieux conseils qu'il n'a cessé de me prodiguer tout au long de ce projet. Il trouve ici le témoignage de ma reconnaissance et mon profond respect.

Je remercie Particulièrement Mr S.DJENNOUNE Professeur à L'UMMTO pour son aide précieuse durant tout le cursus. Je le suis grandement reconnaissante.

Je remercie les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur de participer au jugement de ce travail.

Mes remerciements vont également à tous les enseignants du département Automatique à l'UMMTO et particulièrement les membres de laboratoire de conception et conduite des systèmes de production. Je leur suis grandement reconnaissante.

Sans oublier d'adresser mes remerciements à Mr H.CHEKIREB Professeur à l'ENP pour m'avoir apporté son aide à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes très chers parents, je leurs remercie pour leurs sacrifices, leurs patiences, leurs soutien, l'aide et les encouragements qui m'ont apporté durant toutes ces années d'études. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui. Je leur souhaite santé et long vie.

Je dédie ce travail également :

A tous les membres de ma famille.

A toute personne qui porte de l'estime pour moi.

Résumé

Le présent travail traite la problématique de la commande en force-position et orientation du robot PUMA 560 dans l'espace opérationnel, accomplissant la tâche d'ébavurage d'une pièce usiné.

D'abord les différents modèles du robot sont établis (modèle géométrique, modèle cinématique et modèle dynamique), suivis de la planification de la tâche à réaliser où les différentes grandeurs opérationnelles de références à savoir la position, vitesse et accélération sont générés. En suite, les lois de commande pour les deux structures (position et force-position) sont synthétisées et appliquées (méthode du couple calculé et celle des modes glissant pour la position-orientation et la commande en impédance puis la commande hybride externe pour la force-position).

L'analyse des résultats de simulation obtenus ont révélé de bonne performance de poursuite et de robustesse aux imprécisions du modèle dynamique et l'accomplissement de la tâche désirée.

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
------------------------------------	----------

Chapitre1 : Etat de l'art sur la robotique industrielle

1. Introduction.....	3
2. Les robots industriels	3
3. Les tâches industrielles et les outils de travail	5
4. Génération des mouvements	6
5. Notion de la position et d'orientation	7
5.1. Les coordonnées cartésiennes	8
5.2. Les angles d'Euler.....	8
6. Commande des robots.....	9
6.1. Commandes des mouvements (position et orientation)	9
6.2. Commandes en effort	10
6.3. Programmation des robots.....	10
6.4. Les composants d'une cellule robotique	11
7. Conclusion	12

Chapitre2 : Modélisation du robot PUMA 560

1. Introduction.....	13
2. Modèle dynamique du robot PUMA 560.....	13
2.1. Formalisme de Newton Euler	14
2.2. Formalisme de Lagrange	14
3. Modèle géométrique	16
4. Modèle cinématique.....	18
4.1. Modèle cinématique du premier ordre	18
4.2. Modèle cinématique du premier ordre avec prise en compte de l'outil terminal..	20
4.3. Modèle cinématique du deuxième ordre avec prise en compte de l'outil terminal	22
5. Conclusion	23

Chapitre3 : Planification de la tâche

1. Introduction.....	24
2. Cahier des charges	24
3. Evaluation de l'angle de balayage et loi bang-bang avec palier de vitesse	24
4. Génération de la trajectoire	28
5. Conclusion	30

Chapitre4 : Commande en position

1. Introduction.....	31
2. Commande par couple calculé	31
2.1. Synthèse de la loi de commande	31
2.2. Simulation	37
2.3. Interprétation de résultats	41
3. Commande par modes glissant	44
3.1. Synthèse de loi de commande.....	44
3.2. Simulation.....	46
3.3. Interprétation des résultats.....	55
4. Conclusion	56

Chapitre5 : Commande en Force

1. Introduction.....	57
2. Commande en force	57
2.1. Loi de commande.....	58
2.1.1. Commande en impédance.....	58
2.1.2. Commande hybride externe	62
2.1.3. Modélisation de l'environnement	63
2.2. Simulation et interprétation des résultats	66
2.2.1. Cas de la commande hybride externe avec couple calculé.....	66
2.2.2. Interprétation des résultats de simulation.....	73
2.2.3. Cas de la commande hybride externe avec modes glissant	73
2.2.4. Interprétation des résultats de simulation.....	84
3. Conclusion	84

Conclusion Générale	85
----------------------------------	-----------

Annexe

Modèle géométrique direct du robot PUMA 560	87
---	----

Bibliographique.....	89
-----------------------------	-----------

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis leur apparition, les robots manipulateurs ont toujours révolutionné l'industrie moderne. De par leur rapidité, précision, flexibilité et capacité d'effectuer des travaux répétitifs, ils s'avèrent très utiles voire indispensables dans les chaînes de fabrication et de montage modernes telles que la construction automobile et la fabrication des circuits intégrés.

Avant d'être effectuées par le manipulateur, les tâches doivent être planifiées et l'étape primordiale en planification des tâches consiste en la génération de deux grandeurs fondamentales et de leurs dérivées successives en fonction du temps à savoir la position et l'orientation de l'effecteur.

L'accomplissement des tâches industrielles est basé sur l'action du manipulateur sur l'environnement grâce à son organe terminal (effecteur). D'une manière générale, cette opération est caractérisée par l'évolution dans le temps et dans l'espace de la position et de l'orientation de cet effecteur.

La commande des robots manipulateurs est l'une des préoccupations majeures des recherches en robotique. En effet, un robot manipulateur est caractérisé par un comportement fortement non linéaire, de plus, certaines tâches qui lui sont confiées sont délicates et exigent une très grande précision avec des évolutions souvent très rapides. Des techniques de commande classiques sont utilisées pour piloter les manipulateurs dans la réalisation des tâches telle que la méthode du couple calculé qui est considérée comme étant la méthode idéale pour la commande des manipulateurs. Si la réalisation de la tâche exige une grande précision dynamique tout en étant robuste, il faudra penser à la robustification des méthodes de commande classiques ou faire appel carrément, aux techniques modernes comme la commande à structure variable ou la commande floue adaptative.

La plupart des tâches industrielles sont des combinaisons de mouvements libres et d'autres contraints. La commande dans l'espace libre est assurée par des techniques de commande en position-orientation néanmoins, lorsqu'il s'agit d'un mouvement nécessitant un contact avec l'environnement, ces techniques doivent être complétées par des commandes en effort.

Ce mémoire s'articule autour de cinq chapitres qui se résument comme suit :

Le premier chapitre aura pour objectif de donner une initiation générale et quelques définitions de base relatives à la robotique industrielle.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du manipulateur PUMA 560 dans l'espace articulaire et en donne d'une façon explicite les modèles : géométrique, cinématique et dynamique.

La présentation de la tâche d'ébavurage et la description de la trajectoire désirée à poursuivre (imposée par le cahier des charges) feront l'objet du troisième chapitre. Les consignes ou références en déplacement, vitesse et accélération seront calculées et paramétrisées en fonction du temps.

Le quatrième chapitre exposera la synthèse des lois de commande en position-orientation par la technique du couple calculé, en utilisant le modèle complet du système, lequel comprend le modèle dynamique du robot qui prend en compte le modèle des actionneurs dans l'espace opérationnel. Ceci sera complété par un test de robustesse aux erreurs de modélisation la synthèse d'une seconde loi de commande à structure variable.

Le cinquième chapitre traitera le cas de la commande en effort hybride externe, en utilisant l'équation dynamique du système complet (robot+actionneur+environnement). L'effort sera ensuite régulé implicitement à travers la poursuite d'une consigne délivrée par un régulateur d'effort. Des simulations seront faites pour divers scénarii de fonctionnement.

Ce travail se termine par une conclusion générale portant sur les différents résultats de simulation.

Chapitre 1

Etat de l'art sur la robotique industrielle

1. Introduction

La robotique industrielle a répondu dans un premier temps au besoin de manipuler de manière répétitive et automatique des pièces usinées ou semi-usinées entre les machines d'une chaîne de fabrication. Le robot devait donc avoir au minimum un organe de saisie des pièces pouvant suivre des trajectoires programmables. Le robot industriel est maintenant un produit majeur et répandu, utilisé dans de nombreuses étapes de fabrication (manipulation, peinture, soudure...etc.)

La robotique est par ailleurs considérée comme un élément clé de la compétitivité des entreprises industrielles, au point de susciter des soutiens publics massifs.

2. Robots industriels

Un robot industriel est une structure mécanique articulée à l'image d'un bras humain. Souvent, il possède un nombre suffisant six degrés de liberté (ou de mobilité) lui permettant de réaliser avec précision les tâches auxquelles il est destiné.

En général, six de grés de liberté suffisent, trois sont destinés au positionnement et trois à l'orientation. Cela permet de déplacer et d'orienter un outil (organe effecteur) dans un espace de travail donné (*work space*). Un tel espace lui est en général associé un repère cartésien opérationnel.

Les robots industriels ont d'abord été développés pour intervenir dans les milieux hostiles ou dangereux pour l'être humain (condition extrême de température ou de pression, nucléaire, radioactivité élevée, forte corrosion...etc.). L'utilisation des robots industriels par rapport aux machines-outils, revient à leur flexibilité de fonctionnement sans assistance humaine, ainsi par leur capacité de travailler sans arrêt pendant plusieurs jours avec une qualité de réalisation supérieure et constante. Leur flexibilité s'illustre aussi par leur capacité d'adaptation à des tâches différentes, la raison pour laquelle ils peuvent être affectés à des opérations différentes selon les impératifs de production car il suffit de changer les outils et les programmes de fonctionnement en fonction des nouvelles tâches.

Contrairement à une machine-outil, un robot industriel est un produit standard, facile d'entretien et réutilisable, comme il a une durée de vie relativement longue (il peut facilement atteindre vingt ans).

Il existe une panoplie de robots industriels selon la structure, entre autres : la chaîne ouverte simple, la structure arborescente, la chaîne fermée et la structure parallèle.

Les robots industriels les plus utilisés sont illustrés à la **Figure** ci-après :

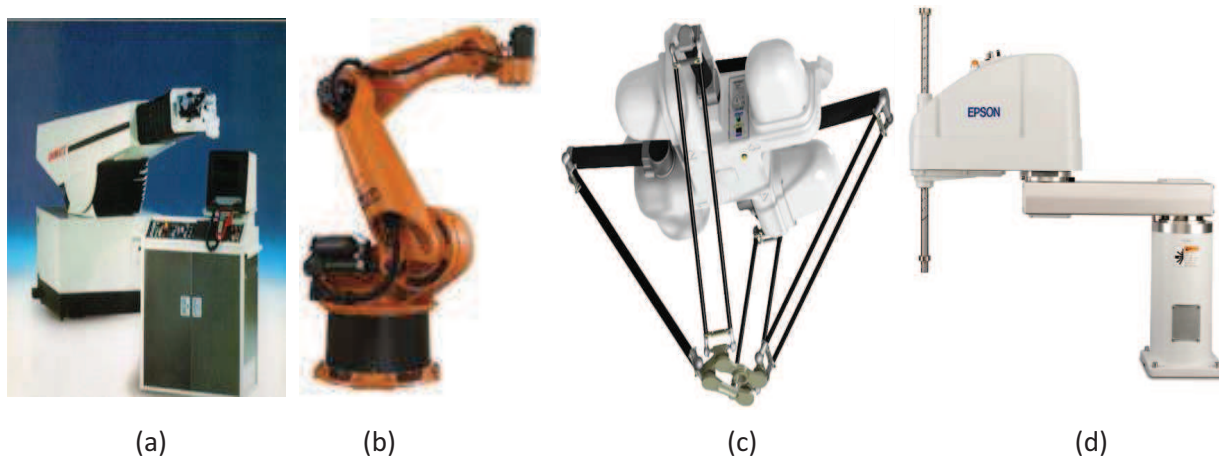


Figure 1.1. Robots industriels. (a)robot Unimate, (b) robot KUKA FAMULUS,(c)robot Adepte quattere, (d) robot SCARA.

Parmi les différentes structures de robots manipulateurs, il existe une architecture d'un manipulateur la plus utilisée en robotique industrielle, celle d'un robot articulé de type PUMA 560 (*Programmable Universal Machine for Assembly*) représenté à la **Figure 1.2**.

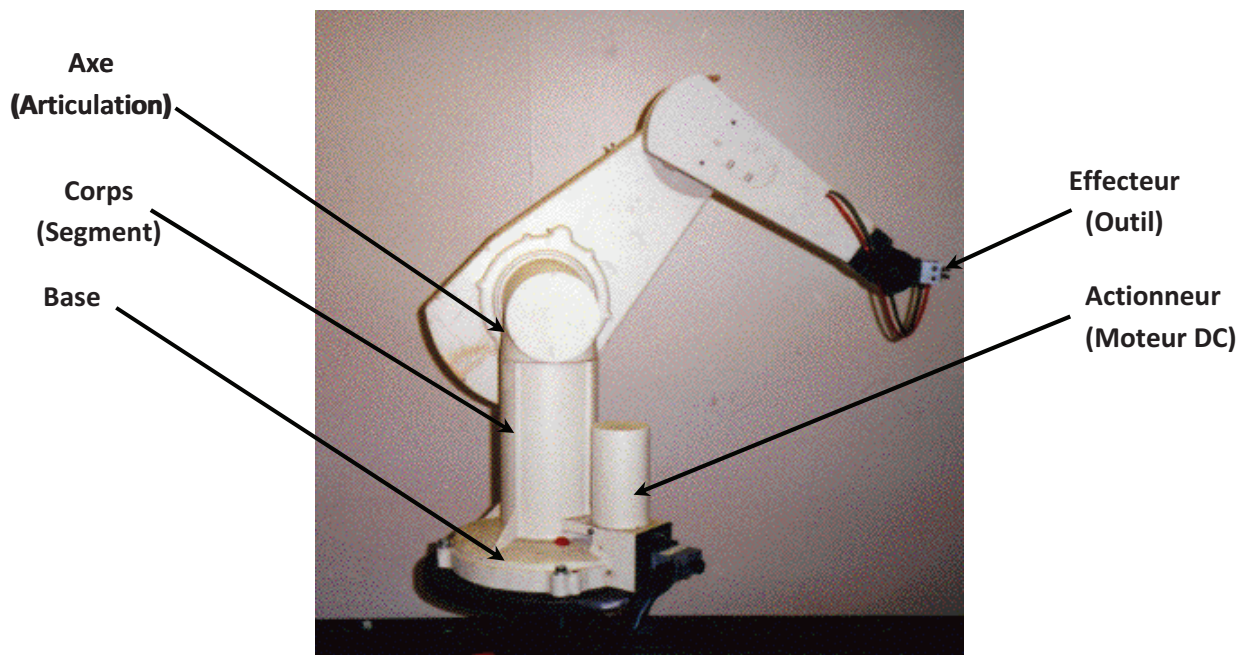


Figure 1.2. Bras de robot PUMA 560.

Le PUMA 560 est un bras manipulateur à six degré de liberté caractérisé par des mouvements de rotation, les trois premières articulations de ce manipulateur (*Waist, Shoulder, Elbow*) caractérisent pour la première une rotation autour d'un axe verticale, la seconde et la troisième suivant deux axe horizontaux dont les mouvement sont identifiés par les variables articulaires q_1 , q_2 et q_3 . Les trois dernières articulations (*Wrist rotation, Wrist bend, Flange*) qui constituent le poignet, sont caractérisées par des variables de rotation q_4 , q_5 et q_6 [4].

Quelques hypothèses simplificatrices sont adoptées, à savoir :

- Le manipulateur est à liaisons rigides.
- Les jeux dans les articulations sont négligeables.

3. Tâches industrielles et outils utilisés

La robotique industrielle à plusieurs champs d'application dont les seules limites sont l'imagination. Parmi ces applications on peut citer :

- Le soudage à l'arc,
- La manutention et service des machines,
- Le packagin/conditionnement qui regroupe une variété d'opérations comme : la pallettisation, la dépalettisation, l'emballage, l'encaissage, ...etc.),
- L'assemblage,
- La peinture/ pulvérisation,
- La découpe et parachèvement : il s'agit d'opération comme le moulage, le taraudage, l'ébavurage...etc.),
- L'usinage : il s'agit d'opérations comme le détournage, le perçage...etc.

Les robots industriels pilotent un équipement dédié aux applications robotisées appelé **effecteur** (outil ou organe terminal). Le terme organe terminal regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositif de serrage, dispositif magnétique, à dépression,...), ou à les transformer (outils, torche à souder, pistolet de peinture, mèche d'ébavurage...). En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement.

4. Génération des mouvements

Le positionnement d'un robot est spécifié en définissant la trajectoire que celui-ci suivre. Elle est définie soit dans l'espace opérationnel propre à la tâche (afin de situer l'effecteur) ou bien dans l'espace articulaire propre au robot (afin d'indiquer les valeurs des paramètres des articulations).

Le problème de la génération de mouvement réside dans le calcul des séquences souhaitées (consigne) de variables articulaires ou de variables liées à l'organe terminal qui assurent le passage du robot par la trajectoire désirée.

Les trajectoires d'un robot peuvent être classifiées comme suit :

- les mouvements entre 2 points avec des mouvements libres entre les points,
- les mouvements entre 2 points via une séquence de points intermédiaires désirés, spécifiés notamment pour éviter les obstacles ; la trajectoire est libre entre les points intermédiaires,
- les mouvements entre 2 points, la trajectoire étant contrainte entre les points (trajectoire rectiligne par exemple),
- les mouvements entre 2 points via des points intermédiaires, la trajectoire étant contrainte entre les points intermédiaires.

Dans les deux premiers cas, la génération de mouvement peut se faire directement dans l'espace articulaire : elle se traduit par une séquence de positions articulaires constituant les consignes des asservissements.

Dans les deux derniers cas, la trajectoire étant fixée à tout instant dans l'espace opérationnel dans lequel il est préférable de raisonner et travailler. La loi de commande utilisée doit être capable de transformer les consignes opérationnelles en consignes articulaires par l'intermédiaire d'un changeur de coordonnées.

Ces deux approches qui concernent la génération des mouvements dans les deux espaces : articulaire et opérationnelle, sont schématisées sur les Figures ci-après :

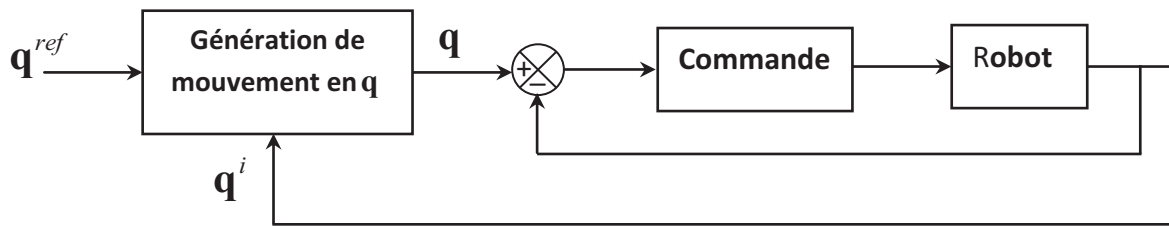


Figure 1.3. Génération des mouvements dans l'espace articulaire.

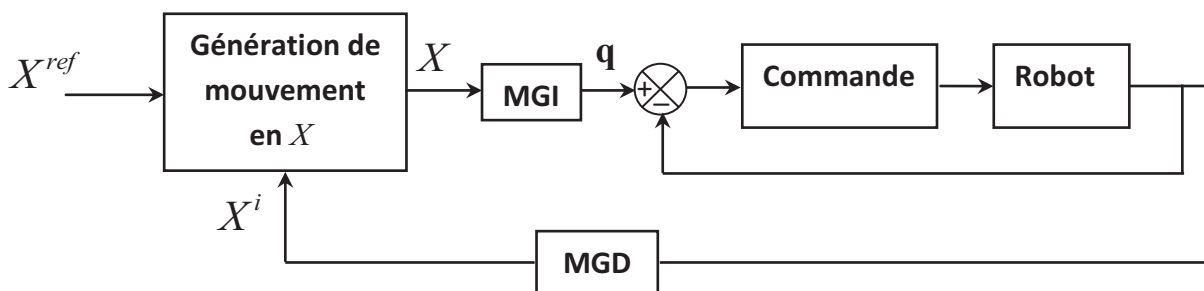


Figure 1.4. Génération des mouvements dans l'espace opérationnel.

A noter que MGD est une transformation de coordonnée qui sera détaillée dans le prochain chapitre, quant au modèle géométrique inverse MGI, il n'est pas utilisé dans ce travail car il ne figure pas dans l'architecture suivie.

5. Notion de position-orientation

La plupart des applications robotisées ne nécessitent pas seulement la définition de la position de l'opérateur et la trajectoire désirée dans le cas de la poursuite, mais aussi dans la réalisation de tâches industrielles bien particulières comme le soudage, l'ébavurage et autres, l'orientation de toute sorte d'outil ou d'organe terminal associé au manipulateur et primordiale pour accomplir ces tâches.

En général, la position d'un point de repère lié à l'organe terminal est décrite par les coordonnées cartésiennes (trois distances), cylindriques (deux distances et un angle) ou sphériques (une distance et deux angles). Quant à l'orientation d'un objet dans l'espace, cela

revient à placer les axes de son repère associé d'une manière bien définie par rapport à un repère de base. Une de ces représentations de l'orientation est, bien entendu, la matrice de passage entre le repère terminal et celui de la base. Cette matrice s'appelle "matrice d'orientation" notée souvent R . Elle est d'ordre 3×3 et ses éléments sont les projections des vecteurs unitaires des axes du repère objet dans le repère de la base. Il existe différentes possibilités pour définir l'orientation de l'organe terminal entre autres : les angles d'Euler, les quaternions, les cosinus directeurs...etc.

Dans le présent travail, les coordonnées cartésiennes et les angles d'Euler seront utilisées pour décrire, respectivement, la position et l'orientation de l'effecteur.

5.1. Coordonnées cartésiennes

C'est le référentiel le plus utilisé en robotique, car il est plus simple du point de vue profondeurs généralisées c'est-à-dire dans le cas de la mesure des distances. Un point est défini par ses trois coordonnées cartésiennes X, Y, Z appelées respectivement : abscisse, ordonnée, et cote. Les coordonnées cartésiennes ne sont rien d'autre que les projections du vecteur position sur la base orthonormée du référentiel en question (voir **Figure 1.5**).

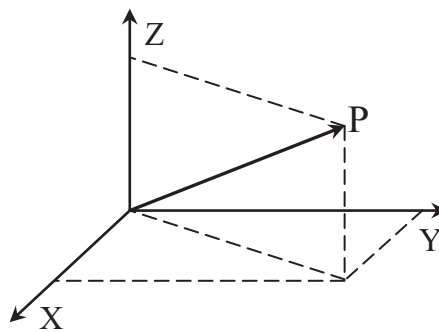


Figure 1.5. Vecteur de position et ses projection.

5.2. Angles d'Euler

L'orientation d'un repère R_n dans le repère R_0 est déterminée par la spécification de trois angles α , β et γ correspondant à trois rotations successives. Le plan (X_n, Y_n) coupe le

plan (X_0, Y_0) suivant une droite ON appelée "ligne nodale", perpendiculaire aux axes Z_0 et Z_n .

Les angles d'Euler sont définis de la façon suivante :

α (Précession) : angle entre X_0 et ON, avec : $0 < \alpha < 360^\circ$;

β (Nutation) : angle entre Z_0 et Z_n avec : $0 < \beta < 180^\circ$;

γ (Rotation propre) : angle entre ON et X_n avec : $0 < \gamma < 360^\circ$.

Ces angles correspondent à une première rotation autour de Z_0 , suivie d'une rotation autour du nouvel axe X suivie d'une dernière rotation autour du nouvel axe Z. A cette séquence (Z,X,Z), certains auteurs préfèrent la séquence (Z,Y,Z). Un cas particulier intéressant est celui que l'on rencontre avec les robots PUMA [2].

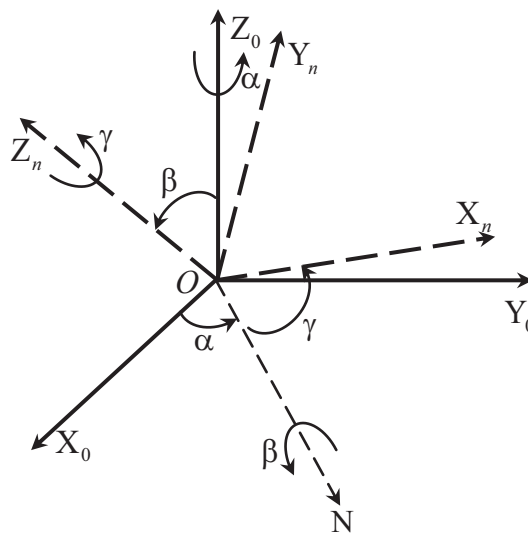


Figure 1.6. Angle d'Euler (convention Z, X, Z).

6. Commande des robots industriels

6.1. Commande des mouvements (position et orientation)

Dans les domaines d'application de la robotique, on rencontre plusieurs types de tâches que le système robotisés peut accomplir. L'accomplissement des tâches est assuré par

la commande des mouvements (position-orientation) de l'organe terminal (outil) propre à la tâche associée au robot.

La commande des mouvements peut se réaliser grâce à plusieurs techniques de commande largement appliquées telles que la commande décentralisée linéaire en utilisant des régulateurs classiques (PID) ou des commandes plus précises telles que la commande dynamique dite aussi couple calculé (computed torque) basée sur le découplage non linéaire du modèle dynamique du robot.

Des commandes non linéaires et robustes peuvent être aussi utilisées comme la commande : à structure variable (modes glissants), passive, adaptative, par un régulateur flou...etc.

6.2. Commande en effort

Les structures de commandes de mouvement citées précédemment assurent l'accomplissement des tâches désirées lorsqu'il s'agit de mouvement en espace libre. Cependant en robotique industrielle, il existe des tâches qui nécessitent un contact avec l'environnement appelées tâches compliantes et ces techniques de commande s'avèrent insuffisantes la raison pour laquelle il est souvent nécessaire de compléter la commande des mouvements par une commande en effort.

Plusieurs techniques de commande en effort ont été mises au point, telle la commande par compliance passive, la commande en amortisseur, la commande en impédance, hybride force-position et d'autres commandes plus avancées telles que les techniques robustes et adaptatives.

6.3. Programmation des robots

Pour la programmation des robots industriels, une armoire de commande est utilisée avec des pupitres de programmation comme il est illustré à la **Figure 1.7**.

- **Armoire de commande :** Elle comporte l'électronique qui pilote le robot. Elle ressemble à un automate ou une commande numérique et permet l'exécution des programmes de travail du robot. Ceux-ci vont commander aussi bien les déplacements du robot, les relations avec les actionneurs et les accessoires ou les outils du travail.

- **Pupitre de programmation** : Appelé aussi *teach pendant* ou boîtier opérateur, il s'agit du panneau de commande déporté du robot qui permet d'effectuer la programmation par apprentissage. Il comporte généralement, un écran d'affichage, des boutons de commande et des dispositifs de mise en mouvement et arrêt, départ, mouvement manuelle, clavier,...etc.

boutons de commande et des dispositifs de mise en mouvement et arrêt, départ, mouvement manuelle, clavier,...etc.

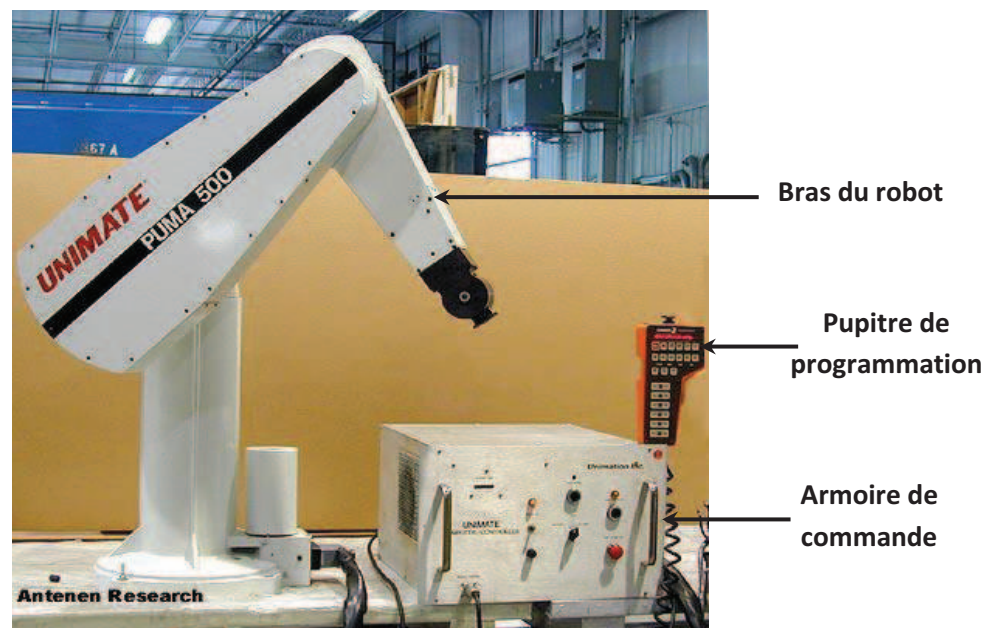


Figure 1.7. Composants d'une cellule robotique.

La programmation du robot peut se faire de plusieurs manières, par apprentissage, en hors ligne ou par auto-apprentissage. Il existe, pour différents métiers, des logiciels d'applications dédiés (par ex. : peinture, soudure...) prenant en compte les spécificités du processus.

Dans la réalisation de la tâche d'ébavurage, la programmation se fait par apprentissage comme suit : La trajectoire du robot est apprise manuellement, c'est-à-dire à l'aide du pupitre de programmation. L'opérateur déplace le robot au point désiré et enregistre sa position, puis il génère de cette façon, tous les points de la trajectoire en indiquant la vitesse de déplacement. Dans le déroulement du cycle, le programmeur intègre des appels processus.

Ce type de programmation est très courant ; cependant, comme il se fait avec le robot dans l'atelier, il nécessite l'arrêt de la cellule en production.

6.4. Composants d'une cellule robotique

La cellule se compose d'un robot avec son armoire de commande et d'équipements périphériques lui permettant d'effectuer la tâche qui lui incombe.

Parmi les équipements, il y a :

- les préhenseurs (pince, aimant, ventouse, changeur de main...etc.) ou outils d'usinage (fraise, torche de soudage, pistolet de peinture...).
- l'alimentation et l'évacuation des pièces (convoyeur, caisses, bols vibrants...)
- les machines ou outils de formage (presse, machine-outil...)
- les capteurs (vision, capteurs d'effort...) qui donnent des sens au robot.

7. Conclusion

Au cours du présent chapitre, des généralités sur la robotique industrielle sont définies. Celles-ci portent sur les robots industriels ainsi que leurs avantages par rapport aux ouvriers et machines-outils, les différentes tâches industrielles robotisées et les outils nécessaires pour l'accomplissement de ces dernières.

Il a été présenté aussi les notions de position et d'orientation qui sont décrites en se servant des coordonnées cartésiennes et angles d'Euler, respectivement.

Il a été cité, d'une part, les techniques de commande des mouvements relatifs à l'espace libre et d'autre part, la structure de commande en effort dans le cas des tâches complaintes.

Enfin, il a été donné un aperçu sur la programmation réelle des robots industriels ainsi que l'architecture matérielle et les composants qui permettent la réalisation de l'interface homme-robot.

Chapitre 2

Modélisation du Robot PUMA

560

1. Introduction

La synthèse d'une loi de commande pour piloter un robot ou la simulation de son comportement nécessite la connaissance des relations entre ses grandeurs d'entrées et/ou de sorties. L'ensemble de ces équations constitue le modèle mathématique du robot.

Plusieurs niveaux de modélisation sont possibles selon les objectifs à atteindre et les contraintes de tâche et performances recherchées à savoir les modèles : géométrique, cinématiques et dynamique.

L'obtention de ces différents modèles n'est pas aisée, la difficulté varie selon la complexité de la cinématique de la chaîne articulée, le nombre de degré de liberté, le type d'articulation et la technologie des actionneurs (électrique, hydraulique...). Ces modèles, qu'ils soient utilisés en simulation ou en commande, doivent représenter le comportement géométrique, cinématique et dynamique du robot de façon réaliste. Il est donc nécessaire de mettre en œuvre des procédures efficaces pour l'identification de leurs paramètres.

Pour qu'une commande puisse effectivement être implantée en temps réel sur un contrôleur de robot, les modèles doivent être calculés en ligne et donc, le nombre d'opérations à effectuer doit être minimisé. Dans ce souci, le développement des modèles conduit aux modèles les plus performants en termes de complexité nombres volume de calculs.

2. Modèle dynamique du robot PUMA560

Le modèle dynamique du robot est décrit par un ensemble d'équations mathématiques portant sur les informations dynamiques du robot. Ces équations peuvent être intégrées afin de simuler le comportement du robot pour une loi de commande donnée sur un ordinateur et ce pour analyser les réponses et les performances ainsi que les objectifs de commande à atteindre. L'établissement de ces équations dynamiques peut se faire par l'application des lois de la mécanique classique entre autres les lois d'Euler-Lagrange et de Newton-Euler. Le modèle dynamique établit ainsi la relation entre les couples et/ou force développés par les actionneurs, d'une part, et les positions, vitesse et accélération articulaires d'autre part. Cette relation a souvent la forme ci-après :

$$\Gamma = f(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}) \quad (2-1)$$

Où :

$\Gamma = [\Gamma_1 \ \Gamma_2 \ \Gamma_3 \ \Gamma_4 \ \Gamma_5 \ \Gamma_6]^T$ est le vecteur des couples/forces des actionneurs, selon que l'articulation est rotoïde (mouvement de rotation) ou prismatique (mouvement de translation),

$\mathbf{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3 \ q_4 \ q_5 \ q_6]^T$ est le vecteur des positions articulaires,

$\dot{\mathbf{q}}$ est le vecteur des vitesses articulaires ($\dot{\mathbf{q}} = \frac{d\mathbf{q}}{dt}$),

$\ddot{\mathbf{q}}$ est le vecteur des accélérations articulaires ($\ddot{\mathbf{q}} = \frac{d^2\mathbf{q}}{dt^2}$),

f est une fonction vectorielle multivariante fortement non linéaire.

2.1. Formalisme de Newton-Euler : Il se base sur le deuxième principe de la dynamique (2^{ème} loi de Newton) en exploitant la théorie des torseurs dynamiques [2].

2.2. Formalisme de Lagrange : il établit la fonction f en se basant sur le principe des travaux virtuels et l'énergie mécanique du système [2]. Ce formalisme sera décrit plus en détail dans la section suivante et il sera adopté dans notre étude.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Gamma_i \quad i = 1 \dots n \quad (2-2)$$

Où :

L est le lagrangien du système donné par $L = K - V$,

K est l'énergie cinétique totale du système,

V est l'énergie potentielle totale du système,

n est le nombre de degrés de liberté du robot.

L'énergie cinétique du système est une fonction quadratique des vitesses articulaires, elle est donnée par : $K = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} m_i v_{Gi}^2 + \frac{1}{2} I_{Gi} \dot{q}_i^2 \right)$ où m_i , I_{Gi} et v_{Gi} représentent pour le $i^{\text{ème}}$ corps du robot, la masse, le moment d'inertie par rapport au centre de gravité et la vitesse de translation du centre de gravité, respectivement. Quant à l'énergie potentielle, elle est donnée

par : $V = \sum_{i=1}^n (-m_i {}^0\mathbf{g}^T {}^0\mathbf{P}_{Gi})$ où ${}^0\mathbf{g}$, ${}^0\mathbf{P}_{Gi}$ représentent respectivement, les vecteurs de gravité et de position du centre de gravité du $i^{\text{ème}}$ corps du robot, projetés dans le repère de la base.

Après avoir appliqué le formalisme d'Euler-Lagrange, les équations obtenues (constituant le modèle dynamique du robot) peuvent se mettre sous la forme compacte suivante [1]:

$$\Gamma = \mathbf{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_{12} + \mathbf{C}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_2 + \mathbf{G}(\mathbf{q}) \quad (2-3)$$

Où :

$\mathbf{A}(\mathbf{q})$ est une matrice de dimension $n \times n$ symétrique définie positive, appelée *matrice d'inertie (Inertia matrix)*,

$\mathbf{B}(\mathbf{q})$ est une matrice de dimension $n \times n$ des couples de Coriolis,

$\mathbf{C}(\mathbf{q})$ est une matrice de dimension $n \times (n+1)/2$ des couples centrifuges (Centrifugal torque),

$\mathbf{G}(\mathbf{q})$ est un vecteur de dimension n des couples de gravitation ou *couple de maintien (Holding Torque)*,

$\dot{\mathbf{q}}_{12}$ est le vecteur de dimension $n \times (n+1)/2$ produit des vitesses, il est explicité par

$$\dot{\mathbf{q}}_{12} = [\dot{q}_1 \dot{q}_2 \dots \dot{q}_1 \dot{q}_n \dot{q}_2 \dot{q}_3 \dots \dot{q}_2 \dot{q}_n \dots \dot{q}_{n-1} \dot{q}_n]^T$$

$\dot{\mathbf{q}}_2$ est le vecteur de dimension n carrées des vitesses, il est explicité comme suit :

$$\dot{\mathbf{q}}_2 = [\dot{q}_1^2 \quad \dots \quad \dot{q}_n^2]^T$$

3. Modèle géométrique du PUMA 560

D'une part, la situation de l'organe terminal ainsi que la trajectoire à suivre sont décrites dans l'espace opérationnelle ou cartésien (*operational space*) et de l'autre part, la configuration du robot est définie dans l'espace articulaire (*joint space*) et afin de faciliter le passage entre ces deux espaces, il faudrait écrire la relation le permettant. Cette relation est appelée modèle géométrique direct (*Direct Kinematics*).

Le modèle géométrique direct (MGD) exprime donc les coordonnées opérationnelles (coordonnées cartésiennes de la pointe de l'outil ainsi que l'orientation du repère de celui-ci) en fonction des coordonnées articulaires comme suit :

$$X = g(\mathbf{q}) \tag{2-4}$$

Où :

X est le vecteur des coordonnées opérationnelles de dimension n ,

g est une fonction vectorielle non linéaire.

Dans le présent travail, la convention D-H modifiée est adoptée pour l'établissement du MGD. La **Figure 2.1** représente la disposition des repères associés aux différentes articulations du PUMA 560 [1].

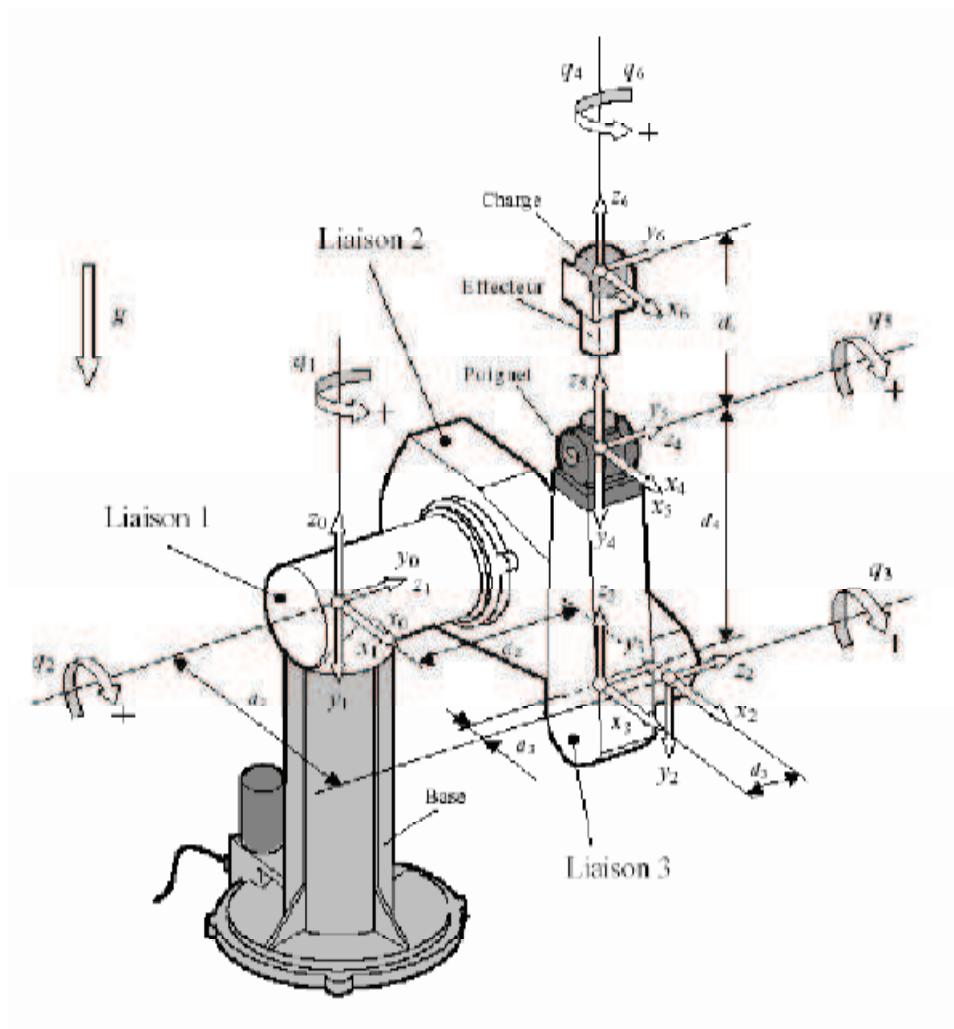


Figure 2.1. Disposition des repères pour le robot PUMA 560 selon la convention D-H modifié.

En respectant la position de l'origine du repère de base du robot et la disposition des repères des liaisons présentées à la **Figure 2.1**, les paramètres de Denavit-Hartenberg modifié (D-H modifié) sont donnés au **Tableau 2.1** [1].

Tableau 2.1. Paramètres de D-H du bras de robot puma 560 :

Numéro de la liaison i	α_i [degré]	θ_i [variable]	a_i [mètre]	d_i [mètre]
1	-90	\mathbf{q}_1	0	0
2	0	\mathbf{q}_2	0.4318	0.2435
3	+90	\mathbf{q}_3	-0.0203	-0.0934
4	-90	\mathbf{q}_4	0	0.4331
5	+90	\mathbf{q}_5	0	0
6	0	\mathbf{q}_6	0	-

L'utilisation des paramètres D-H conduit à la matrice de transformation homogène entre le repère R_6 et celui de la base R_0 , donnée par :

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0P_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

Où :

$${}^0R_6 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

$${}^0P_6 = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$$

Les expressions des différents éléments de la matrice d'orientation 0R_6 et ceux du vecteur position sont données en annexe.

4. Modèle cinématique

4.1. Modèle cinématique du premier ordre

Sachant que le MGD exprime les coordonnées opérationnelles en fonction des coordonnées articulaires, le modèle cinématique direct d'ordre 1 (MCD1) permet d'exprimer les vitesses opérationnelles en fonction des vitesses articulaires.

Pour cela, il faut d'abord exprimer le vecteur des vitesses de translation selon les trois directions du repère de la base ${}^0V_6 = \frac{d}{dt} {}^0P_6$ ainsi que celui des vitesses de rotation autour de ces derniers ${}^0\omega_6$.

La concaténation des deux vecteurs forme le vecteur des vitesses opérationnelles naturelles donné par :

$$\dot{X}_n = \begin{bmatrix} {}^0V_6 \\ {}^0\omega_6 \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

Pour passer du MGD vers le MCD1, il suffit d'exprimer le vecteur \dot{X}_n en fonction des vitesses articulaires. Ceci est donné par :

$$\dot{X}_n = J_n(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2-7)$$

Où :

$J_n(\mathbf{q})$ est la matrice jacobienne naturelle du robot (*natural Jacobean velocities*).

Il reste à exprimer le vecteur des vitesses opérationnelles naturelles ${}^0\omega_6$ en fonction des vitesses opérationnelles correspondant à la paramétrisation de l'orientation.

Dans le cas où l'orientation est paramétrisée par les angles d'Euler ZXZ, le vecteur des vitesses de rotation correspondant est donnée par :

$$\omega_{z_xz} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (2-$$

8)

Où α , β et γ représentent les angles d'Euler ZXZ.

Il est montré dans [3] que :

$$\omega_{z_xz} = \Omega_{z_xz} {}^0\omega_6 \quad (2-9)$$

$$\text{Où } \Omega_{z_xz} = \begin{bmatrix} -\sin \alpha \cot \beta & \cos \alpha \cot \beta & 1 \\ \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} & \frac{-\cos \alpha}{\sin \beta} & 0 \end{bmatrix}$$

Soit $X = \begin{bmatrix} {}^0P_6 \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}$ le vecteur des coordonnées opérationnelles paramétrisées (virtuelles), alors

Le vecteur des vitesses opérationnelles paramétrisé est donné comme suit :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} {}^0V_6 \\ \omega_{z_xz} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

Il résulte des équations (2-10) et (2-9) que :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega_{z_xz} \end{bmatrix} \dot{X}_n \quad (2-11)$$

En utilisant la relation (2-7), il vient :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega_{z \times z} \end{bmatrix} J_n(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{q}} \quad (2-12)$$

Cette dernière relation représente le MCD 1 sans prise en compte de l'outil terminal ou effecteur (*tool*).

4.2. Modèle cinématique du premier ordre avec prise en compte de l'outil terminal

Pour réaliser la tâche d'ébavurage, le robot est doté d'une mèche pointue (outil d'ébavurage) telle que représentée à la **Figure 2.2**. La mèche étant rigide, par conséquent la théorie des torseurs cinématiques peut être appliquée pour exprimer la vitesse de la pointe de l'outil en fonction de celle de la 6^{ème} articulation qui est donnée par (2-7).

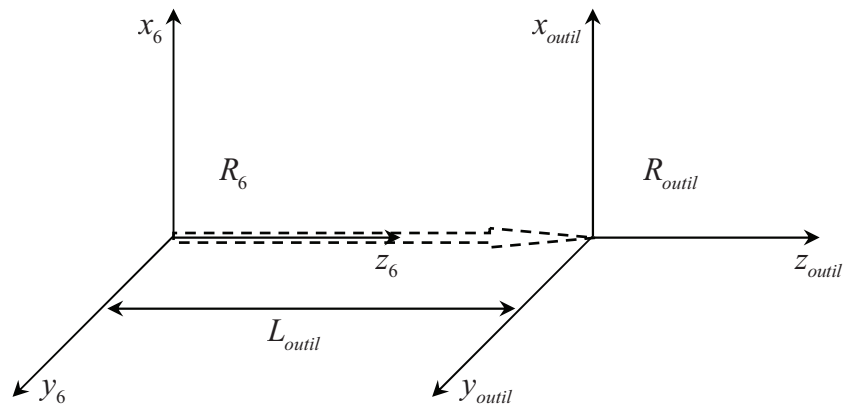


Figure 2.2. L'outil et les repères associés.

D'après la **Figure 3.2**, la matrice de transformation homogène entre R_{outil} et R_6 est donnée par :

$${}^6T_{outil} = \begin{bmatrix} I_3 & {}^6P_{outil} \\ 0_{3 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$\text{Où : } {}^6P_{outil} = L_{outil} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Soient ${}^0V_{outil}$ et ${}^0\omega_{outil}$ les vitesses de translation et de rotation de l'outil projetées dans le repère de la base, alors d'après le torseur cinématique

$$\begin{cases} {}^0V_{outil} = {}^0V_6 + {}^0\omega_6 \times {}^0P_{outil} \\ {}^0\omega_{outil} = {}^0\omega_6 \end{cases} \quad (2-14)$$

Avec : ${}^0P_{outil}$ est le vecteur position de la pointe de l'outil exprimé dans le repère de la base. Il est donné par l'expression suivante

$${}^0P_{outil} = {}^0R_6 \cdot {}^6P_{outil} \quad (2-15)$$

En utilisant la matrice de pré-produit vectoriel, cette dernière équation peut être réécrite comme suit

$$\begin{cases} {}^0V_{outil} = {}^0V_6 - {}^0\hat{P}_{outil} \cdot {}^0\omega_6 \\ {}^0\omega_{outil} = {}^0\omega_6 \end{cases} \quad (2-16)$$

Où : ${}^0\hat{P}_{outil}$ est la matrice antisymétrique de pré-produit vectoriel donnée par :

$${}^0\hat{P}_{outil} = L_{outil} \begin{bmatrix} 0 & -R_{33} & R_{23} \\ R_{33} & 0 & -R_{13} \\ -R_{23} & R_{13} & 0 \end{bmatrix} \quad (2-$$

17)

Sous forme matricielle, l'équation (2-16) s'écrit

$$\begin{bmatrix} {}^0V_{outil} \\ {}^0\omega_{outil} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & -{}^0\hat{P}_{outil} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0V_6 \\ {}^0\omega_6 \end{bmatrix} \quad (2-18)$$

En exploitant les équations (2-12) et (2-18), il vient

$$\dot{X} = J_{base}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \quad (2-19)$$

Avec : J_{base} est la matrice jacobienne de base telle que :

$$J_{base}(\mathbf{q}) = M_{base}J(\mathbf{q}) \quad (2-20)$$

Il est à noter que la prise en compte de l'outil terminal et de la paramétrisation de l'orientation par les angles d'Euler ZXZ se traduit, dans le MCD 1, par la matrice M_{base} explicitée ci-après :

$$M_{base} = \begin{bmatrix} I_3 & -{}^0\hat{P}_{outil} \\ 0_{3 \times 3} & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega_{zxz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_3 & -{}^0\hat{P}_{outil} \cdot \Omega_{zxz} \\ 0_{3 \times 3} & \Omega_{zxz} \end{bmatrix} \quad (2-21)$$

ayant pour dérivée, par rapport au temps, \dot{M}_{base} telle que

$$\dot{M}_{base} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & -\left({}^0\dot{\hat{P}}_{outil} \cdot \Omega_{zxz} + {}^0\hat{P}_{outil} \cdot \dot{\Omega}_{zxz} \right) \\ 0_{3 \times 3} & \dot{\Omega}_{zxz} \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

L'équation (2-19) représente le MCD 1, lequel permet le passage des vitesses articulaires propres au robot vers les vitesses opérationnelles paramétrisées propres à la tâche.

4.3. Modèle cinématique du second ordre avec prise en compte de l'outil terminal

De même que le MCD 1, le modèle cinématique direct d'ordre deux (MCD 2) permet de faire le passage entre accélérations articulaires et accélérations opérationnelles. Il s'obtient par dérivation, par rapport au temps, du MCD 1.

$$\ddot{X} = J_{base}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + J_{base}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} \quad (2-23)$$

5. Conclusion

Au cours du présent chapitre, il a été exposé les relations mathématiques de base (modèles) liant les deux espaces de coordonnées relatifs à la robotique à savoir l'espace articulaire intéroceptif et l'espace opérationnel extéroceptif. Ces relations ont été établies et détaillées afin de dévoiler leur complexité et faciliter exploitation à des fins de commande ou de simulation.

Il y a lieu de signaler que les relations complexes et non linéaires qui régissent le fonctionnement des bras manipulateurs, rencontrées lors de l'établissement de leurs modèles, rendent la synthèse de lois de commande, pour piloter le robot, fastidieuse voire inextricable dans certains cas (robots parallèles ou redondants). Pour cette raison et pour d'autres, le roboticien devrait maîtriser certains artifices mathématiques et/ou informatiques (calcul matriciel, techniques de commande numérique en temps réel...etc.) afin d'harmoniser et de simplifier les modèles d'une part, et d'implémenter de façon efficace les méthodes de commande de l'autre part.

Chapitre 3

Planification de la tâche

1. Introduction

Avant d'être réalisées par le robot, les tâches doivent être planifiées. On entend par là, l'expression, d'une façon complètement explicite, des lois horaires (en fonction du temps) concernant l'évolution des positions, vitesses et accélérations de l'outil destiné à la réalisation de la tâche dans l'espace opérationnel (lié souvent à l'atelier d'usinage). Ces lois horaires serviront de consignes au dispositif de commande du robot afin d'assurer le passage de l'outil par la trajectoire désirée.

2. Cahier des charges

La pointe de l'outil (mèche d'ébavurage) doit parcourir un arc AB circulaire de 180° de rayon $a=10\text{cm}$ dans le sens antihoraire sachant qu'il démarre et arrive à vitesse nulle. De plus, l'outil doit être orienté de telle manière qu'il soit radial sortant (vers l'extérieur) formant un angle de 45° au dessus du plan horizontal contenant l'arc comme illustré à la **Figure 3.1**.

D'après la **Figure 3.1**, la position de la pointe de la mèche est donnée par :

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} a \cos \theta + x_0 \\ a \sin \theta + y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Où : θ est l'angle de balayage en radians.

3. Evolution de l'angle de balayage et loi bang-bang avec palier de vitesse

La loi bang-bang avec palier de vitesse, appelée aussi loi trapèze, est la loi optimale parmi celles qui assurent la continuité de la vitesse et de la position, cependant l'accélération reste discontinue. Cette loi convient bien à notre cahier des charges, en effet, le mobile démarre à vitesse nulle ($\dot{\theta}(0)=0$), accélère jusqu'à atteindre une vitesse maximum $\dot{\theta}_{\max}$ à l'instant t_b qu'il maintient jusqu'à l'instant t_f-t_b puis décélère pour atteindre une vitesse nulle à l'instant final t_f ($\dot{\theta}(t_f)=0$) (voir **Figure 3.2**).

D'après la loi bang-bang, la vitesse angulaire $\dot{\theta}(t)$ est donnée par :

$$\dot{\theta}(t) = \begin{cases} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_b} t, & 0 \leq t < t_b \\ \dot{\theta}_{\max}, & t_b \leq t < t_f - t_b \\ \frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_b} (t_f - t), & t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (3-2)$$

L'accélération $\ddot{\theta}(t)$ est déduite en dérivant (3-2), elle est donnée par :

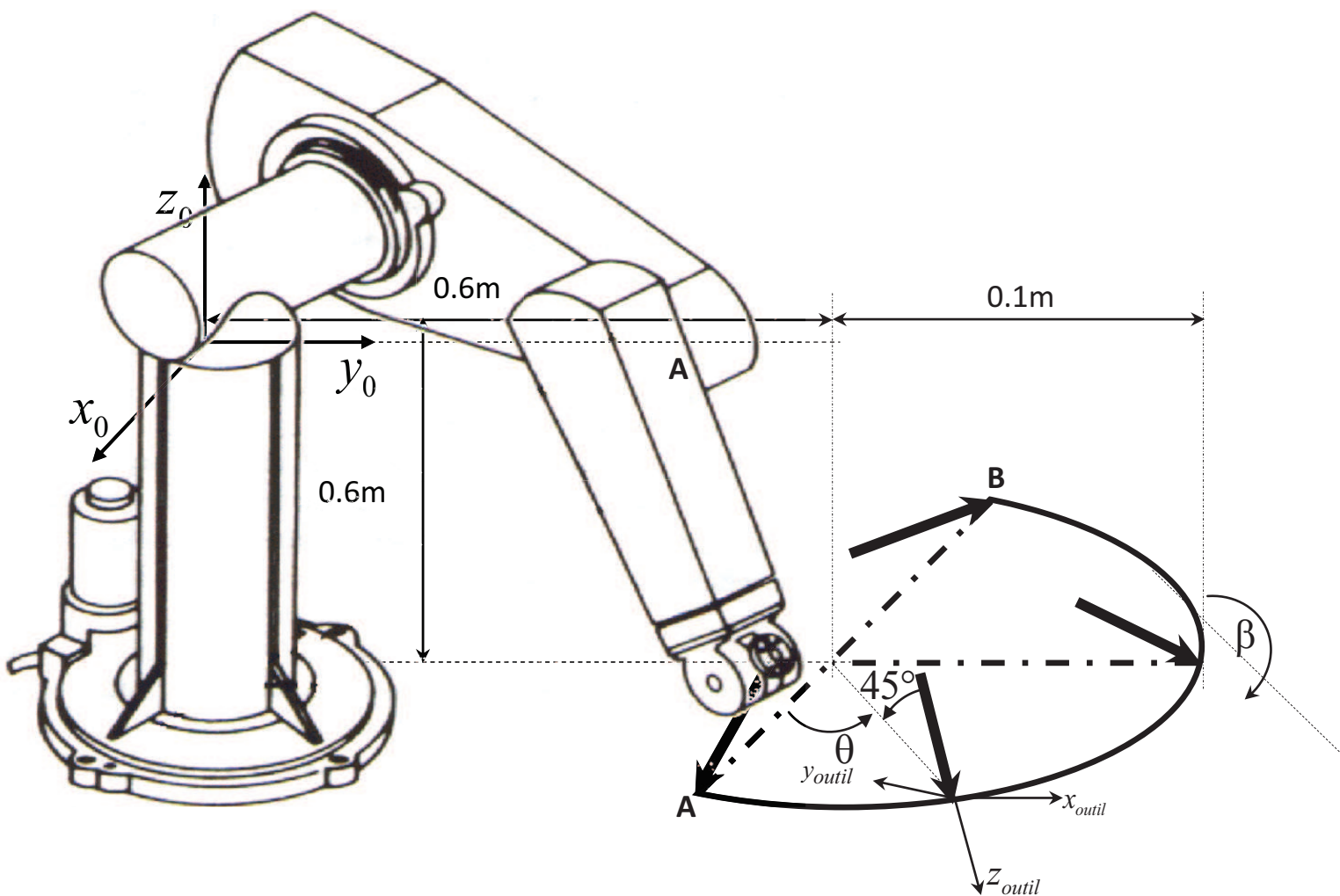


Figure 3.1. Description géométrique de la tâche dans l'espace opérationnel.

$$\ddot{\theta}(t) = \begin{cases} \frac{\dot{\theta}_{max}}{t_b}, & 0 \leq t < t_b \\ 0, & t_b \leq t < t_f - t_b \\ -\frac{\dot{\theta}_{max}}{t_b}, & t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (3-3)$$

La position $\theta(t)$ est obtenue en intégrant les équations de vitesse dans l'intervalle de temps correspondant à chaque étape du mouvement.

Pour $t \in [0, t_b[$

$$\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt} \Rightarrow d\theta = \dot{\theta} dt \quad (3-4)$$

En intégrant les deux membres de (3-4)

$$\int_0^{\theta(t)} d\theta = \int_0^t \dot{\theta} dt$$

Ce qui donne

$$\theta(t) = \int_0^t \frac{\dot{\theta}_{max}}{t_b} t dt = \frac{\dot{\theta}_{max}}{2t_b} t^2 \quad (3-5)$$

Ainsi la position à l'instant t_b est donnée par :

$$\theta(t_b) = \frac{\dot{\theta}_{max}}{2} t_b \quad (3-6)$$

Pour $t \in [t_b, t_f - t_b[$

$$\dot{\theta}(t) = \dot{\theta}_{max} \Rightarrow \int_{\theta(t_b)}^{\theta(t)} d\theta = \int_{t_b}^t \dot{\theta}_{max} dt \quad (3-7)$$

Ce qui donne

$$\theta(t) = \dot{\theta}_{max} \left(t - \frac{t_b}{2} \right) \quad (3-8)$$

Ainsi la position à l'instant $t_f - t_b$ est donnée par

$$\theta(t_f - t_b) = \dot{\theta}_{\max} \left(t_f - \frac{3t_b}{2} \right) \quad (3-9)$$

Pour $t \in [t_f - t_b, t_f]$

$$\dot{\theta}(t) = -\frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_b} (t_f - t) \quad (3-10)$$

En intégrant les deux membres de (3-10)

$$\int_{\theta(t_f - t_b)}^{\theta(t)} d\theta = \int_{t_f - t_b}^{t_f} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{t_b} (t_f - t) dt \quad (3-11)$$

Ce qui donne

$$\theta(t) = -\frac{\dot{\theta}_{\max}}{2t_b} (t^2 + t_f^2 - t_b^2 - 2tt_f) + \dot{\theta}_{\max} \left(t_f - 3\frac{t_b}{2} \right) \quad (3-12)$$

A l'instant t_f , la position est donnée par

$$\theta(t_f) = -\frac{\dot{\theta}_{\max}}{2t_b} (t_b^2) + \dot{\theta}_{\max} \left(t_f - 3\frac{t_b}{2} \right) \quad (3-13)$$

Ou encore :

$$\theta(t_f) = \dot{\theta}_{\max} (t_f - t_b)$$

Or d'après le cahier des charges, $\theta(t_f) = \pi$, la valeur de $\dot{\theta}_{\max}$ est imposée par l'expression suivante :

$$\dot{\theta}_{\max} = \frac{\pi}{t_f - t_b} \quad (3-14)$$

Finalement, la position $\theta(t)$ est donnée par :

$$\theta(t) = \begin{cases} \frac{\dot{\theta}_{\max}}{2t_b} t^2, & 0 \leq t < t_b \\ \dot{\theta}_{\max} \left(t - \frac{t_b}{2}\right), & t_b \leq t < t_f - t_b \\ \frac{-\dot{\theta}_{\max}}{2t_b} (t^2 + t_f^2 - t_b^2 - 2tt_f), & t_f - t_b \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (3-15)$$

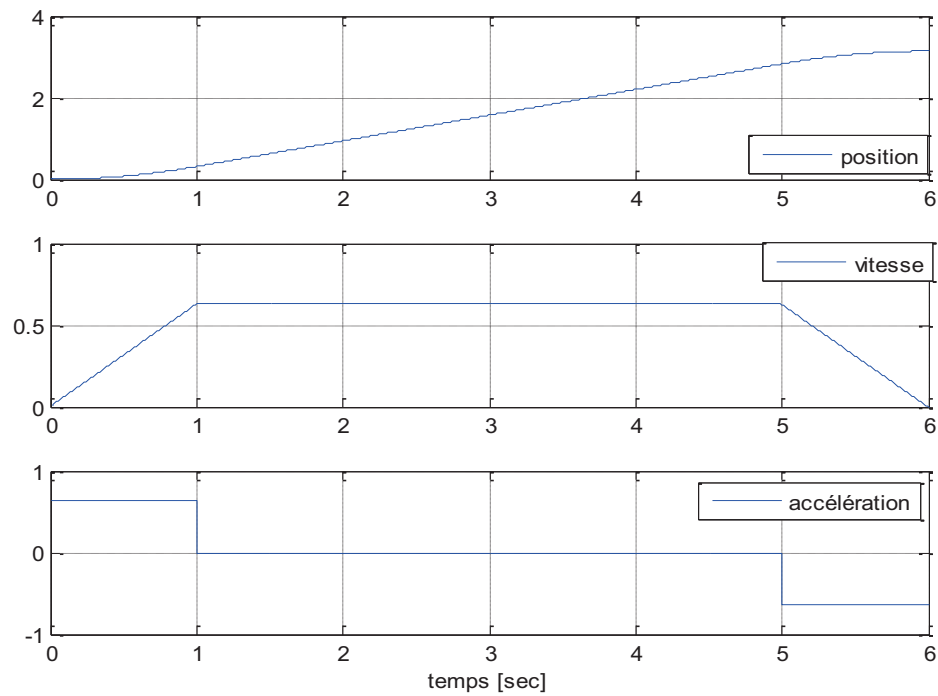


Figure 3.2. Evolution de la position, vitesse et accélération selon la loi bang-bang avec palier de vitesse.

4. Génération de la trajectoire

La grandeur génératrice $\theta(t)$ étant calculée à tout instant, les grandeurs opérationnelles de référence (position X_{ref} , vitesse \dot{X}_{ref} , accélération \ddot{X}_{ref}) en sont déduites.

En exploitant le cahier des charges (voir la **figure 3**), les expressions des coordonnées cartésiennes de la pointe de l'outil p_x, p_y, p_z sont donnée par :

$$\begin{cases} p_x = a \cos(\theta) + x_0 \\ p_y = a \sin(\theta) + y_0 \\ p_z = -0.6 \end{cases} \quad (3-16)$$

Où x_0, y_0, z_0 représentent les coordonnées cartésiennes du centre de la trajectoire circulaire (en mètres), telles que :

$$\begin{cases} x_0 = 0 \\ y_0 = 0.6 \\ z_0 = -0.6 \end{cases}$$

Pour que le repère de base R_0 coïncide avec le repère outil R_{outil} , il doit subir une première

rotation de $\theta + \frac{\pi}{2}$ autour de l'axe z_0 suivie d'une deuxième rotation de $\frac{3\pi}{4}$ autour du nouvel axe x . En adoptant la paramétrisation d'orientation de l'outil par les angles d'Euler ZXXZ, cela se traduit par:

$$\begin{cases} \alpha = \theta + \frac{\pi}{2} \\ \beta = \frac{3\pi}{4} \\ \gamma = 0 \end{cases} \quad (3-17)$$

Il est à noter que du fait de la symétrie cylindrique de l'outil, l'angle γ est choisi arbitrairement nul (l'orientation est invariante par rapport à γ).

$$\text{Ainsi : } X_{ref} = \begin{bmatrix} a \cos \theta + x_0 \\ a \sin \theta + y_0 \\ -0.6 \\ \theta + \frac{\pi}{2} \\ \frac{3\pi}{4} \\ \frac{\pi}{2} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

Une simple dérivation de X_{ref} conduit à :

$$\dot{X}_{ref} = \begin{bmatrix} -a \sin \theta \dot{\theta} \\ a \cos \theta \dot{\theta} \\ 0 \\ \dot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

De même :

$$\ddot{X}_{ref} = \begin{bmatrix} -a \cos \theta \dot{\theta}^2 - a \sin \theta \ddot{\theta} \\ -a \sin \theta \dot{\theta}^2 + a \cos \theta \ddot{\theta} \\ 0 \\ \ddot{\theta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

5. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la description de la tâche à réaliser par le robot ainsi que la définition du cahier des charges correspondant. Ce dernier se traduit par une grandeur angulaire génératrice θ suivant une loi horaire bien adaptée (loi bang-bang avec palier de vitesse) de laquelle ont été déduites toutes les grandeurs opérationnelles de référence à savoir : la position, la vitesse et l'accélération.

Chapitre 4

Commande en Position

1. Introduction

Après avoir planifié la tâche à réaliser par le PUMA 560 et déterminé les références en position, vitesse et accélération (chapitre précédent), il reste à générer les tensions de commande pour piloter les actionneurs des différentes articulations du robot afin d'assurer la poursuite de la trajectoire désirée.

En se basant sur l'équation dynamique du robot, plusieurs approches sont utilisées pour la commande des bras manipulateurs, dont la commande :

- classique de type PID,
- par découplage non linéaire (couple calculé),
- fondée sur une fonction de Lyapunov,
- robuste à structure variable (modes glissants),
- adaptative
- prédictive
- Passive...etc.

2. Commande par couple calculé (*computed torque*)

La commande par découplage non linéaire est considérée comme la solution idéale pour la commande des robots manipulateurs en particulier, lorsque l'application exige des évolutions rapides du robot et une grande précision dynamique. L'utilisation de la commande par découplage non linéaire constitue une bonne approche dans ce sens.

Ce type de commande est aussi connu sous le nom de *commande dynamique* ou couple calculé parce qu'elle est fondée sur l'utilisation du modèle dynamique du manipulateur.

2.1. Synthèse de la loi de commande

L'équation dynamique dans l'espace articulaire étant la suivante:

$$\Gamma = \bar{A}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \bar{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (4-1)$$

Afin de mieux illustrer, l'équation (4-1) est représentée en boucle ouverte par le schéma de la **Figure 4.1** ci-après:

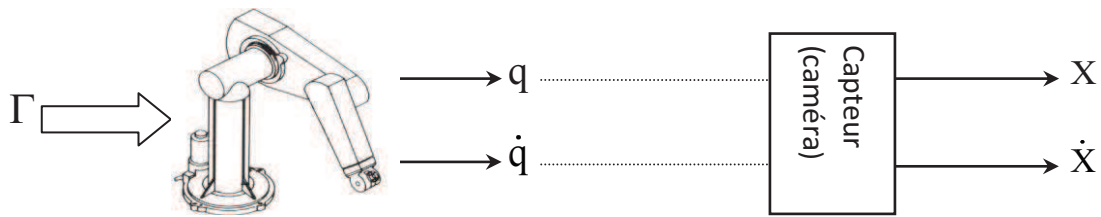


Figure 4.1. Schéma en boucle ouvert de.

Pour changer sa configuration articulaire, le robot est équipé de six actionneurs. Chaque actionneur est un moteur à courant continu à excitation séparée alimenté par un hacheur branché à une source de tension constante [2].

Pour compléter le modèle dynamique du système, il faut prendre en compte le modèle de l'actionneur représenté par les équations électrique et mécanique de l'ensemble des moteurs DC (voir la Figure 4.2).

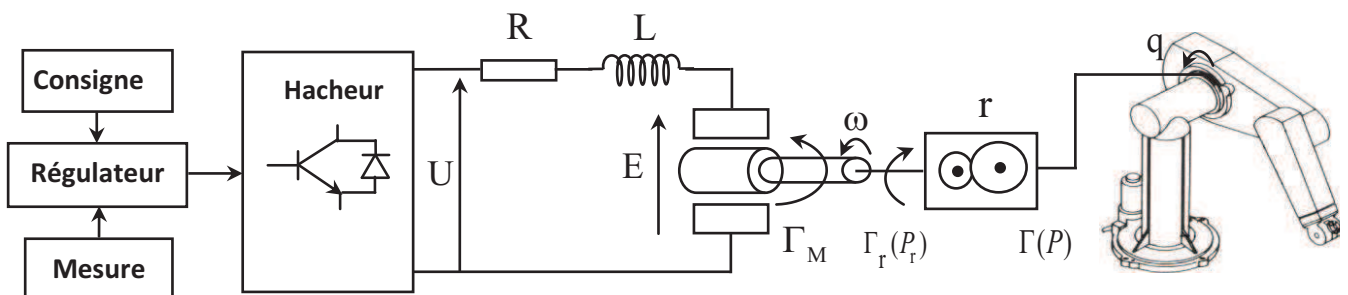


Figure 4.2. Schéma simplifié d'une articulation actionnée par un moteur à courant continu.

Les lois de KIRCHOFF, d'après la Figure 4.2 permet d'écrire les équations électriques :

- Equation électrique :

$$U = L \frac{di}{dt} + Ri + E \text{ avec } E = K \dot{\omega} \tag{4-2}$$

Où :

U est la tension de commande des moteurs en V

i est le courant des moteurs en A

L est l'inductances propre à chaque moteur en H

R est la résistance des induits en Ω

E est la forces électromotrices des moteurs en V

$\dot{\omega}$ est la vitesse de rotation angulaire en rad / s

K est une constante propre aux moteurs

La deuxième loi de NEWTON, d'après la **Figure 4.2** permet d'écrire les équations mécaniques :

- **Equation mécanique**

$$I \ddot{\omega} = \sum \text{moments} \quad (4-3)$$

Où encore :

$$I \ddot{\omega} = \Gamma_M - K_{vis} \dot{\omega} - K_{clmb} \omega - \Gamma_r \quad (4-4)$$

Où :

I est le moment d'inertie des arbres des moteurs en Kgm^2

K_{vis} est le frottement viscos en Nms / rad

K_{clmb} est le frottement coulomb en Nm

Γ_M est le couple moteur en Nm

Γ_r est le couple résistant au couple moteur en Nm

ω est la position angulaire en rad

$\ddot{\omega}$ est l'accélération angulaire en rad / s^2

L'expression du coefficient de réduction r en fonction de la position, vitesse et accélération angulaires et la position, vitesse et accélération articulaires du robot est donnée comme suit :

$$r = \frac{\mathbf{q}}{\omega} = \frac{\dot{\mathbf{q}}}{\dot{\omega}} = \frac{\ddot{\mathbf{q}}}{\ddot{\omega}} \Rightarrow \dot{\omega} = \frac{\dot{\mathbf{q}}}{r} \quad (4-5)$$

La conservation de puissance au niveau du réducteur permet d'écrire:

$$\Gamma_r \dot{\omega} = \Gamma \dot{\mathbf{q}} \quad (4-6)$$

La substitution de l'équation (4-5) dans (4-6) donne :

$$\Gamma_r \frac{\dot{\mathbf{q}}}{r} = \Gamma \dot{\mathbf{q}} \quad (4-7)$$

Il en découle:

$$r = \frac{\Gamma_r}{\Gamma} \quad (4-8)$$

L'équation (4-2) peut se réécrire :

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U - K \dot{\omega} \quad (4-9)$$

En régime quasi-statique du courant, le courant est donné par :

$$i = \frac{U - K \dot{\omega}}{R} \quad (4-10)$$

Etant donné que les moteurs sont à excitation séparée, le couple moteur Γ_M a pour expression :

$$\Gamma_M = K i = \frac{K}{R} (U - K \dot{\omega}) \quad (4-11)$$

La substitution de (4-11) dans (4-4) donne :

$$I \ddot{\omega} = \frac{K}{R} (U - K \dot{\omega}) - K_{vis} \dot{\omega} - K_{clmb} \omega - r \Gamma \quad (4-12)$$

Ou encore :

$$I \ddot{\omega} = \frac{K}{R} U - \left(\frac{K^2}{R} + K_{vis} \right) \dot{\omega} - K_{clmb} \omega - r (\bar{A}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \bar{H}) \quad (4-13)$$

Il en découle :

$$\frac{K}{R} U = r \bar{A}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + r \bar{H} + I \ddot{\omega} + \left(\frac{K^2}{R} + K_{vis} \right) \dot{\omega} + K_{clmb} \omega \quad (4-14)$$

La substitution de (4-3) dans (4-14) donne :

$$\frac{K}{R}U = r\bar{A}(\mathbf{q}) + r\bar{H} + \frac{I}{r}\ddot{\mathbf{q}} + \left(\frac{K^2}{R} + K_{vis}\right)\frac{\dot{\mathbf{q}}}{r} + \frac{K_{clmb}}{r}\mathbf{q} \quad (4-15)$$

Finalement,

$$U = \frac{R}{K}\left(r\bar{A}(\mathbf{q}) + \frac{I}{r}\ddot{\mathbf{q}}\right) + \frac{R}{K}\left(r\bar{H} + \left(\frac{K^2}{R} + K_{vis}\right)\frac{\dot{\mathbf{q}}}{r} + \frac{K_{clmb}}{r}\mathbf{q}\right) \quad (4-16)$$

Le modèle dynamique en tension dans l'espace articulaire du robot s'écrit comme suit :

$$U = A\ddot{\mathbf{q}} + H \quad (4-17)$$

Où :

$$A = \frac{R}{K}\left(r\bar{A}(\mathbf{q}) + \frac{I}{r}\right)$$

$$H = \frac{R}{K}\left(r\bar{H} + \left(\frac{K^2}{R} + K_{vis}\right)\frac{\dot{\mathbf{q}}}{r} + \frac{K_{clmb}}{r}\mathbf{q}\right)$$

Or, d'après le modèle cinématique direct d'ordre deux, l'accélération opérationnelle a la forme ci-après :

$$\ddot{X} = \dot{J}_{base}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + J_{base}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} \quad (4-18)$$

d'où :

$$\ddot{\mathbf{q}} = J_{base}^{-1}(\ddot{X} + \dot{J}_{base}\dot{\mathbf{q}}) \quad (4-19)$$

La substitution de l'expression de $\ddot{\mathbf{q}}$ donnée par (4-19) dans (4-17) donne :

$$U = A_X\ddot{X} + H_X \quad (4-20)$$

Où :

$$A_X = A J_{base}^{-1}$$

$$H_X = H - A J_{base}^{-1} \dot{J}_{base} \dot{\mathbf{q}}$$

L'équation (4-20) représente le modèle dynamique du robot plus actionneurs dans l'espace opérationnel. Cette dernière peut se réécrire comme l'équation dynamique d'un double intégrateur comme suit :

$$\ddot{X} = w \quad (4-21)$$

Où $w = A_X^{-1}(U - H_X)$

L'équation dynamique de l'erreur opérationnelle ($e = X^{ref} - X$) est choisie de telle manière à ce que la solution de cette dernière soit exponentiellement stable (cahier des charges). Pour atteindre cet objectif, un choix possible est donné par l'équation d'erreur ci-après :

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = 0 \quad (4-22)$$

Où k_p et k_v sont des matrices diagonales définies positives représentant les gains proportionnels et dérivés, respectivement.

De (4-22), est tirée l'expression de l'erreur d'accélération comme suit:

$$\ddot{e} = -k_v \dot{e} - k_p e \quad (4-23)$$

Où encore :

$$\ddot{X}^{ref} - \ddot{X} = -k_v \dot{e} - k_p e \quad (4-24)$$

Ce qui donne :

$$\ddot{X}^{ref} + k_v \dot{e} + k_p e = \ddot{X} \quad (4-25)$$

Remplaçant \ddot{X} donné par (4-21) dans (4-25) :

$$\ddot{X}^{ref} + k_v \dot{e} + k_p e = A_X^{-1}(U - H_X) \quad (4-26)$$

La tension de commande linéaire dans l'espace opérationnel est exprimée par la relation suivante :

$$U = A_X(\ddot{X}^{ref} + k_v \dot{e} + k_p e) + H_X \quad (4-27)$$

Soit $w = \ddot{X}^{ref} + k_v \dot{e} + k_p e$ le nouveau vecteur de commande du système découplé second ordre, à cet effet l'expression de la tension de commande aura la forme suivante :

$$U = A_x w + H_x \quad (4-28)$$

La loi de commande en tension donnée par (4-27) et est représentée à la **Figure** ci-après sous forme d'un schéma bloc :

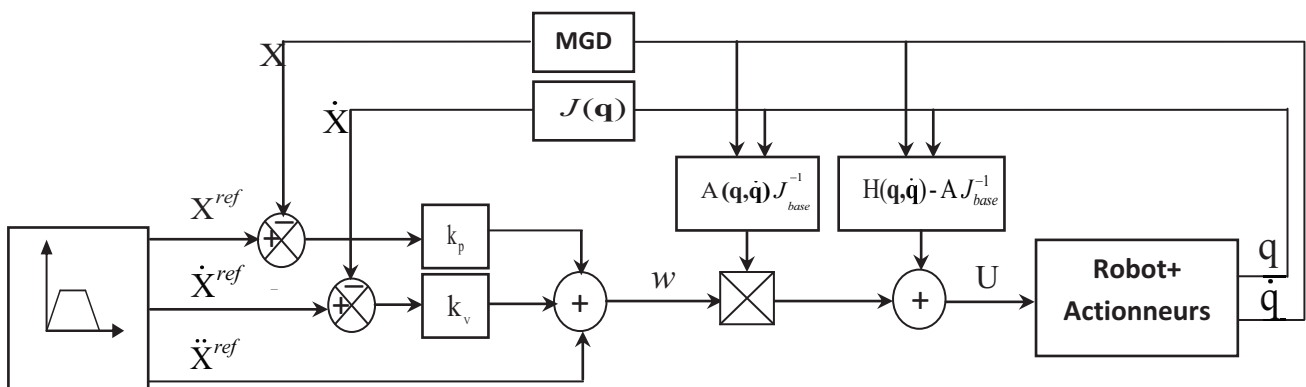


Figure 4.3. Schéma de commande par couple calculé dans l'espace opérationnel.

2.2.Simulation

Les paramètres de simulation sont choisis tels que :

- Les gains du régulateur

$$K_p = 5000 ; K_v = 0.707\sqrt{k_p} = 50$$

- Les paramètres des moteurs sont tel que :

$$R = \text{diag}([2.1 \ 2.1 \ 2.1 \ 6.7 \ 6.7 \ 6.7]) \Omega$$

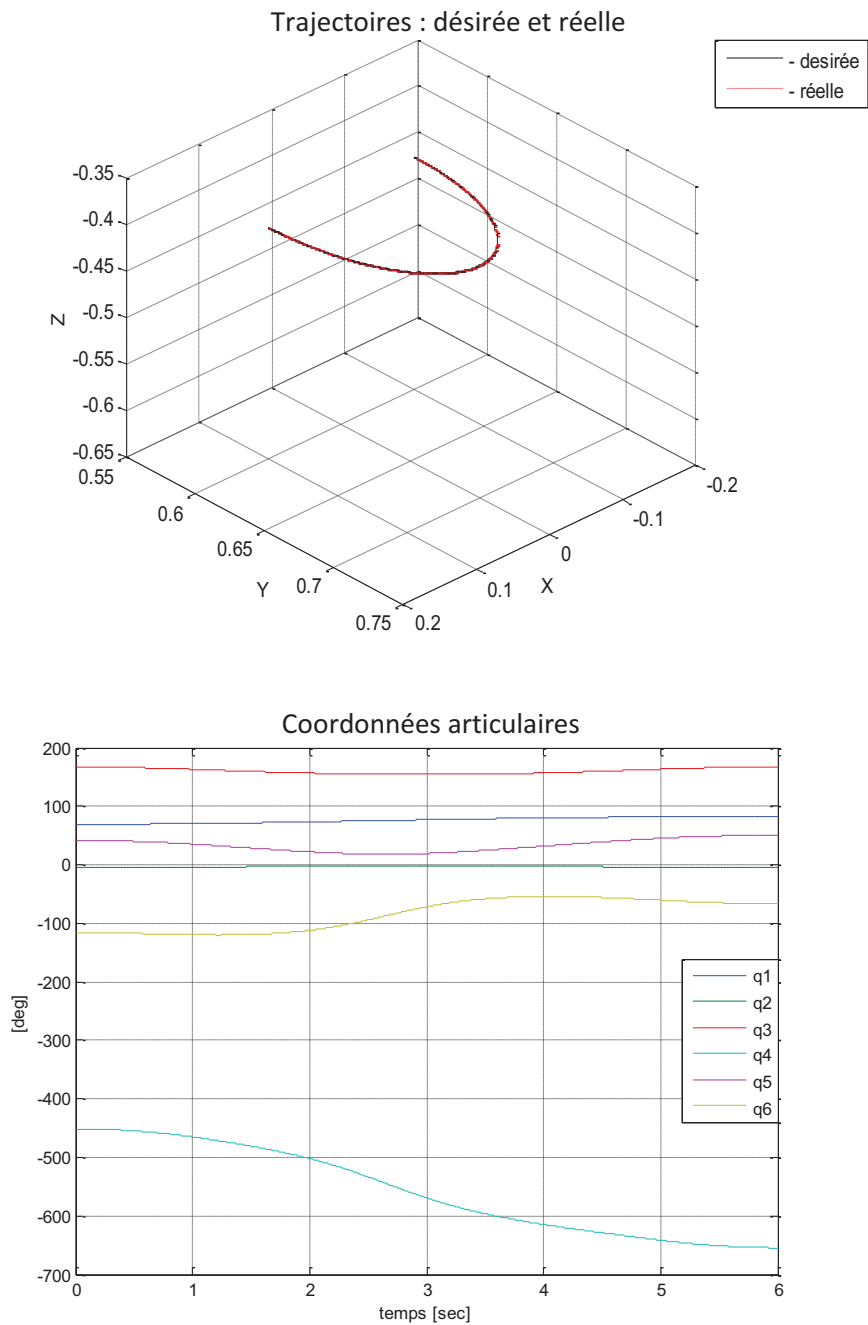
$$K = \text{diag}([0.189 \ 0.219 \ 0.202 \ 0.075 \ 0.066 \ 0.066]) \text{V.tr}^{-1}$$

$$r = \text{inv}(\text{diag}([62.61 \ 107.36 \ 53.69 \ 76.01 \ 71.91 \ 76.63]))$$

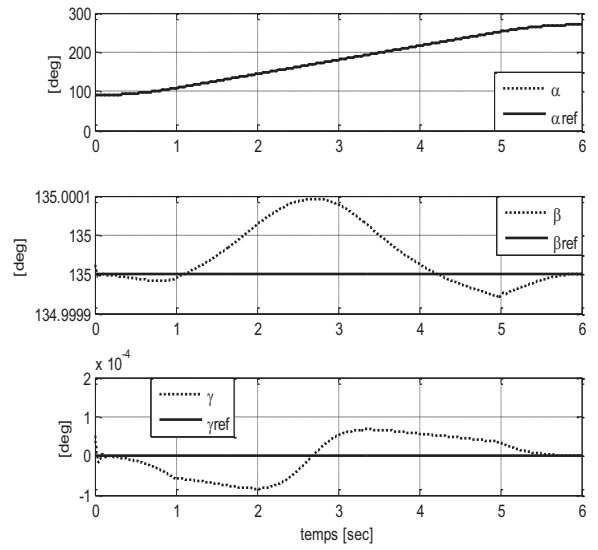
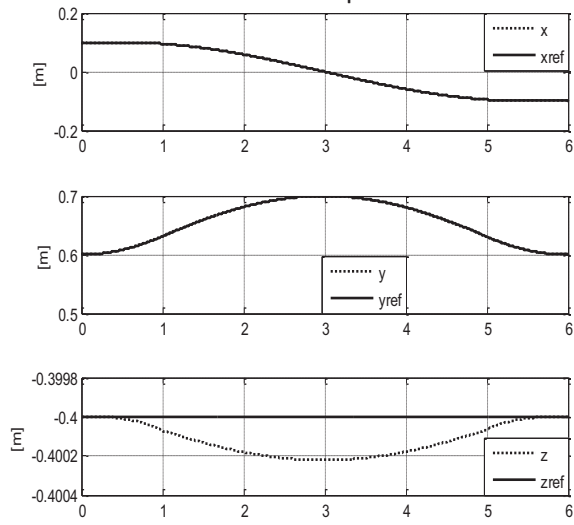
$$I = 10^{-6} \text{diag}([291 \ 409 \ 299 \ 35 \ 35 \ 33]) \text{Kg.m}^2$$

Les résultats de simulation sont donnés à la **Figure** ci-après :

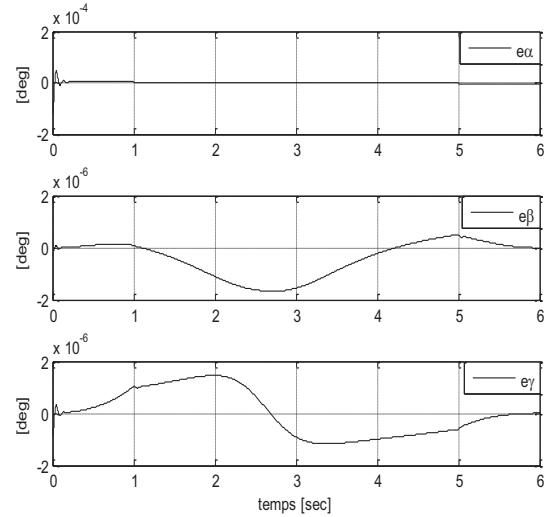
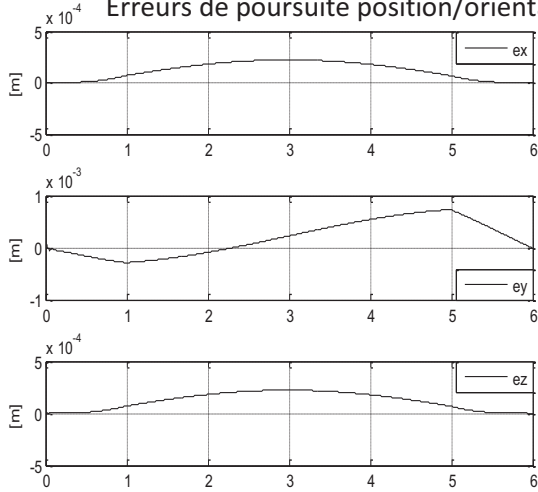
- **Situation normale (sans erreurs paramétriques)**



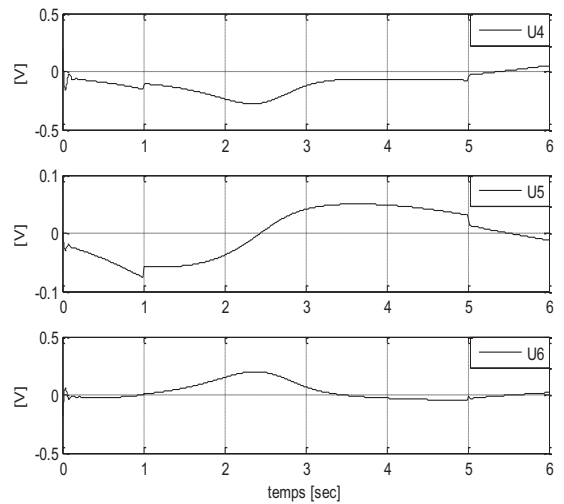
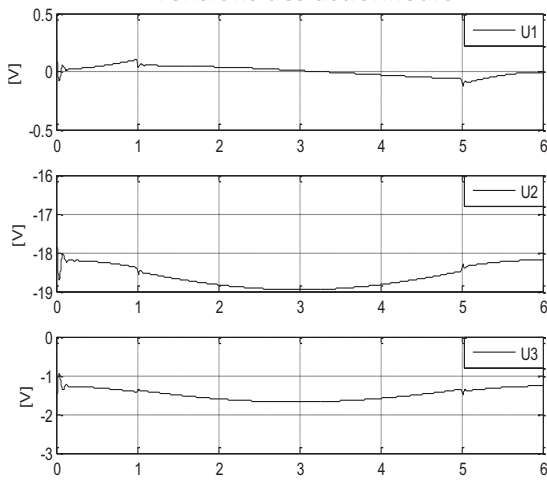
Coordonnées opérationnelles



Erreurs de poursuite position/orientation



Tensions des actionneurs



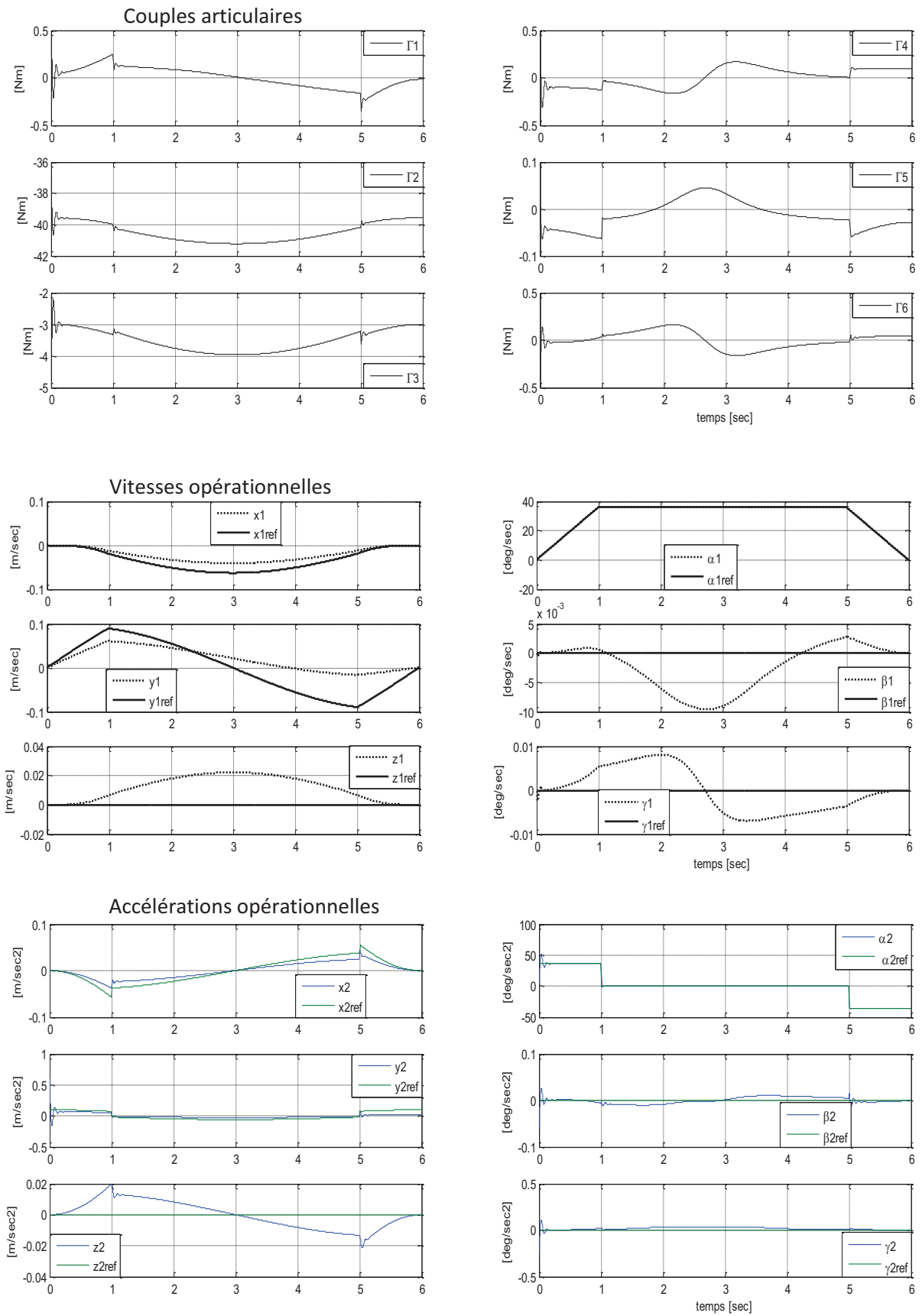


Figure 4.4. Cas de la commande par couple calculé sans erreurs paramétriques.

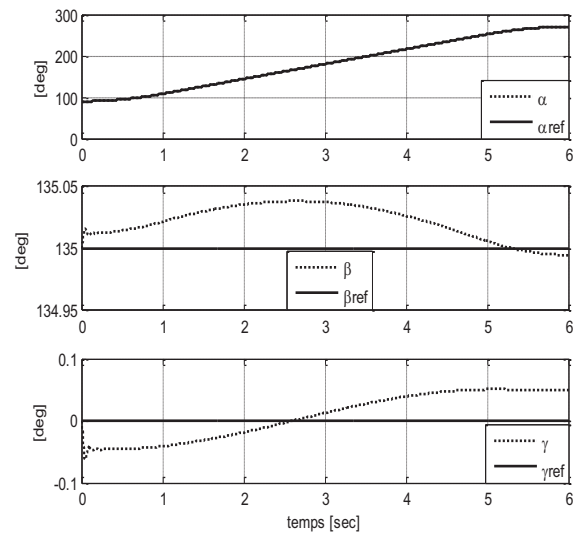
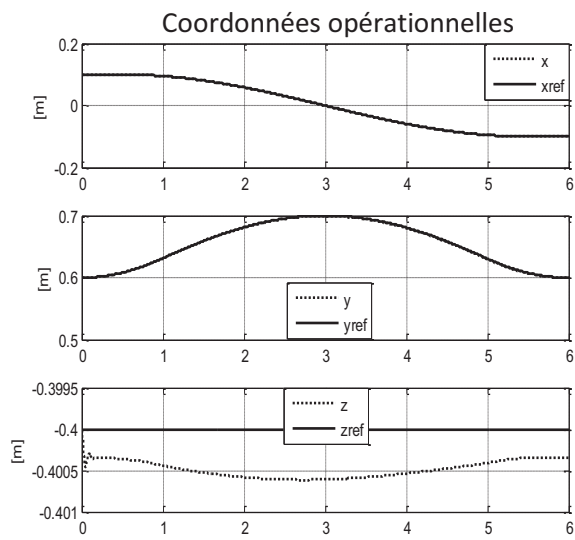
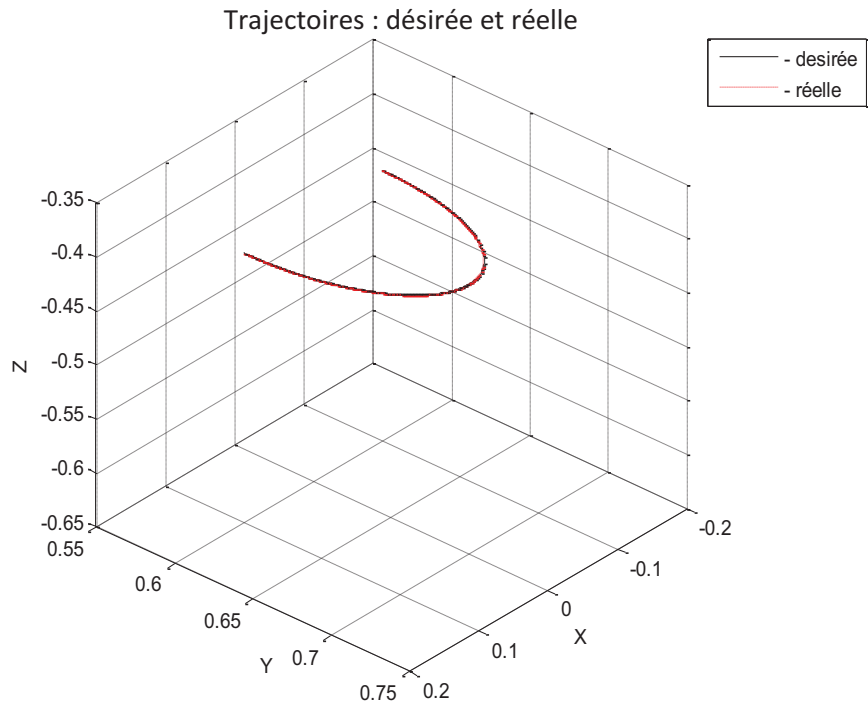
2.3. Interprétation

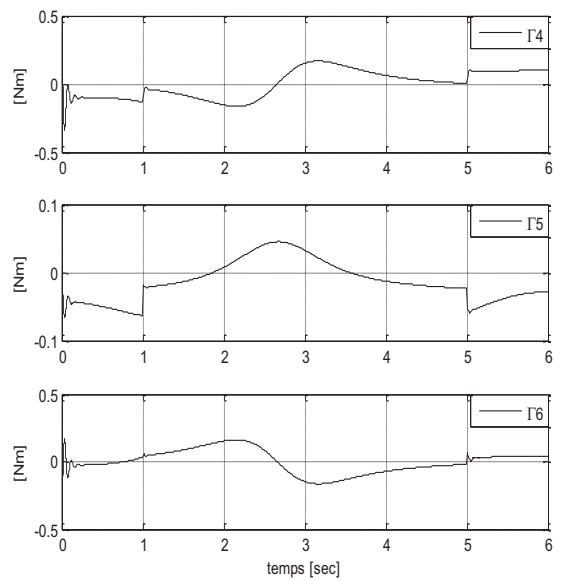
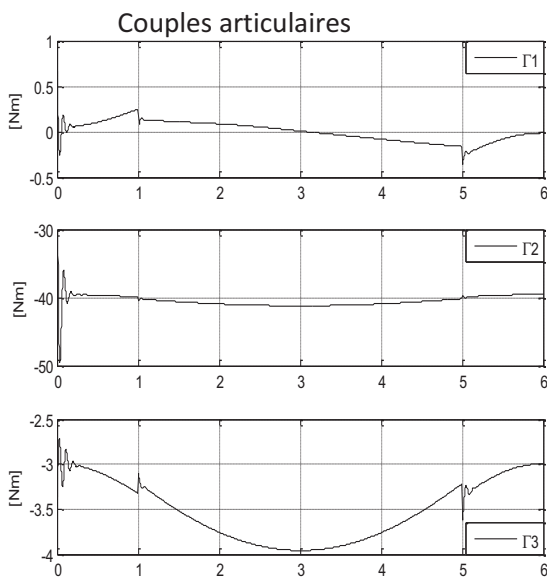
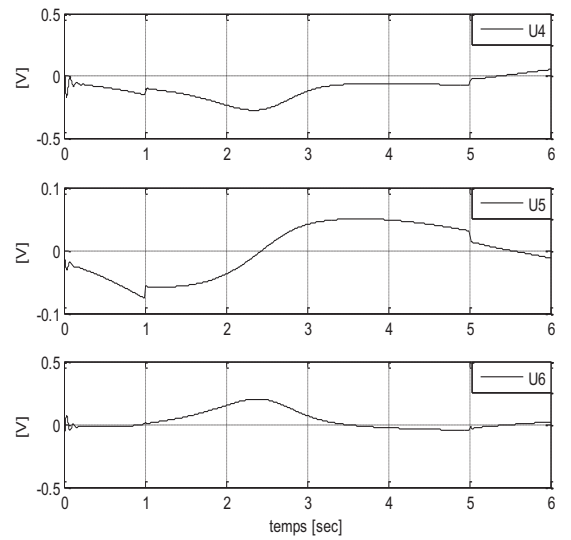
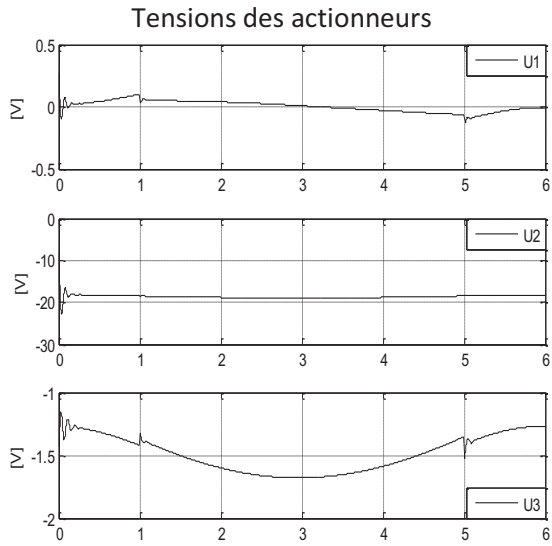
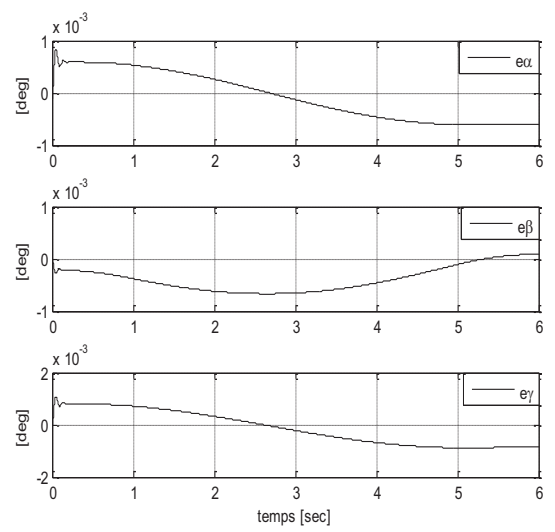
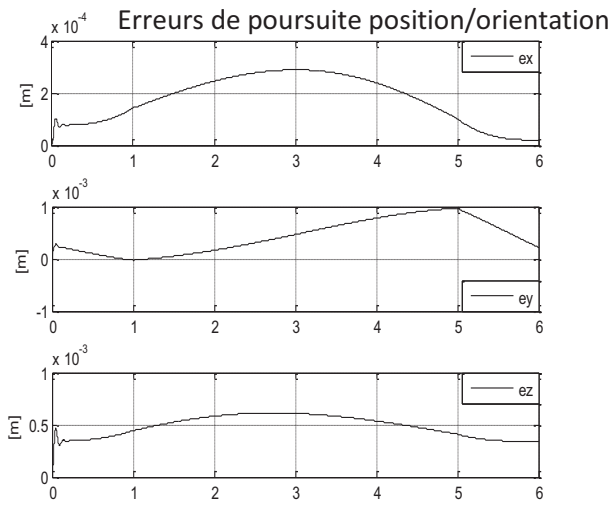
Les résultats obtenus montrent que la commande classique (couple calculé) a permis d'assurer la poursuite de la trajectoire désirée propre à la tâche. De plus, en analysant les courbes de la **Figure 4.4**, il est constaté un suivi effectif des trajectoires de références en position, vitesse et accélération selon les trois directions cartésiennes X, Y et Z et les trois orientations α, β, γ . Cela se justifie par les erreurs de poursuite qui sont inférieures à 0.8 mm pour la position et inférieures à 0.0001° pour l'orientation. Il y a lieu de noter que les tensions de commande sont lisses et admissibles (inférieures à 20 V ce qui est équivalent à des couples moteurs inférieurs 42 Nm).

En général, le vecteur des couples de Coriolis, centrifuges et de gravité noté H très difficile à obtenir en modélisation analytique et vu la forte dépendance de la loi de commande par couple calculé du modèle dynamique du manipulateur, la loi de commande est rendue très sensible aux incertitudes de modélisation et aux perturbations externe [2]. Cela est confirmé par les résultats de simulation dans le cas d'une imprécision paramétrique affectant le modèle dynamique.

- **Situation défailante (présence d'erreurs paramétriques)**

Les résultats de simulation donnés à la **Figure 4.5** sont obtenus dans le cas d'une erreur de modélisation de 50% sur le vecteur H.





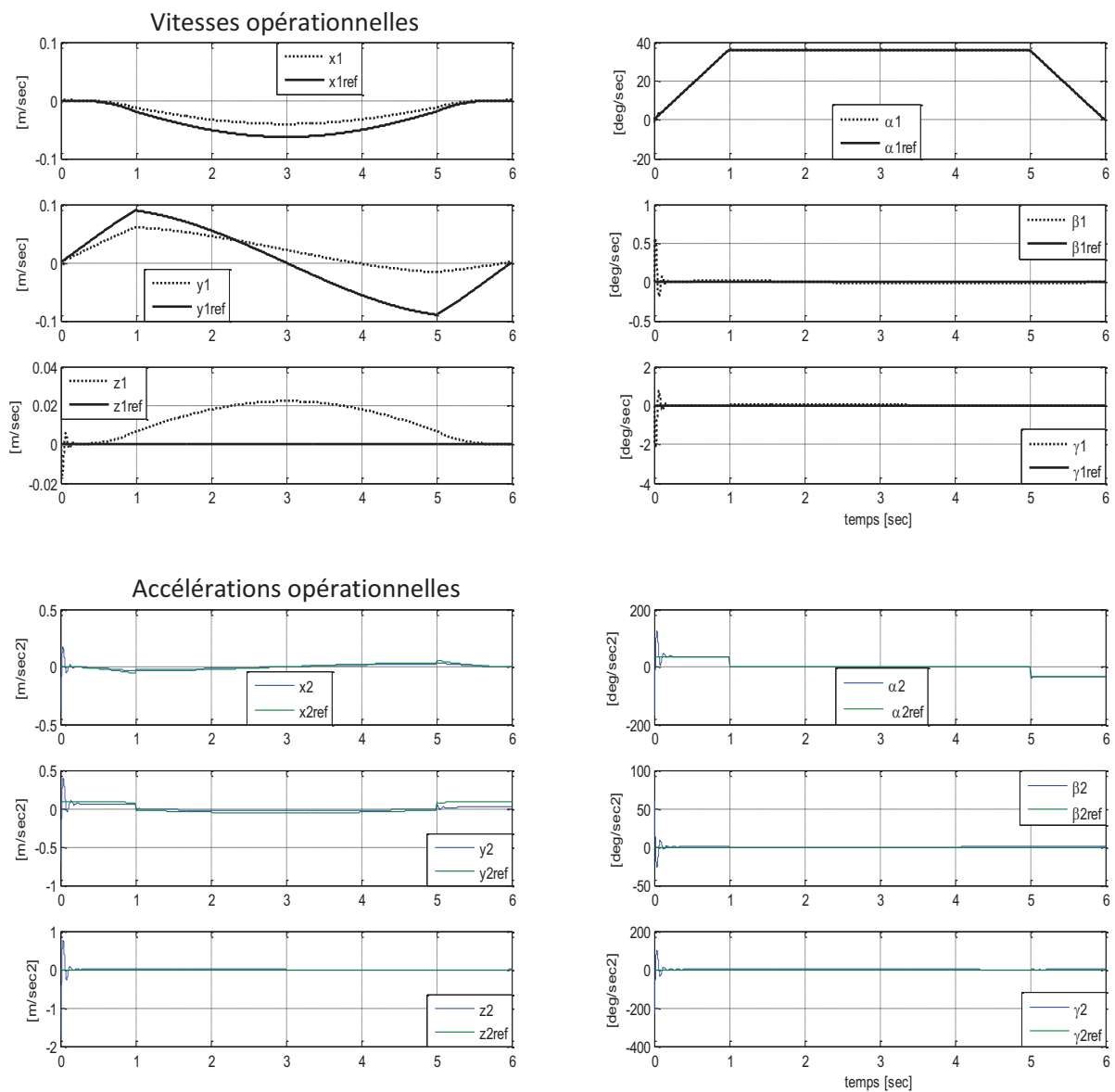


Figure 4.5. Cas de la commande par couple calculé avec 50% d’erreur de modélisation sur le vecteur H.

Pour remédier à ce problème (robustesse vis-à-vis des erreurs de modélisations), il ya lieu d’adopter une autre stratégie de commande en position-orientation robuste telle que la commande à structure variable (*sliding mode Control*).

3. Commande par modes glissants

3.1. Synthèse de la loi de commande

L'équation dynamique du système dans l'espace opérationnelle a la forme ci-après :

$$U = A_x \ddot{X} + H_x$$

Cette dernière peut se réécrire comme l'équation dynamique d'un double intégrateur comme suit :

$$\ddot{X} = w \quad (4-29)$$

Où :

w est le nouveau vecteur de commande.

L'objectif est de réaliser la poursuite de la trajectoire de référence bien définie dans le cahier des charges. Une surface de glissement qui réalise cet objectif pourrait avoir la forme suivante :

$$s = \dot{e} + \lambda e \quad (4-30)$$

Où:

$e = X^{ref} - X$ est l'erreur en position dans l'espace opérationnel.

$\dot{e} = \dot{X}^{ref} - \dot{X}$ est l'erreur en vitesse dans l'espace opérationnel.

En effet, lors du glissement $s = \dot{e} + \lambda e = 0$ ce qui signifie que $\dot{e} = -\lambda e$ et l'erreur de poursuite converge asymptotiquement vers 0.

Le coefficient constant de conception λ est à choisir de façon à avoir une dynamique rapide en régime de glissement.

La condition de glissement et d'attractivité qui se traduit par $\dot{s} = -Ksign(s)$ permet d'écrire

$$\ddot{e} + \lambda \dot{e} = -Ksign(s) \quad (4-31)$$

Ou encore :

$$(\ddot{X}^{ref} - \ddot{X}) - \lambda \dot{e} = -Ksign(s) \quad (4-32)$$

La substitution de (4-29) dans (4-32) conduit à :

$$\ddot{X}^{ref} - w - \lambda \dot{e} = -Ksign(s) \quad (4-33)$$

Il en découle :

$$\ddot{X} = w = \ddot{X}^{ref} - \lambda \dot{e} + K \text{sign}(s) \quad (4-34)$$

L'expression de la loi de commande est donnée par :

$$U = A_x (\ddot{X}^{ref} - \lambda \dot{e} + K \text{sign}(s)) + H_x \quad (4-35)$$

Pour faire face au phénomène de broutement dû à la forte non linéarité de la fonction *sign* ce qui risquerait de causer une forte oscillation des tensions de commande des actionneurs (moteurs à courant continu), il serait nécessaire d'adoucir cette fonction en la remplaçant par une fonction sigmoïde.

Afin de mieux illustrer, l'équation (4-35) est schématisée sous forme d'un schéma bloc présenté à la **Figure** ci-après :

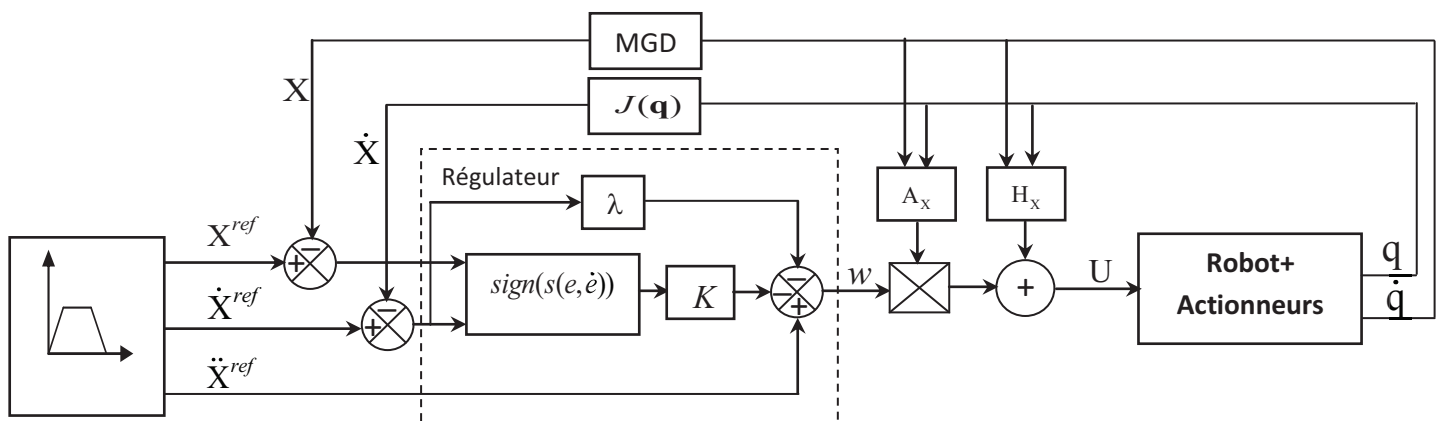


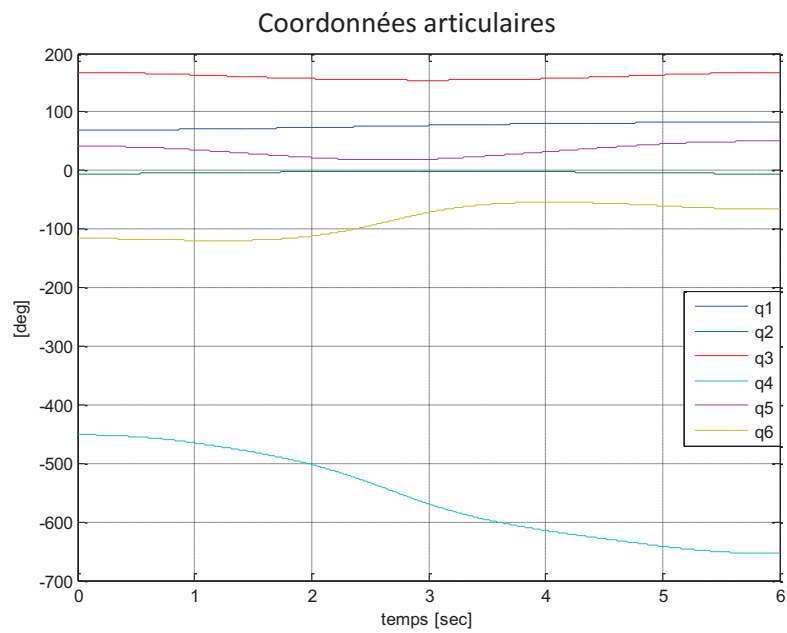
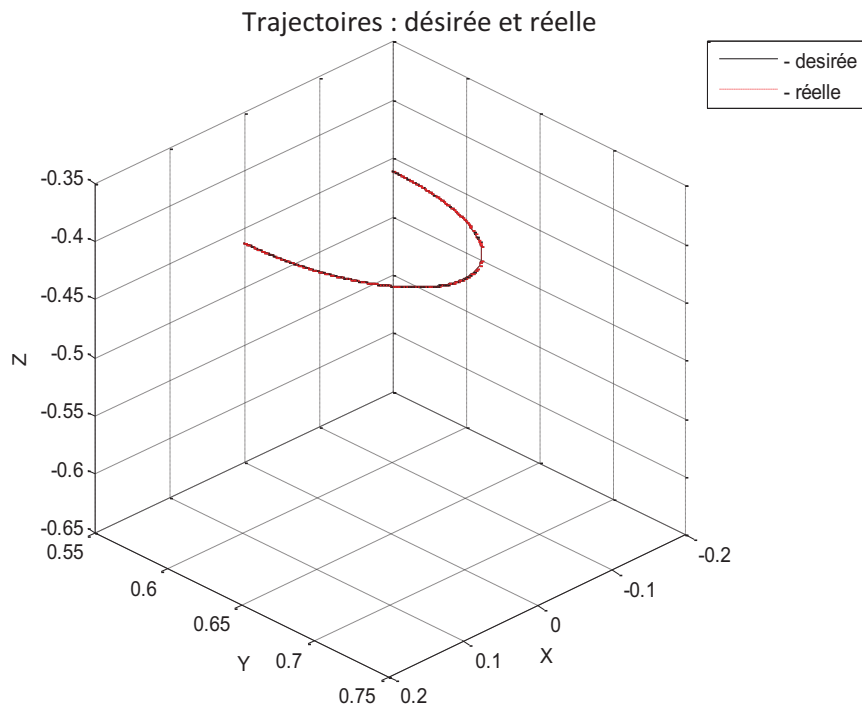
Figure 4.6. Schéma de commande par modes glissants dans l'espace opérationnel.

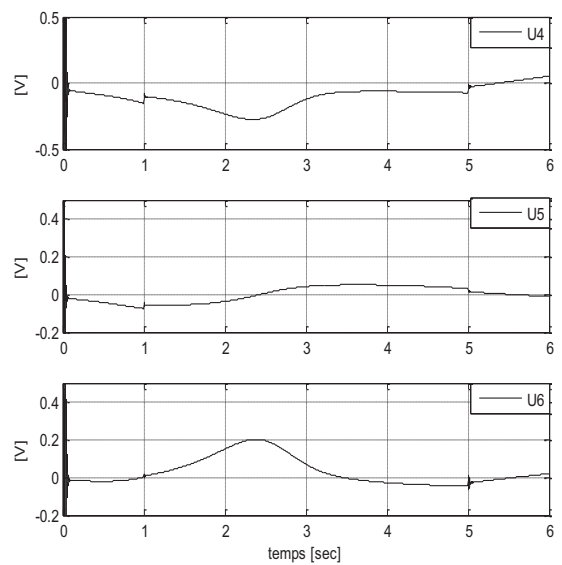
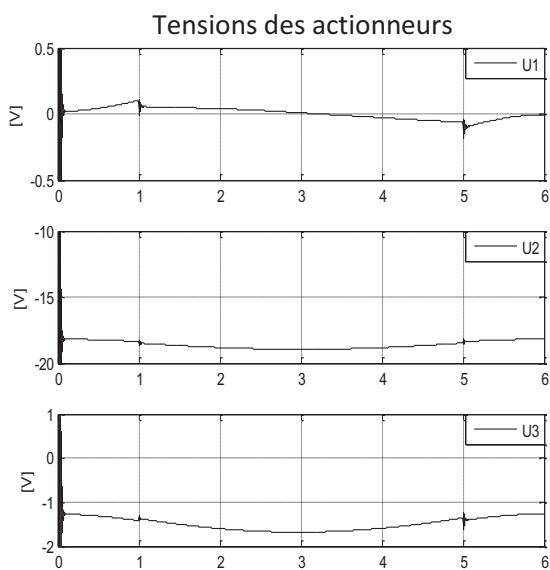
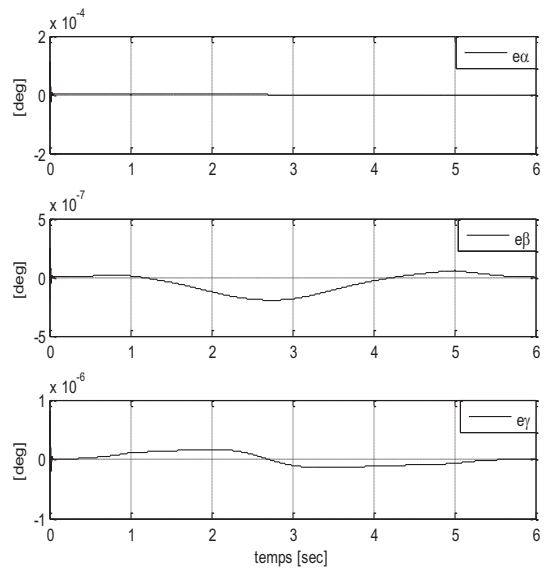
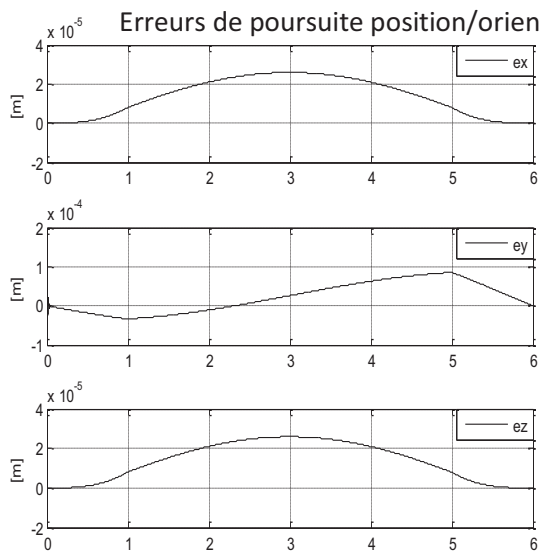
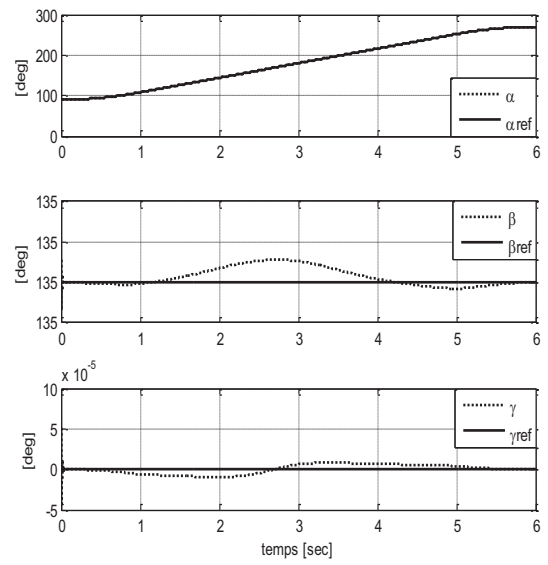
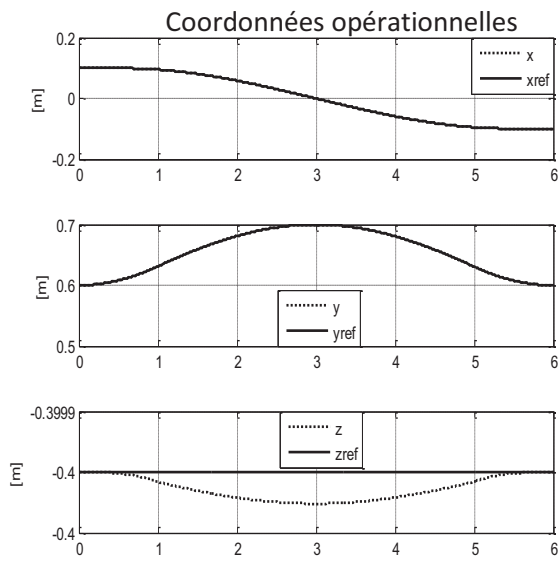
3.2. Simulation

- **Situation normale (sans erreurs paramétriques) :**

Les courbes **Figure 4.7** représentent la poursuite des trajectoires en position et orientation en appliquant la structure de commande par mode glissant. Les paramètres de réglage qui ont donné satisfaction sont tels que :

$\lambda = 600$ et $K = 2000$.





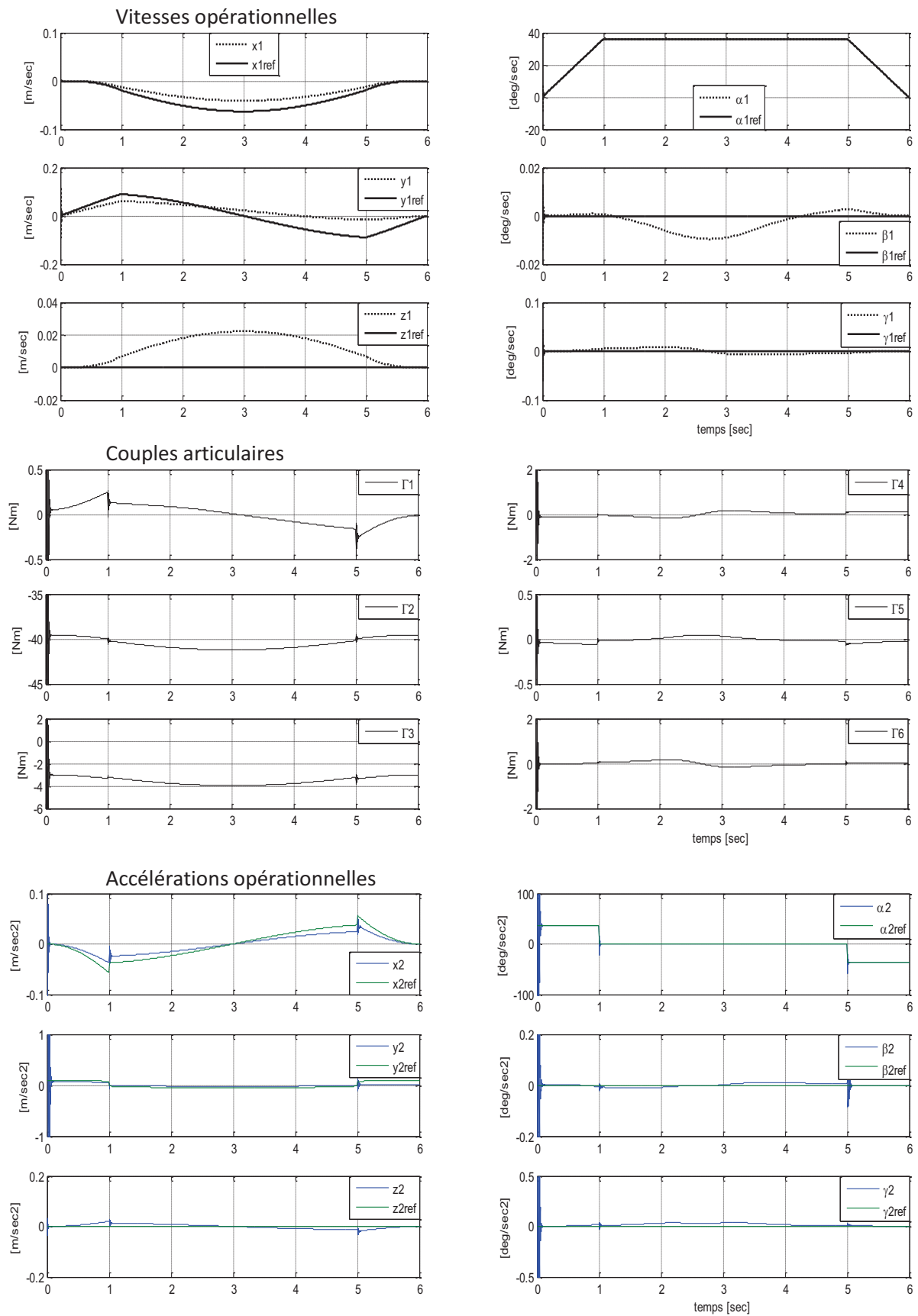
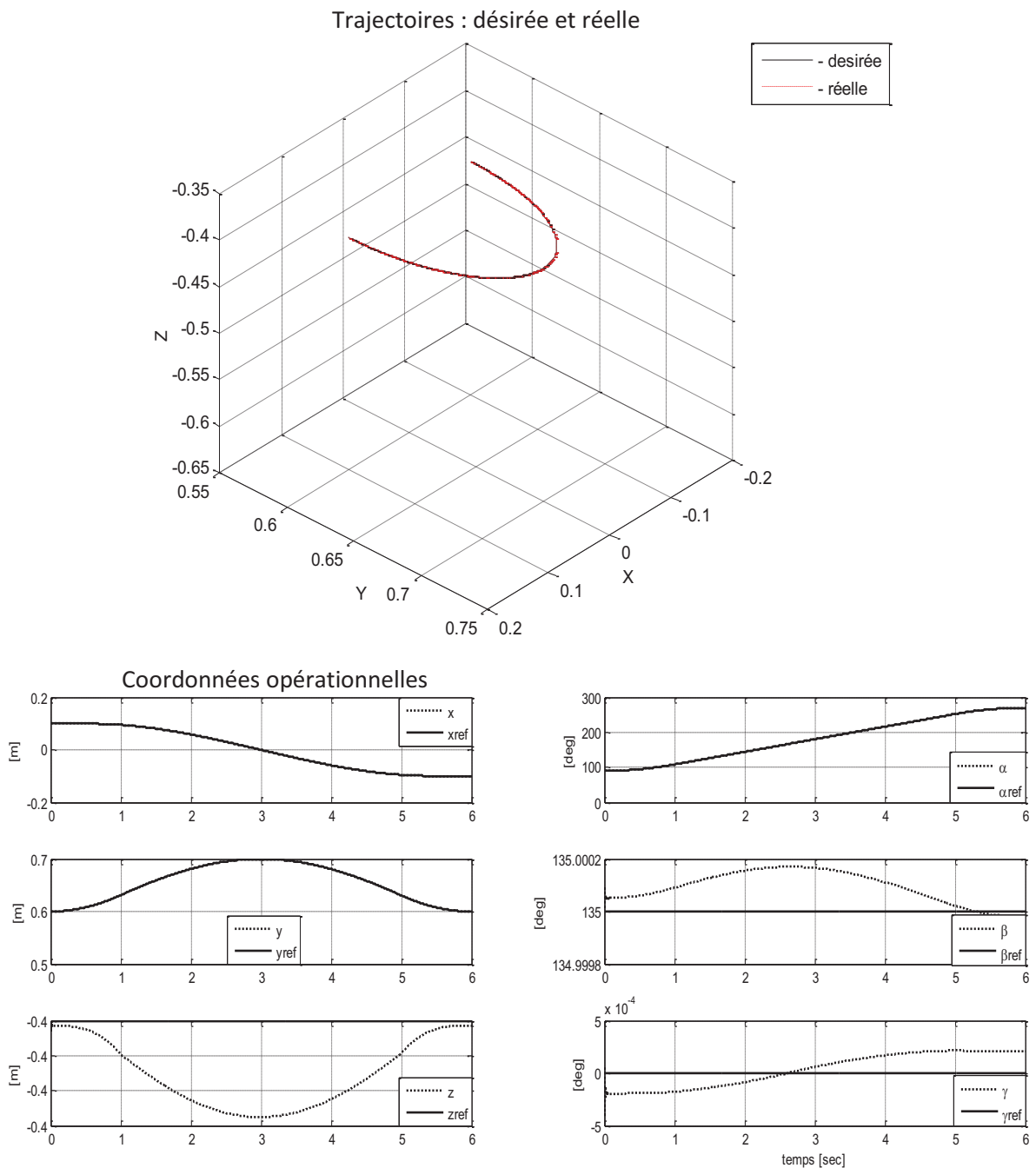


Figure 4.7. Cas de la commande par modes glissants sans erreurs paramétriques.

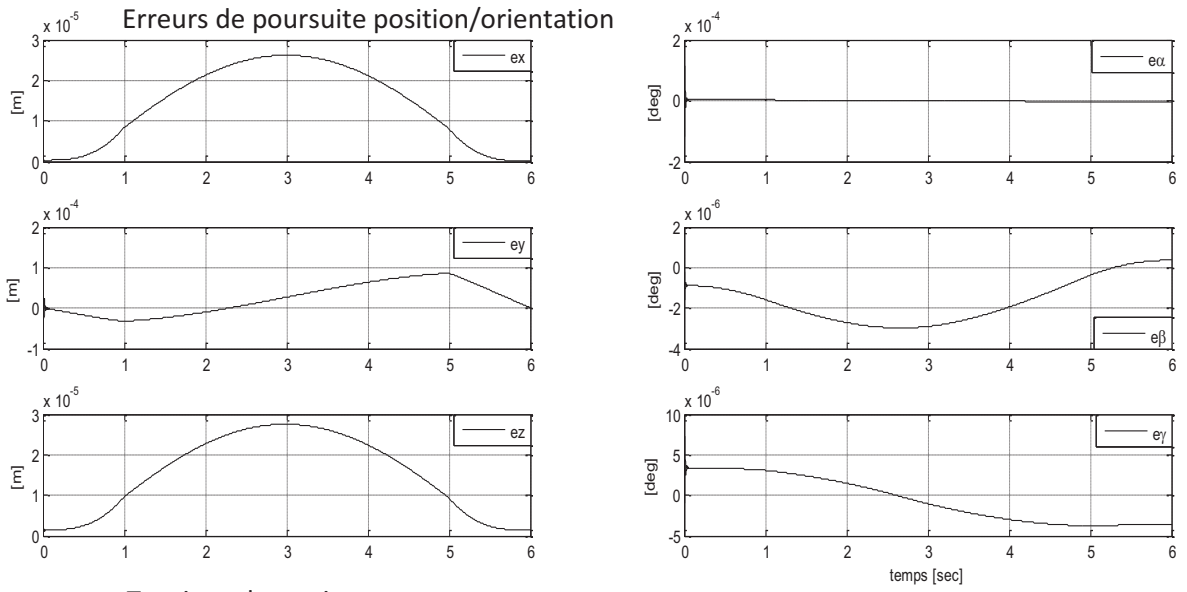
• Situation défailante (présence d'erreurs paramétriques)

Les simulations montrent que la commande à structure variable est robuste vis-à-vis des erreurs paramétriques. Ces résultats sont obtenus en considérant une erreur de modélisation de 50% sur la matrice H.

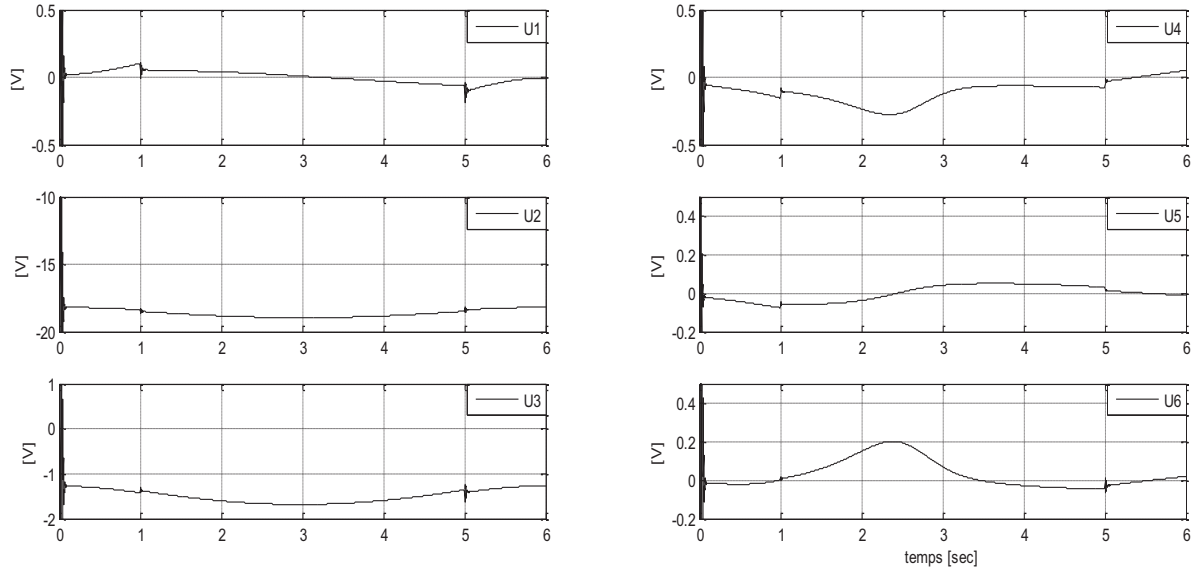
Les résultats de simulations sont donnés à la **Figure** ci-après :



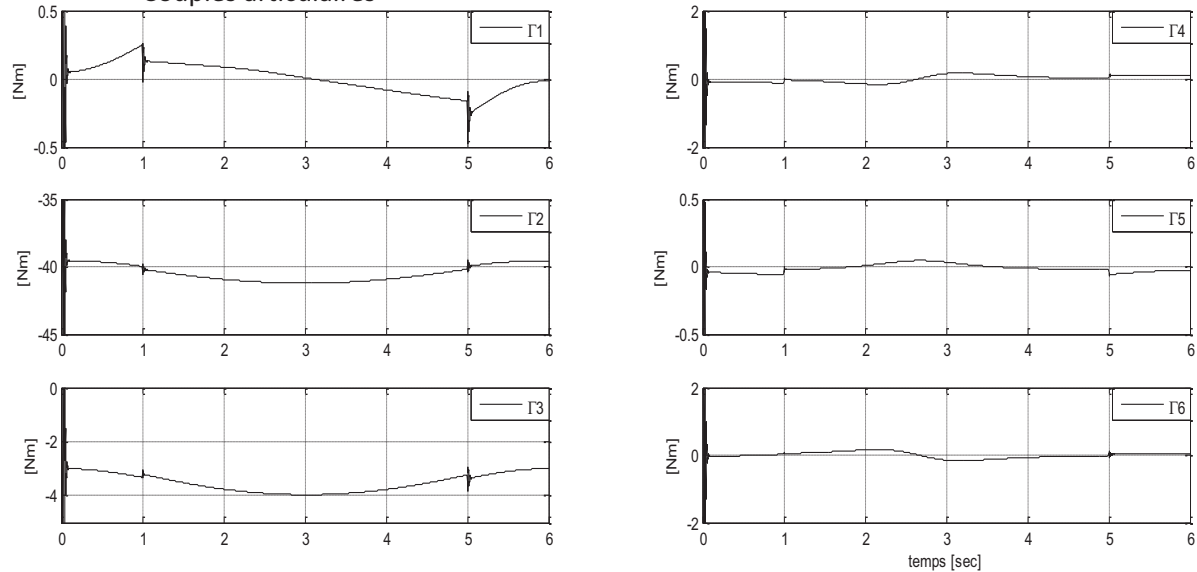
Erreurs de poursuite position/orientation



Tensions des actionneurs



Couples articulaires



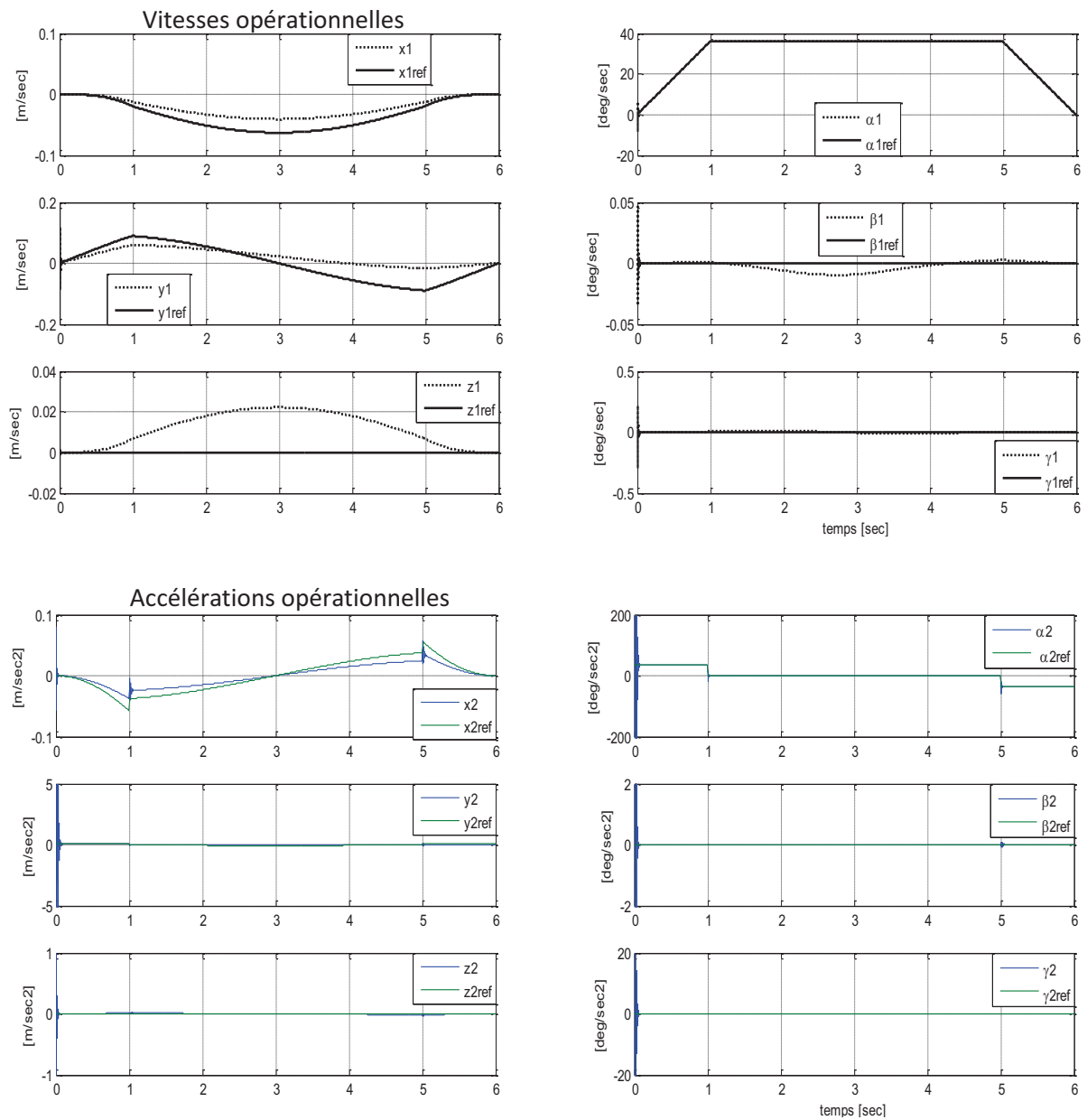
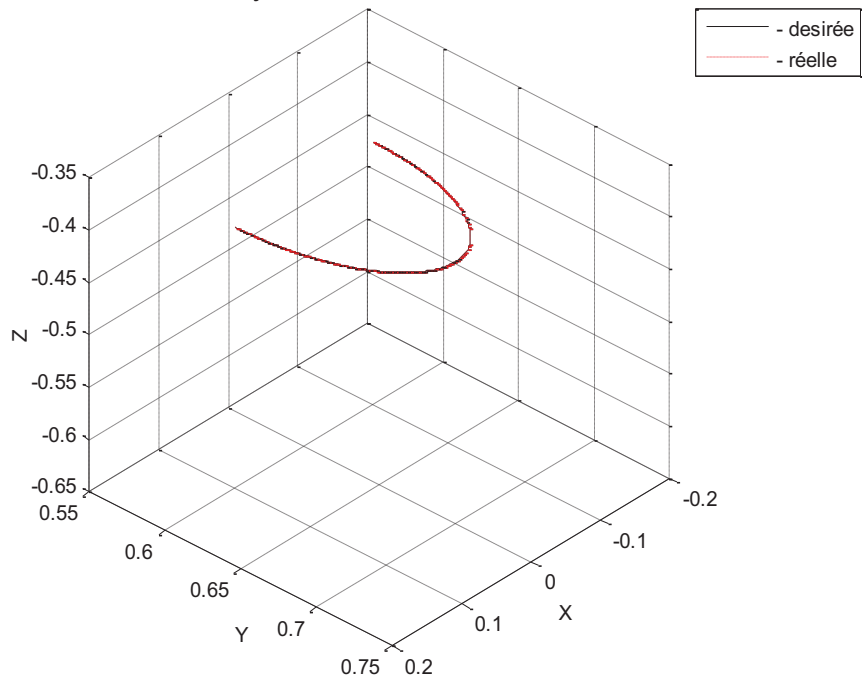


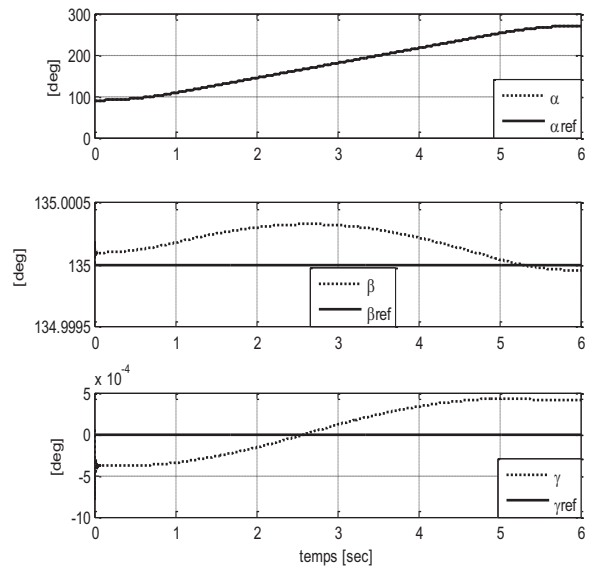
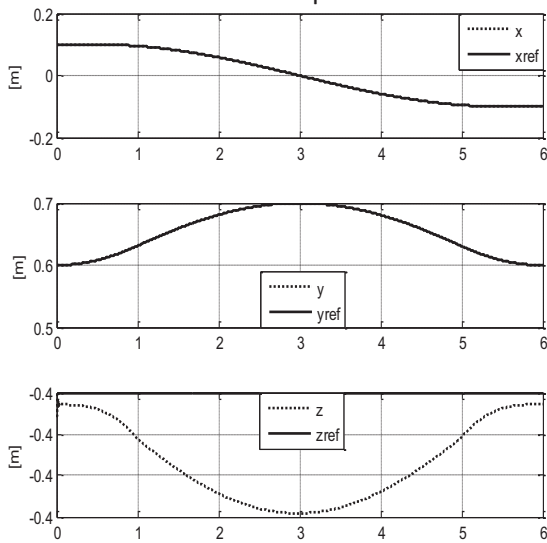
Figure 4.8. Cas de la commande par modes glissants avec 50% d'erreur de modélisation sur le vecteur H.

Les résultats de simulation donnés à la **Figure 4.9** sont obtenus dans le cas où le vecteur H (difficile à établir et exigeant un nombre important d'opérations) est négligé lors du calcul de la commande.

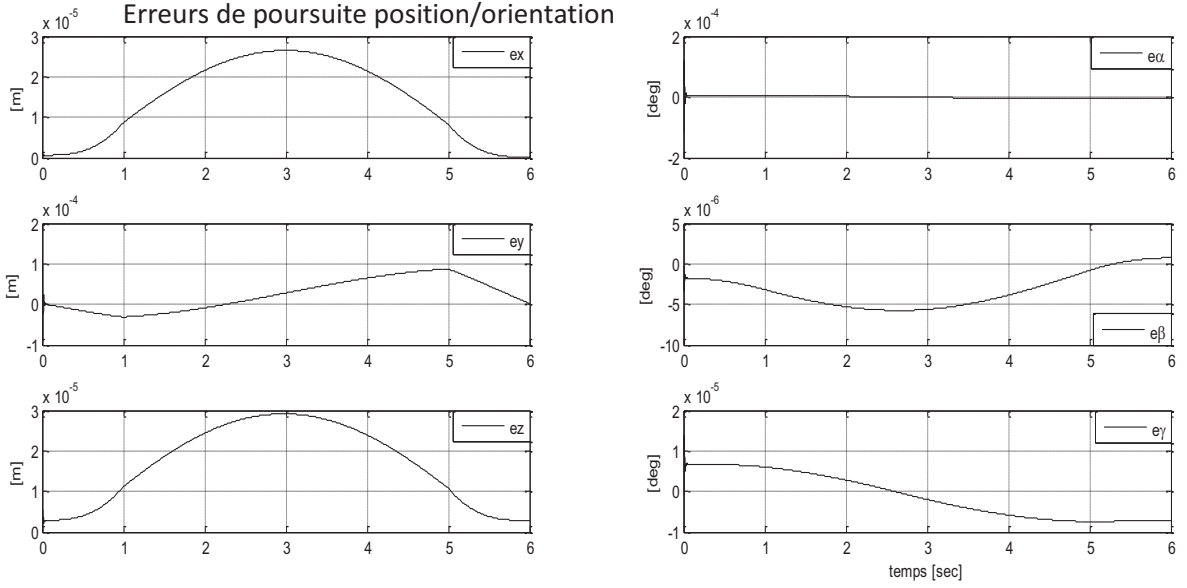
Trajectoires : désirée et réelle



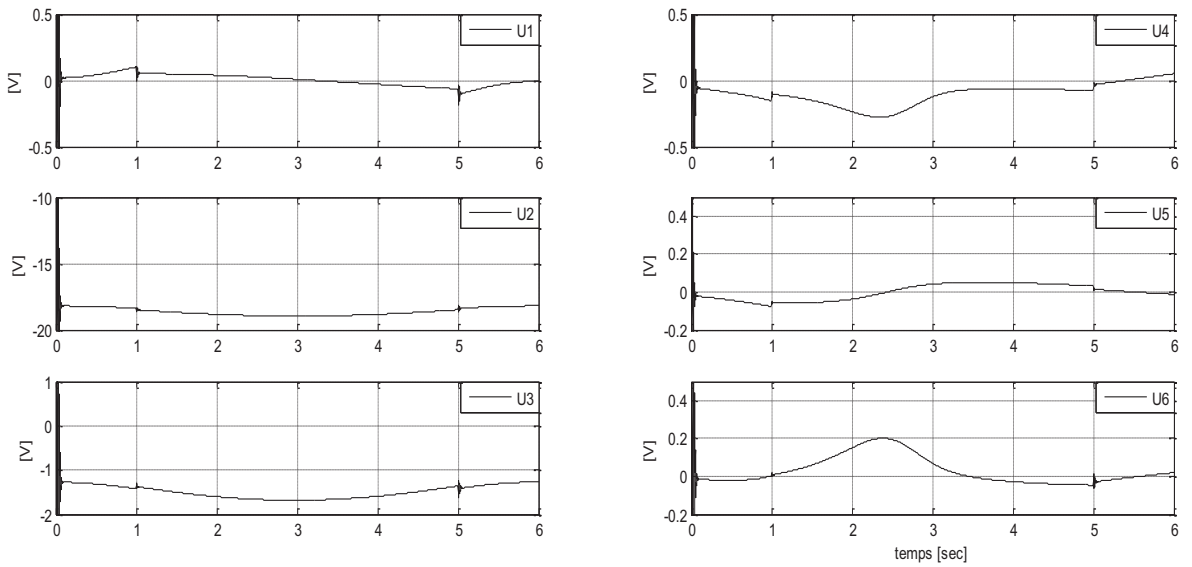
Coordonnées opérationnelles



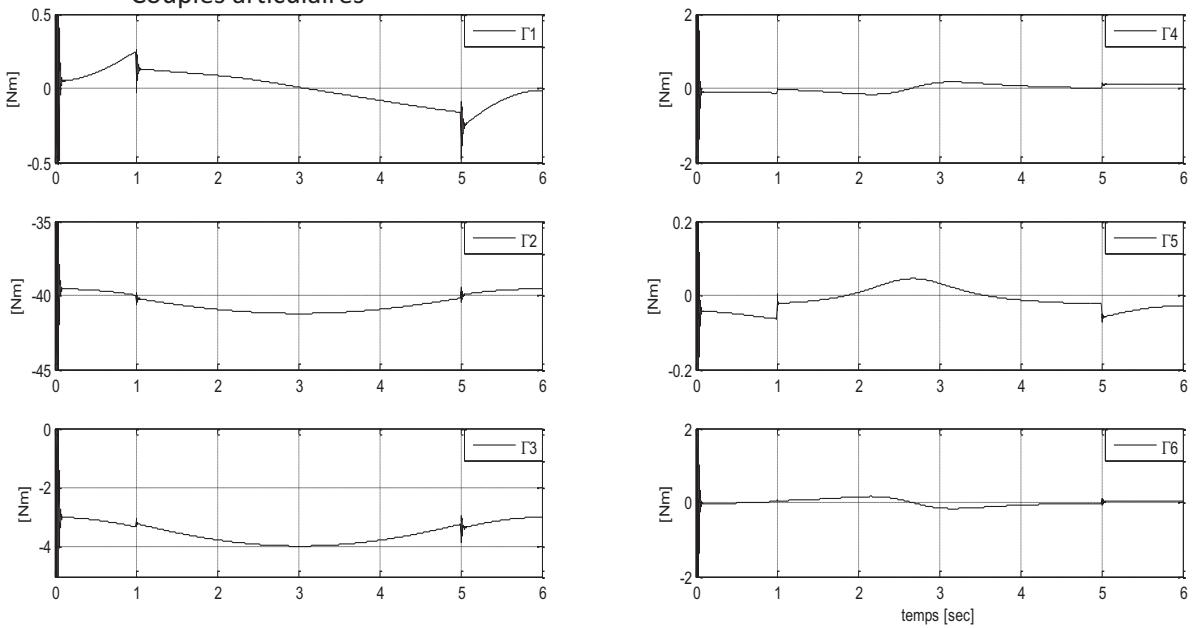
Erreurs de poursuite position/orientation



Tensions des actionneurs



Couples articulaires



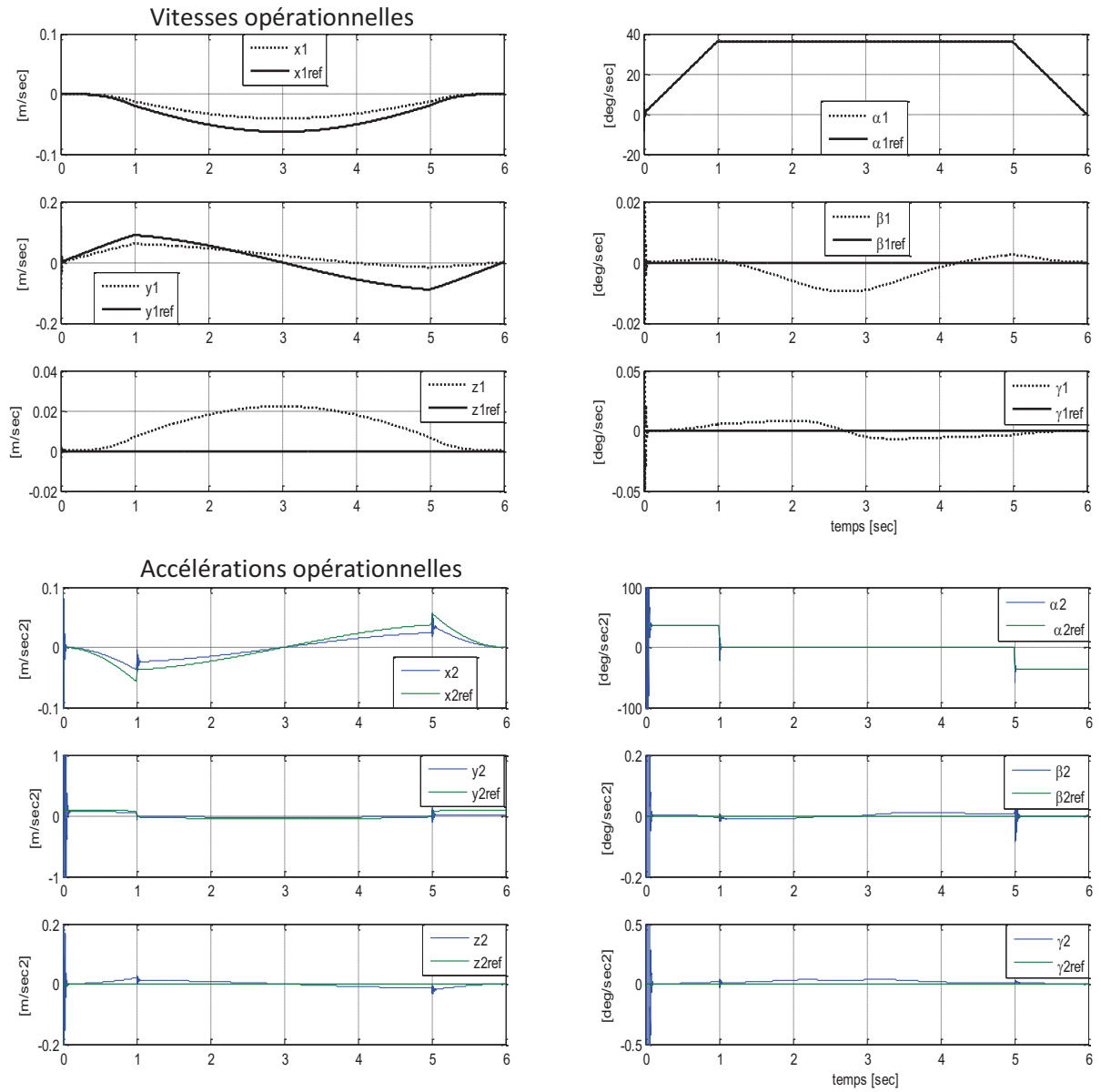


Figure 4.9. Cas de la commande par modes glissants avec le vecteur H négligé.

3.3. Interprétation

Les résultats de simulation montrent que la performance de poursuite de trajectoire en position et en orientation n'a pas été influencée par l'absence du vecteur H dans la loi de commande, ce qui veut dire que la technique de commande utilisée est robuste vis-à-vis des erreurs de modélisations. Néanmoins, il faut constater que cette correction présente des limitations, dans le choix du gain de réglage, dues au phénomène de chattering.

Comme la tâche d'ébavurage définie dans le cahier des charges exige un contact avec une surface rigide (pièce à ébavurer), une commande en effort devrait faire partie du système de commande en plus de la commande en position/orientation qui est tout le temps nécessaire. Le prochain chapitre sera consacré à la commande en force des manipulateurs.

4. Conclusion

Au cours du présent chapitre, il a été développé un modèle complet du robot en prenant en compte la dynamique des actionneurs et ce en combinant les équations électriques et mécaniques des moteurs avec l'équation dynamique du manipulateur. Le modèle dynamique obtenu qui a servi à la synthèse de deux lois de commande dans l'espace opérationnel, a pour entrées les six tensions d'alimentation des moteurs.

Le couple calculé est une technique idéale pour la commande des robots, cependant, vu la forte dépendance du modèle dynamique, celle-ci est très sensible aux imprécisions paramétriques inévitables lors de la modélisation. Comme solution, il a été proposé la technique des modes glissants connue par son caractère robuste.

L'étude présentée dans ce chapitre en considérant les deux structures de commande sus exposées, restent insuffisantes pour la réalisation complète de la tâche d'ébavurage qui doit être complétée par la compliance et la commande en force, ce qui fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 5

Commande en Force

1. Introduction

L'automatisation de certaines tâches industrielles telles que l'assemblage, l'usinage (ébavurage, ébarbage), la poursuite de surfaces (polissage,...etc.), nécessite l'exécution de succession de mouvements libres et de mouvements contraints. D'un mouvement libre résulte un déplacement par contre le mouvement contraint induit un effort. Deux objectifs sont visés par la commande d'un robot manipulateur en contact avec l'environnement à savoir:

- le robot est asservi en position sans recevoir de consigne en effort,
- le robot est équipé d'un capteur d'effort et est asservi en effort et en position.

Les principales structure de commande en effort son présentées au tableau suivant [2] :

Tableau 5.1. Classification des structures de commande en effort.

Commande sans consigne d'effort	Commande avec consigne d'effort
Compliance passive	Commande hybride
Commande par raideur active	Commande hybride externe
Commande en impédance	

2. Commande en force

Cette commande permet d'asservir à la fois les déplacements et les efforts. Elle se caractérise par la présence de deux boucles imbriquées de commande, une boucle externe correspondant à l'asservissement en effort et une boucle interne pour l'asservissement en position hiérarchiquement inférieure.

La boucle en position est toujours active et l'asservissement de position est basé généralement sur la commande par découplage non linéaire. Ainsi, la notion de commande en effort se base-t-elle sur la poursuite d'une trajectoire suivant une direction bien déterminée, bien entendu, cette direction doit être différente de celle suivant laquelle s'exerce la commande en effort.

2.1. Loi de commande

2.1.1. Commande en impédance mécanique d'un robot

En robotique industrielle, l'environnement est, généralement, inconnu à l'effecteur terminal du manipulateur et les variations de l'impédance d'environnement peuvent être petites ou grandes, lisse ou brusque et dépendent fortement des matériaux utilisés et de la tâche à exécuter. En effet, le robot peut se déplacer dans l'espace libre ou contraint sur un environnement mou ou rigide, homogène ou hétérogène.

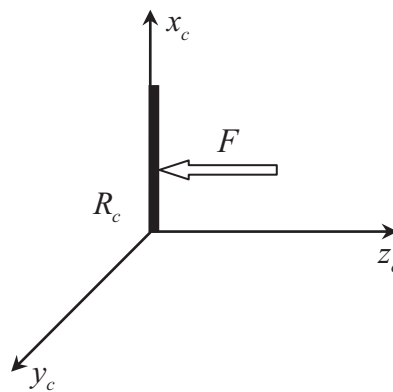


Figure 5.1. Repère de compliance et force.

Dans la philosophie de commande en force des systèmes mécaniques articulés d'une façon générale, il est souvent fait appel au comportement force-position désiré ou en d'autres termes la commande en force revient à commander la relation dynamique force-position. Cette relation traduit l'impédance mécanique exprimée naturellement dans le repère de compliance [2] (repère propre à la tâche) R_c par :

$$Z = -\frac{F}{X_c} = Ms^2 + Bs + K \quad (5-1)$$

Où :

F est la force (désirée ou réelle).

X_c est la position (désirée ou réelle).

Z est l'impédance désirée du robot.

s est la variable complexe de Laplace.

Le robot est astreint à se comporter comme un système mécanique d'ordre deux constitué d'une masse M , d'un amortisseur de coefficient B et d'un ressort de raideur K .

Le choix des matrices précédentes comme matrices diagonales creuses, à l'exception de la composante cartésienne suivant l'axe Z (direction de l'effort) qui doit avoir une valeur élevée,

se justifie par les objectifs à atteindre à savoir : diminuer l'effet du premier contact (rebond), amortir le choc et réaliser un asservissement en force précis.

Dans le repère de compliance, l'équation (5-1) conduit à :

$$F - F^{ref} = M(\ddot{X}_c^{ref} - \ddot{X}_c) + B(\dot{X}_c^{ref} - \dot{X}_c) + K(X_c^{ref} - X_c) \quad (5-2)$$

Où :

F^{ref} est la force désirée.

X_c^{ref} est la position désirée.

Dans le repère de la base du robot, l'équation (5-2) s'écrit :

$$F - F^{ref} = MR_c(\ddot{X}^{ref} - \ddot{X}) + BR_c(\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + KR_c(X^{ref} - X) \quad (5-3)$$

En multipliant à gauche par R_c^{-1} , il vient :

$$R_c^{-1}(F - F^{ref}) = R_c^{-1}MR_c(\ddot{X}^{ref} - \ddot{X}) + R_c^{-1}BR_c(\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + R_c^{-1}KR_c(X^{ref} - X) \quad (5-4)$$

4)

L'équation ci-dessus peut être écrite comme suit :

$$F_{base} - F_{base}^{ref} = M_X(\ddot{X}^{ref} - \ddot{X}) + B_X(\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + K_X(X^{ref} - X) \quad (5-5)$$

5)

Les matrices M_X, B_X, K_X représentent l'impédance désirée projetée dans le repère de la base. Elles sont données par :

$$M_X = R_c^{-1} M R_c$$

$$B_X = R_c^{-1} B R_c$$

$$K_X = R_c^{-1} K R_c$$

F_{base} et F_{base}^{ref} sont les forces réelle et désirée exprimées dans le repère de la base, celles-ci sont données par :

$$F_{base} = R_c^{-1} F_c$$

$$F_{base}^{ref} = R_c^{-1} F_c^{ref}$$

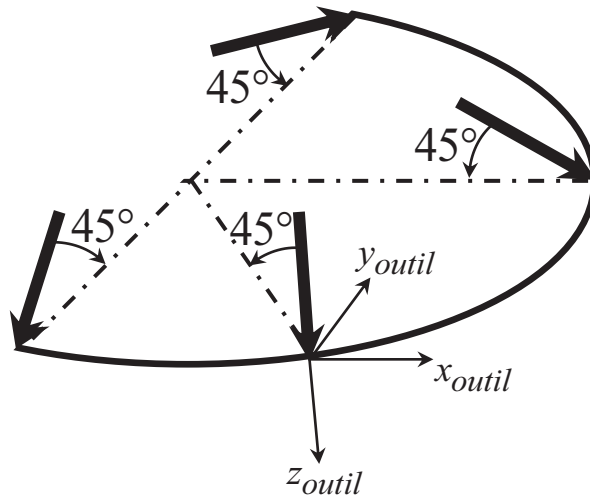


Figure 5.2. Repère de compliance lié à la tâche.

De l'équation (5-5) est tirée l'expression donnant l'accélération réelle opérationnelle :

$$\ddot{X} = \ddot{X}^{ref} + M_X^{-1} (B_X (\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + K_X (X^{ref} - X) + F_{base}^{ref} - F_{base}) \quad (5-6)$$

Dans l'espace articulaire, l'équation dynamique en couple, prenant en compte l'interaction du manipulateur avec son environnement est donnée par [2] :

$$\Gamma = \bar{A}(q)\ddot{q} + \bar{H}(q, \dot{q}) + J_{base}^T F \quad (5-7)$$

Le choix de la tension comme entrée de commande conduit à (voir chapitre précédent):

$$U = A\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{H} + \frac{Rr}{K} J_{base}^T F \quad (5-8)$$

L'équation (5-8) peut s'écrire dans l'espace opérationnel comme suit :

$$U = A_X \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{H}_X \quad (5-9)$$

Où :

$$A_X = A J_{base}^{-1}$$

$$\mathbf{H}_X = \mathbf{H} - A J_{base}^{-1} \dot{J}_{base} \dot{\mathbf{q}} + \frac{Rr}{K} J_{base}^T F$$

La même procédure de synthèse que celle exposée au chapitre précédent donne la loi de commande globale, prenant en compte la contribution de la boucle de commande en force. Celle-ci peut être donnée comme suit :

$$U = A_X w + \mathbf{H}_X \quad (5-10)$$

Où :

$$w = \ddot{X}^{ref} + M_X^{-1} \left(B_X (\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + K_X (X^{ref} - X) + F_{base}^{ref} - F_{base} \right)$$

Il y a lieu de noter que w est constitué de deux termes : l'un w_X relatif à la commande en position-orientation et l'autre w_F représentant la contribution de l'asservissement en force.

Par simple identification, ces deux termes sont donnés par :

$$w_X = \ddot{X}^{ref} + M_X^{-1} \left(B_X (\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + K_X (X^{ref} - X) \right) \quad (5-11)$$

$$w_F = M_X^{-1} \left(F_{base}^{ref} - F_{base} \right) \quad (2-12)$$

Il est à noter que le terme de correction relatif à la commande en position w_X est équivalent à celui du couple calculé développé au chapitre précédent (commande PD). De façon analogue, le terme relatif à la correction en force w_F est proportionnel (commande P).

Dans ce sens, il serait intéressant de lui ajouter une action intégrale afin d'éliminer l'erreur en régime statique.

La **Figure 5.3** schématise la commande en impédance dont la loi est donnée par l'équation (5-10) comme suit :

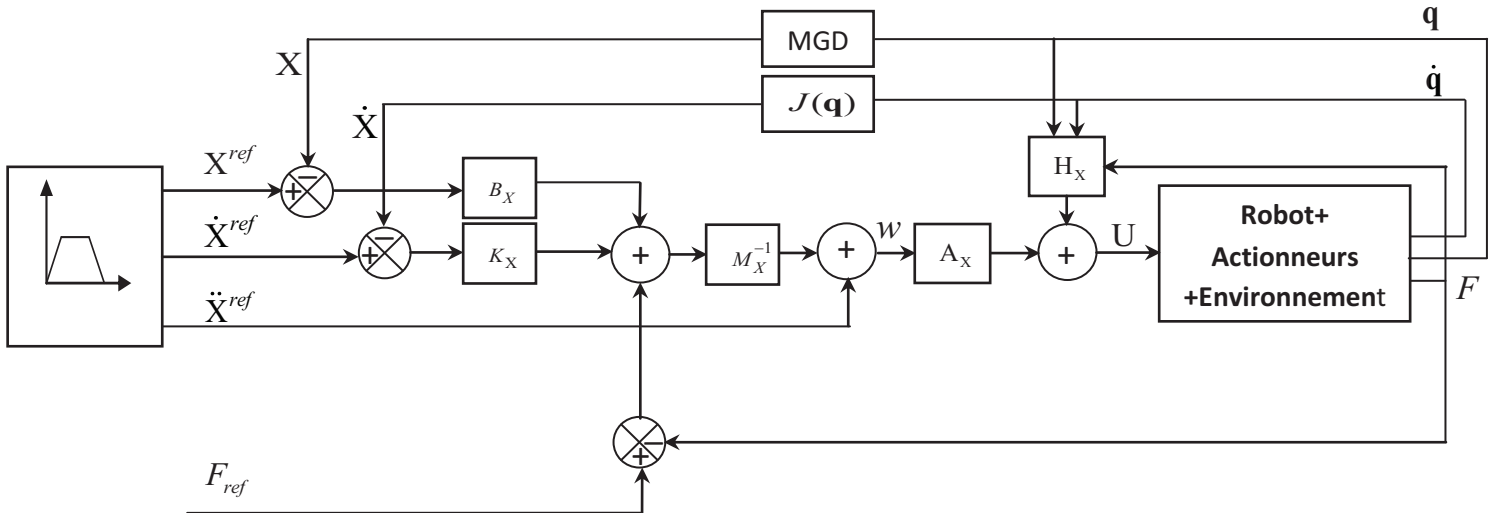


Figure 5.3. Structure de la commande en impédance dans l'espace opérationnel.

2.1.2. Commande hybride externe

La commande hybride externe est une version améliorée de la commande en impédance [2]. En effet, la contribution de la loi de commande en force est complétée par l'action intégrale telle que :

$$w_F = M_X^{-1} \left(K_F (F_{base}^{ref} - F_{base}) + K_I \int_0^t (F_{base}^{ref} - F_{base}) d\tau \right) \quad (5-13)$$

K_F et K_I sont des matrices diagonales définies positives représentant les gains de conception de la commande PI de la force.

Le schéma de base de cette architecture est donné à la **Figure 5.4**.

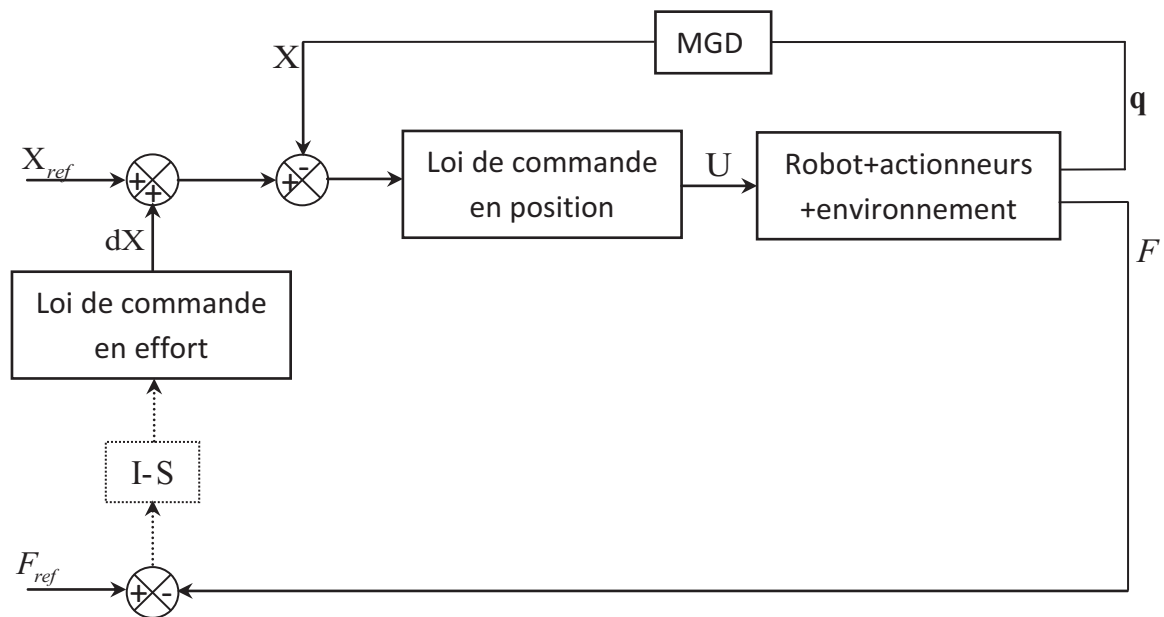


Figure 5.4. Schéma de principe de la commande hybride externe.

2.1.3. Modélisation de l'environnement

Dans tout ce qui précède, il a été supposé l'existence d'un capteur de force pour mesurer l'effort de contact entre l'outil terminal du robot et l'environnement. Cependant, des difficultés d'ordre techniques peuvent se poser quant à l'insertion du capteur supposé être déformable et de faibles dimensions. Pour cela, deux solutions sont envisageables et concernent soit le remplacement du capteur de force par un observateur pour reconstruire l'information sur la force indispensable au calcul de la commande, soit la modélisation de l'environnement ce qui permettra d'avoir une information plus ou moins précise sur la force selon le niveau de précision du modèle de l'environnement.

En simulation, souvent c'est la deuxième solution qui est adoptée. La dynamique de l'environnement du manipulateur est donc à son tour modélisée sachant que l'environnement coïncide avec la trajectoire de référence de la tâche à réaliser. Dans le cadre de la commande hybride externe, l'environnement est modélisé du point de vue mécanique par une impédance

de second ordre constituée d'une masse M_e , d'un amortisseur de coefficient B_e et d'un ressort de raideur K_e . Cela se traduit par l'expression suivante :

$$Z_e = \frac{F_e}{(X_c - X_c^{ref})} = M_e s^2 + B_e s + K_e \quad (5-14)$$

Où : F_e est la force exercée par le robot sur l'environnement exprimée naturellement dans le repère de compliance.

Il est à noter que le terme $X_c - X_c^{ref}$ représente **la pénétration virtuelle** de l'outil dans l'environnement et reflète par conséquent sa **rigidité**.

Après avoir modélisé l'environnement du robot, il vient la définition du comportement désiré du robot par des matrices diagonales creuse d'inertie, d'amortissement et de raideur désirées dont les éléments sont choisis en fonction des performances souhaitées :

Les éléments des matrices désirées de raideur, d'amortissement et d'inertie sont choisis comme suit :

Pour la matrice de raideur, sont fixées des valeurs élevées relatives aux directions non contraintes pour obtenir une bonne précision, et des valeurs faibles relatives aux directions contraintes pour réduire l'effort de contact.

Dans le cas de la matrice d'amortissement sont imposées des valeurs élevées aux directions contraintes pour amortir le contact, et des valeurs faibles aux directions libres.

Enfin, concernant la matrice d'inertie, sont attribuées des valeurs élevées aux directions contraintes pour diminuer la dynamique (la mobilité) du robot, tandis qu'aux directions libres sont imposées des valeurs faibles.

Les matrices qui définissent l'impédance désirée et qui ont permis de satisfaire les performances souhaitées lors de la réalisation de la tâche par le manipulateur, sont fixées comme suit :

$$M_d = \text{diag}([200 \quad 200 \quad 200 \quad 0.1 \quad 0.1 \quad 0.1])$$

$$B_d = \text{diag}([1600 \quad 1600 \quad 3600 \quad 100 \quad 100 \quad 100])$$

$$K_d = \text{diag}([12500 \quad 12500 \quad 10000 \quad 100 \quad 100 \quad 100])$$

Concernant l'effort désiré suivant la direction des Z , et afin de respecter les limites tolérées par les actionneurs d'une part et d'adoucir l'impact en réduisant au maximum les tensions de commande de l'autre part, un signal de consigne sous forme d'échelon de 100 N (avec un régime transitoire doux) est utilisé tel que illustré à la **Figure 5.5**.

$$F_c^{ref} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 100(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (5-15)$$

La constante de temps τ caractérisant le régime transitoire est fixée à $\tau = 0.1$ s.

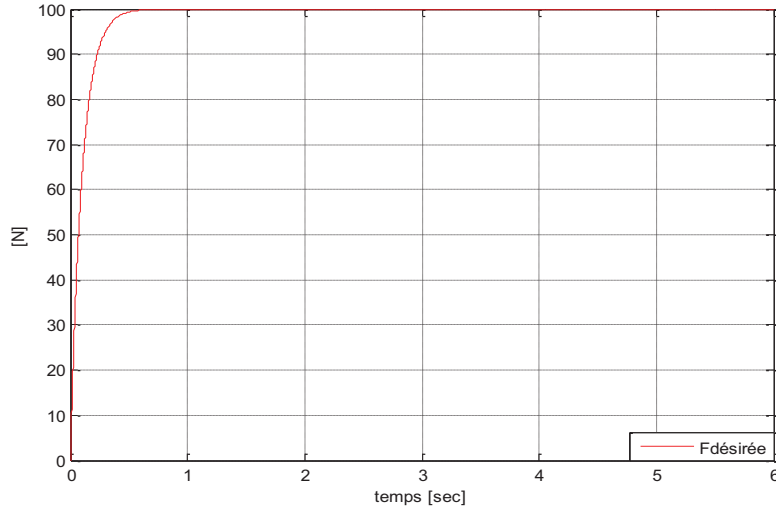


Figure 5.5. Consigne d'effort.

Dans la structure de commande hybride externe en impédance, la boucle interne de position est toujours active donc pour l'expression de cette loi de commande il peut être utilisé l'une des méthodes de commande en position exposées au chapitre précédent.

La loi de commande en position par le couple calculé est donnée par [2] :

$$w_x = \ddot{X}^{ref} + M_x^{-1} (B_x (\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + K_x (X^{ref} - X)) \quad (5-16)$$

L'insertion du terme de commande en effort donné par (5-13) dans l'expression classique de la loi de commande en position conduit à la nouvelle entrée de commande hybride telle que :

$$w = w_x + w_F \quad (5-17)$$

ou encore :

$$w = \ddot{X}^{ref} + M_x^{-1} (B_x (\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + K_x (X^{ref} - X) + K_F (F_{base}^{ref} - F_{base}) + K_I \int_0^t (F_{base}^{ref} - F_{base}) d\tau) \quad (5-18)$$

Pour mieux illustrer, l'expression ci-dessus est schématisée à la **Figure** ci-après :

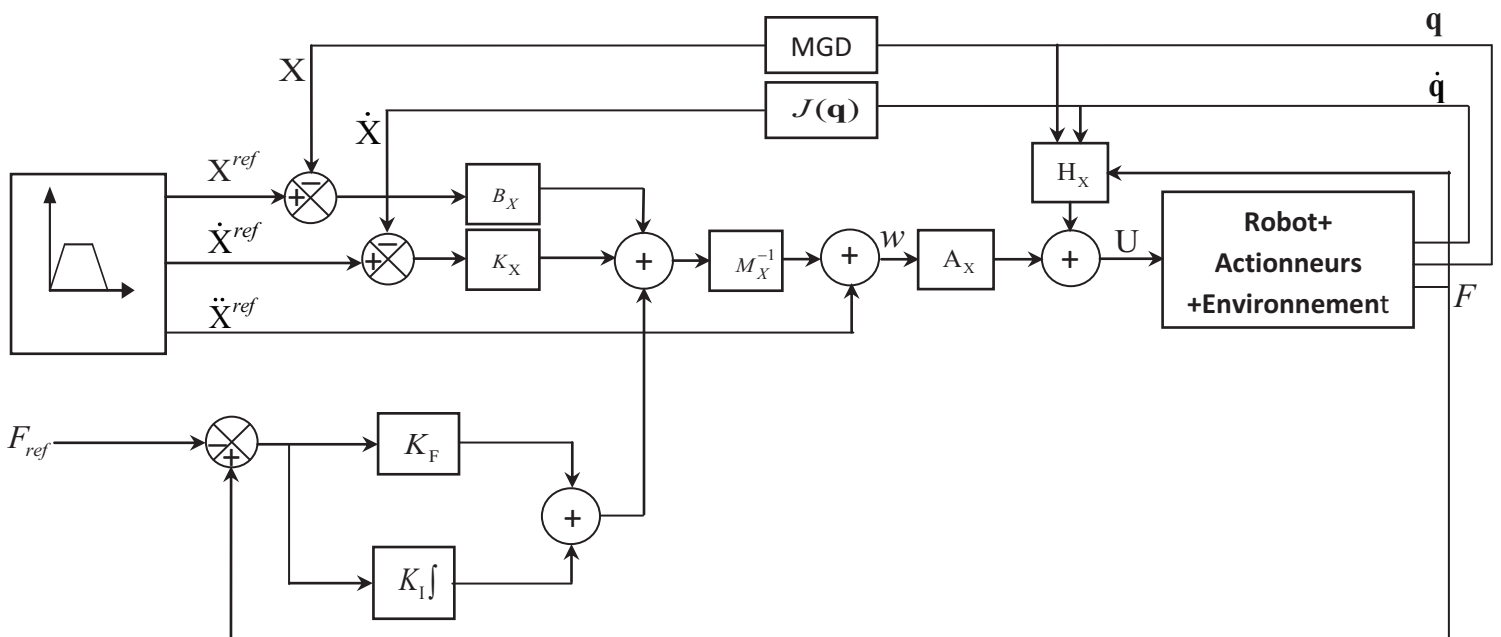


Figure 5.6. Structure de la commande hybride externe dans le cas du couple calculé.

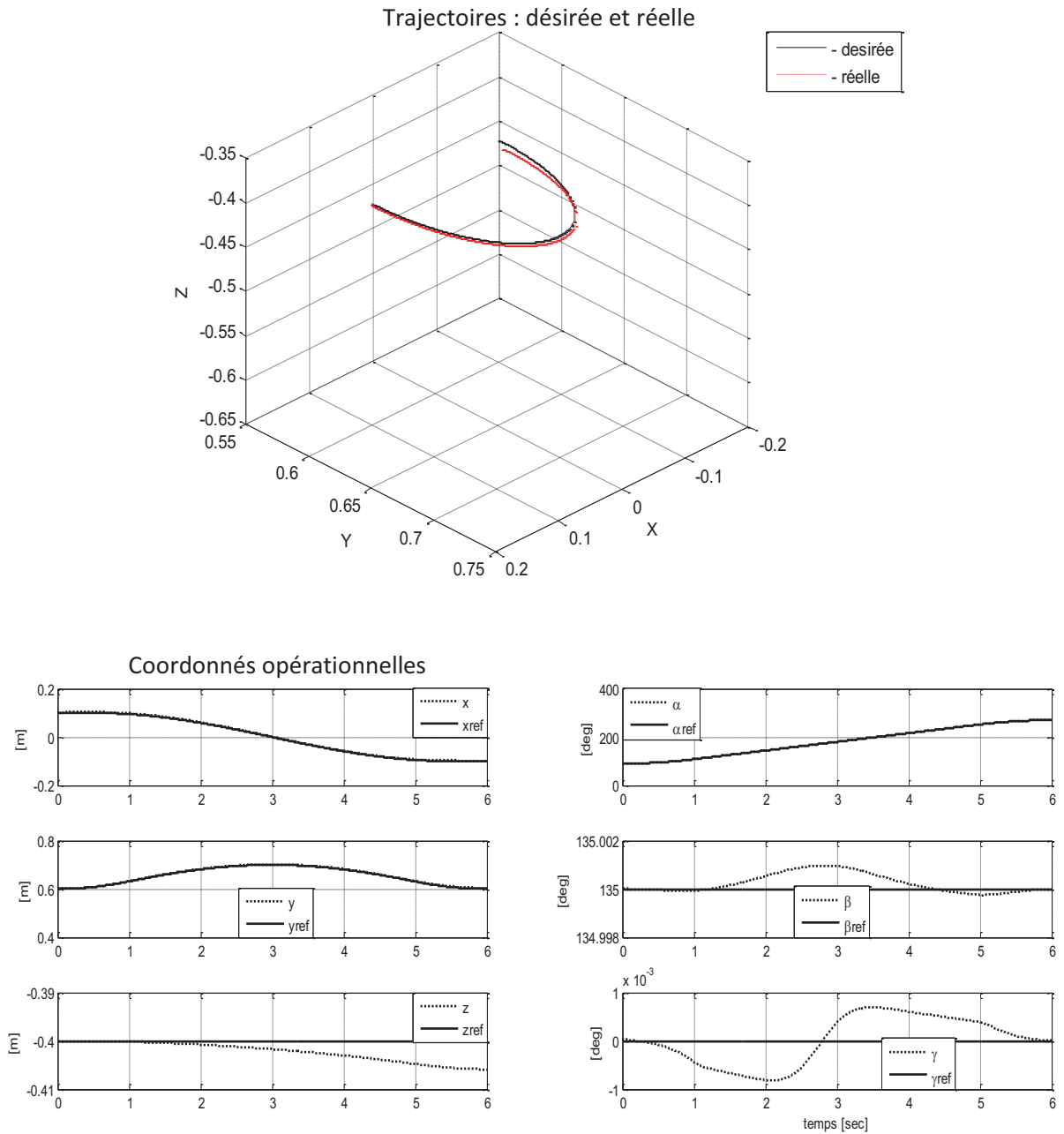
2.2 Simulation et interprétation des résultats

2.2.3. Cas de la commande hybride externe avec couple calculé

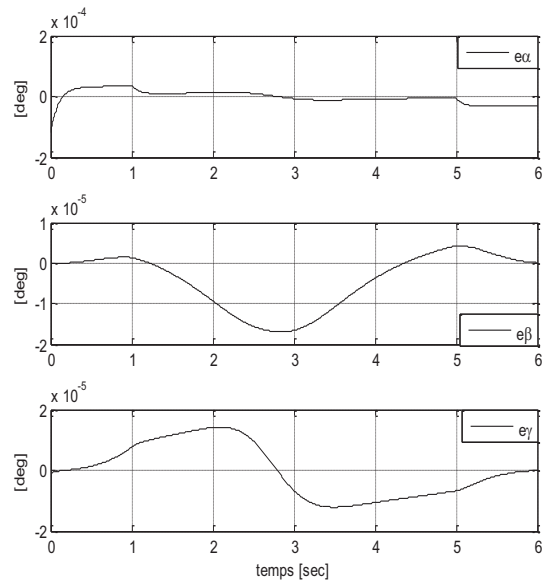
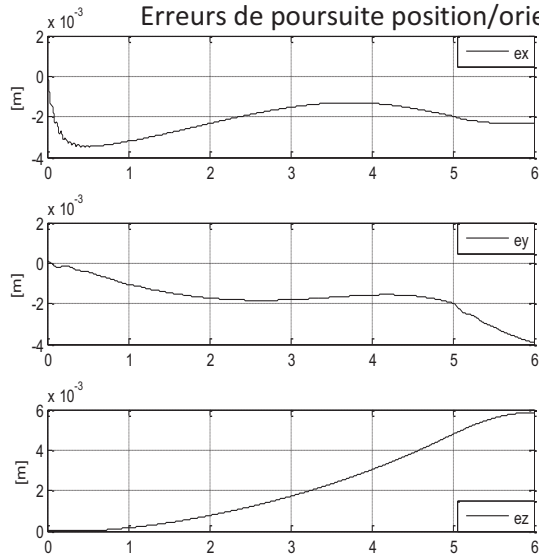
Les paramètres des régulateurs force-position qui ont donné satisfaction sont tels que :

$$K_F = 100 \text{ et } K_I = 500.$$

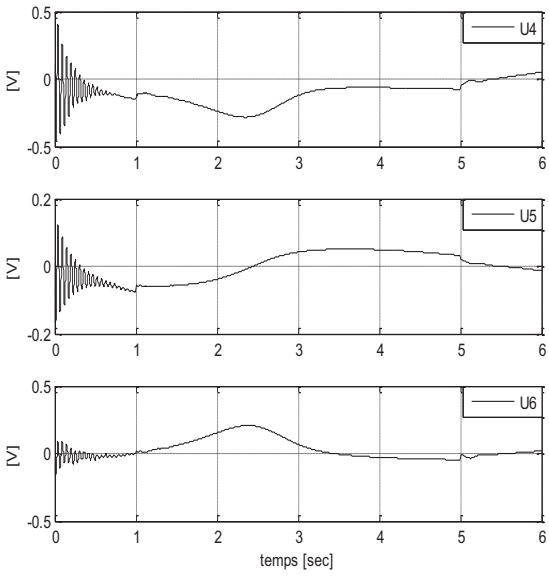
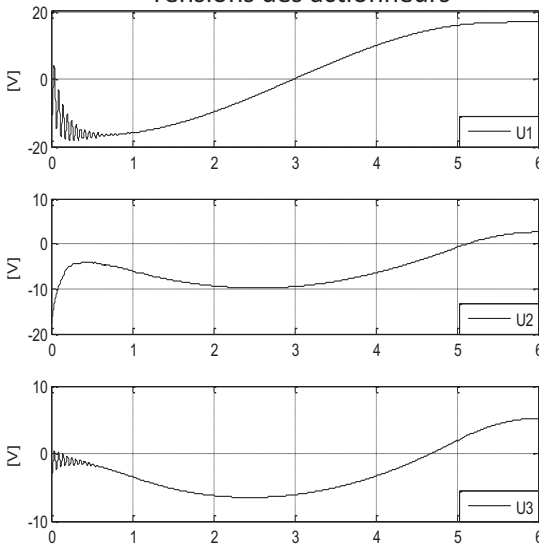
Les résultats obtenus sont donnés à la **Figure** ci-après :



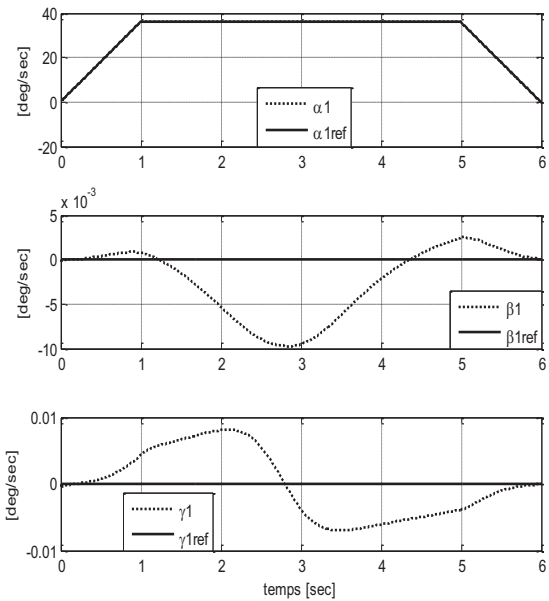
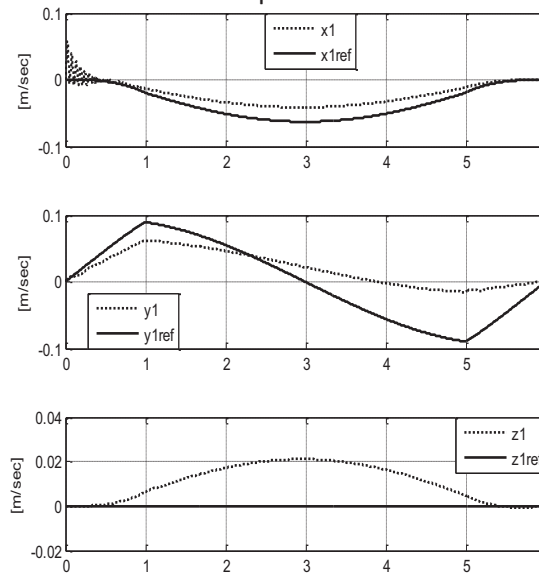
Erreurs de poursuite position/orientation



Tensions des actionneurs



Vitesses opérationnelle



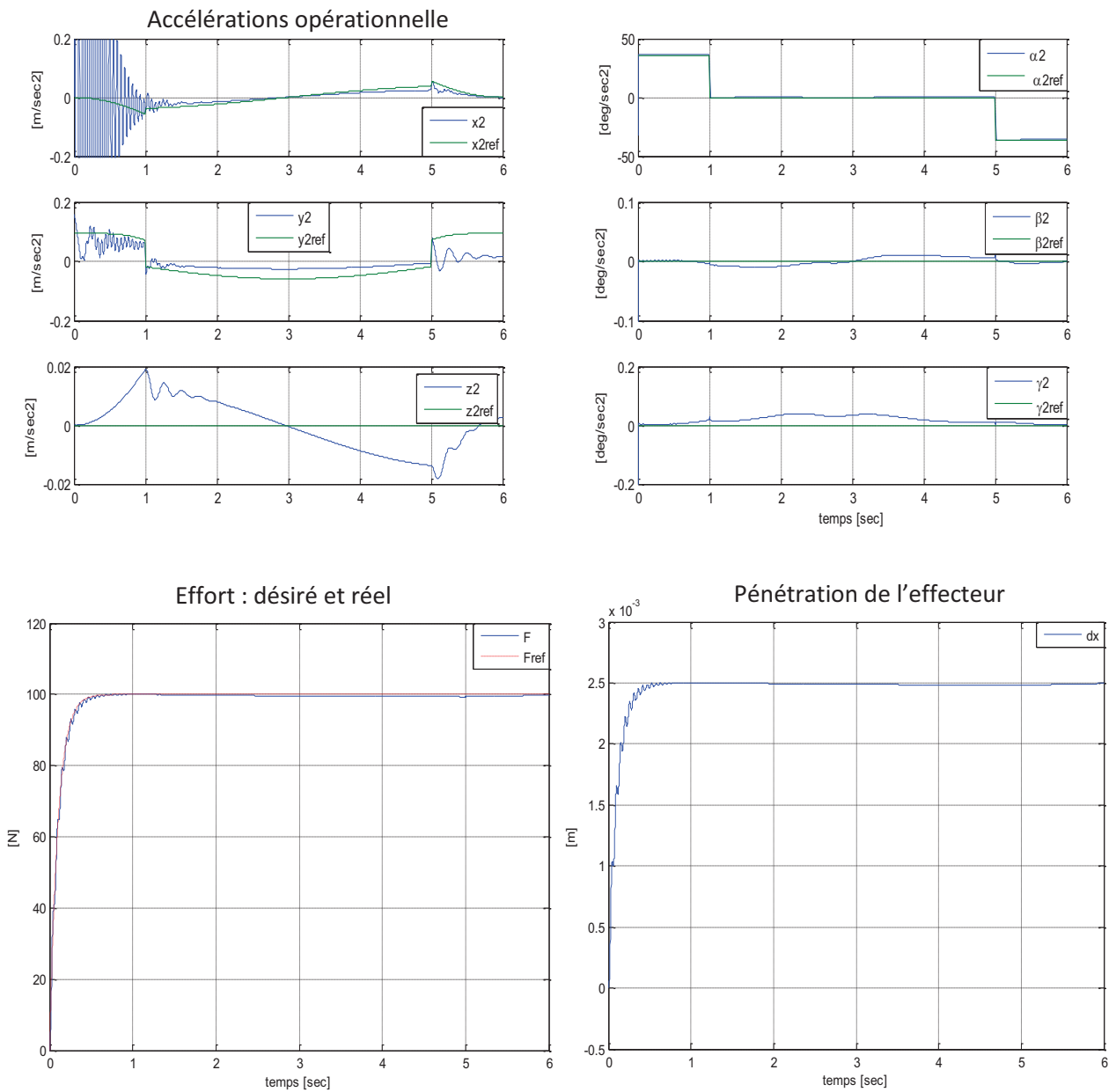
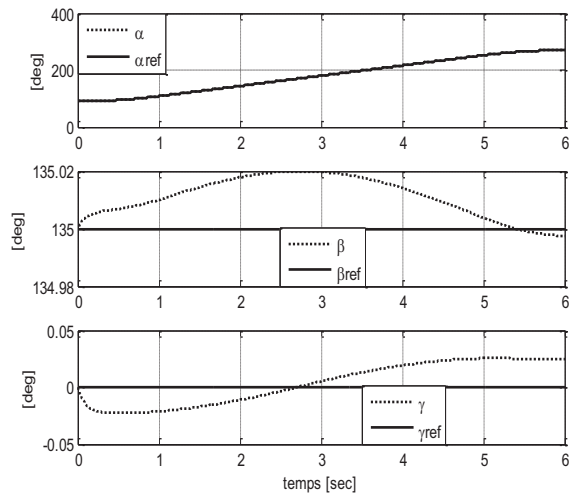
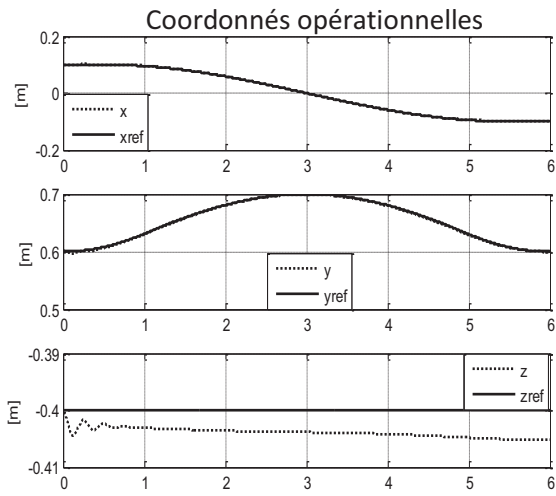
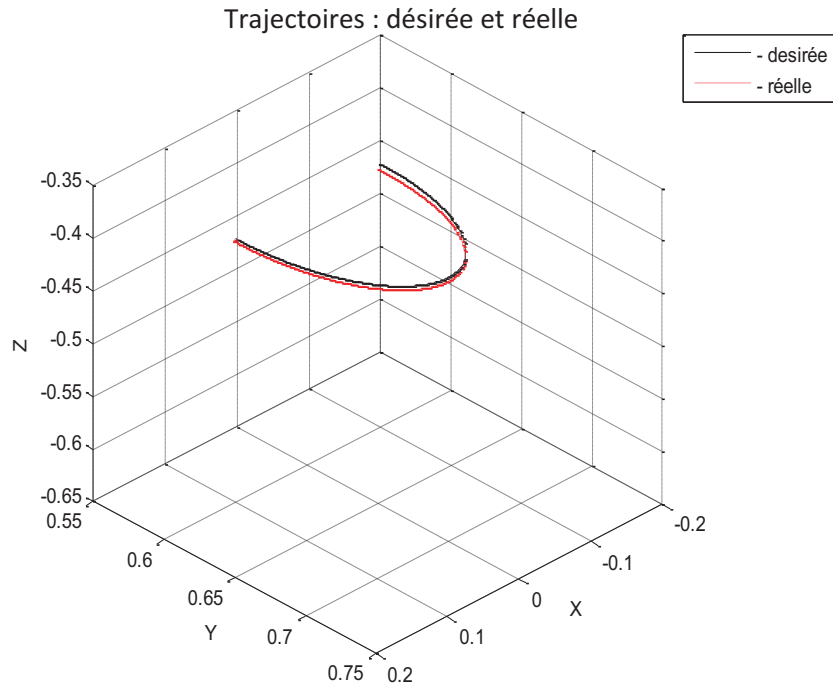
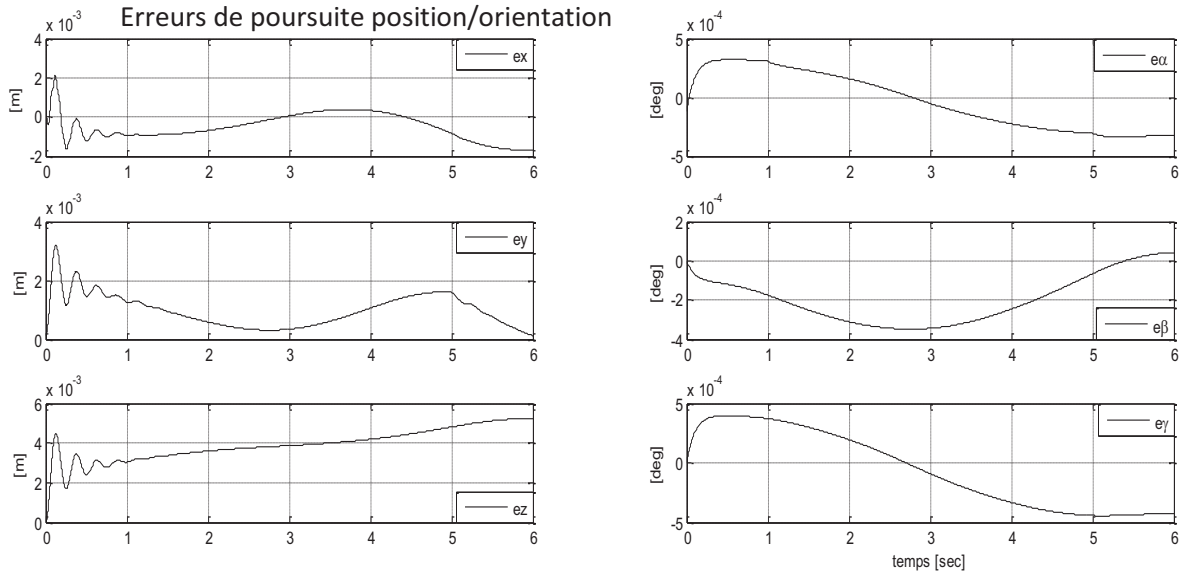


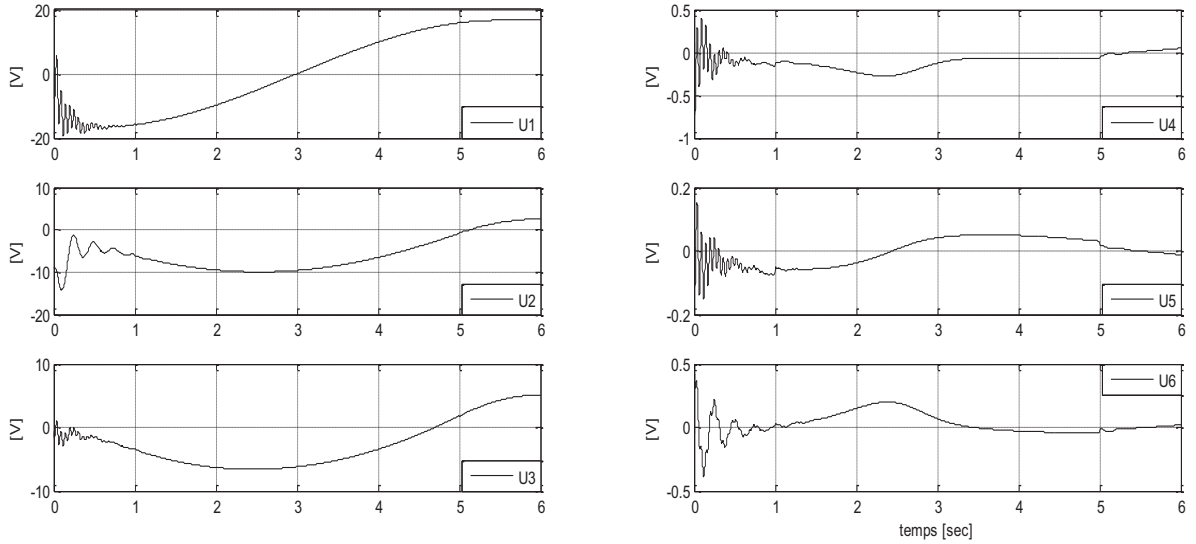
Figure 5.7. Cas de la commande hybride externe avec couple calculé et sans erreurs paramétriques.



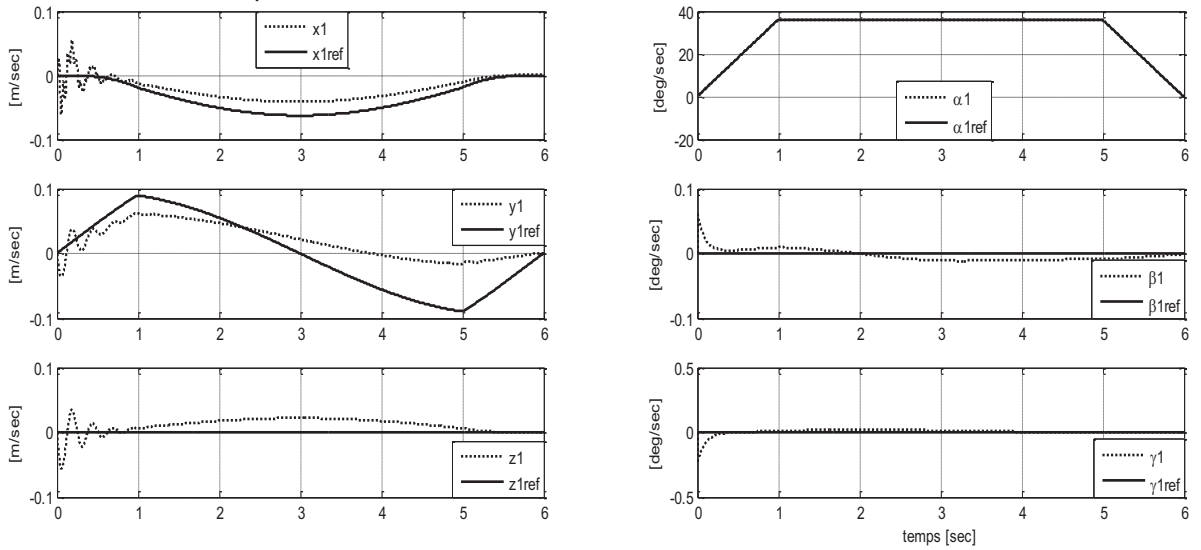
Erreurs de poursuite position/orientation



Tensions des actionneurs



Vitesses opérationnelle



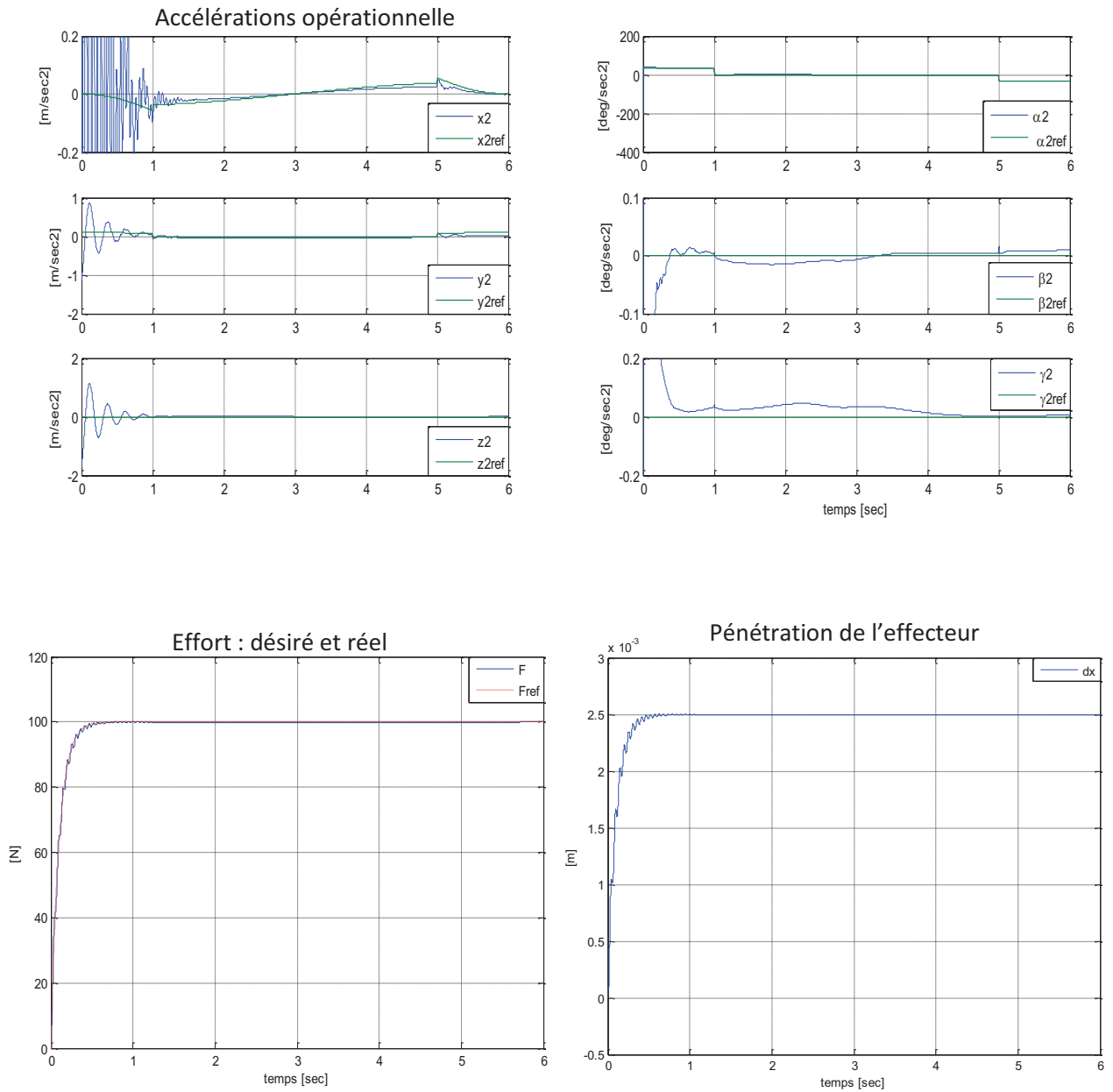


Figure 5.8. Cas de la commande hybride externe avec le couple calculé et 50% d'erreurs paramétrique sur le vecteur H.

2.2.2 Interprétation

Les figures précédentes montrent que la poursuite en force est effective. Cela est justifié par les erreurs de régulation en force qui ne dépassent pas 0.3 N. La poursuite en orientation est aussi réalisée avec des erreurs minimales inférieures à 0.0005°. Cependant, la position réelle est écartée de sa références ce qui est dû essentiellement à la pénétration virtuelle de l'outil dans l'environnement impédant projetée dans le repère de la base.

Il faut noter que le robot ne peut développer d'effort que s'il est en contact avec l'environnement, ce qui signifie que les erreurs de poursuite sont en réalité nulles, il suffit pour cela de considérer la pénétration de l'outil qui est de l'ordre de 2.5 mm en régime permanent.

2.2.3. Cas de la commande hybride externe avec les modes glissants

Comme il est montré que le couple calculé manque de robuste par rapport aux incertitudes de modélisation, le choix est porté sur la commande à structure variable pour exploiter sa propriété de robustesse. Dans ce cas,

$$w_X = \ddot{X}^{ref} + M_X^{-1} \left(B_X (\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + K_X (X^{ref} - X) + K_p \text{sign}(s) \right) \quad (5-19)$$

La commande en position est complétée par la commande en effort donnée par (5-19) ce qui donne l'expression de la nouvelle entrée hybride telle que :

$$w = w_X + w_F \quad (5-20)$$

Ou encore :

$$w = \ddot{X}^{ref} + M_X^{-1} \left(B_X (\dot{X}^{ref} - \dot{X}) + K_X (X^{ref} - X) + K \text{sign}(s) + K_F (F_{base}^{ref} - F_{base}) + K_1 \int_0^t (F_{base}^{ref} - F_{base}) d\tau \right) \quad (5-21)$$

Afin de mieux illustrer, l'expression ci-dessus est schématisée à la **Figure** ci-après sous forme d'un schéma bloc comme suit :

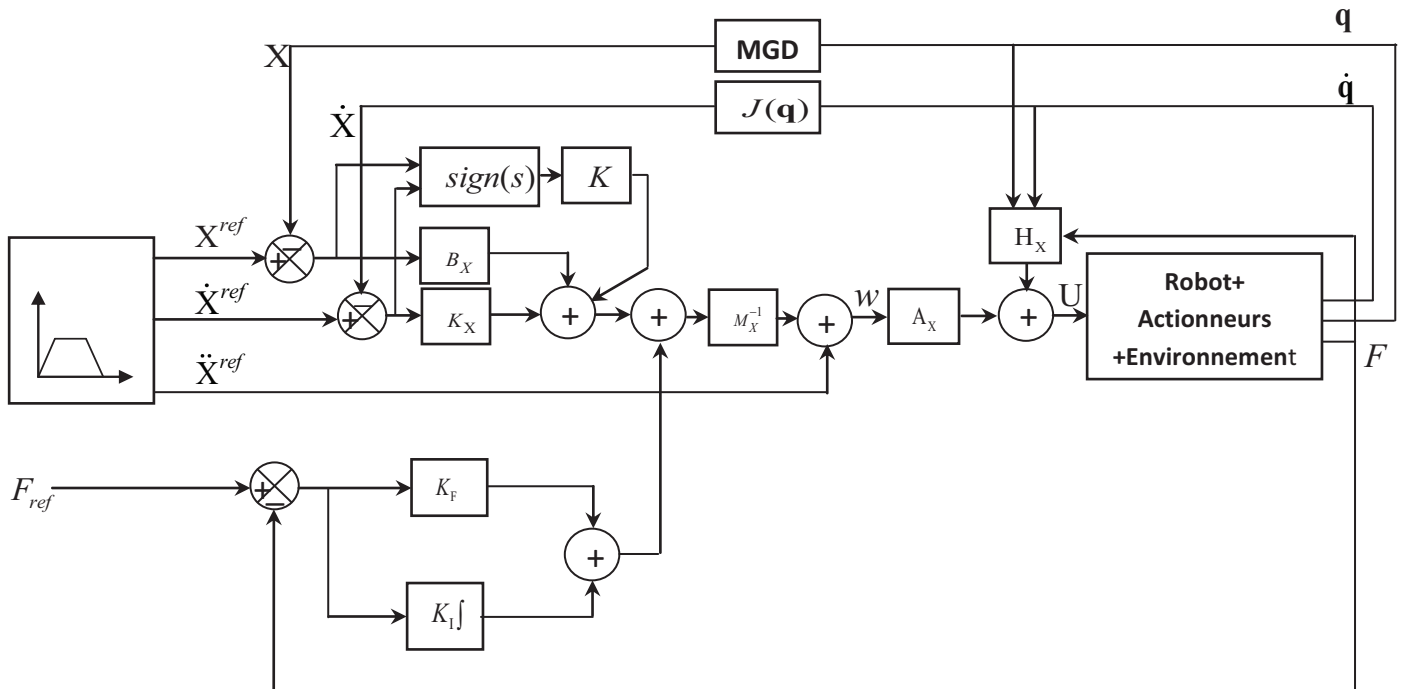


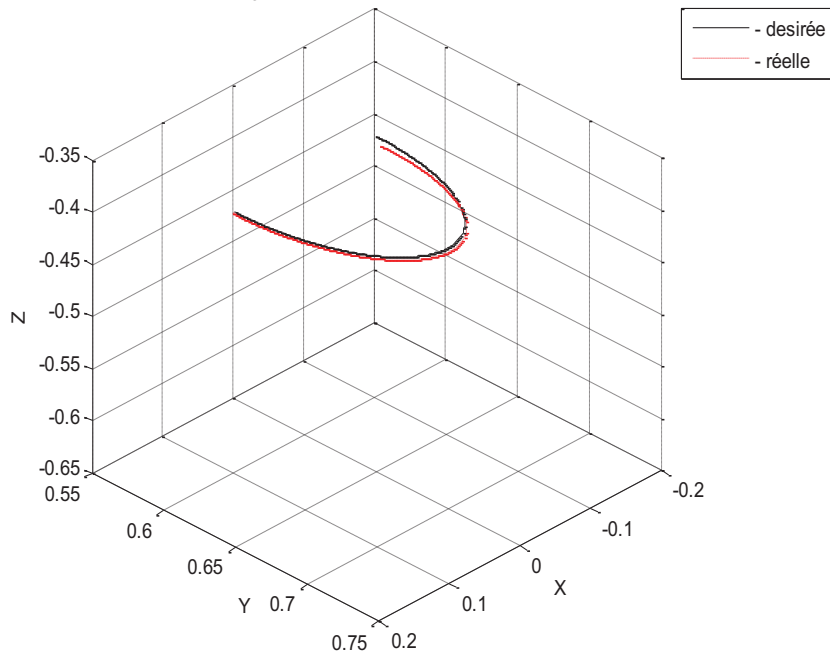
Figure 5.9. Structure de la commande hybride externe avec modes glissants.

Les paramètres des régulateurs force-position qui ont donné satisfaction sont tels que :

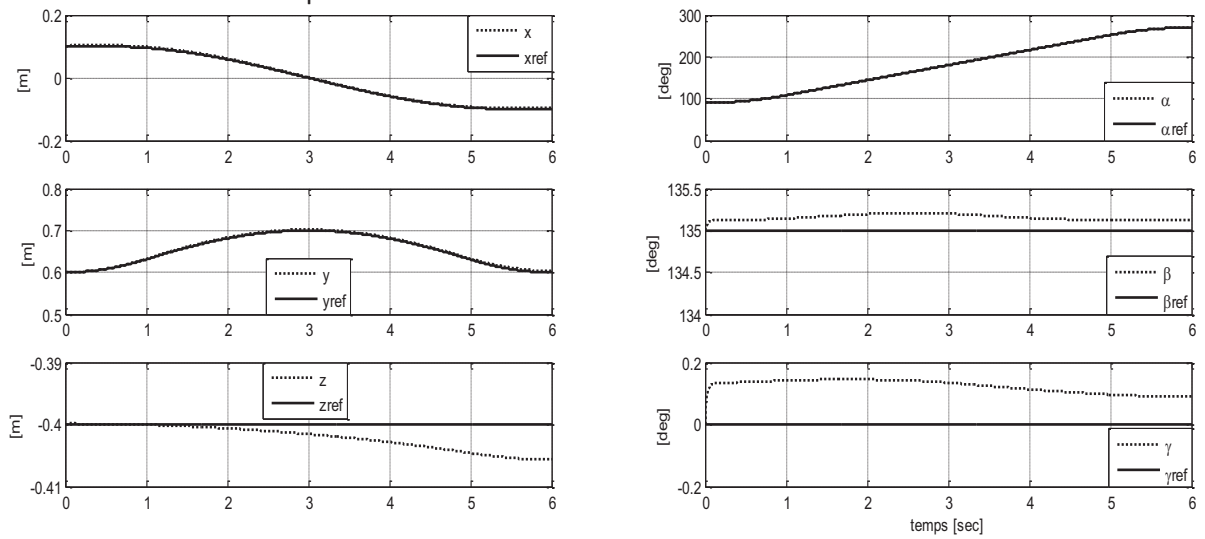
$$\lambda = 1000 \text{ et } K = 200.$$

Les courbes représentant la poursuite des trajectoires force-position en appliquant les modes glissants pour la boucle en position sont représentées à la **Figure 5.10**:

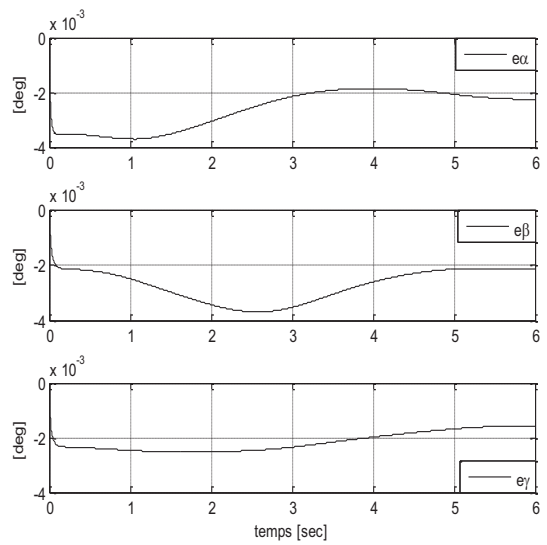
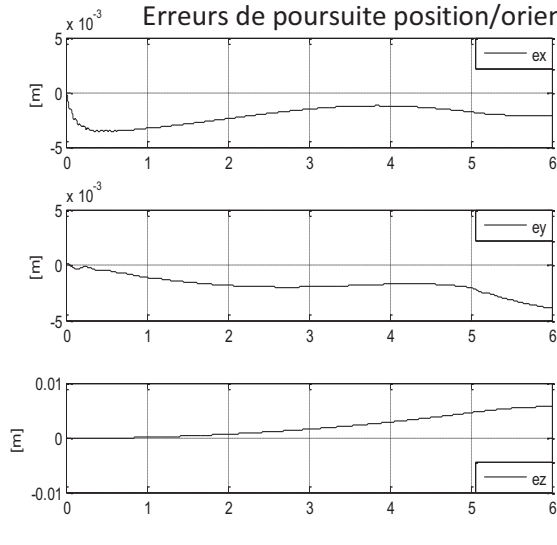
Trajectoires : désirée et réelle



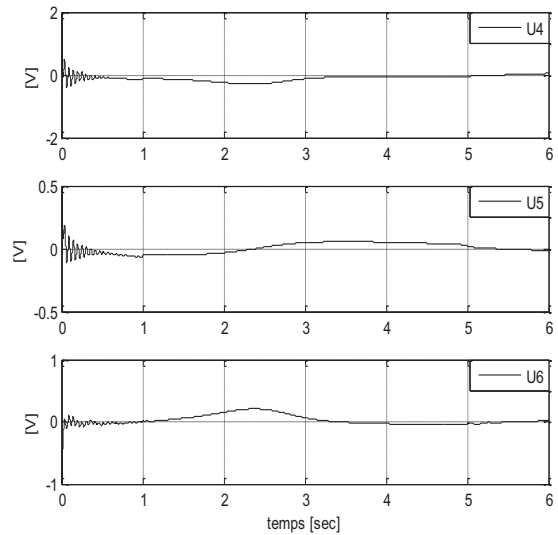
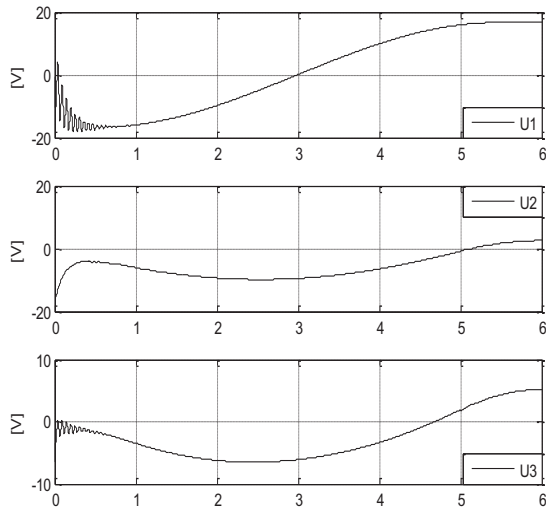
Coordonnées opérationnelles



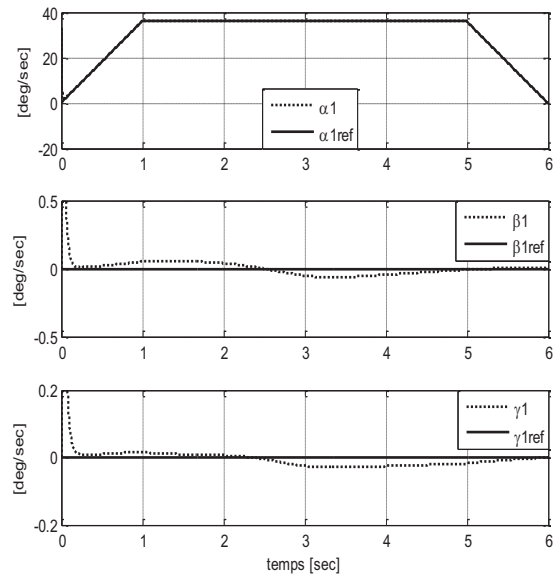
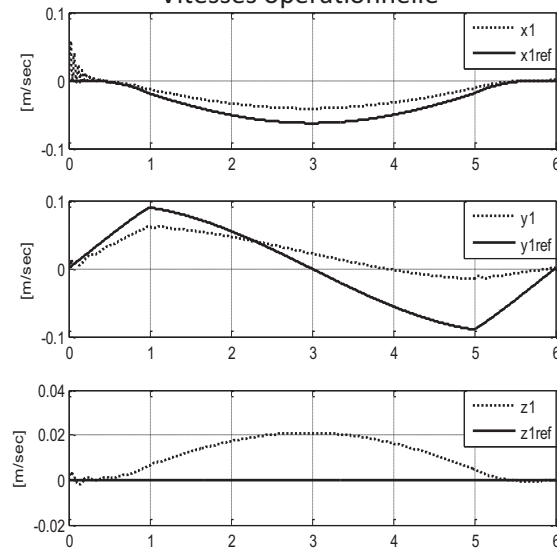
Erreurs de poursuite position/orientation



Tensions des actionneurs



Vitesses opérationnelle



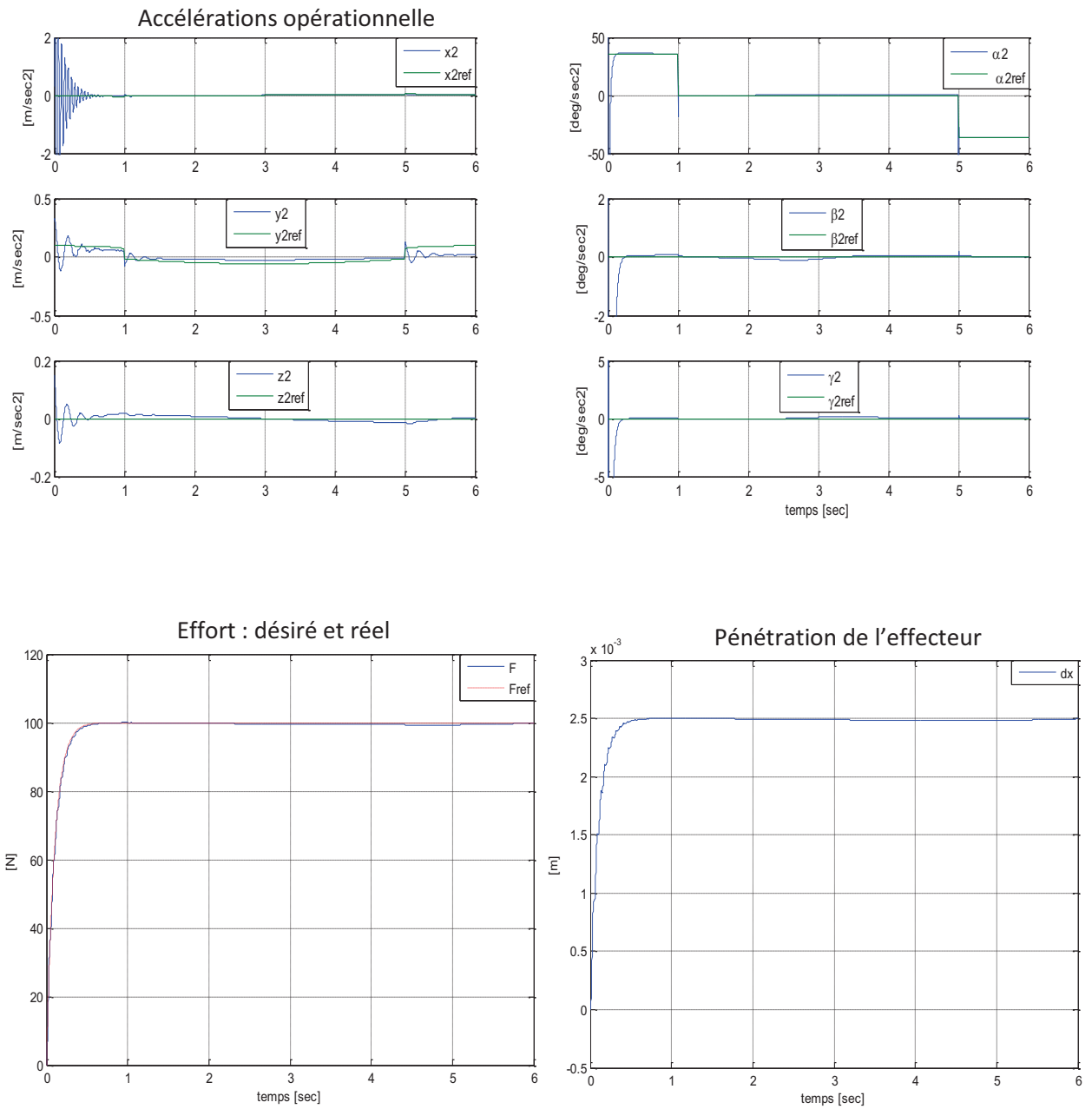
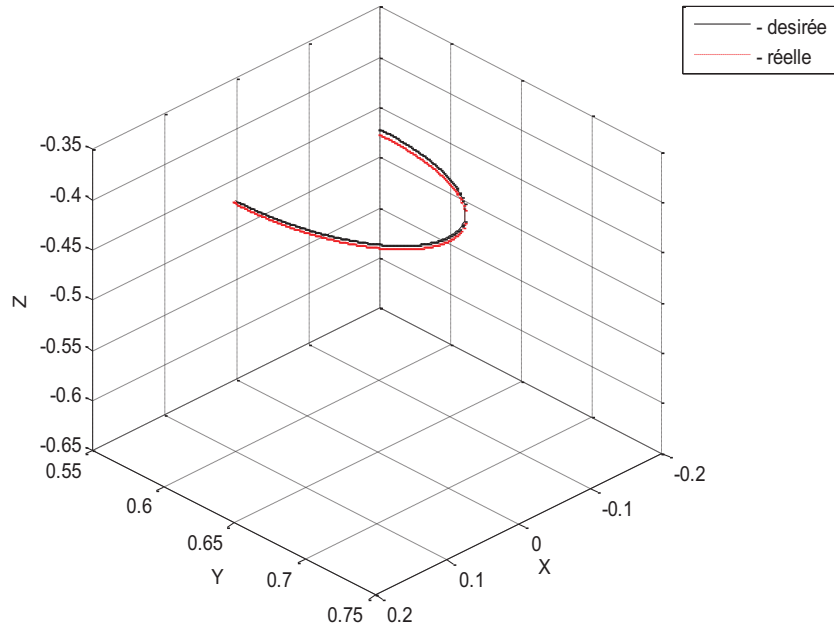
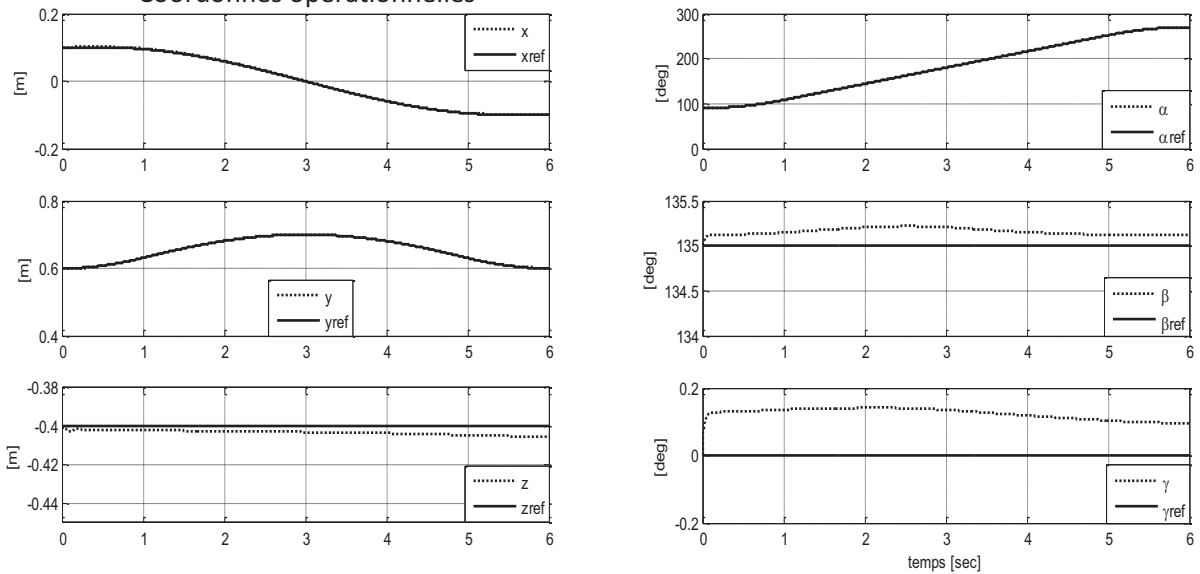


Figure 5.10. Cas de la commande hybride externe avec modes glissants et sans erreurs paramétriques.

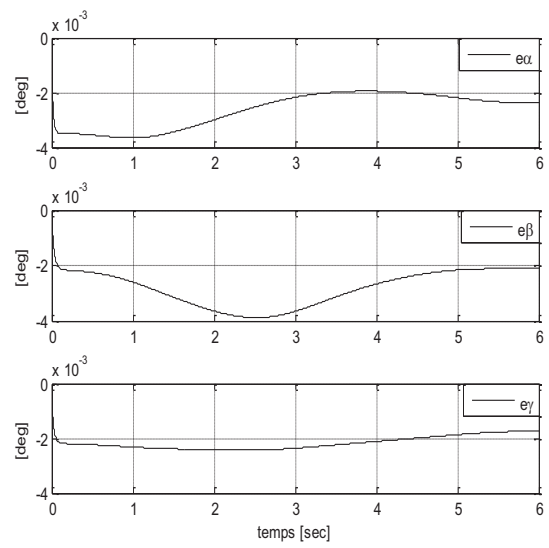
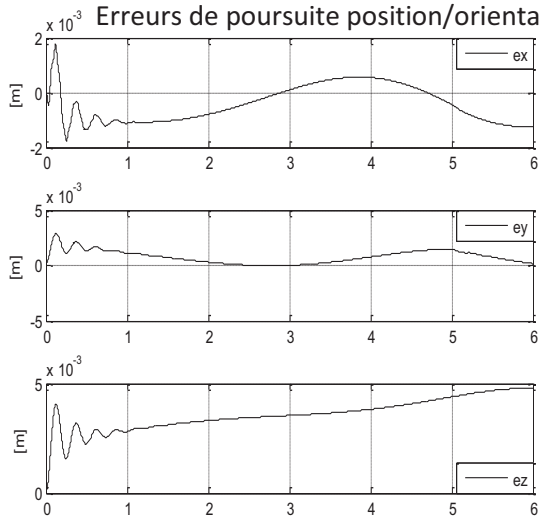
Trajectoires : désirée et réelle



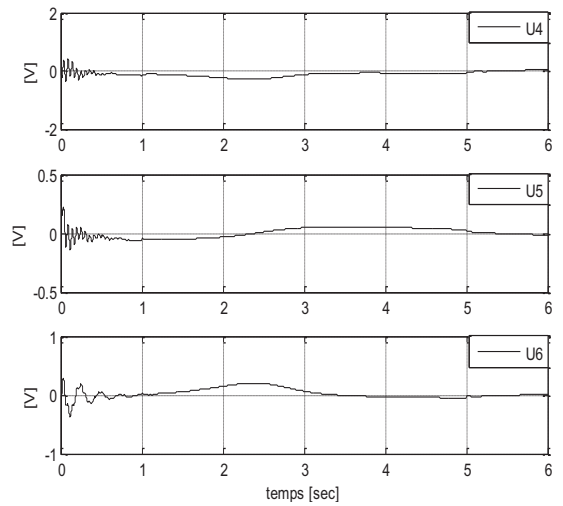
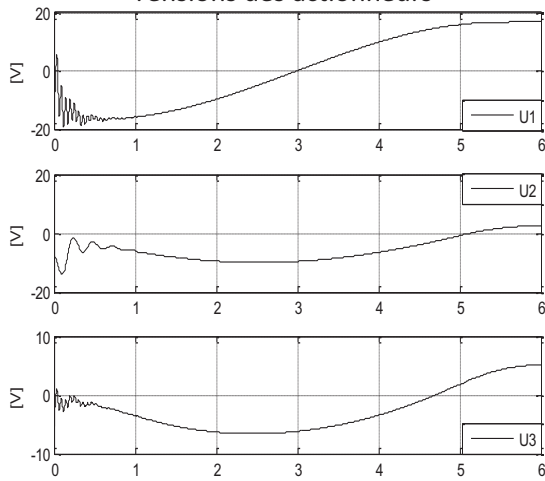
Coordonnées opérationnelles



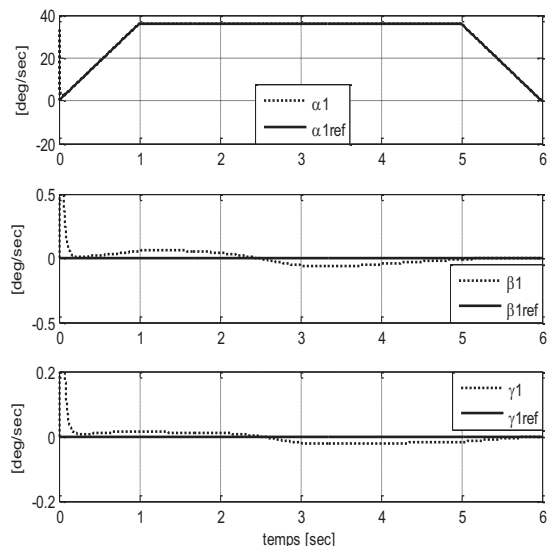
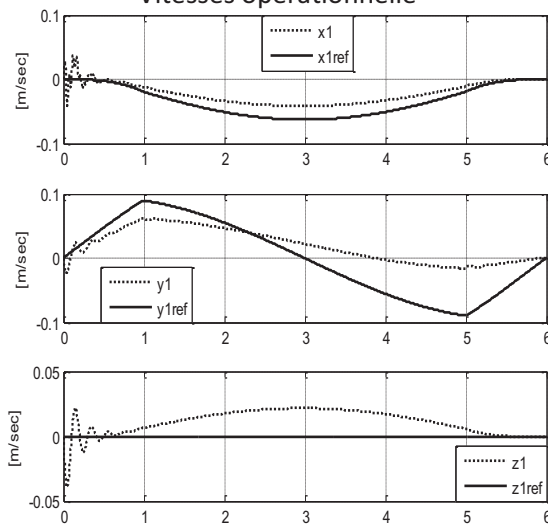
Erreurs de poursuite position/orientation



Tensions des actionneurs



Vitesses opérationnelle



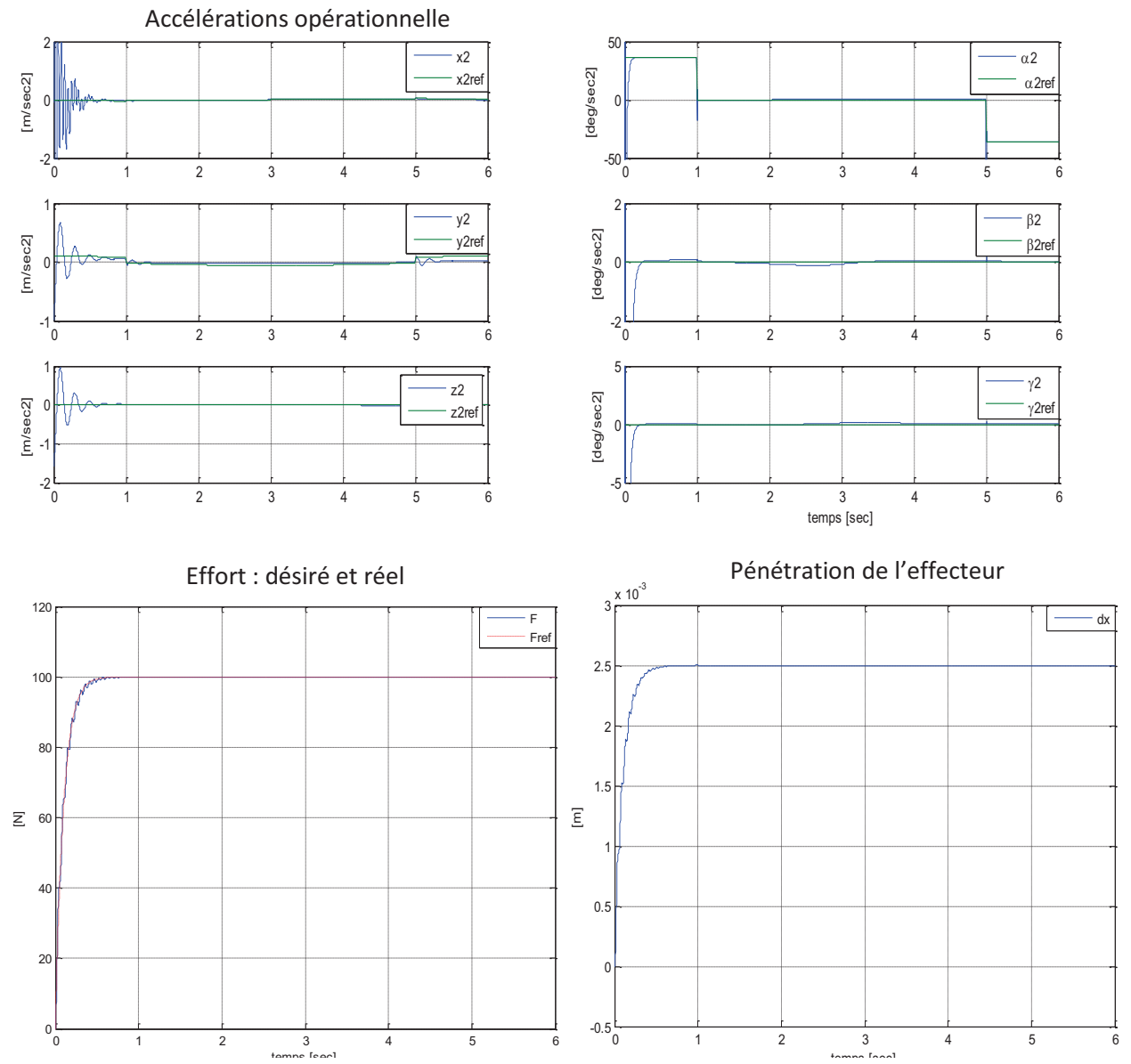
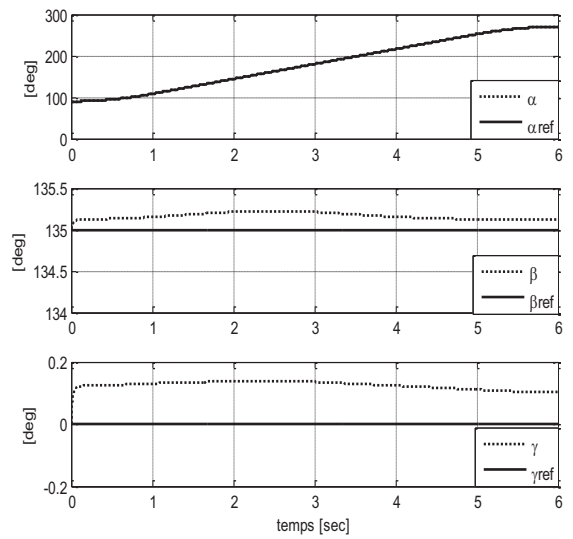
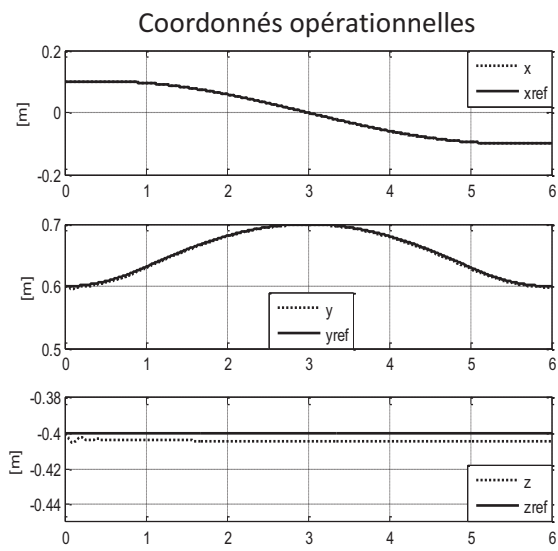
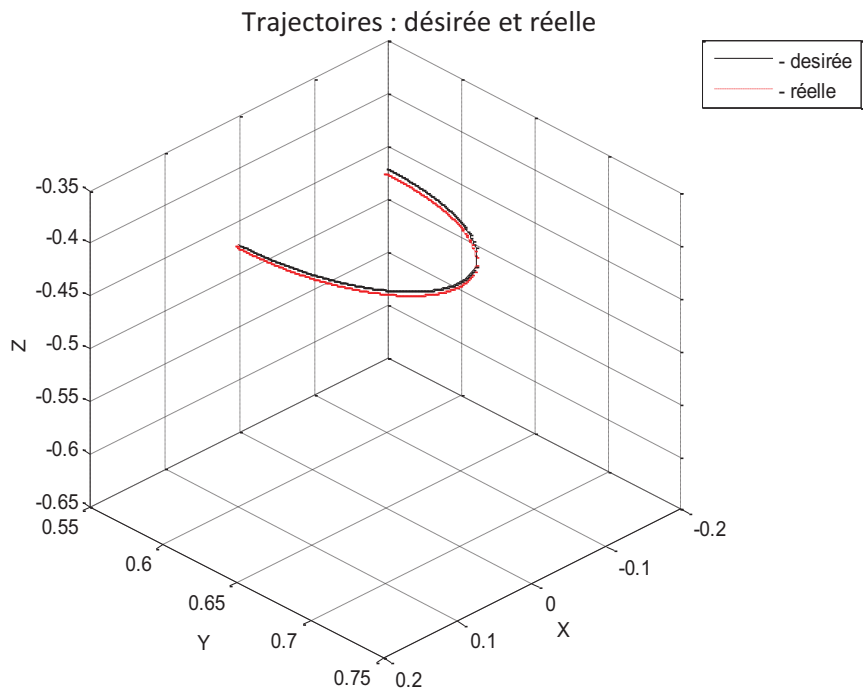
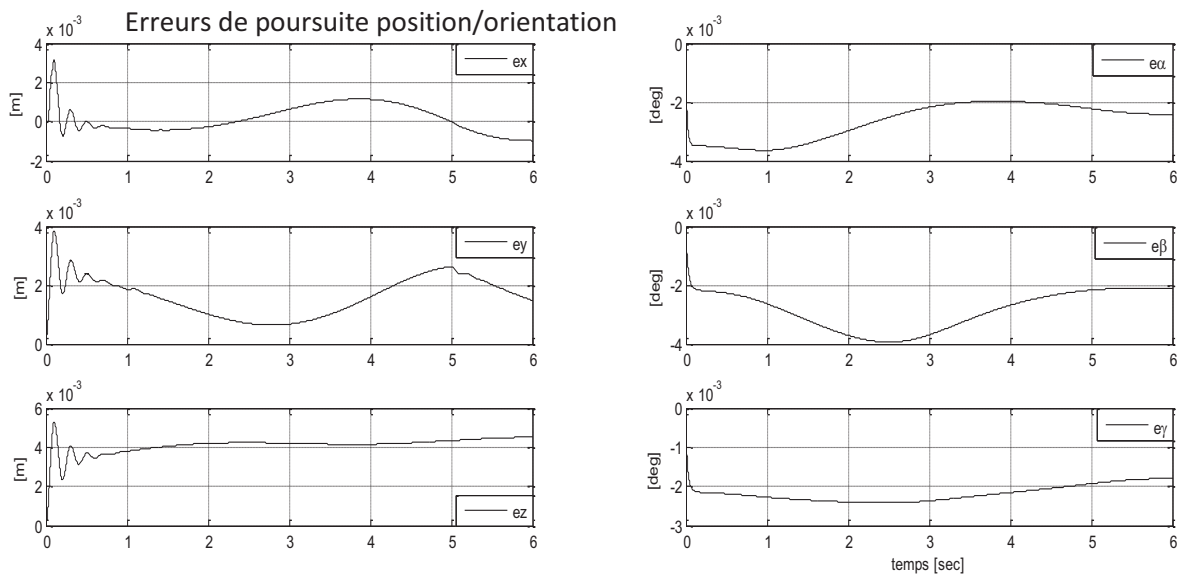


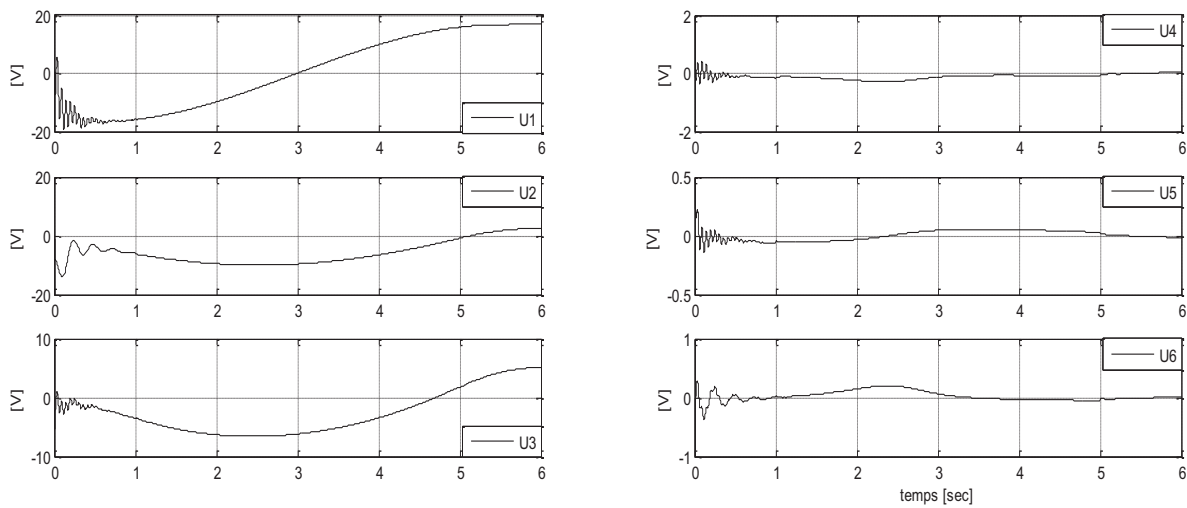
Figure 5.11. Cas de la commande hybride externe avec modes glissants et 50% d'erreur paramétrique sur le vecteur H.



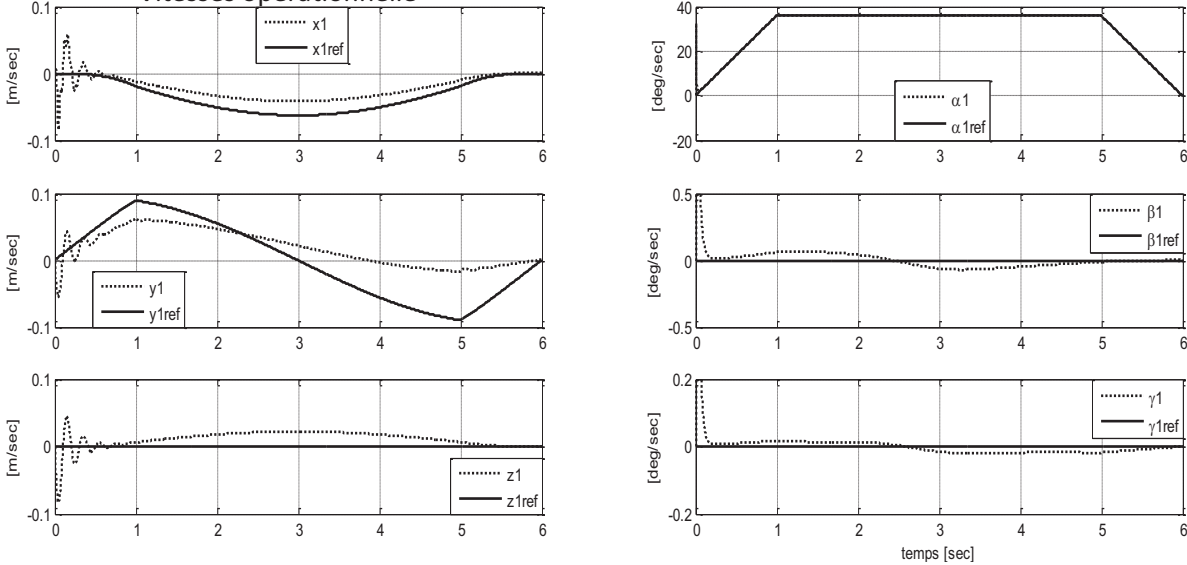
Erreurs de poursuite position/orientation



Tensions des actionneurs



Vitesses opérationnelle



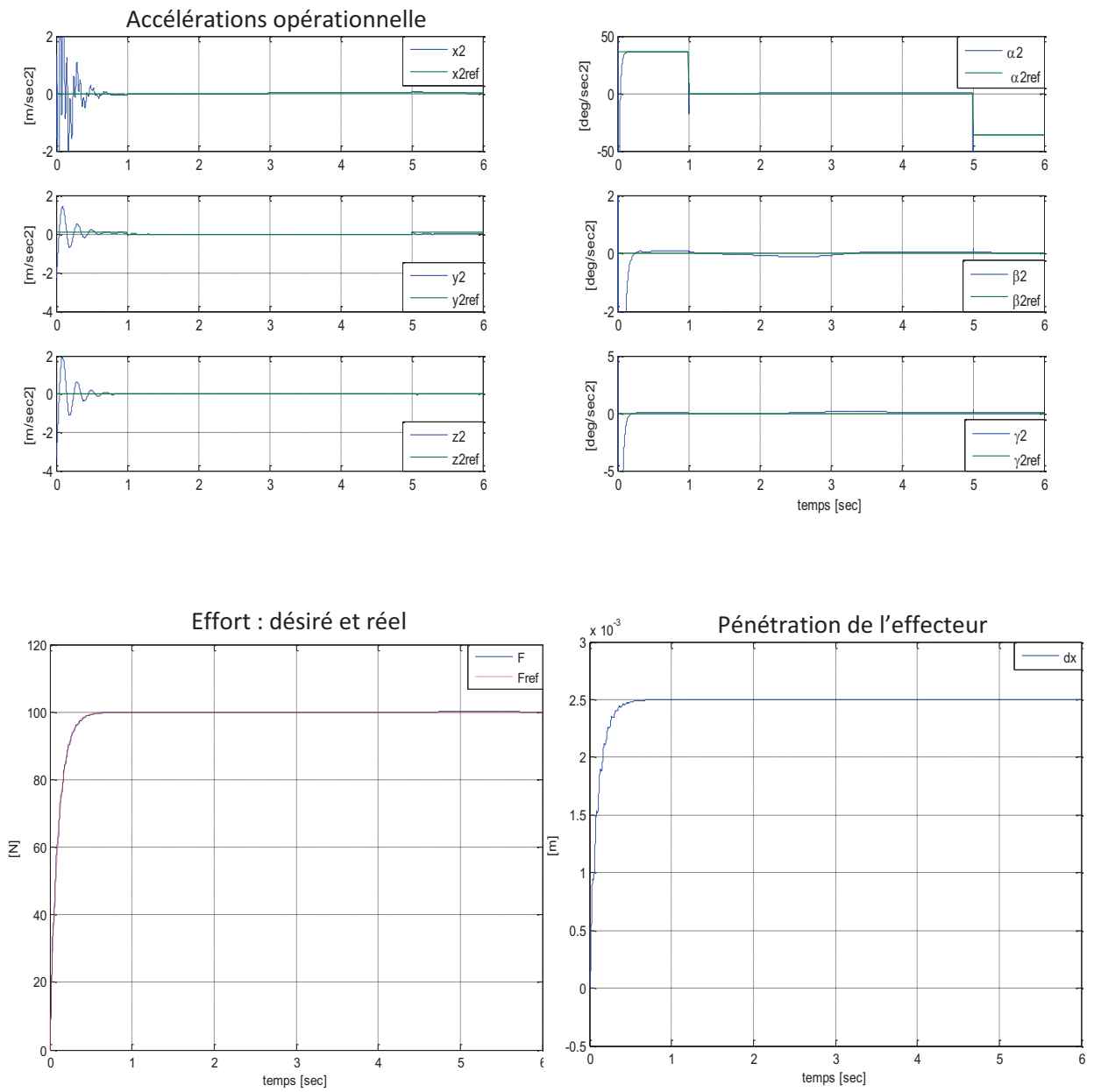


Figure 5.12. Cas de la commande hybride externe avec modes glissants avec le vecteur H négligé.

2.2.4 Interprétation

Une excellente poursuite est constatée en position-orientation et en force. De plus les tensions d'alimentation des moteurs restent admissibles. Néanmoins, au démarrage, celles-ci sont oscillatoires pour vaincre l'inertie du robot supposé être initialement à l'arrêt.

3. Conclusion

Dans ce chapitre, est exposée une méthode pour la commande en force-position du robot PUMA 560 basée sur la compliance de la tâche d'une part, et exploitant la notion d'impédance mécanique qui traduit le comportement force-position du robot d'autre part. En effet, du point de vue du principe de la mécanique newtonienne, la force est la raison d'existence du déplacement qui est à son tour limité par l'inertie et l'amortissement. Le même principe a été exploité pour modéliser l'environnement afin de restituer l'information sur la force de contact évitant ainsi l'utilisation de capteurs intéroceptifs techniquement ardue.

Pour conduire le robot à réaliser la tâche désirée dans l'espace opérationnel, une structure de commande relativement facile à mettre en œuvre a été appliquée. Celle-ci a nécessité peu de calcul puisque elle se base sur deux boucles de commande en cascade : une commande non linéaire robuste (modes glissants) vue au chapitre précédent et une boucle de réglage d'effort de type proportionnel-intégral.

Les résultats de simulation ont montré que cette structure de commande est efficace et simple. De plus elle est robuste face aux incertitudes et simplification inévitables lors de la modélisation du manipulateur.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENELEALE

Les tâches industrielles robotisées, comme l'ébavurage doivent être réalisées en respectant un certain nombre de contraintes techniques imposées pour assurer une meilleure qualité du produit. Le travail présenté dans ce mémoire traite le problème de la commande en force-position permettant l'accomplissement, par le manipulateur PUMA 560, de cette tâche dans l'espace opérationnel.

Cet objectif ne peut être réalisé par un simple positionnement de l'outil, il faut considérer aussi l'orientation de l'effecteur laquelle fait partie de la description géométrique de la tâche. Autrement dit, l'orientation de l'effecteur autant que la position, doivent être bien définies le long de la trajectoire à parcourir.

Pour générer la trajectoire de l'outil dans l'espace opérationnel, deux grandeurs fondamentales sont à spécifier à savoir la position et l'orientation de celui-ci en fonction des paramètres géométriques de la tâche et qui sont, à leur tour fonction du temps. La position de l'outil est décrite naturellement en coordonnées cartésiennes. Quant à l'orientation, elle est paramétrisée intuitivement par la composition de rotations successives (angles d'EULER) autour des axes du repère outil ou celui de la base. De plus, le modèle dynamique complet de l'ensemble : robot PUMA 560 plus actionneurs (moteurs DC à excitation séparée), a été élaboré pour servir à la synthèse et la simulation de la commande.

Afin de piloter le robot, la commande par couple calculé est synthétisée dans l'espace opérationnel. Le manque de robustesse que présente cette commande face aux erreurs de modélisation a conduit au développement d'une autre commande à structure variable non linéaire pour son caractère robuste aux erreurs de modélisation. La commande en position-orientation est insuffisante pour la réalisation de la tâche d'ébavurage, la raison pour laquelle la boucle de commande en position-orientation est complétée par une boucle de commande en effort utilisant la caractéristique mécanique désirée appelée aussi impédance. Le système de commande global nécessite donc deux consignes, l'une en position-orientation et l'autre en effort. La commande hybride externe adoptée dans ce travail a été utilisée après avoir résumé ses principes.

A la lumière des résultats obtenus, il faut dire que la commande hybride externe en impédance (ou commande en impédance généralisée) utilisant la technique des modes glissant, a permis de maintenir l'outil terminal sur la trajectoire désirée et d'appliquer la force souhaitée sur l'environnement afin d'usiner la pièce avec de meilleures performances.

Comme perspective, il serait intéressant d'utiliser la structure de commande en force-position de type hybride interne qui exploite l'orthogonalité des directions de position et celles d'effort. Pour voir s'il y a possibilité d'améliorer les performances statiques et dynamiques du robot, il serait judicieux de tester d'autres techniques de commande en position-orientation telles que le *back-stepping* et la commande floue adaptative.

Annexe

ANNEXE

Modèle géométrique direct du PUMA560

Le modèle géométrique direct est établi sur la base des paramètres géométriques Denavit-Hartenberg. Il est explicité par les expressions suivantes :

$${}^0T_6 = \begin{bmatrix} {}^0R_6 & {}^0P_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (A1)$$

Où :

$${}^0R_6 = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

$${}^0P_6 = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$$

Avec :

$$R_{11} = C_1 [C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6) - S_{23} S_5 C_6] - S_1 (S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6)$$

$$R_{21} = S_1 [C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6) - S_{23} S_5 C_6] - C_1 (S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6)$$

$$R_{31} = C_1 [C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 S_6) - S_{23} S_5 C_6] - S_1 (S_4 C_5 C_6 + C_4 S_6)$$

$$R_{12} = C_1 [-C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 C_6) - S_{23} S_5 C_6] - S_1 (-S_4 C_5 S_6 + C_4 S_6)$$

$$R_{22} = S_1 [-C_{23} (C_4 C_5 C_6 - S_4 C_6) - S_{23} S_5 C_6] - C_1 (-S_4 C_5 S_6 + C_4 S_6)$$

$$R_{32} = S_{23} (C_4 C_5 S_6 - S_4 C_6) - C_{23} S_5 C_6$$

$$R_{13} = C_1 (C_{23} C_4 S_5 - S_{23} C_5) - S_1 S_4 S_5$$

$$R_{23} = S_1 (C_{23} C_4 S_5 + S_{23} C_5) + C_1 S_4 S_5$$

$$R_{33} = S_{23} C_4 S_5 + C_{23} C_5$$

$$P_x = C_1 (a_3 C_{23} + d_4 S_{23} + a_2 C_2) - (d_3 + d_2) S_1$$

$$P_y = S_1(a_3C_{23} + d_4S_{23} + a_2C_2) - (d_3 + d_2)C_1$$

$$P_z = -a_3S_{23} + d_4C_{23} - a_2S_2$$

Références Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Armstrong B., Khatib O., Burdick J., « The Explicit Dynamic Model and Inertial Parameters of the PUMA 560 Arm », Proc. IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, San Francisco, avril 1986, p. 510-518.

- [2] Khalil W., Dombre E., « Modélisation, Identification et commande des Robots », 2^{ième} édition revue et augmentée, Hermès Science Publications, Paris, 1999.

- [3] Craig J.J., « Introduction to Robotics: Mechanics and control », 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company, 1999.

- [4] R .Merzouki., « COURS de Robotique Industriel », 2010-2011.

- [5] Spong M. W., Vidyasagar M., “Robot Dynamics and Control”,Quinn-Woodbine, USA, 1981.

- [6] K.David Young., Sensor Member., « A Control Engineers Guid te Sliding Modes Cotrôl, IEEE Trnsactions on control systems technology ; May 1999.

- [7] Michel Fochi et al...., « Torque-control Based Compliant Actuation of a Quadruped Robot », IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, March 2012.

- [8] B.Armstrong, « A Search for Consensus Among Model parameters Reported for the PUMA 560 Robot », Electrical Engineering and Computer science University of Wisconsin USA.

- [9] Daisuke Kabayashi., Kajiro Watanabe., Kuzuyuki Kabayashi., Yosuke Kurihara., « Impedance Force Control of Robot Hand Using Pressure Sensor », Annual Conference, Waseda University, Tokyo, Japan, September 2011.
- [10] S.Tungpotoratonawong., Kigashi Ohishi., Toshimasa Miyazaki, « Force sensor-less Workspace Impedance Control Considering Resonant Vibration of Industrial Robot », University of Technology, Japan, IEEE, 2005.
- [11] A.Hammache., « Commande en Position/Orientation par Différentes Paramétrisations de l'Orientation du Bras de Robot PUMA 560 dans l'Espace opérationnel », Mémoire de Magister à l'ENP, 2006.
- [12] M.Ali-bey., « Commande en effort des Robots Manipulateurs », Mémoire de Magister à l'ENP, 2005.
- [13] Fabricio Garelli., Luis Garacia., Antonio Sala., « Sliding mode speed auto-regulation technique for robotic tracking », Robotics and Autonomous systems, Vol.57, 2011.p.139-182.
- [14] F.Jatta., G.Legnani., A.Visioli., G.Ziliani, « On these velocity feedback in hybrid force/velocity control of industrial manipulators », Science direct, Control Engineering Practice, Vol.14, 2006.p. 1045-1055.
- [15] Charulampos.P., Bechlioulis., Zoe Doulgeri., George A. Rouithkis, «Guaranteeing prescribed performance and contact maintenance via an approximation free robot force/position controller, Automatica, Vol. 48, 2012.p.360-365.