

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla
Faculté des Nouvelles Technologies de
l'Information et de la Communication
Département d'Electronique et des
Télécommunications

Réf :



جامعة قاصدي مرباح ورقلة
كلية التكنولوجيات الحديثة
للمعلومات والاتصال
قسم الإلكترونيك والاتصالات
المرجع:

MEMOIRE

En vue de l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Automatique

Spécialité : Automatique et Systèmes

Présenté Par : Mr. BELALEM Abdelaziz
Mr. REHOUMA Mohamed

Thème :

**Commande Prédicative d'un Twin Rotor Multi
Entrées Multi Sorties Système**

Soutenu publiquement le : 01/07/2019

Devant le jury :

Mr. BENHELAL Belkhir
Mr. KAFI Mohamed Redouane
Mme. KARA Fouzia

Université Kasdi Merbah –Ouargla Président
Université Kasdi Merbah –Ouargla Superviseur
Université Kasdi Merbah –Ouargla Examineur

Année universitaire 2018/2019

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier éternellement Allah le tout puissant de nous avoir donné du courage et de la volonté de mener à terme ce modeste travail.

À nos familles qui nous ont toujours encouragés et soutenus durant nos études.

Nos gratitude s'adressent également à **M. Mohamed Redouane KAFI** de nous avoir guidés tout au long de cette année, aussi pour le temps précieux qu'il nous accordait et pour nous avoir secoués quand il le fallait.

Nous souhaitons aussi remercier ici **M. Oussama ZEHRI** pour son soutien.

Nous remercions les membres de jury d'avoir accepté examiner ce travail. Leurs disponibilités ont rendu cette soutenance possible.

DEDIDACE

Nous dédions ce modeste travail à

Nos chers parents

À nos chères sœurs et frères,

Toutes nos petites familles

Toutes nos grandes familles

Tous nos amis

À tous les étudiants de l'Automatique et Systèmes

et toute la promotion 2018/2019

Liste d'abréviations

| | |
|--------------|--|
| UAV | Véhicule Aérien Sans Pilote |
| TRMS | Twin Rotor Multi Entrées Multi Sorties Système |
| MPC | Contrôle Prédictive par Modèle |
| PID | Proportionnelle Intégrateur Dérivateur |
| MIMO | Multi Entrées Multi Sorties |
| 2DOF | 2 degrés de liberté |
| Fuzzy | Floue |
| PFC | Commande Prédictive Fonctionnelle |
| DMC | Commande Prédictive par Matrice Dynamique |
| GPC | Commande Prédictive Généralisé |

RESUME

L'objectif du présent travail est la commande d'un prototype de système UAV qui est un système physique complexe ; non linéaire, multi variable et instable en boucle ouverte, il s'appelle le TRMS. Le TRMS est un simulateur de vol d'un hélicoptère, constitué de deux entrées/sorties fortement couplés, il représente presque tous les problèmes envisageables dans une approche de commande avancée. Après la linéarisation du système au voisinage d'une zone opérationnelle donnée, des techniques classiques de commande des systèmes linéaires peuvent être appliquées. La commande prédictive par modèle (MPC), est choisie en raison de ses résultats prometteurs dans le domaine du système non-linéaire multi variable, elle est basée sur l'utilisation d'un modèle pour prédire le comportement futur du système sur un horizon de temps fini. La comparaison de simulations obtenues avec celle du PID montre des très bons résultats par rapport les performances et la stabilité.

Mots clés :

TRMS, MPC, Twin Rotor Multi Entrées Multi Sorties, Commande prédictive, PID.

ABSTRACT

The objective of this work is to control a prototype UAV system, which is a complex physical system: non-linear, multivariable, and unstable open loop, it is called the TRMS system. The TRMS is a helicopter flight simulator composed of two strongly coupled inputs/outputs; it represents almost all the possible problems in an advanced control approach. After linearization of the system around of a given operational area, the classical control techniques of linear systems were applied. The predictive control model (MPC) is chosen because of its promising results in the field of the multivariable nonlinear system. It relies on the use of a model to predict the future behavior of the system over a finite time horizon. The comparison of the simulations obtained with that of the PID shows excellent results in terms of performance and stability.

Keywords:

TRMS, MPC, Twin Rotor Multi Input Multi Output, Predictive Control, PID.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو التحكم في النظام النموذجي للطائرات بدون طيار وهو نظام فيزيائي معقد، غير خطي، متعدد المداخل والمخارج وغير مستقر، الا وهو TRMS. TRMS عبارة عن محاكي طيران لطائرة هليكوبتر ، يتكون من مدخلين ومخرجين مترابطين بشدة ، ويمثل تقريباً جميع المشكلات المحتملة في نهج التحكم المتقدم. بعد تحويل النظام غير الخطي الى اخر خطي في محيط منطقة تشغيل معينة، يمكن تطبيق تقنيات التحكم التقليدية للأنظمة الخطية. يتم اختيار التحكم التنبؤي النموذجي (MPC) نظراً لنتائجه الواعدة في مجال النظام غير الخطي متعدد المتغيرات، وهو يعتمد على استخدام نموذج للتنبؤ بسلوك النظام في المستقبل عبر أفق زمني محدد. توضح مقارنة المحاكاة التي تم الحصول عليها مع اختبار PID نتائج جيدة جداً من حيث الأداء والاستقرار.

كلمات دلالية:

جهاز TRMS متعدد المداخل متعدد المخارج ، التحكم التنبؤي بالنموذج MPC ، أفق التنبؤ ، النظام غير الخطي ذي المداخل والمخارج المتعددة ، تقنية التحكم PID

SOMMAIRE

| | Page |
|--|-----------|
| Remerciements | 02 |
| Dédicace..... | 03 |
| Liste d'abréviations..... | 04 |
| Résumé | 05 |
| Liste des figures..... | 10 |
| Liste des tableaux..... | 12 |
| Chapitre I : Introduction Générale..... | 11 |
| Chapitre II : Généralités sur la Commande Prédicative par Modèle MPC | 17 |
| 1. Introduction | 18 |
| 2. Historiques de la commande prédictive | 18 |
| 3. Principe générale de la commande prédictive..... | 18 |
| 4. Commande prédictive par Modèle | 19 |
| 5. Les composantes d'une commande prédictive | 21 |
| 5.1. Modèle de prédiction | 22 |
| 5.2. Prédiction à base de Modèle d'état | 22 |
| 5.3. Fonction coût (critère de performance)..... | 24 |
| 5.4. L'Algorithme d'optimisation..... | 24 |
| 6. MPC avec contraintes | 25 |
| 6.1. Types des Contraintes | 25 |
| 6.1.1. En fonction du type de variable | 25 |
| 6.1.2. En fonction de la façon dont ils sont traités | 25 |
| 6.2. Contraintes sur la variation incrémentielle de la variable de contrôle et l'amplitude de la variable de contrôle | 25 |
| 6.3. Contraintes de sortie | 26 |
| 7. Les aspects qui ont permis le développement du MPC..... | 26 |
| 8. Avantages de la commande prédictive MPC..... | 27 |
| 9. Inconvénients de la commande prédictive MPC..... | 28 |
| 10. Conclusion..... | 28 |
| Chapitre III : Twin Rotor Multi Input Multi Output Système TRMS | 29 |
| 1. Introduction..... | 30 |
| 1.1. Contexte | 30 |
| 1.2. Identification du système | 30 |
| 2. La Description | 31 |

| | |
|---|----|
| 2.1. Description du TRMS | 31 |
| 2.2. Modèle Mathématique du TRMS | 32 |
| 3. Schéma de Système TRMS | 36 |
| 4. Linéarisation de Système TRMS | 37 |
| 4.1. Objectif de Linéarisation..... | 37 |
| 4.2. Démonstration mathématique | 37 |
| 4.3. Le modèle non linéaire du Twin Rotor MIMO Système | 38 |
| 5. Rappel | 39 |
| 6. Le modèle linéaire de Twin Rotor MIMO Système à le point de fonctionnement (ψ, ϕ)(0,0)..... | 39 |
| 7. Conclusion..... | 40 |
| Chapitre IV : Implémentation & Simulations | 41 |
| 1. Introduction | 42 |
| 2. Définition des paramètres | 42 |
| 3. Simulation avec un signal de référence échelon de 0.3 rad | 44 |
| 4. Simulation avec un signal de référence échelon de 0.6 rad | 48 |
| 5. Simulation avec un signal de référence échelon carré de 0.3 rad..... | 52 |
| 6. Simulation avec un signal de référence sinusoïdale de 0.3 rad | 56 |
| 7. Conclusion | 59 |
| Conclusion Générale | 60 |
| Références & Bibliographies..... | 62 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|---|------|
| 2.1 Principe générale de la commande prédictive | 19 |
| 2.2 Exemple pratique sur le Principe de la commande prédictive..... | 20 |
| 2.3 Composantes de la commande prédictive..... | 21 |
| 2.4 Schéma explicite de la commande prédictive..... | 21 |
| 3.1 Unité mécanique TRMS | 31 |
| 3.2 Système de contrôle TRMS | 32 |
| 3.3 Modèle phénoménologique TRMS | 33 |
| 3.4 Schéma du système simplifié TRMS | 36 |
| 4.1 Réponse pour un échelon de 0.3 rad, l'angle d'élévation..... | 44 |
| 4.2 Réponse pour un échelon de 0.3 rad, l'angle d'Azimuth | 44 |
| 4.3 Erreur d'angle d'élévation pour un échelon de 0.3 rad..... | 45 |
| 4.4 Erreur d'angle d'Azimuth pour un échelon de 0.3 rad | 45 |
| 4.5 Commande U1 élévation, pour un échelon de 0.3 rad..... | 46 |
| 4.6 Commande U2 Azimuth, pour un échelon de 0.3 rad..... | 46 |
| 4.7 Réponse pour un échelon de 0.6 rad, l'angle d'élévation..... | 48 |
| 4.8 Réponse pour un échelon de 0.6 rad, l'angle d'Azimuth | 48 |
| 4.9 Erreur d'angle d'élévation pour un échelon de 0.6 rad..... | 49 |
| 4.10 Erreur d'angle d'Azimuth pour un échelon de 0.6 rad. | 49 |
| 4.11 Commande U1 élévation, pour un échelon de 0.6 rad..... | 50 |
| 4.12 Commande U2 Azimuth, pour un échelon de 0.6 rad..... | 50 |
| 4.13 Réponse pour un échelon carré de 0.3 rad, l'angle d'élévation..... | 52 |
| 4.14 Réponse pour un échelon carré de 0.3 rad, l'angle d'Azimuth | 52 |
| 4.15 Erreur d'angle d'élévation pour un échelon carré de 0.3 rad..... | 53 |
| 4.16 Erreur d'angle d'Azimuth pour un échelon carré de 0.3 rad..... | 53 |
| 4.17 Commande U1 élévation, pour un échelon carré de 0.3 rad..... | 54 |
| 4.18 Commande U2 Azimuth, pour un échelon carré de 0.3 rad..... | 54 |
| 4.19 Réponse pour un sinusoïdale de 0.3 rad, l'angle d'élévation..... | 56 |
| 4.20 Réponse pour un sinusoïdale de 0.3 rad, l'angle d'Azimuth..... | 56 |
| 4.21 Erreur d'angle d'élévation pour un sinusoïdale de 0.3 rad..... | 57 |
| 4.22 Erreur d'angle d'Azimuth pour un sinusoïdale de 0.3 rad | 57 |
| 4.23 Commande U1 élévation, pour un sinusoïdale de 0.3 rad..... | 58 |
| 4.24 Commande U2 Azimuth, pour un sinusoïdale de 0.3 rad..... | 58 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|--|------|
| 3.1 Paramètres du modèle TRMS [3-4-6]..... | 35 |
| 4.1 Paramètre de bloc MPC | 43 |
| 4.2 Paramètre de bloc PID | 43 |

Chapitre I : Introduction Générale

L'objectif de la conception d'un contrôleur pour le système MIMO à double rotor est de fournir une plate-forme expérimentale permettant de contrôler le vol d'hélicoptère [1-2]. La modélisation du système TRMS et la mise au point de différents types de contrôleurs robustes ont suscité beaucoup d'attention en raison du fait que la dynamique du système TRMS est semblable à celle de l'hélicoptère [3-4]. Le TRMS est un banc d'essai de laboratoire développé par Feedback Instruments Ltd pour des expériences de contrôle [5].

Le problème de contrôle du TRMS est considéré comme un défi en raison du fait que la dynamique du TRMS est non linéaire et instable et qu'il existe également un fort effet de couplage entre les deux hélices [6]. Le système Twin Rotor MIMO peut donc être considéré comme un véhicule aérien complexe et non conventionnel qui présente des défis difficiles en termes de modélisation, de conception du contrôleur et de mise en œuvre [7]. Le TRMS est capable d'effectuer une rotation dans les deux sens, à savoir horizontal et vertical. Une force de portance est générée par le rotor principal, ce qui permet au TRMS de se déplacer autour de l'axe de tangage vers le haut. Le mouvement autour de l'axe de lacet est effectué avec le rotor de queue [6-8]. L'intérêt de la recherche pour les plates-formes de laboratoire pour simuler des manœuvres complexes d'aéronefs et étudier différents paradigmes de contrôle s'est développé au fil des ans.

De nombreuses stratégies de contrôle du TRMS allant des techniques classiques aux techniques avancées et intelligentes ont été développées [9]. Dans [10], Une loi de commande optimale voisine couplée à une estimation pour résoudre le problème de suivi de trajectoire et / ou de régulation d'un système multi variable 2DOF à deux rotors (TRMS) a été développée. Une technique de commande H^∞ basée sur un réseau local modèle est proposée pour résoudre le problème de stabilisation TRMS (CE-150). En utilisant le fait que le système peut être linéarisé autour d'un ensemble de points de fonctionnement, ils ont conçu un contrôleur H^∞ pour le système linéarisé. Pour cela, ils ont résolu le problème dit de sensibilité mixte dans [11]. Une comparaison entre les techniques de contrôle classiques (PID) et les techniques de contrôle intelligentes basées sur la logique floue type-1 et intervalle type-2 a été présentée dans [12] pour la commande d'un système MIMO (TRMS), une poursuite précise avec robustesse aux incertitudes structurées / non structurées

a été obtenue. Un opérateur de rétroaction en cascade généralisé, associé à l'estimation d'état, a été proposé dans [13] à une plate-forme TRMS afin de réguler ses trajectoires de sortie, quelles que soient leurs complexités. Cette nouvelle technologie de contrôle a été conçue en deux phases en cascade. L'opérateur de rétroaction optimal nominal est d'abord déterminé pour obtenir l'état nominal et les trajectoires d'entrée d'un système TRMS, où le bruit de processus et de mesure n'est pas pris en compte dans cette phase. Dans la deuxième phase, les trajectoires d'état nominal et d'entrée ont été utilisées pour déterminer les entrées optimales (tensions de moteur à courant continu) appliquées aux rotors principal et arrière du TRMS afin de réguler les trajectoires de référence en élévation (pitch) et azimut (azimut) sujet au bruit de processus et de mesure. Les contrôleurs LQR fuzzy distribués en parallèle sont conçus dans [14] pour contrôler la position des angles de tangage et de lacet afin de couvrir diverses régions de fonctionnement. Dans [15], un contrôleur de mode glissant intégral et glissant flou est conçu pour contrôler la position des angles de tangage et de lacet du TRMS. Un contrôleur de mode glissant de second ordre est proposé pour le contrôle de position du système TRMS dans [16], dans lequel le système est pseudo-découplé en sous-systèmes verticaux et horizontaux et les effets de couplage sont considérés comme des incertitudes et des perturbations des sous-systèmes.

La commande prédictive par modèle (MPC), est une technique de contrôle émergente, a beaucoup attiré l'attention en raison de sa capacité à contrôler les systèmes à contraintes. MPC est largement utilisé dans l'industrie pour la conception de contrôleurs destinés à des processus MIMO extrêmement complexes [17].

L'idée de base de MPC est d'utiliser un modèle explicite du système pour prédire son comportement futur. Ensuite calculer de manière répétée une séquence de signaux de commande par le biais d'une méthode d'optimisation, dans laquelle la divergence entre la trajectoire du système prédite et la trajectoire de référence souhaitée est minimisée à travers un horizon fini [18-19-20].

MPC a d'abord été appliqué avec succès pour des systèmes à dynamique lente [21]. C'est aujourd'hui l'un des algorithmes de contrôle multi variable les plus largement utilisés dans l'industrie tels que la fabrication de pointe, le traitement des produits alimentaires, la robotique, l'électronique de puissance, les applications automobile et aérospatiale [22-23]. Les systèmes à plusieurs variables ont posé des

défis sans précédent aux ingénieurs de contrôle en raison de leur dynamique couplée. Comme MPC peut gérer des interactions multi variables et les contraintes de système physique dans le cadre d'optimisation, elle convient mieux aux systèmes MIMO. En outre, MPC est en mesure d'assurer des performances de suivi, une stabilité et une robustesse en boucle fermée [24].

Dans ce travail, la conception de MPC pour TRMS permettant de contrôler le suivi de trajectoire est décrite. Le système est considéré sous sa véritable forme couplée et des contraintes sur l'entrée de commande sont également incorporées. L'avantage réside dans la simplicité de la conception, sans compromettre les exigences de performance, mais aussi en garantissant la robustesse.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres avec une introduction générale et une conclusion générale.

Le chapitre deux est intitulé Généralités sur la Commande Prédicative par Modèle MPC. En fait, l'approche MPC se repose sur la prédiction par modèle. Nous présenterons le principe du contrôle prédictif, dans lequel nous nous concentrerons principalement sur la commande prédictive (MPC).

Le troisième chapitre est intitulé Twin Rotor MIMO Système. Il est principalement consacré à la présentation de systèmes fonctionnant dans une large gamme de conditions de fonctionnement à des fins de contrôle. Nous présenterons quelques généralités sur TWIN Rotor MIMO System TRMS, sa structure et son principe de fonctionnement, ensuite la modélisation physique du système non linéaires multi variable à 2 DOF (hélicoptère TRMS 33-949 de Feedback Instruments) est détaillée, avec la déduction du modèle mathématique validé. Par la suite nous effectuons une linéarisation du système autour d'un point opérationnel.

Le chapitre quatre, intitulé implémentation et simulation, souligne la loi de contrôle proposée, permettant de résoudre le problème de suivi de trajectoire et de régulation d'un modèle TRMS. Un contrôleur est conçu pour contrôler la position des angles d'azimut et d'élévation du système, puis validé à l'aide d'un ensemble de résultats de simulation. Ce dernier illustre l'efficacité du schéma de contrôle proposé pour des incertitudes importantes avec des non-linéarités. Car Ce dernier est linéarisé autour d'un point de fonctionnement. La loi de commande proposée prend

en compte les incertitudes de processus et de mesure du modèle de TRMS. Les résultats de la simulation sont présentés pour démontrer la performance de la loi de commande proposée.

La conclusion générale résume l'approche globale proposée et les résultats obtenus, tout en dévoilant les suggestions pour des travaux ultérieures et les tendances futures.

Chapitre II : Généralités sur la Commande Prédictive par Modèle MPC

II. 1- Introduction

La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique. Elle constitue un domaine ample, varié et intègre des disciplines comme la commande optimale, la commande multi-variable et la commande avec contrainte.

Elle a pour objectif de commander des systèmes industriels complexes. Elle est utilisée dans diverses applications, notamment dans les systèmes robotiques, des machines électriques, la surveillance et la conduite des procédés biotechnologiques.

La commande prédictive est un terme général qui englobe un ensemble de méthodes différentes (PFC, DMC, GPC, MPC...). Néanmoins, toutes ces techniques utilisent la même philosophie de contrôle et le principe de fonctionnement est le même [24]

II. 2- Historiques de la commande prédictive

Elle a fait ses débuts en 1962 suite aux travaux de Zadeth et Whalen. Elle sera connue plus tard dans le monde industriel, particulièrement dans le secteur de la pétrochimie, suite aux travaux de Richalet et A. Rault

Grâce à sa capacité à prendre en compte les contraintes, à contrôler les systèmes multi variables et la possibilité qu'elle offre d'utiliser différentes structures de modèle, la commande prédictive (non linéaire (NMPC)) est à présent largement reconnue comme l'une des techniques de contrôle les plus puissantes si ce n'est la seule approche possible dans beaucoup de problèmes de contrôle à résoudre. Au fil du temps, beaucoup d'améliorations ont été faites sur cette technique, notamment les travaux de Mayne et Michalska. Aujourd'hui, elle est également adaptée à la commande des systèmes rapides.

II. 3- Principe générale de la commande prédictive

La principale idée de la commande prédictive se résume à « utiliser un modèle pour prédire le comportement du système et choisir la meilleure décision au sens d'un certain coût tout en respectant les contraintes ».

À chaque période d'échantillonnage du contrôleur un calcul des prédictions des variables contrôlées est effectué jusqu'à un horizon de temps N (horizon de prédiction) grâce au modèle interne et la future loi de commande calculée, à appliquer sur les variables manipulées jusqu'à un horizon temporel N_u (horizon de commande), en minimisant un critère de performances. A la période d'échantillonnage suivante, seul le premier élément (en rouge – voir figure ci-dessous) de la loi de commande calculée est appliqué sur le système. Cette procédure est ensuite répétée : c'est le principe de l'horizon fuyant. Ainsi à chaque période d'échantillonnage, un problème d'optimisation doit être résolu en temps réel.

Dans le cas linéaire ce problème est exprimé sous forme d'un programme quadratique qui admet donc un seul minimum global tandis que dans le cas non linéaire, c'est un programme non linéaire avec contraintes non convexe admettant plusieurs minimas locaux [1-2].

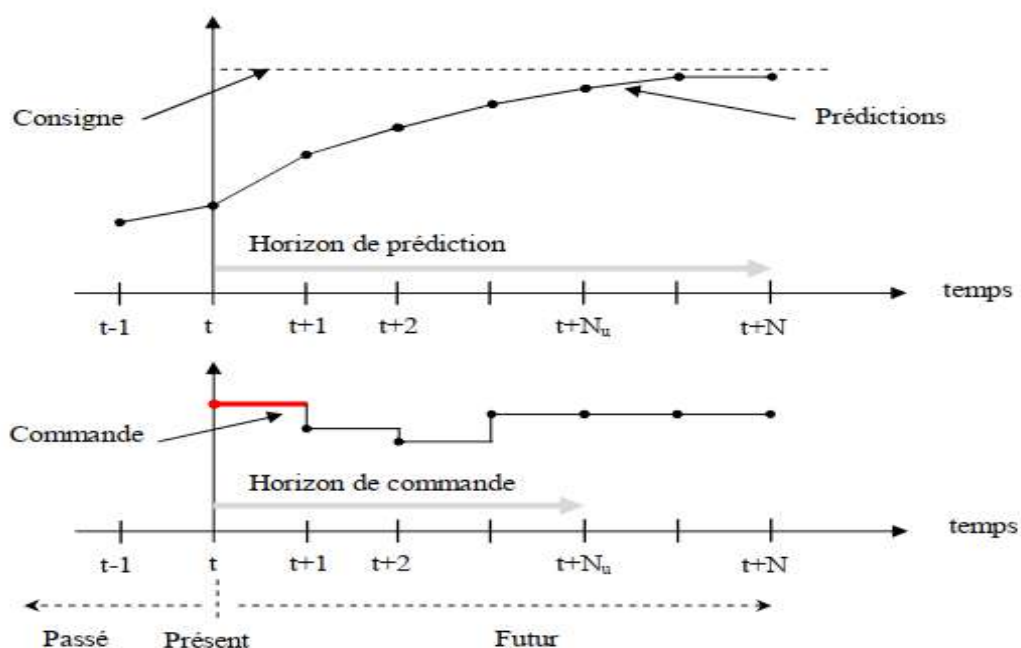


Figure 2.1 : Principe générale de la commande prédictive

II. 4- Commande prédictive par modèle

La commande prédictive (MPC pour Model Predictive Control) est une technique de commande, compatible avec le fait qu'à chaque temps d'échantillonnage le signal de commande découle de la résolution d'un problème

d'optimisation. La MPC n'est pas une stratégie spécifique de commande mais c'est une méthodologie développée autour de certaines idées communes.

MPC est devenue de plus en plus populaire ces dernières années dans le milieu industriel pour sa tolérance envers différents types de systèmes et le respect des contraintes imposées, ainsi que la compatibilité avec le matériel.

L'idée principale de la commande prédictive est basée sur l'utilisation d'un modèle du système à commander pour prédire sa sortie sur un certain horizon, l'élaboration d'une séquence optimale de commandes futures satisfaisant les contraintes et minimisant une fonction coût, l'application du premier élément de la séquence optimale sur le système et la répétition de la procédure complète à la prochaine période d'échantillonnage [18-19-20].

Par exemple, le conducteur d'un véhicule connaît la trajectoire de référence désirée à l'avance (la route) sur un horizon de commande fini (son champ visuel), et en prenant en compte les caractéristiques de la voiture (modèle mental du comportement du véhicule), il décide quelles actions (accélérer, freiner ou tourner le volant) il faut réaliser afin de suivre la trajectoire désirée. Seule la première action de conduite est exécutée à chaque instant, et la procédure est répétée à nouveau pour les prochaines actions [25].

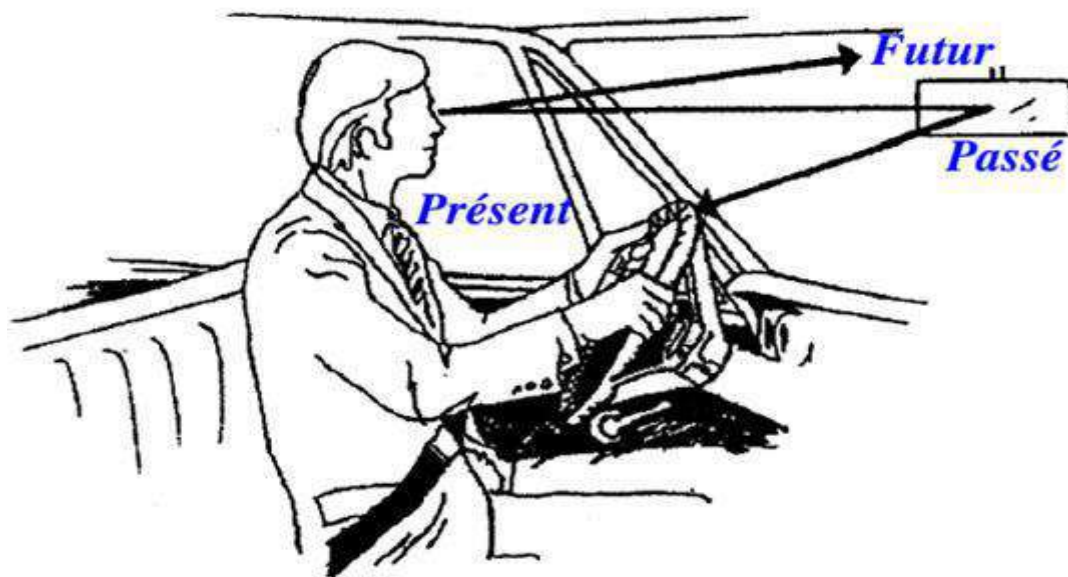


Figure 2.2 : Exemple pratique sur le Principe de la commande prédictive

II. 5- Les composantes d'une commande prédictive

Tous les algorithmes MPC possèdent des éléments communs et différentes options peuvent être choisies pour chaque élément, donnant lieu à différents algorithmes. Ces éléments sont [1-2] :

- Modèle de prédiction,
- une fonction coût à minimiser plus les contraintes
- l'algorithme d'optimisation (pour déterminer la séquence de commande).

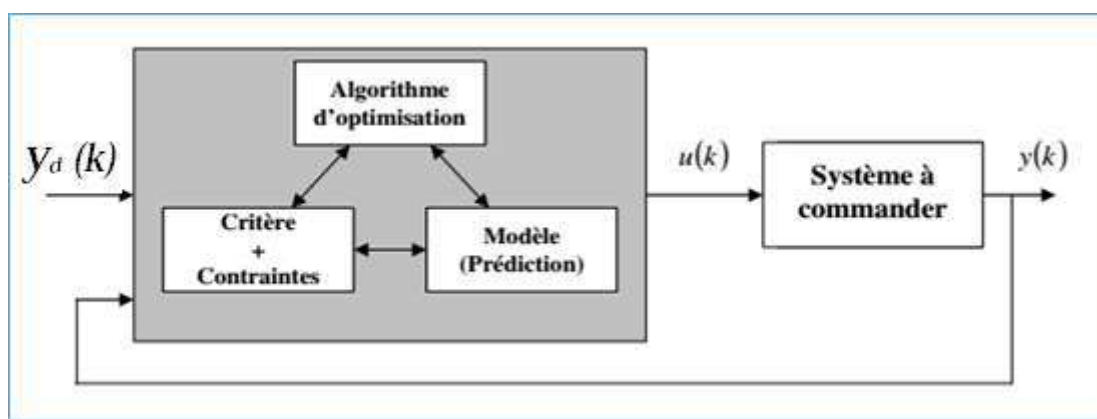


Figure 2.3 : Composantes de la commande prédictive

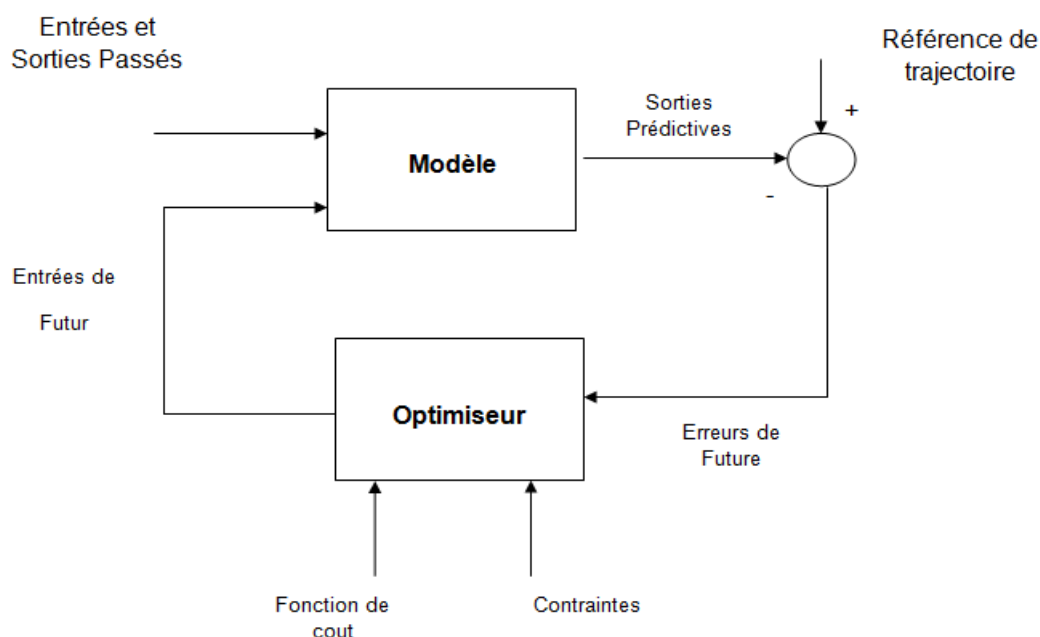


Figure 2.4 : Schéma explicite de la commande prédictive

II. 5-1- Modèle de prédiction :

Le modèle est la pierre angulaire de MPC ; une conception complète doit inclure les mécanismes nécessaires pour obtenir le meilleur modèle possible, lequel doit être suffisamment complet pour rendre pleinement compte de la dynamique du processus et permettre de calculer les prévisions, tout en étant intuitif et en permettant une analyse théorique. L'utilisation du modèle de processus est déterminée par la nécessité de calculer la sortie prévue aux instants futurs $\hat{y}(t + k/t)$.

Les différentes stratégies de MPC peuvent utiliser divers modèles pour représenter la relation entre les produits et les intrants mesurables, dont certaines sont des variables manipulées et d'autres peuvent être considérées comme des perturbations mesurables pouvant être compensées par une action en retour.

Un modèle de perturbation peut également être pris en compte pour décrire le comportement non reflété par le modèle de processus, y compris l'effet des entrées non mesurables.

Le modèle de prédiction se compose de deux parties, la première décrit la relation entrées sorties et l'autre les perturbations et les erreurs de modélisation. Le modèle doit être discret car la commande prédictive est une commande numérique.

Selon le modèle, il existe plusieurs formes de commande prédictive :

- Commande prédictive linéaire à base de modèle d'état, Fonction de transfert ... etc.
- Commande prédictive non linéaire à base de modèle d'état non linéaire ... etc.

II. 5-2- Prédiction à base de Modèle d'état :

Modèle d'état discret :

$$x(t + 1) = \mathbf{A} x(t) + \mathbf{B} u(t) \dots \dots \dots (2.1)$$

$$y(t) = \mathbf{C} x(t) \dots \dots \dots (2.2)$$

Où $x \in R^n$ est le vecteur d'état appartenant à un espace d'état $M \in R^n$, $u \in R^m$ le vecteur d'entrée u et $y \in R^l$ le vecteur de sortie du système.

on calcule les n prédictions en développant les équations d'état :

$$x(t + 1) = \mathbf{A} x(t) + \mathbf{B} u(t) = \mathbf{A} x(t) + \mathbf{B} u(t - 1) + \mathbf{B} \Delta u(t) \dots \dots \dots (2.3)$$

$$x(t + 2) = \mathbf{A} x(t + 1) + \mathbf{B} u(t + 1) \dots \dots \dots (2.4)$$

$$x(t + 2) = \mathbf{A}^2 x(t) + (\mathbf{A}\mathbf{B} + \mathbf{B}) u(t - 1) + (\mathbf{A}\mathbf{B} + \mathbf{B}) \Delta u(t) + \mathbf{B}\Delta u(t + 1)$$

⋮
⋮
⋮

$$x(t + p) = \mathbf{A}^p x(t) + (\mathbf{A}^{p-1} \mathbf{B} + \dots + \mathbf{B})u(t - 1) + (\mathbf{A}^{p-1} \mathbf{B} + \dots + \mathbf{B}) \Delta u(t) + \dots \mathbf{B}\Delta u(t + p - 1) \dots \dots \dots (2.5)$$

d'où le prédicteur optimal sous forme matricielle

$$\hat{\mathbf{X}} = \begin{bmatrix} \hat{X}(t) \\ \hat{X}(t + 1) \\ \vdots \\ \hat{X}(t + p - 1) \end{bmatrix} = \Psi_0 x(t) + \Gamma_0 u(t - 1) + \Lambda \Delta U$$

$$\text{où : } \Delta U = \begin{bmatrix} \Delta u(t) \\ \Delta u(t + 1) \\ \vdots \\ \Delta u(t + p - 1) \end{bmatrix}, \quad \Psi_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{A}^2 \\ \vdots \\ \mathbf{A}^p \end{bmatrix}, \quad \Gamma_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{A}\mathbf{B} + \mathbf{B} \\ \vdots \\ \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{B} + \dots + \mathbf{B} \end{bmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}\mathbf{B} + \mathbf{B} & \mathbf{B} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \mathbf{0} & \vdots & \vdots \\ \mathbf{A}^{p-1}\mathbf{B} + \dots + \mathbf{B} & \mathbf{A}^{p-2}\mathbf{B} + \dots + \mathbf{B} & \dots & \mathbf{B} \end{bmatrix}$$

où encore :

$$y' = \mathbf{C}X' = \Psi_y x(t) + \Gamma_y u(t - 1) + \Lambda_y \Delta U \dots \dots \dots (2.6)$$

Avec : $\Psi_y = \mathbf{C}\Psi_0$, $\Gamma_y = \mathbf{C}\Gamma_0$ et $\Lambda_y = \mathbf{C}\Lambda$

II. 5-3- Fonction coût (critère de performance)

La fonction coût J pénalise les écarts entre les sorties prédites commandées $y(t + k)/t$ et la trajectoire de référence $r(t + k/t)$. La trajectoire de référence peut dépendre de mesures effectuées à l'instant k , en particulier, son point de départ peut être la mesure de la sortie $y(t)$; ainsi elle peut être un ensemble de point fixe ou autre trajectoire prédéterminée. On définit la fonction coût suivante :

$$J = \sum_{k=1}^N \|X_k - r_k\|_Q^2 + \sum_{k=0}^{N_u-1} \|u_k\|_R^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

où N est l'horizon de prédiction et N_u l'horizon de commande, on assume que $N_u \leq N$, et que $\Delta u(t + k / t) = 0$ pour $k \geq N_u$, donc $u(t + k/t) = u(t + N_u - 1/t)$ pour tout $k \geq N_u$.

La forme de l'équation implique que l'erreur entre la sortie et la référence est pénalisée à chaque instant situé dans l'horizon de prédiction ($1 \leq k \leq N$). C'est le cas le plus fréquent dans la commande prédictive. Pour le cas de la régulation à l'origine la référence r est nulle.

II. 5-4- L'Algorithme d'optimisation

Pour obtenir la loi de commande, on remplace **le prédicteur** dans la fonction coût :

$$J = \|\hat{X}\|_Q^2 + \|\Delta U\|_R^2$$

$$= \|\Psi_0 x(t) + \Gamma_0 u(t - 1) + \Lambda \Delta U\|_Q^2 + \|\Delta U\|_R^2$$

En prenant le gradient de J par rapport au commande ΔU :

$$\nabla_{\Delta U} J = 0$$

On aura

$$\Delta U = \frac{1}{2} H^{-1} G$$

Ou : $H = \Lambda^t Q \Lambda + R$, $G = -2 \Lambda^t Q (\Psi_0 x(t) + \Gamma_0 u(t - 1))$

On applique seulement la première composante de ΔU au système

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}(t - 1) + \Delta \mathbf{u}(t)$$

II. 6- MPC avec contraintes :

En pratique, tous les processus sont soumis à des contraintes :

- Les actionneurs ont un rayon d'action limité et une vitesse de balayage limitée (limites physiques, comme dans les vannes de régulation)
- Limites de sécurité : limites de pression ou de température
- Conditions de fonctionnement : en raison de limites technologiques ou de raisons économiques ou environnementales (profil de température dans un four)

II. 6-1- Types des Contraintes

II. 6-1-1 En fonction du type de variable :

- Variables d'entrée ou manipulées (VM) : peuvent être maintenues dans les limites par écrêtage.
- Variables de sortie ou contrôlées (VC) : Les contraintes de sortie doivent être contrôlées à l'avance car les variables de sortie sont affectées par la dynamique du processus, Négliger les contraintes de sortie peut réduire les profits économiques et causer des dommages aux personnes et aux équipements.

II. 6-1-2 En fonction de la façon dont ils sont traités :

- Hard ;
- Soft : Pénalisé dans la fonction de coût

II. 6-2- Contraintes sur la variation incrémentielle de la variable de contrôle et l'amplitude de la variable de contrôle :

Ce sont des contraintes strictes sur le taux de changement des variables de contrôle, les limites supérieure et inférieure de ce type de contraintes sont spécifiées sous la forme :

$$\Delta \mathbf{u}_{min} \leq \Delta \mathbf{u}(k) \leq \Delta \mathbf{u}_{max}$$

Les contraintes d'amplitude de la variable de contrôle représentent les limites de contrôle physiques du système :

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max}$$

II. 6-3- Contraintes de sortie :

Nous pouvons également spécifier la plage de fonctionnement pour la sortie de l'installation. Par exemple, supposons que la sortie $y(k)$ ait une limite supérieure y_{max} et une limite inférieure y_{min} , de sorte que les contraintes de sortie sont spécifiées comme suit :

$$y_{min} \leq y(k) \leq y_{max}$$

Les contraintes de sortie sont souvent implémentées en tant que contraintes souples de la manière qui ajoutent une variable de jeu $s_g > 0$ aux contraintes, comme indiqué ci-dessous :

$$y_{min} - s_g \leq y(k) \leq y_{max} + s_g$$

Souvent, les contraintes de sortie entraînent une modification importante des variables de contrôle et des variables de contrôle incrémentielles. Lorsque les contraintes de sortie sont appliquées, le contrôle ou incrémentiel

Les variables de contrôle peuvent violer leurs propres contraintes, le problème du conflit de contraintes apparaît.

Dans les situations où les contraintes sur les variables de contrôle sont plus importantes pour le fonctionnement de l'installation, les contraintes de sortie sont souvent assouplies en sélectionnant une variable de jeu plus grande s_g pour résoudre le problème de conflit.

II. 7- Les aspects qui ont permis le développement du MPC

Les techniques de modélisation et d'identification qui sont maintenant diverses et puissantes.

Les techniques de commande robuste permettent l'utilisation d'algorithmes MPC où est intégré un modèle d'incertitudes.

Les calculateurs numériques sont chaque jour plus rapides et permettent l'exécution en ligne d'algorithmes plus complexes tels que ceux abordant l'optimisation avec des contraintes.

II. 8- Avantages de la commande prédictive :

MPC présente une série d'avantages par rapport à d'autres méthodes, parmi lesquelles se distinguent :

- Il est particulièrement attrayant pour le personnel n'ayant qu'une connaissance limitée du contrôle, car les concepts sont très intuitifs et le réglage est relativement facile.
- Il peut être utilisé pour contrôler une grande variété de processus, allant de ceux dont la dynamique est relativement simple à des processus plus complexes, y compris des systèmes avec des temps de retard longs, des phases non minimales ou instables.
- Le cas multi variable peut facilement être traité.
- Il comporte intrinsèquement une compensation pour les temps morts.
- Il introduit le contrôle anticipé de manière naturelle pour compenser les perturbations mesurables.
- Le contrôleur résultant est une loi de contrôle facile à mettre en œuvre.
- Son extension au traitement des contraintes est conceptuellement simple, et celles-ci peuvent être systématiquement incluses lors du processus de conception.
- C'est très utile lorsque des références futures (robotique ou traitement par lots) sont connues.
- C'est une méthodologie totalement ouverte basée sur certains principes de base qui permet des extensions futures.
- Tout système théoriquement commandable, mono-variable, multi-variable, linéaire ou non, stationnaire ou non, avec contraintes diverses, peut être piloté par cette technique. Si l'on doit toujours exploiter au maximum toutes les particularités de chaque processus, la procédure de mise en œuvre reste la même pour tout processus.

- La projection de la commande sur une base future permet de ne pas avoir d'erreur sur une consigne quelconque connue ou estimée sur l'horizon de prédiction.
- La non-nécessité d'utiliser une représentation d'état lors de l'implantation du modèle du système, ce qui s'avère intéressant lorsque les modèles proviennent d'une de fonction de transfert discrète.
- La relation fournissant la commande se traduit par un simple algorithme, et beaucoup de calculs peuvent être faits hors ligne ou il ne reste à faire en temps réel que l'acquisition de la sortie du processus et le calcul proprement dit de la commande, incluant néanmoins l'élaboration de la réponse libre.

II. 9- Inconvénients de la commande prédictive :

- L'inconvénient principal de la commande MPC est le temps d'exécution, de ce fait la méthode trouve son application beaucoup plus dans le domaine des procédés chimiques qui sont en général des systèmes lents à grande période d'échantillonnage où l'application des méthodes numériques ne pose pas de problème.
- De plus, il n'y a pas de règles définies permettant de choisir les paramètres, sauf quelque compromis entre les différentes caractéristiques déduit par expérience dans le domaine.
- Elle nécessite une modélisation précise (difficulté scientifique).

II. 10- Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté un survol du principe de fonctionnement de la commande MPC, on a décrit les principaux éléments qui apparaissent dans cette méthodologie.

Chapitre III: Twin Rotor Multi Entrées Multi Sorties Système

III. 1- Introduction

III. 1-1- Contexte

Le modèle TRMS comprend une poutre pivotée sur sa base de telle sorte qu'elle tourne librement dans les plans horizontal et vertical. Il y a deux rotors, celui principal et celui de la queue aux deux extrémités du faisceau, qui sont entraînés par des moteurs à courant continu. Au pivot, un bras de contrepoids avec un poids à son extrémité est fixé à la poutre. L'état du faisceau est décrit par quatre variables de processus : les angles horizontaux et verticaux mesurés par des codeurs montés au pivot et deux vitesses angulaires correspondantes.

Il existe également deux autres variables d'état, les vitesses angulaires des rotors, mesurées par des capteurs de vitesse couplés aux moteurs à courant continu entraînants. La différence fondamentale entre l'installation en laboratoire et l'hélicoptère réel réside dans le fait que la force aérodynamique est contrôlée en modifiant l'angle d'attaque d'un hélicoptère, tandis que dans l'installation en laboratoire, l'angle d'incidence est fixe. En faisant varier la vitesse des deux rotors, la force aérodynamique peut être contrôlée dans un modèle TRMS. Comme chaque rotor affecte les deux angles de position, un couplage croisé important peut-être observé entre les actions des rotors. Pour stabiliser le système TRMS, la conception des contrôleurs est basée sur le découplage. Le système TRMS a été conçu pour fonctionner avec un contrôleur numérique externe basé sur PC. La communication avec les capteurs de position, de vitesse et les moteurs est assurée par l'ordinateur de contrôle via une carte E / S et une interface d'alimentation dédiées. Un logiciel temps réel fonctionnant dans l'environnement MATLAB / Simulink RTW / RTWT contrôle la carte d'E / S.

III. 1-2- Identification du système

L'identification du système intègre les outils mathématiques et les algorithmes utilisés pour construire des modèles dynamiques à partir de données mesurées. Le modèle mathématique dynamique implique qu'il s'agit d'une description mathématique du comportement dynamique d'un système dans le domaine temporel ou fréquentiel.

L'identification du système est réalisée en mesurant le comportement du système et les entrées de processus dans le système pour essayer de formuler une relation mathématique entre eux sans prendre en compte les processus internes du système.

Pour les systèmes non linéaires, la modélisation du système est effectuée en supposant au préalable une structure de modèle, puis en estimant les paramètres du modèle. Nous pouvons soit spécialiser la structure du modèle dans un but particulier, soit en avoir une générale pouvant également être utilisée pour d'autres périphériques. La complexité du modèle est déterminée par l'estimation du paramètre [6].

III. 2- La Description

III. 2-1- Description du TRMS

Comme le montre la figure 3.1, l'unité mécanique TRMS est composée de deux rotors positionnés sur une poutre horizontale avec un contrepoids au niveau du pivot. L'unité entière est attachée à la tour, ce qui garantit des expériences de contrôle de l'hélicoptère en toute sécurité.



Fig.3.1 : Unité mécanique TRMS [6]

Avec l'unité mécanique, l'unité électrique placée sous la tour joue un rôle important dans le contrôle TRMS. Sa fonction est de permettre aux signaux mesurés d'être transférés vers le PC et aux applications de signaux de contrôle via une carte E / S. Les unités mécaniques et électriques fournissent une configuration complète du système de contrôle présentée à la figure 3.2.

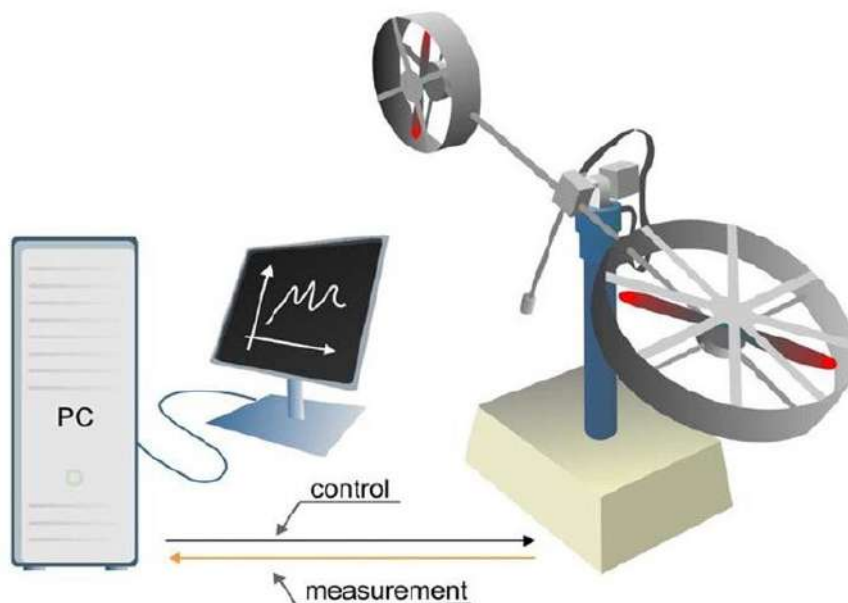


Fig. 3.2 : Système de contrôle TRMS

III. 2-2- Modèle mathématique du TRMS

Le modèle mécanique-électrique de la TRMS est présenté à la figure 3.3.

Habituellement, les modèles phénoménologiques tendant à être non linéaires, ce qui signifie qu'au moins un des états (courant i -rotor, θ -position) est un argument d'une fonction non linéaire. Afin de présenter un tel modèle en tant que fonction de transfert (forme de dynamique linéaire des plantes représentant un système de contrôle), il doit être linéarisé. Comme le montre le schéma électromécanique de la figure 3.3, les équations de modèle non linéaires suivantes peuvent être dérivées [3-4-6]

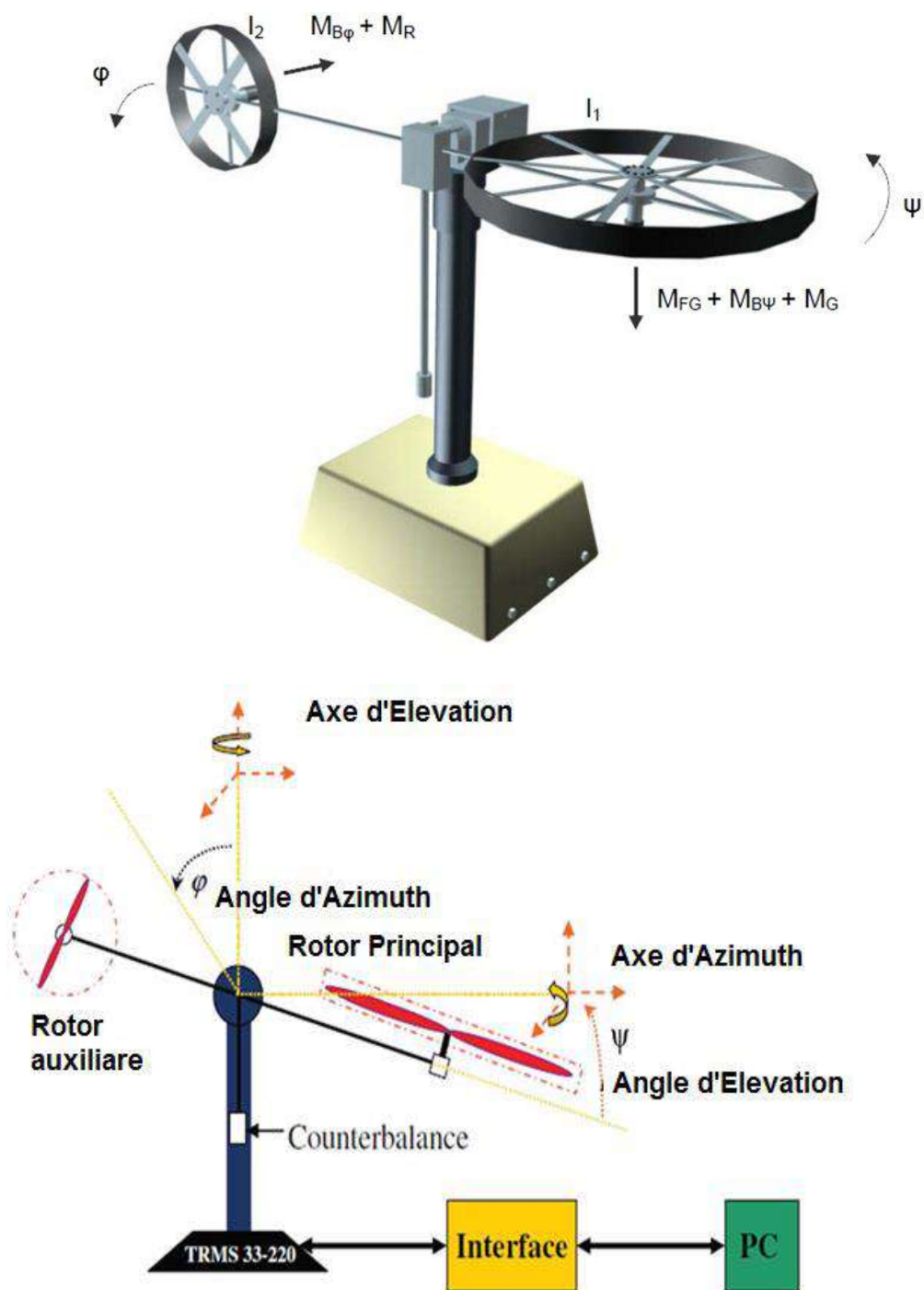


Fig. 3.3 : Modèle phénoménologique TRMS

$$I_1 \cdot \ddot{\Psi} = M_1 - M_{FG} - M_{B\psi} - M_G \dots \dots \dots (3.1)$$

Ou M_1 représente la caractéristique statique non linéaire

$$M_1 = a_1 \cdot \tau_1^2 + b_1 \cdot \tau_1 \dots \dots \dots (3.2)$$

Et M_{FG} représente la gravite momentanément

$$M_{FG} = M_g \cdot \sin \Psi \dots\dots\dots (3.3)$$

Par ailleurs $M_{B\Psi}$ c'set les forces momentanément des frictions

$$M_{B\Psi} = B_{1\Psi} \cdot \dot{\Psi} + B_{2\Psi} \cdot \sin (2\Psi) \dot{\varphi}^2 \dots\dots\dots (3.4)$$

M_G Moment gyroscopique

$$M_G = K_{gy} \cdot M_1 \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \Psi \dots\dots\dots (3.5)$$

Le moment moteur est décrit par une fonction de transfert de premier ordre approximative dans le domaine de Laplace :

$$\tau_1 = \frac{k_1}{T_{11}s+T_{10}} \cdot u_1 \dots\dots\dots (3.6)$$

Les équations qui font référence au mouvement du plan horizontal sont les suivantes:

$$I_2 \cdot \ddot{\varphi} = M_2 - M_{B\varphi} - M_R \dots\dots\dots (3.7)$$

Ou M_2 représente la caractéristique statique non linéaire

$$M_2 = a_2 \cdot \tau_2^2 + b_2 \cdot \tau_2 \dots\dots\dots (3.8)$$

Et $M_{B\varphi}$ c'set les forces momentanément des frictions

$$M_{B\varphi} = B_{1\varphi} \cdot \dot{\Psi} + B_{2\varphi} \cdot \sin (\dot{\varphi}) \dots\dots\dots (3.9)$$

M_R C'est la dynamique de réaction croisée :

$$M_R = \frac{k_c(T_0s+1)}{(T_p s+1)} \cdot \tau_1 \dots\dots\dots (3.10)$$

Le circuit électrique de DC moteur est donné comme suit :

$$\tau_2 = \frac{k_2}{T_{21}s+T_{20}} \cdot u_2 \dots\dots\dots (3.11)$$

Les paramètres du modèle phénoménologique ayant été choisis expérimentalement, le modèle non linéaire TRMS est un modèle semi-phénoménologique.

Le tableau suivant donne les valeurs approximatives des paramètres :

| Paramètre | Valeur |
|--|--|
| I_1 : moment d'inertie de moteur vertical | $6.8 \cdot 10^{-2} \text{ kg.m}^2$ |
| I_2 : moment d'inertie de moteur horizontal | $2 \cdot 10^{-2} \text{ kg.m}^2$ |
| a_1 : caractéristique statique | 0.0135 |
| b_1 : caractéristique statique | 0.0924 |
| a_2 : caractéristique statique | 0.02 |
| b_2 : caractéristique statique | 0.09 |
| M_g : gravité momentanément | 0.32 N.m |
| $B_{1\psi}$: fonction de friction momentanément | $6 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.s/rad}$ |
| $B_{2\psi}$: fonction de friction momentanément | $1 \cdot 10^{-3} \text{ N.m.s}^2/\text{rad}$ |
| $B_{1\phi}$: fonction de friction momentanément | $1 \cdot 10^{-1} \text{ N.m.s/rad}$ |
| $B_{2\phi}$: fonction de friction momentanément | $1 \cdot 10^{-2} \text{ N.m.s}^2/\text{rad}$ |
| K_{gy} : gyroscopique momentanément | 0.05 s/rad |
| k_1 : gain de moteur 1 | 1.1 |
| k_2 : gain de moteur 1 | 0.8 |
| T_{11} : dénominateur moteur 1 | 1.1 |
| T_{10} : dénominateur moteur 1 | 1 |
| T_{21} : dénominateur moteur 2 | 1 |
| T_{20} : dénominateur moteur 2 | 1 |
| T_p : réaction momentanément croisée | 2 |
| T_0 : réaction momentanément croisée | 3.5 |
| k_c : gain de réaction momentanément croisée | -0.2 |

Tableau 3.1 Paramètres du modèle TRMS [3-4-5-6]

Les limites du signal de commande sont réglées sur $[-2,5V - + 2,5V]$.

III. 3- Schéma de système TRMS

Le TRMS est une installation MIMO (Multiple Input Multiple Output). Le schéma simplifié de la TRMS est présenté à la figure 3.4.

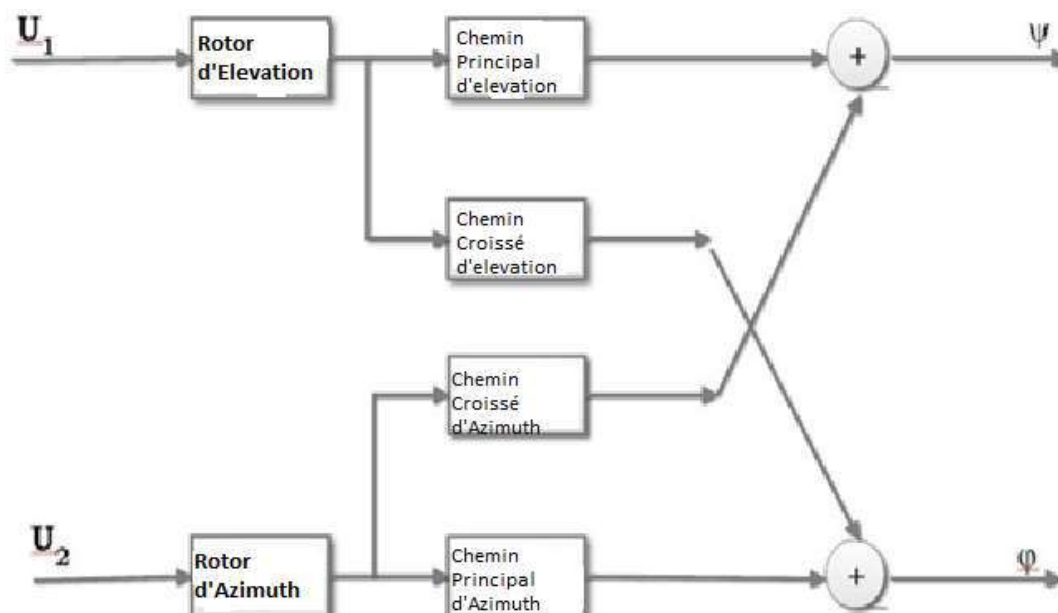


Fig.3.4 Schéma du système simplifié TRMS [6]

Le TRMS a deux entrées de contrôle U_1 et U_2 . Comme on peut le voir à la figure 3.4, la dynamique des couplages croisés entre les rotors est l'essentiel du TRMS.

La variable d'état de position des faisceaux est mesurée à l'aide de codeurs incrémentaux, qui fournissent un signal de position relative. Il est donc important de définir les conditions initiales appropriées à chaque exécution de la simulation TRMS en temps réel.

III. 4- Linéarisation de system TRMS

III. 4-1- Objectif de Linéarisation

Il existe de nombreux systèmes non linéaires complexes dans la nature, ce qui explique l'intérêt des ingénieurs et des scientifiques pour les simplifier. Dans le domaine de l'automatisation, il existe plusieurs méthodes pour concevoir un contrôleur pour un système. La plupart de ces méthodes font référence à des modèles linéaires car ils sont plus faciles à comprendre que les modèles non linéaires [8].

L'application de l'une des méthodes de contrôle dans un système non linéaire nécessite la linéarisation du système autour d'un point rendant le contrôleur valide uniquement dans la plage de points de fonctionnement. Cette section explique comment linéariser un système non linéaire autour d'un point opérationnel.

III. 4-2- Démonstration mathématique [20]

➤ Cas d'un seul vecteur d'Etat :

Pour simplifier, considérons une fonction non linéaire f avec un seul état x et une seule entrée u où :

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = f(x, u) \dots \dots \dots (3.12)$$

L'approximation en série de Taylor donne la possibilité d'approcher la fonction (f) autour d'un point de fonctionnement(x_s, u_s).

$$\dot{x} = f(x_s, u_s) + \frac{\partial f}{\partial x} \parallel_{x_s, u_s} (x - x_s) + \frac{\partial f}{\partial u} \parallel_{x_s, u_s} (u - u_s) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \parallel_{x_s, u_s} (x - x_s)^2 + \frac{\partial^2 f}{\partial x u} \parallel_{x_s, u_s} (x - x_s)(u - u_s) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial u^2} \parallel_{x_s, u_s} (u - u_s)^2 + \dots \dots \dots (3.13)$$

En ignorant les termes d'ordre supérieur et quadratiques, l'équation devient :

$$\dot{x} \approx f(x_s, u_s) + \frac{\partial f}{\partial x} \parallel_{x_s, u_s} (x - x_s) + \frac{\partial f}{\partial u} \parallel_{x_s, u_s} (u - u_s) \dots \dots \dots (3.14)$$

où $f(x_s, u_s) = constant$, $\frac{\partial f}{\partial x} \parallel_{x_s, u_s} = constant$ et $\frac{\partial f}{\partial u} \parallel_{x_s, u_s} = constant$

➤ Cas général de Système Non Linéaire Multi Entrées Multi Sorties :

Considérant le Système Non Linéaire Multi Entrées Multi Sorties

$$\dot{x} = f(x, u) \dots\dots\dots (3.15)$$

$$y = g(x, u) \dots\dots\dots (3.16)$$

Où : $x = [x_1, x_2, \dots, x_i]^t$ et $y = [y_1, y_2, \dots, y_i']^t$

La forme de modèle linéaire du système non linéaire MIMO donnée par ;

$$\begin{cases} x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \\ y = Cx(k) \end{cases} \dots\dots\dots (3.17)$$

Où les éléments des matrices de linéarisation sont:

$$A_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$B_{ij'} = \frac{\partial f_i}{\partial u_{j'}} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$C_{i'j} = \frac{\partial g_{i'}}{\partial x_j} \Big|_{x_s, u_s}$$

$$D_{i'j'} = \frac{\partial g_{i'}}{\partial u_{j'}} \Big|_{x_s, u_s}$$

III. 4-3- Le modèle non linéaire du Twin Rotor MIMO Système :

Le Système Twin Rotor MIMO non linéaire a la forme d'espace d'état non linéaire comme suit :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = g(x, u) \end{cases} \dots\dots\dots (3.18)$$

où :

Les variables d'état désignées $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7] = [\Psi \ \varphi \ \tau_1 \ \tau_2 \ \Psi \ \varphi \ MR] [4]$,

Les équations différentielles suivantes représentent le modèle mathématique d'un système physique

$$\dot{x}_1 = -\frac{T_{10}}{T_{11}} x_1 + \frac{k_1}{T_{11}} u_1 \dots\dots\dots (3.19)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{T_{20}}{T_{21}} x_2 + \frac{k_2}{T_{21}} u_2 \dots \dots \dots (3.20)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \dots \dots \dots (3.21)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{a_1}{I_1} x_1^2 + \frac{b_1}{I_1} x_1 + \frac{Mg}{I_1} \sin x_3 + \frac{0.0326}{2I_1} \sin(2x_3) x_6^2 - \frac{B_{1\psi}}{I_1} \dot{x}_3 - \frac{k_{gy}}{I_1} \cos(x_3) x_5 (a_1 x_1^2 + b_1 x_1) \dots \dots \dots (3.22)$$

$$\dot{x}_5 = x_6 \dots \dots \dots (3.23)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{a_2}{I_2} x_2^2 + \frac{b_2}{I_2} x_2 - \frac{b_{1\phi}}{I_2} x_1 - \frac{k_c}{I_2} 1.75(a_1 x_1^2 + b_1 x_1) \dots \dots \dots (3.24)$$

$$\dot{x}_7 = \frac{1}{T_p} \left(k_c - \frac{k_c T_0 T_{10}}{T_p} \right) x_1 - \frac{1}{I_p} x_7 + \frac{k_c T_0 k_1}{T_p T_{11}} u_1 \dots \dots \dots (3.25)$$

III. 5- Rappel

En général, la linéarisation du système autour du point de fonctionnement est utilisée pour désigner des régulateurs de stabilisation pour les systèmes non linéaires.

Dans ce travail, le système TERMS a été linéarisé près du point de fonctionnement $(\psi, \phi)(0,0)$.

L'erreur entre les approximations linéaires et le comportement de la fonction non linéaire près du point de fonctionnement est presque égale à l'zéro.

III. 6- Le modèle linéaire de Twin Rotor MIMO Système autour du point de fonctionnement $(\psi, \phi)(0,0)$

Les matrices linéarisées A, B et C du modèle d'espace d'état (3.17) du TRMS MIMO système sont développées à l'aide des équations (3.1) et (3.11) et des équations (3.19) et (3.20), les matrices sont décrites comme suit [7]:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -0.8333 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -4.7059 & 0 & 1.2456 & 0 & -0.0882 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.4823 & 3.6000 & 0 & -5 & 18.7500 \\ 0 & 0 & -0.0169 & 0 & 0 & 0 & -0.5000 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

III. 7- Conclusion

Dans ce chapitre, Le Twin Rotor MIMO (TRMS) a été présenté d'une façon globale, ensuite une description fonctionnelle du système est détaillée. Sur la base de cette dernière description on constate que le système est multi variable, non linéaire avec un couplage croisé. La complexité de ce modèle rend le système difficile à commander avec les techniques de contrôle conventionnelles. C'est la raison pour laquelle nous avons proposé une linéarisation du système afin de pouvoir utiliser les approches de contrôle linéaire basées sur modèle.

CHAPITRE IV : IMPLEMENTATION et SIMULATION

IV. 1- Introduction :

Pour montrer l'efficacité de la stratégie de contrôle prédictive proposée (MPC), un ensemble de simulations est effectué sur le modèle du TRMS. Les paramètres du système sont choisis comme dans [3-4-5] et résumés dans le chapitre III - point 2.2.

Les performances du contrôleur proposé sont étudiées en considérant les angles " ψ " et " ϕ " du TRMS ainsi que leurs angles de référence respectifs.

Pour mieux illustrer la supériorité du contrôleur proposé, une comparaison est effectuée avec la technique bien connue de contrôleur PID.

Cela conduit à prévoir a priori les avantages et les inconvénients de ces deux types de contrôle (MPC et PID) du point de vue de l'automatique, le meilleur sera celui qui répond aux exigences telles que :

- ✓ Meilleure performance statique et dynamique
- ✓ Meilleur suivi de la référence.

IV. 2- Définition des paramètres :

Avant de procéder à la simulation, nous devons d'abord définir les paramètres initiaux de nos contrôleurs MPC et PID pour le TWIN rotor MIMO système :

* Les contraintes :

Les contraintes dans le cas du système MIMO sont spécifiées indépendamment pour chaque variable d'entrée et variable de sortie.

Dans ce travail, nous avons généré un contrôleur MPC, basé sur un modèle linéaire du TRMS permettant de contrôler une plage bien précise :

Pour le signal de control :

$$\begin{cases} -2.5(V) \leq u_1 \leq +2.5(V) \\ -2.5(V) \leq u_2 \leq +2.5(V) \\ -0.5(V) \leq \Delta u_1 \leq +0.5(V) \\ -0.5(V) \leq \Delta u_2 \leq +0.5(V) \end{cases}$$

Et pour les contraintes sur la sortie :

$$\begin{cases} -0.7(rad) \leq y_1 \leq +0.7(rad) \\ -0.7(rad) \leq y_2 \leq +0.7(rad) \\ -0.1(rad) \leq \Delta y_1 \leq +0.1(rad) \\ -0.1(rad) \leq \Delta y_2 \leq +0.2(rad) \end{cases}$$

* Paramètres du bloc MPC :

| Paramètre | Valeur |
|-------------------------------|--|
| Temps d'échantillonnage T_s | 0.05 s |
| Horizon de prévision N | 30 |
| Horizon de contrôle N_u | 3 |
| Q | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ |
| R | $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ |

Tableau 4.1 : paramètre de bloc MPC

* Paramètres du bloc PID :

| Paramètre PID | Angle Pitch (Main rotor) | Angle Yaw (Tail rotor) |
|---------------|-----------------------------|---------------------------|
| k_p | -0.1 | 4.5 |
| k_i | 0.7 | 0.7010 |
| k_d | 0.28 | 2.85 |

Tableau 4.2 : paramètre de bloc PID

Remarque :

Les valeurs de différents blocs (MPC et PID) sont ajustées après plusieurs essais de simulations (Valeurs empiriques).

IV. 3- Simulation avec un signal de référence échelon de 0.3 rad (élévation et Azimuth) :

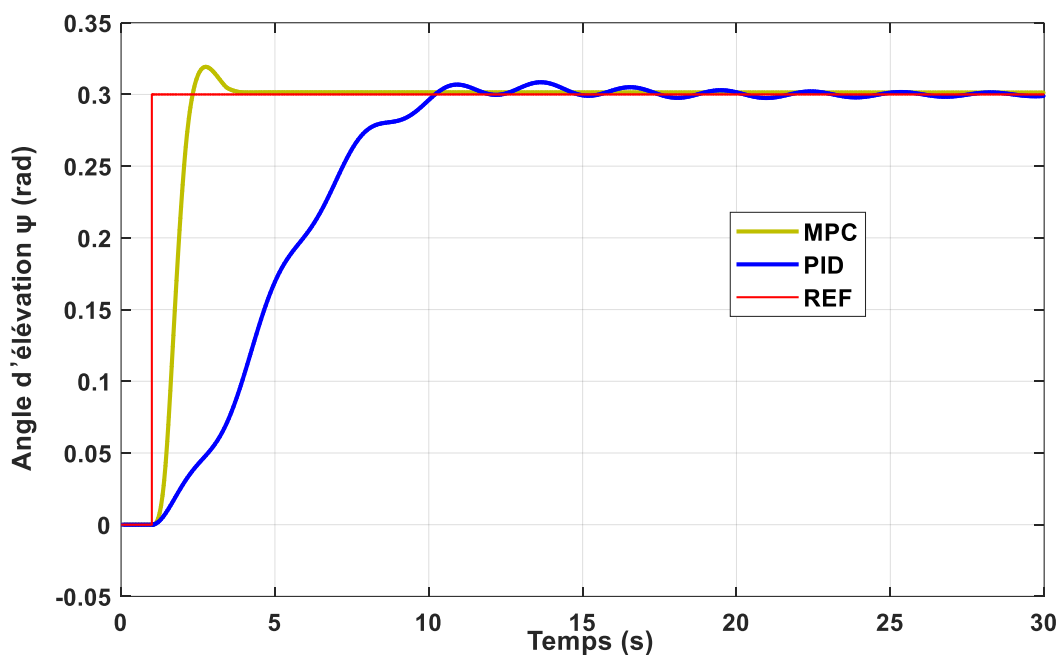


Figure 4.1: Réponse pour un échelon de 0.3 rad, l'angle d'élévation.

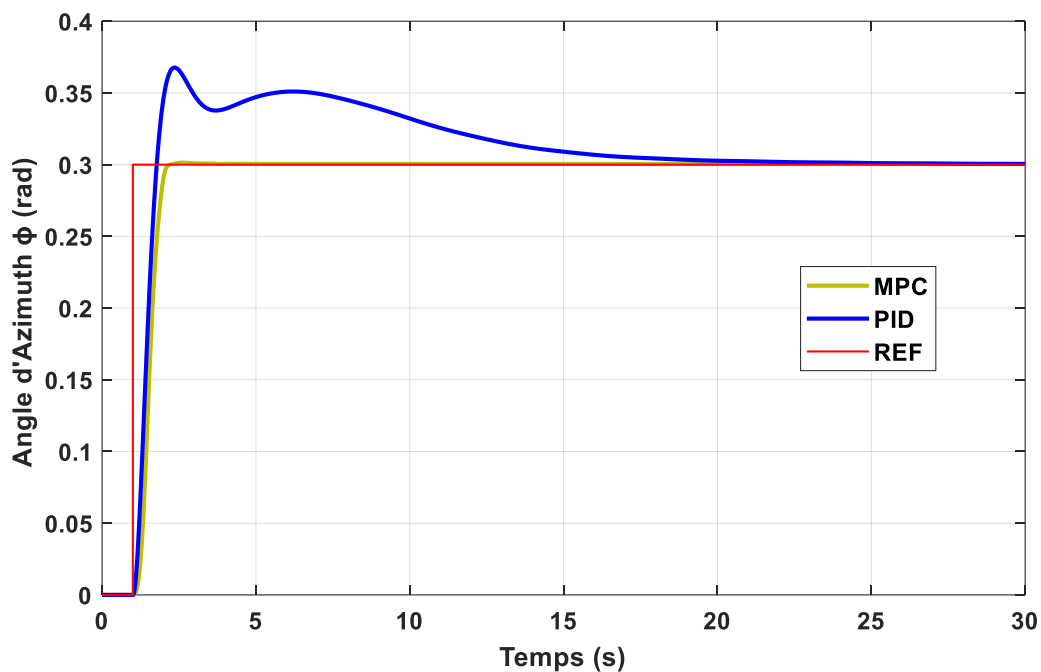


Figure 4.2: Réponse pour un échelon de 0.3 rad, l'angle d'Azimuth.

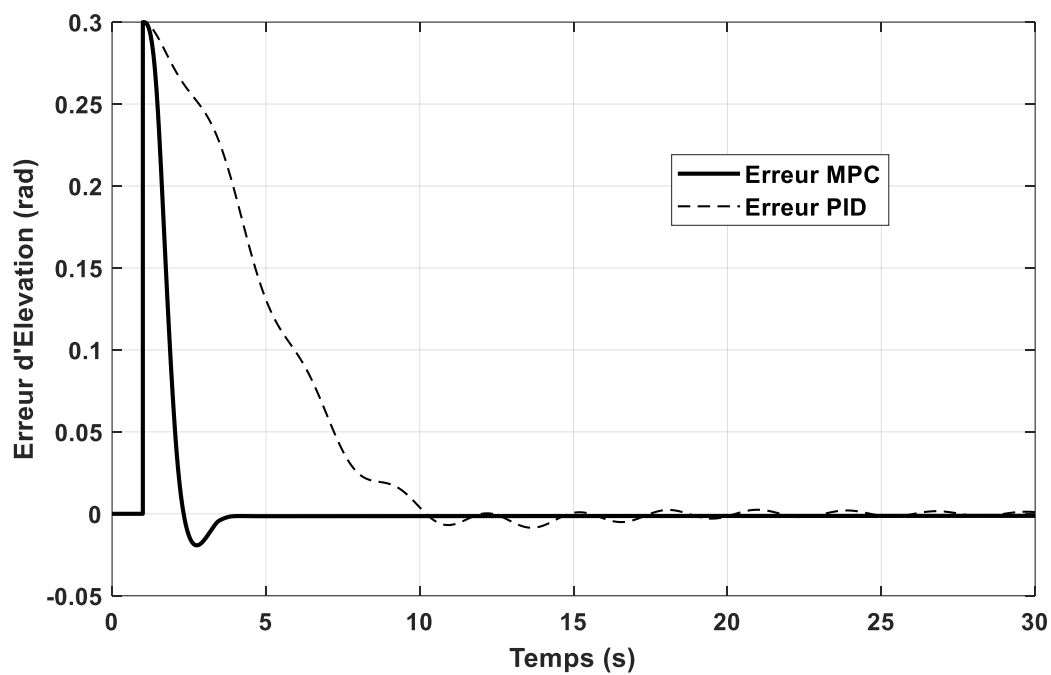


Figure 4.3: Erreur d'angle d'élévation pour un échelon de 0.3 rad.

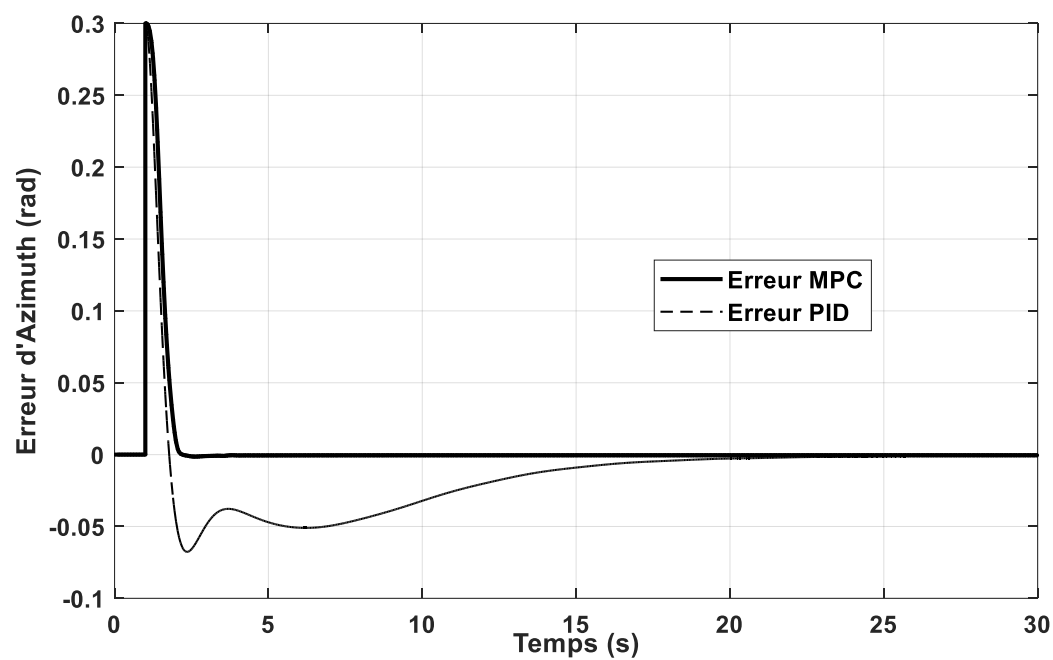


Figure 4.4: Erreur d'angle d'Azimuth pour un échelon de 0.3 rad.

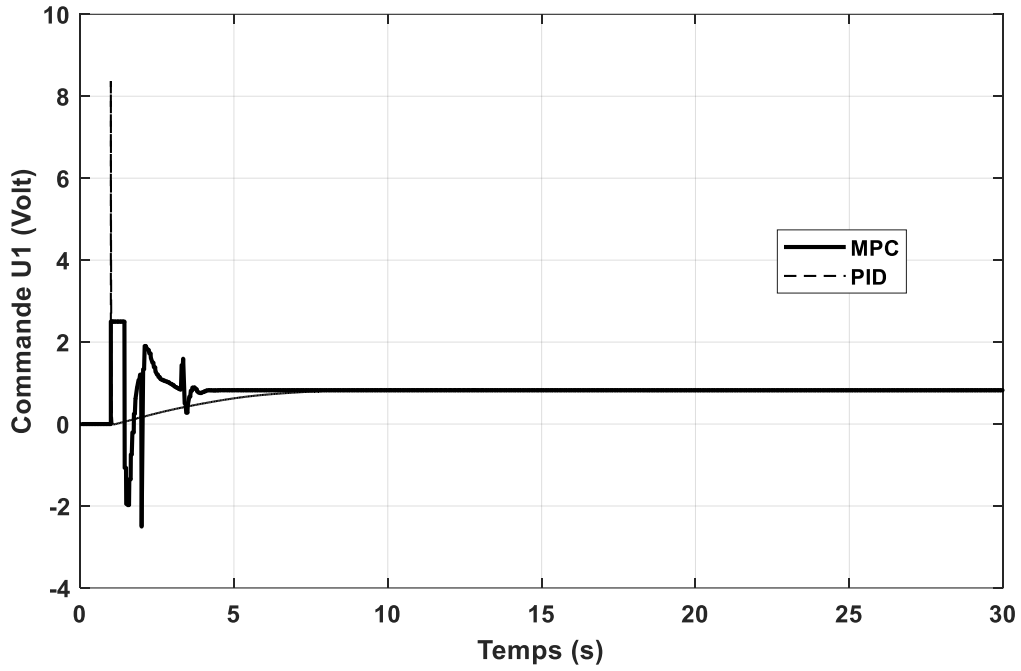


Figure 4.5: Commande U1 élévation, pour un échelon de 0.3 rad.

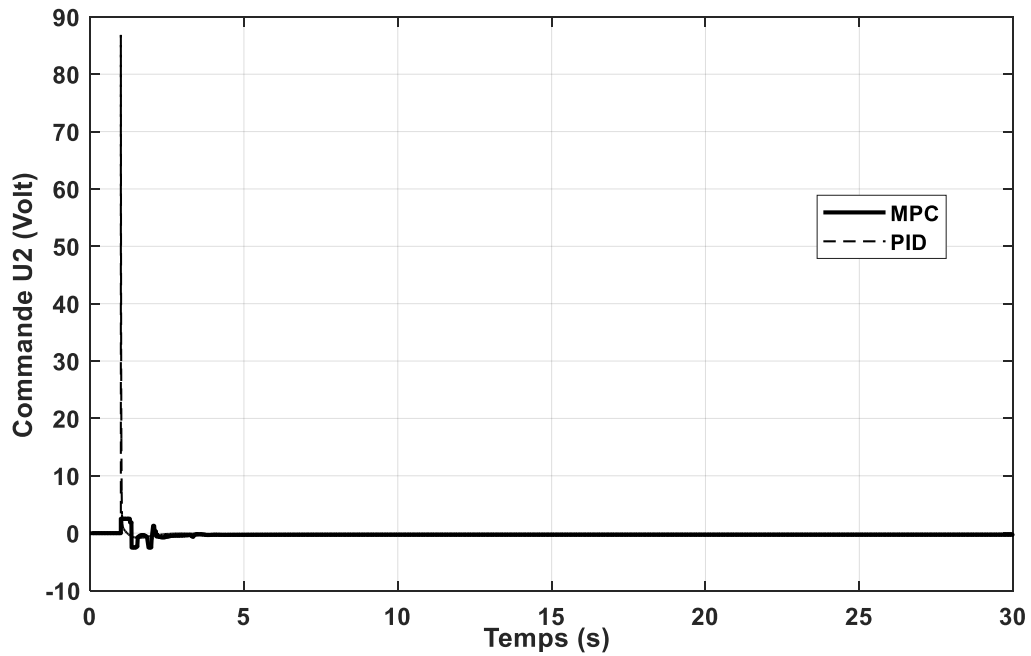


Figure 4.6: Commande U2 Azimuth, pour un échelon de 0.3 rad.

Les figures (4.1 à 4.6) montrent les résultats obtenus, on utilisant un échelon de 0,3 rad comme signal de référence pour les deux entrées du système.

Le contrôleur MPC a une réponse rapide, moins (3 s) dans le rotor principale et moins (1 s) dans le rotor auxiliaire, avec une stabilité très satisfaisante contrairement à la réponse du contrôleur PID qui a une réponse plus lente et avec des fluctuations. L'erreur (écart entre le signal de référence et le signal résultant) dans le contrôleur MPC, tend vers la valeur zéro (0) rapidement (environ 3 s) pour l'angle d'élévation et (environ 1 s) pour l'angle d'Azimuth.

Au contraire, l'erreur dans le cas du contrôleur PID tend vers zéro dans un temps plus long environ 10 s pour les deux angles.

Les signaux de commande générés par le contrôleur MPC ne dépassent pas les limites définies au début de la simulation, mais dans le contrôleur PID, les signaux dépassent les seuils, ce qui peut endommager le système.

IV. 4- Simulation avec un signal de référence échelon de 0.6 rad (élévation et Azimuth) :

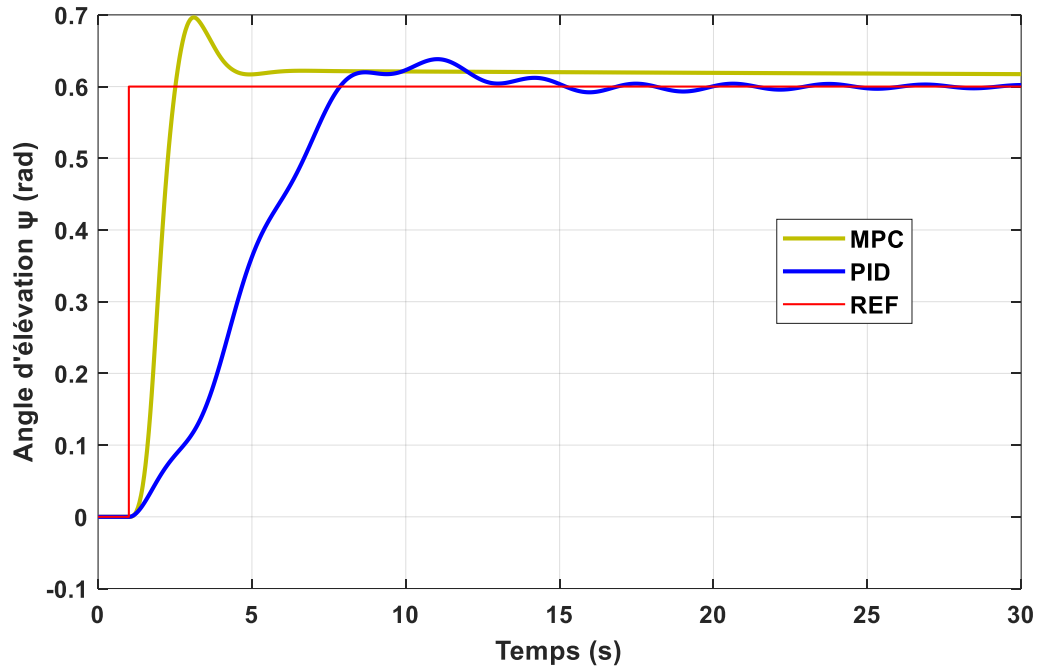


Figure 4.7: Réponse pour un échelon de 0.6 rad, l'angle d'élévation.

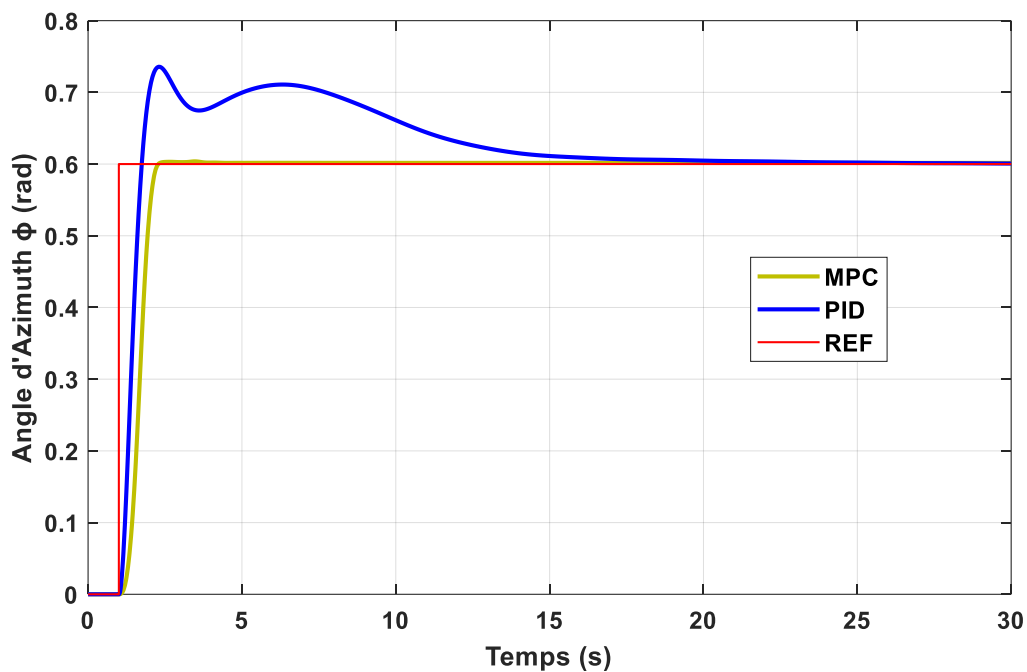


Figure 4.8: Réponse pour un échelon de 0.6 rad, l'angle d'Azimuth.

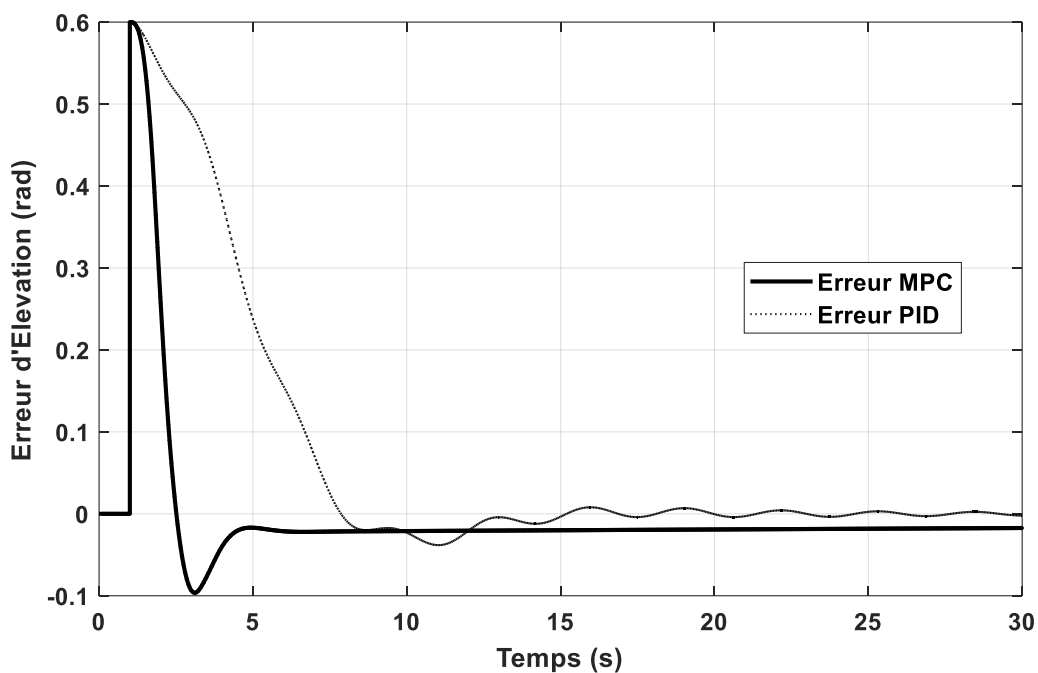


Figure 4.9: Erreur d'angle d'élévation pour un échelon de 0.6 rad.

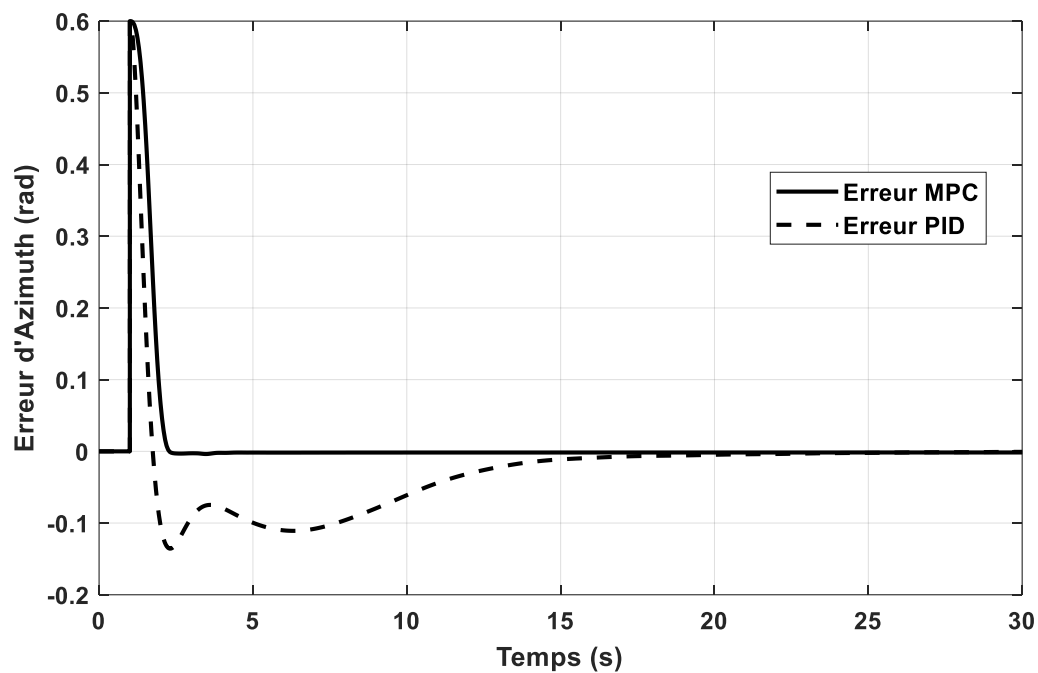


Figure 4.10: Erreur d'angle d'Azimuth pour un échelon de 0.6 rad.

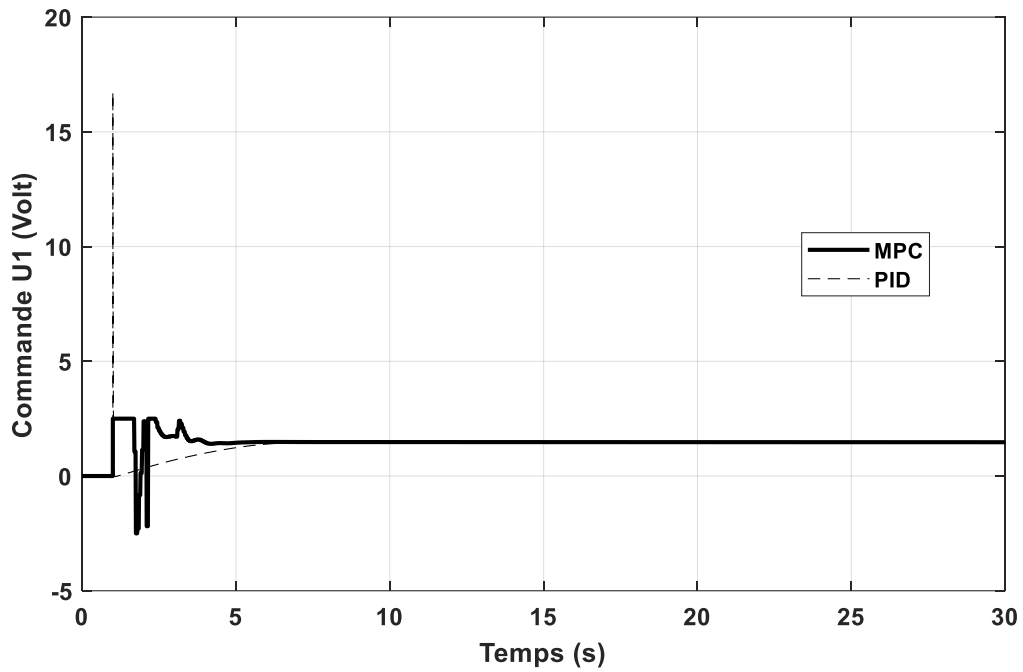


Figure 4.11: Commande U1 élévation, pour un échelon de 0.6 rad

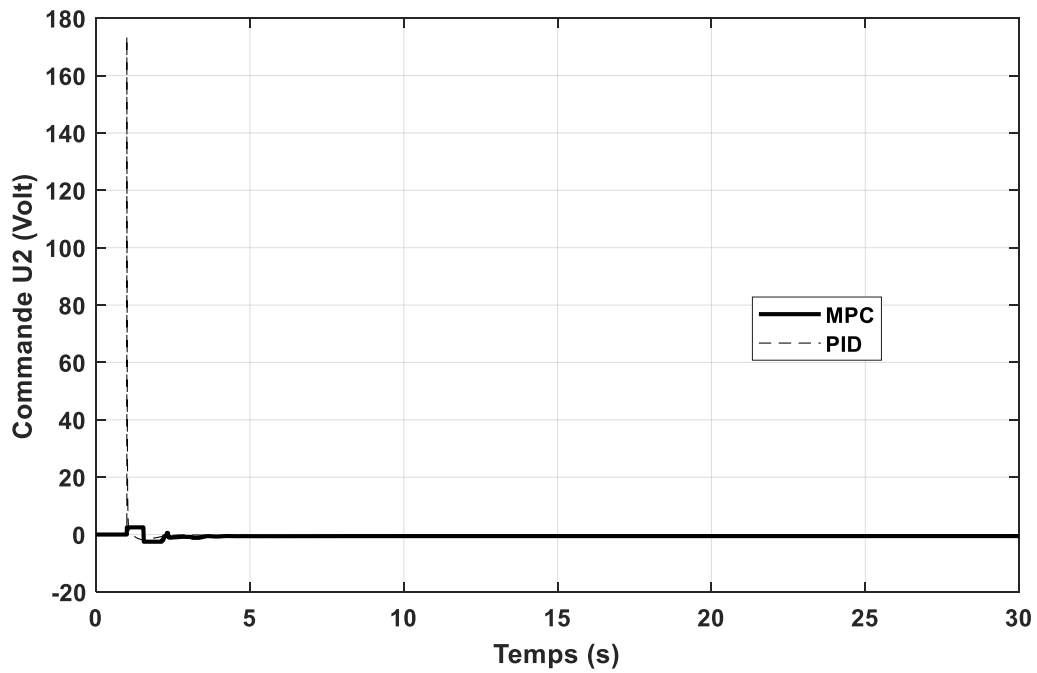


Figure 4.12: Commande U2 Azimuth, pour un échelon de 0.6 rad.

Les figures (4.7 à 4.12) montrent les résultats obtenus, on utilisant un échelon de 0,6 rad comme signal de référence pour les deux entrées du système.

Par rapport aux résultats obtenus lors de l'expérience précédente, nous observons que le contrôleur MPC prend plus de temps à atteindre le point de référence (04 secondes), sachant que nous avons utilisé une valeur de référence loin du point de fonctionnement. Ce qui justifier la petite dégradation de la commande en terme d'erreur statique, qui est de l'ordre 0.02 rad ($\approx 1,15$ degré).

IV.5- Simulation avec un signal de référence échelon carré de 0.3 rad (élévation et Azimuth)

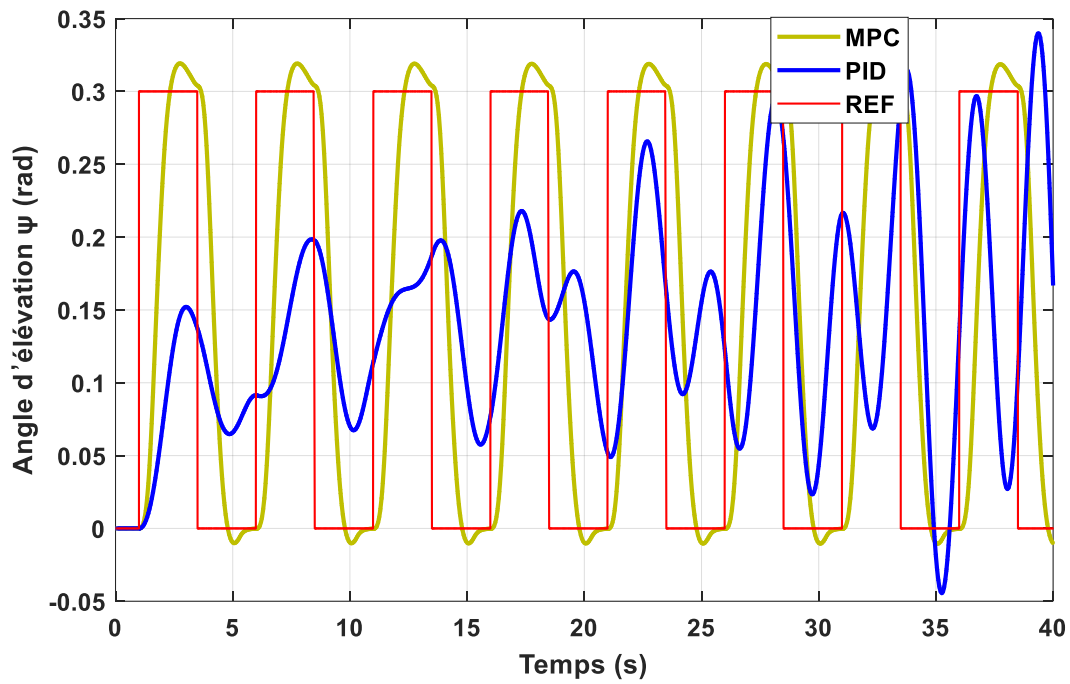


Figure 4.13: Réponse pour un échelon carré de 0.3 rad, l'angle d'élévation.

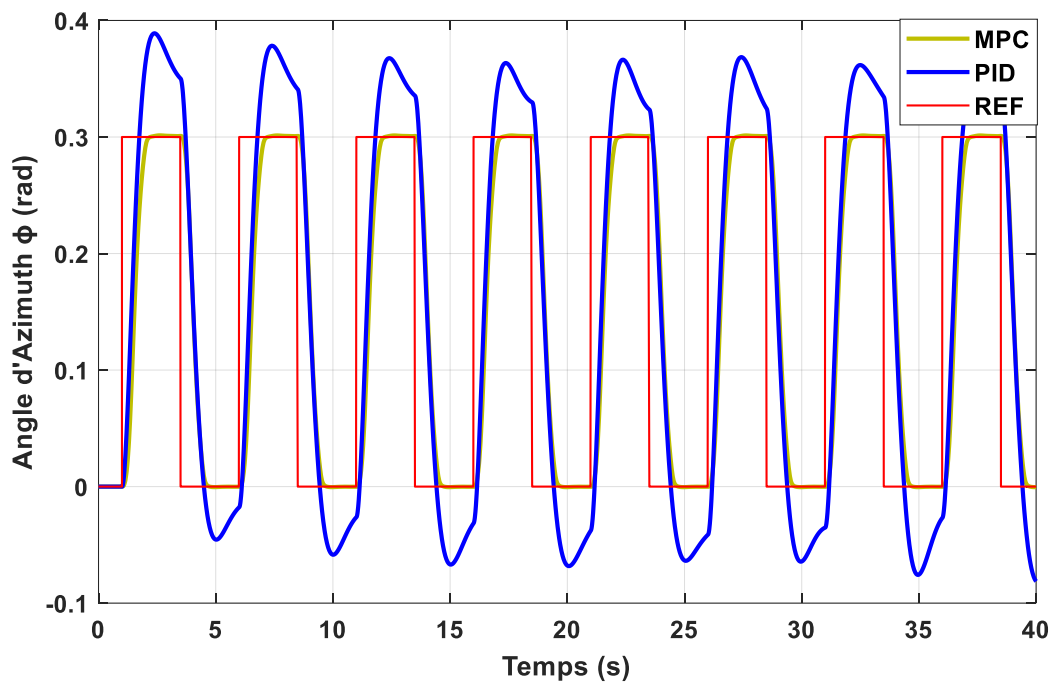


Figure 4.14: Réponse pour un échelon carré de 0.3 rad, l'angle d'Azimuth.

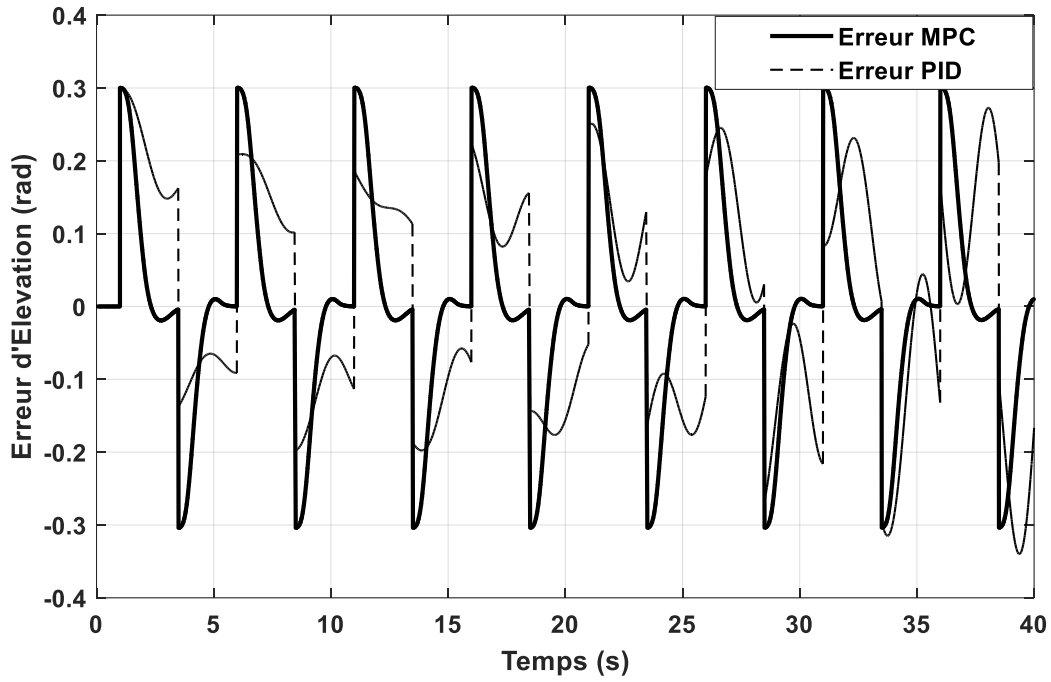


Figure 4.15: Erreur d'angle d'élévation pour un échelon carré de 0.3 rad.

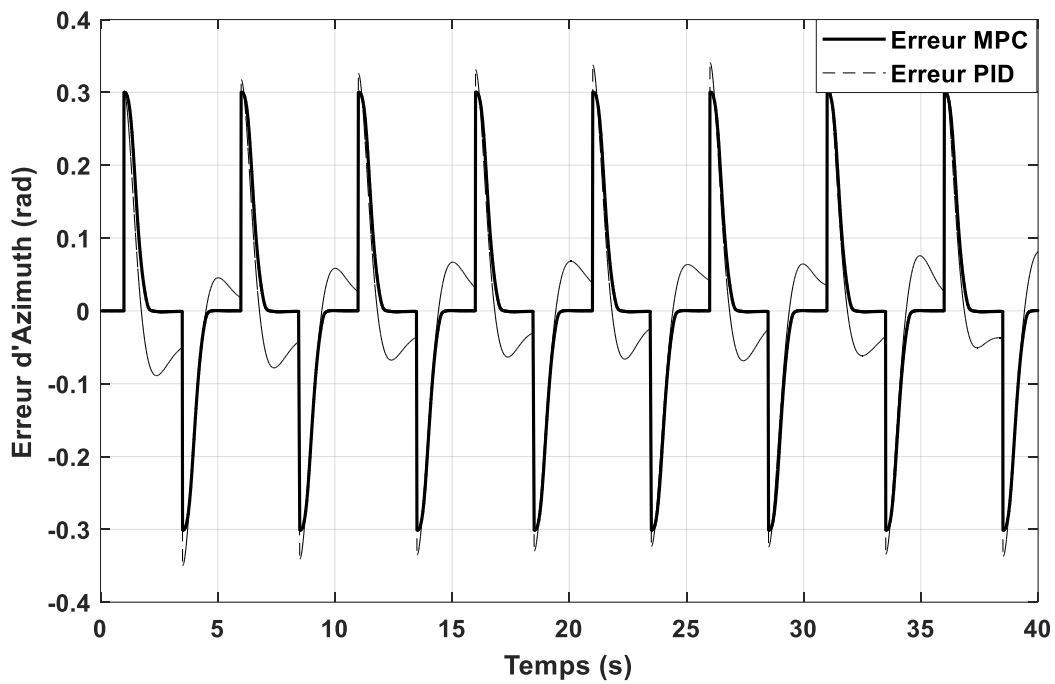


Figure 4.16: Erreur d'angle d'Azimuth pour un échelon carré de 0.3 rad.

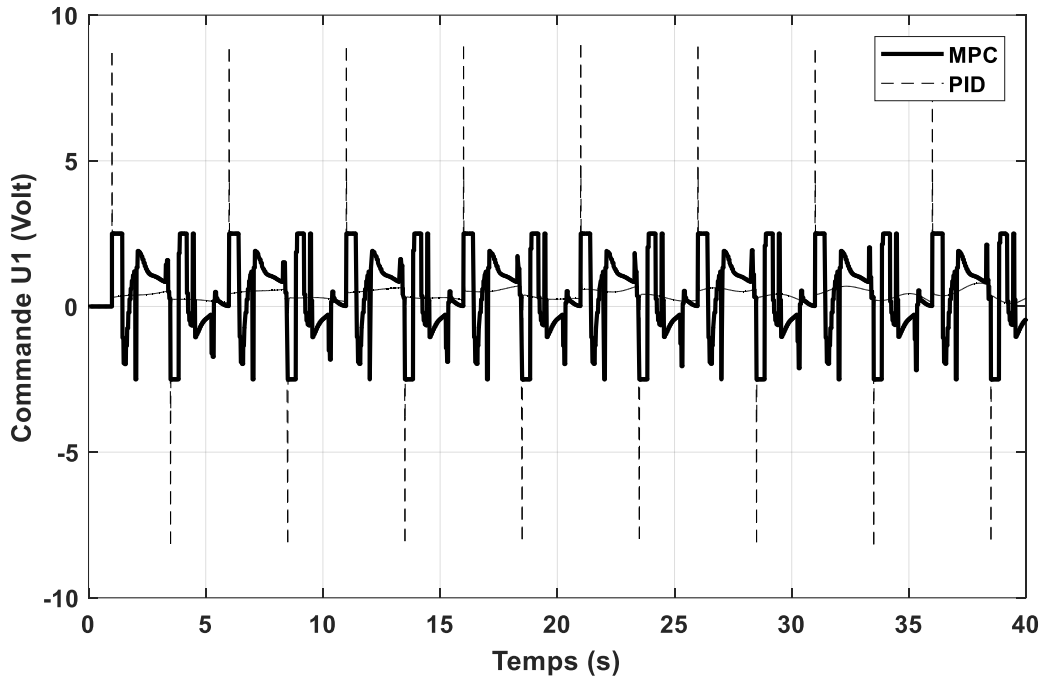


Figure 4.17: Commande U1 élévation, pour un échelon carré de 0.3 rad.

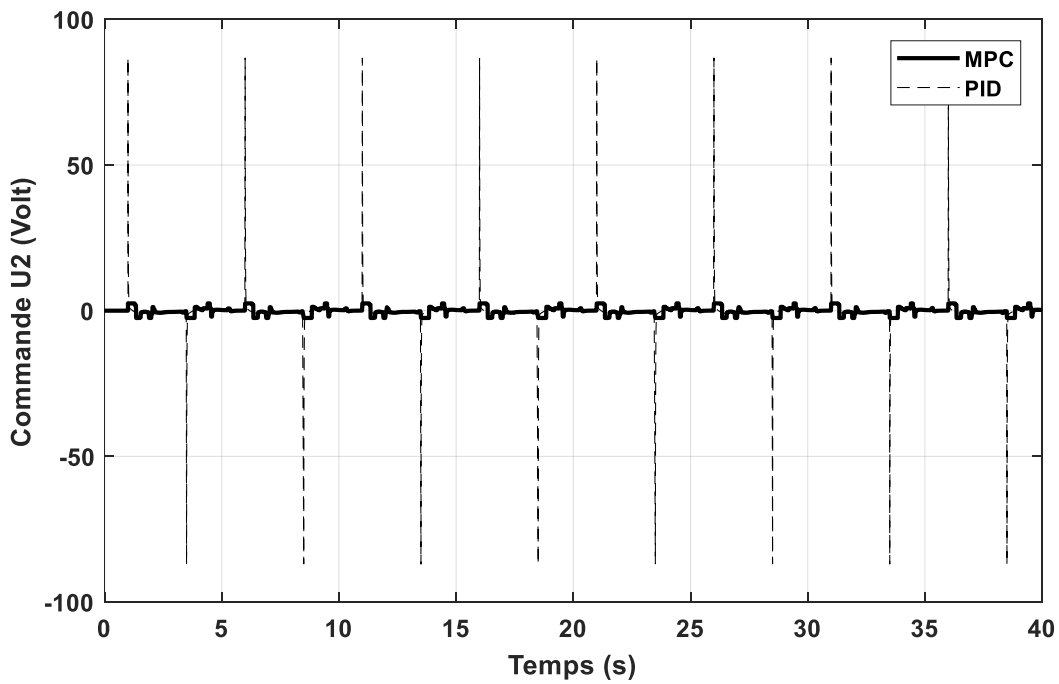


Figure 4.18: Commande U2 Azimuth, pour un échelon carré de 0.3 rad.

Les figures (4.13 à 4.18) montrent les résultats obtenus, on utilisant un échelon carré de 0,3 rad et de fréquence de 0.4 Hz, comme signal de référence pour les deux entrées du système.

Nous constatant que la réponse du système avec le contrôleur MPC converge rapidement vers la référence dans un temps inférieure à 1 seconde, toute en maintenant les seuils limites des signaux de commandes. Au contraire au contrôleur PID qui ne parvient jamais à suivre sa référence.

IV. 6- Simulation avec un signal de référence sinusoïdale de 0.3 rad (élévation et Azimuth) :

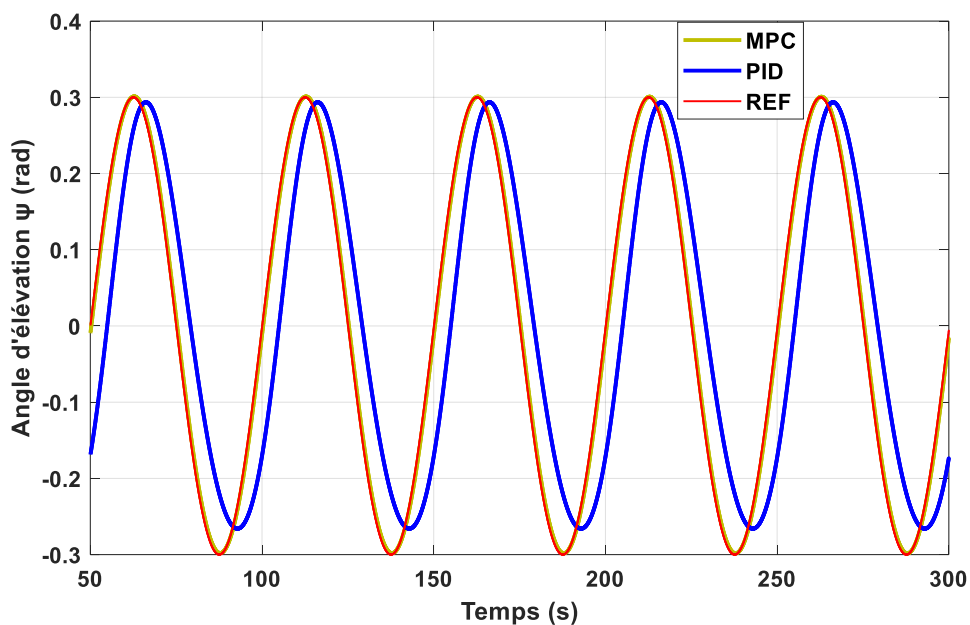


Figure 4.19: Réponse pour un sinusoïdale de 0.3 rad, l'angle d'élévation.

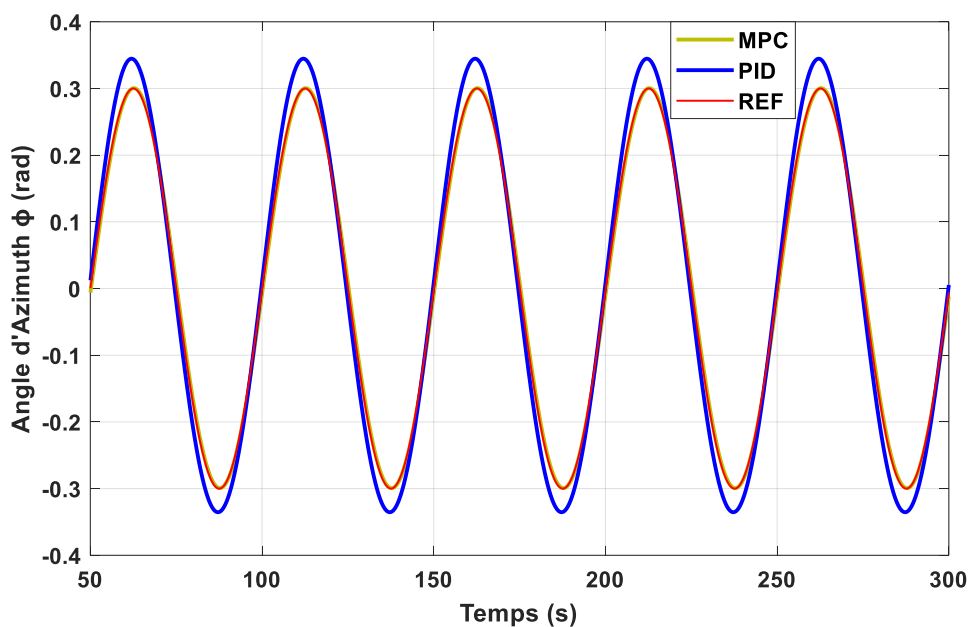


Figure 4.20: Réponse pour un sinusoïdale de 0.3 rad, l'angle d'Azimuth.

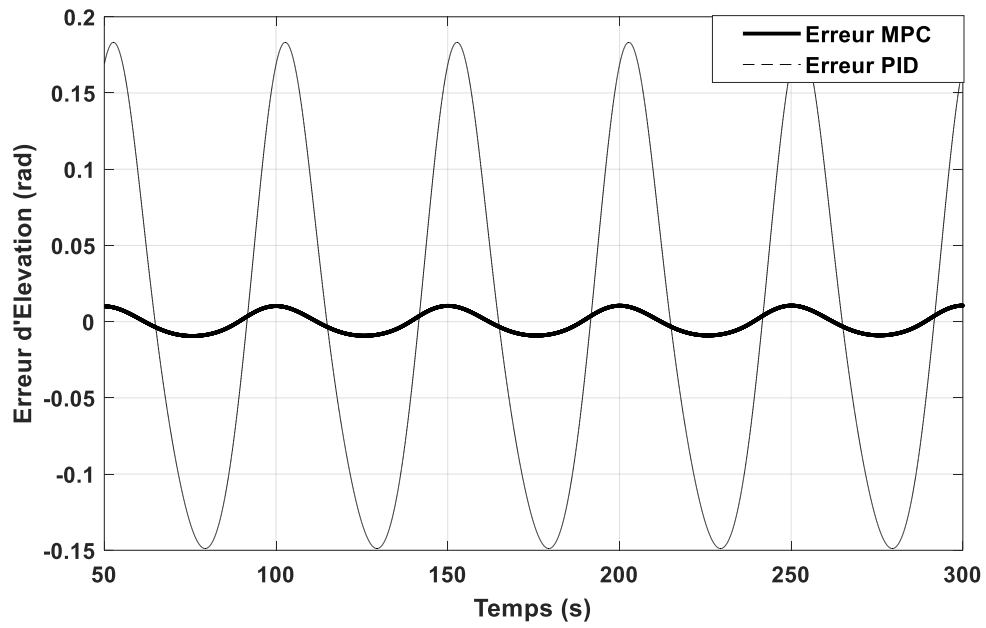


Figure 4.21: Erreur d'angle d'élévation pour un sinusoïdale de 0.3 rad.

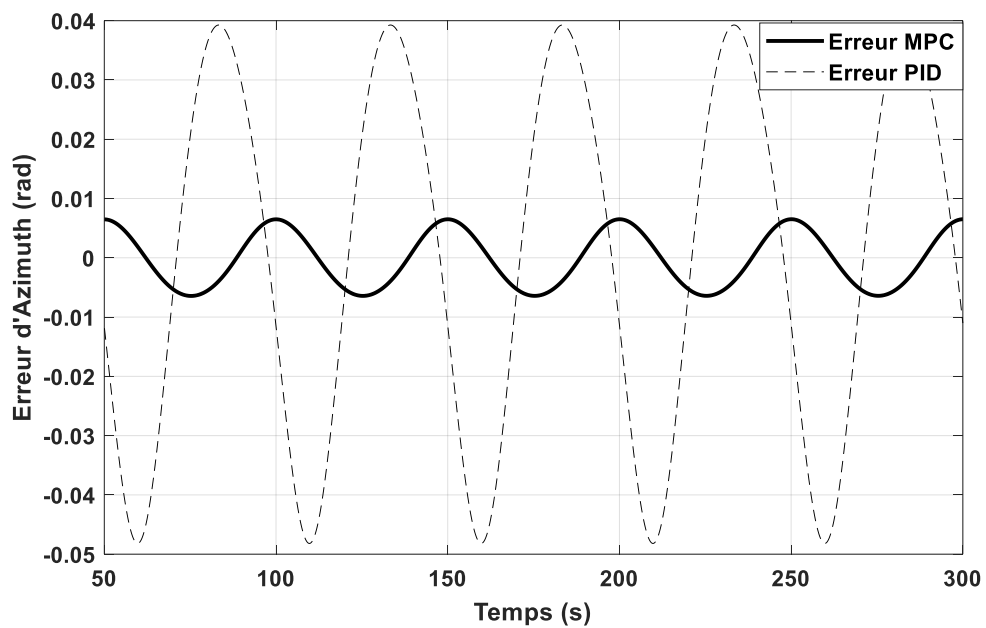


Figure 4.22: Erreur d'angle d'Azimuth pour un sinusoïdale de 0.3 rad.

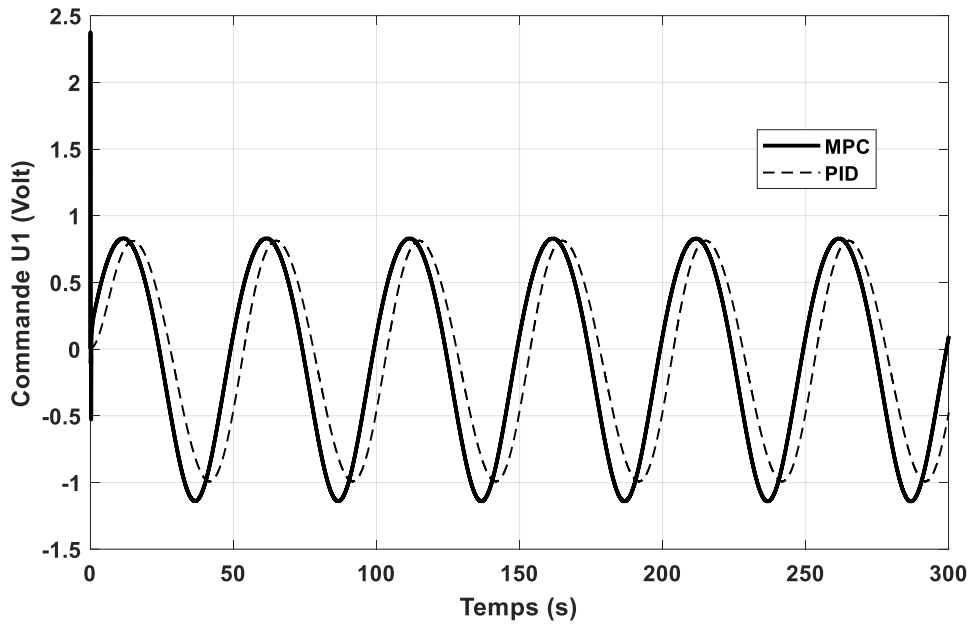


Figure 4.23: Commande U1 élévation, pour un sinusoïdale de 0.3 rad.

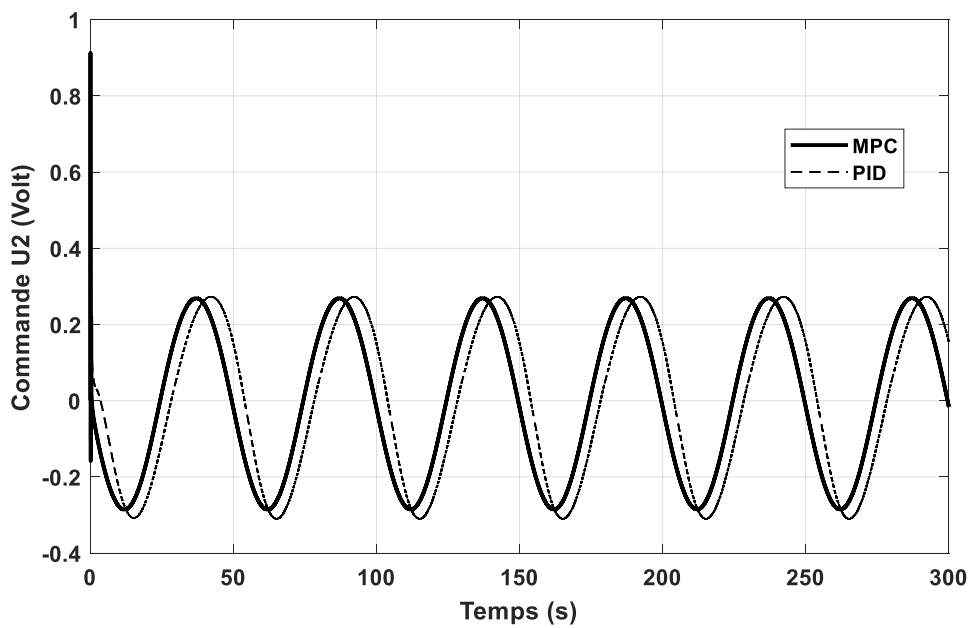


Figure 4.24: Commande U2 Azimuth, pour un sinusoïdale de 0.3 rad.

Les figures (4.19 à 4.24) montrent les résultats obtenus, on utilisant un signal de référence sinusoïdale de 0.13 rad/s de fréquence et de 0,3 rad d'amplitude pour les deux entrées du système. Le contrôleur MPC a une réponse parfaite et identique avec la référence en plus du maintien des seuils préfixés. Tandis que le contrôleur PID donne des bons résultats avec un simple déphasage toute en restant dans les limites des seuils définis préalablement (Contraintes)

L'erreur dans le contrôleur MPC, pour les deux angles, est presque nulle dans tout l'intervalle de la commande, par contre l'erreur dans PID existe dans un intervalle limité.

IV. 7- Conclusion

Au vue de tous les résultats qu'on a obtenus dans tous les phases de simulation, on peut dire que la stratégie de la commande adoptée (MPC) prend en charge parfaitement le système TRMS en termes de robustesse en stabilité et en performance. Les résultats montrent la supériorité de la technique de commande par rapport au technique de commande classique PID.

CONCLUSION GENERALE

Dans le présent travail la commande prédictive a été présentée. Ce type de commande a considérablement augmenté ces dernières années. En effet, la formulation du contrôle prédictif permet d'inclure des contraintes sur les variables manipulées ainsi que sur les variables d'état du système lors de la conception du contrôle. De plus, la facilité de mise en œuvre du contrôle prédictif et sa compréhension simple sont des avantages qui caractérisent ce type de contrôle.

Dans cette étude, l'état de l'art de la technique de contrôle prédictif par la commande par modèle (MPC) a été détaillé.

Le « Twin Rotor MIMO System » TRMS, qui est un bon exemple de système non linéaire incertain hautement couplé perturbé multivariable, a été introduit. Le modèle du système a été détaillé et un modèle de simulation linéarisé a été fourni. L'analyse du modèle fourni confirme que le système est multivariable à deux degrés de liberté et un couplage croisé fort. Le twin rotor est donc un bon exemple de système de contrôle multivariable complexe non linéaire, qui ne pourrait pas être facilement commandé par un contrôle classique pour toute la plage de zones d'opération.

L'application de cette technique de contrôle (MPC) au système proposé (TRMS) a donné d'excellentes réponses avec la prise en charge des incertitudes.

En fait, les tests effectués démontrent que les performances de l'approche de contrôle proposée (MPC) fournissent les trajectoires désirées pour les angles d'azimut et d'élévation, qui sont obtenues avec des erreurs asymptotiques satisfaisantes.

MPC assure également le découplage de la dynamique du système avec de bonnes performances. Les résultats de comparaison avec le PID montrent la supériorité du MPC dans la compensation des incertitudes de grande magnitude.

Références & Bibliographie

- [1] Camacho, E. F., Bordons, C., & Johnson, M. (1999). Model predictive control. Advanced textbooks in control and signal processing.
- [2] Maciejowski, J. M. (2002). Predictive control: with constraints. Pearson education.
- [3] Raghavan, R., & Thomas, S. (2016, March). MIMO model predictive controller design for a twin rotor aerodynamic system. In 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT) (pp. 96-100). IEEE.
- [4] Ulasayar, A., & Zad, H. S. (2015, November). Robust & optimal model predictive controller design for twin rotor MIMO system. In 2015 9th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO) (pp. 854-858). IEEE.
- [5] Twin Rotor MIMO System 33-949S User Manual, Feedback Instruments Ltd., East Sussex, UK, 2006
- [6] Satapathy, A., & Nayak, R. R. (2010). Modelling of twin rotor MIMO system (TRMS) (Doctoral dissertation).
- [7] Ilyas, M., Abbas, N., UbaidUllah, M., Imtiaz, W. A., Shah, M. A. Q., & Mahmood, K. (2016). Control law design for twin rotor MIMO system with nonlinear control strategy. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2016
- [8] Oussama ZEHRI & Sonia KHALI : Mémoire de Fin d'études Master en Automatique ; Local Model Networks Control, Université Kasdi Merbah Ouargla 2018.
- [9] Juang, J. G., Lin, R. W., & Liu, W. K. (2008). Comparison of classical control and intelligent control for a MIMO system. Applied Mathematics and Computation, 205(2), 778-791.
- [10] Miah, S., Kafi, M. R., Chaoui, H., & Ahn, I. S. (2016, June). Neighboring optimal control of partially-observed twin rotor multi-input multi-output system. In 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (pp. 393-398). IEEE

- [11] Kafi, M. R., Chaoui, H., Miah, S., & Debilou, A. (2017). Local model networks based mixed-sensitivity H-infinity control of CE-150 helicopters. *Control Theory and Technology*, 15(1), 34-44
- [12] Kafi, M. R., Chaoui, H., & Miah, S. (2017, October). Twin-rotor MIMO system and its control using interval type-2 fuzzy logic. In *2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS)* (pp. 330-335). IEEE
- [13] Miah, S., Kafi, M. R., & Chaoui, H. (2019). Generalized Cascaded Control Technology for a Twin-Rotor MIMO System with State Estimation. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30(2), 170-180.
- [14] Tao, C. W., Taur, J. S., & Chen, Y. C. (2010). Design of a parallel distributed fuzzy LQR controller for the twin rotor multi-input multi-output system. *Fuzzy Sets and Systems*, 161(15), 2081-2103.
- [15] Tao, C. W., Taur, J. S., Chang, Y. H., & Chang, C. W. (2010). A novel fuzzy-sliding and fuzzy-integral-sliding controller for the twin-rotor multi-input–multi-output system. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 18(5), 893-905.
- [16] Mondal, S., & Mahanta, C. (2012). Adaptive second-order sliding mode controller for a twin rotor multi-input–multi-output system. *IET Control Theory & Applications*, 6(14), 2157-2167.
- [17] Qin, S. J., & Badgwell, T. A. (1997, June). An overview of industrial model predictive control technology. In *AIChE Symposium Series* (Vol. 93, No. 316, pp. 232-256). New York, NY: American Institute of Chemical Engineers, 1971-c2002.
- [18] J. B. Rawlings, "Tutorial overview of model predictive control," *Control Systems*, IEEE, vol. 20, pp. 38-52, 2000.
- [19] Rossiter, J. A. (2018). *A first course in predictive control*. CRC press.
- [20] Wang, L. (2009). *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Springer Science & Business Media.

- [21] Essahafi, M. (2014). Model Predictive Control (MPC) Applied To Coupled Tank Liquid Level System. arXiv preprint arXiv:1404.1498.
- [22] Yu-Geng, X., De-Wei, L., & Shu, L. (2013). Model predictive control—status and challenges. *Acta Automatica Sinica*, 39(3), 222-236.
- [23] Juang, J. G., Liu, W. K., & Lin, R. W. (2011). A hybrid intelligent controller for a twin rotor MIMO system and its hardware implementation. *ISA transactions*, 50(4), 609-619.
- [24] Sofiane YACIA & Mnd Rafik TAOUINET : Mémoire de Fin d'études Master en Electrotechnique ; Commande Predictive d'un Redresseur à MLI, Université Abderrahman MIRA bejaia 2013.
- [25] Yacine FERDJOUKH : Mémoire de Fin d'études Master en Automatique ; Commande Prédicative Généralisé : Application Au Moteur a Excitation Séparée, Université Mohamed BOUDIAF M'SILA 2016.
- [26] Boumaza, H : Mémoire de Fin d'études Magistère en Electronique, Option : Contrôle des systèmes ; Commande prédictive approximante, Université Constantine 1-2013.