



وزارة البحث العلمي والتعليم العالي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
POUR OBTENIR LE DIPLOME
DE MASTER ACADEMIQUE**

Par :
MEHALA Abdelbasset
BERBER Zineddine

Spécialité: Automatique et informatique industrielle

Intitulé du sujet

Régulation de vitesse d'un moteur à courant continu par commande
prédictive MPC

Soutenu le 06/07 /2026 devant le jury composé de :

Président : Mr. DAOUD Mohamed	MCA Université de Mostaganem
Examineur : Mr. BEKKOUCHE Benaissa	PR Université de Mostaganem
Encadrante : Mme BECHIRI Fatiha	MCA Université de Mostaganem
Co-Encadrante : Mme REZINI Saliha	MCA Université de Mostaganem

RESUME

Ce travail présente l'étude, la modélisation et la commande d'un moteur (MCC) en utilisant l'environnement MATLAB.

Dans un premier temps, une modélisation mathématique du moteur a été réalisée à partir des équations électriques et mécaniques caractérisant son fonctionnement. Ensuite, un modèle de simulation sous Simulink a été développé afin d'analyser le comportement dynamique du moteur en fonctionnement à vide et en charge.

Dans un deuxième temps, deux stratégies de commande ont été étudiées : la commande classique PID et la commande prédictive MPC (Model Predictive Control). La commande PID permet d'assurer une régulation simple et efficace de la vitesse du moteur, tandis que la commande MPC offre de meilleures performances en présence des contraintes et des perturbations. Enfin, une comparaison entre les deux méthodes de commande a été effectuée à travers plusieurs critères tels que le temps de réponse, le dépassement, la stabilité et la robustesse face aux perturbations. Les résultats obtenus montrent que la commande MPC présente des performances supérieures à celles de la commande PID dans les systèmes complexes nécessitant une grande précision.

Mots clés : Moteur à courant continu, MPC, PID, Perturbations, Modélisation, MATLAB
Abstract

الملخص

يتناول هذا العمل دراسة ونمذجة والتحكم في محرك التيار المستمر باستخدام بيئة محاكاة متخصصة ماطلاب. ويُعد محرك استخدامًا في التطبيقات الصناعية، لما يتميز به من سهولة التحكم، وسرعة الاستجابة،. المحركات.التيار المستمر من أكثر والأداء الديناميكي الجيد

في المرحلة الأولى، تم تطوير نموذج رياضي للمحرك بالاعتماد على المعادلات الكهربائية والميكانيكية التي تصف سلوكه. إنشاء نموذج للمحاكاة بهدف دراسة أداء المحرك في حالتي التشغيل بدون حمل ومع الحمل.الديناميكي. كما تم

وفي المرحلة الثانية، تمت دراسة استراتيجيتين للتحكم ، الأولى تعتمد على المنظم التقليدي، والثانية تعتمد على التحكم التنبؤي المبني على نموذج رياضي للنظام. حيث يتميز المنظم التقليدي بسهولة التطبيق وفعاليته في تنظيم سرعة المحرك، في حين القيود التشغيلية والاضطرابات، بفضل قدرته على التنبؤ بسلوك النظام واتخاذ قرار التحكم الأمثل. وجود

وأخيرًا، أُجريت مقارنة بين طريقتي التحكم اعتمادًا على مجموعة من المعايير، من بينها زمن الاستجابة، ونسبة التجاوز، والاستقرار، والمتانة في مواجهة الاضطرابات. وقد أظهرت نتائج المحاكاة أن طريقة التحكم التنبؤية تحقق أداءً أفضل من عالية في التحكم. الطريقة التقليدية، خاصةً في الأنظمة المعقدة التي تتطلب دقة

الكلمات المفتاحية: محرك التيار المستمر، التحكم التنبؤي، المنظم التقليدي، الاضطرابات، النمذجة، المحاكاة، ماطلاب

Summary

This work presents the study, modeling, and control of a DC motor using MATLAB Environment.

First, a mathematical model of the motor was developed based on the electrical and mechanical equations describing its operation. Then, a simulation model was implemented in Simulink in order to analyze the dynamic behavior of the motor under no-load and load conditions.

Secondly, two control strategies were studied: the classical PID controller and the Model Predictive Control (MPC). The PID controller ensures a simple and efficient speed regulation, whereas MPC provides better performances in the presence of constraints and disturbances.

Finally, a comparison between the two control methods was carried out using several criteria such as response time, overshoot, stability, and robustness against disturbances. The obtained results show that MPC provides better performances than PID for complex systems requiring high precision.

Keywords: Direct current motor, MPC, PID, Disturbances Modelling, MATLAB.

Remerciement

Avant toute chose, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la patience et la force durant toutes ces années d'étude.

Nous sommes très reconnaissants à madame **BECHIRI Fatiha & Madame REZINI Saliha** et notre remerciement pour nous avoir encadré et en particulier pour leurs soutiens, leurs gentillesse, leurs encouragements, leurs conseils et leurs patiences pendant ce travail.

Mes sincère remerciements aux messieurs les membres de jury **Mr. DAOUD Mohamed et Mr BEKKOUCHE Benaissa** qui nous ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement **monsieur BENDRIS** technicien au labo 13 qui nous a ouvert le labo durant toute la période de notre travail.

Enfin, un remerciement spécial aux étudiants de la 2^{ème} année Master de la spécialité d'Automatique et informatique industrielle.

Dédicaces

Ce travail est le fruit d'un long cheminement qui n'aurait pu aboutir sans le soutien précieux de nombreuses personnes. C'est avec une profonde gratitude que nous leur dédions ces quelques lignes.

*À nos chers parents,
qui ont été notre soutien dans les moments de doute,
qui ont partagé nos efforts et nos nuits de travail par leur présence silencieuse,
et qui n'ont jamais cessé de croire en nous, même lorsque nous doutions nous-mêmes.
Votre amour inconditionnel a été notre plus grande force.*

*À nos amis,
pour leur soutien, leurs encouragements, leurs paroles réconfortantes et leur présence tout au long de ce parcours.*

*Leur aide, de près comme de loin,
a été précieuse et a contribué à la réalisation de ce travail.*

*À nos enseignants et mentors,
qui ont éveillé en nous le goût du savoir,
nourri notre curiosité intellectuelle
et nous ont guidés tout au long de notre parcours.*

*Enfin, à tous ceux qui, de près ou de loin,
ont contribué à la réalisation de ce projet,
nous exprimons notre sincère reconnaissance.*

Ce mémoire est autant le vôtre que le nôtre.

Liste des figures

Figure I-1 : Conversion d'énergie de la machine à courant continu	3
Figure I-2 : : machine à courant alternatif asynchrone.....	4
Figure I-3 : machine à courant alternatif synchrone	4
Figure I-4: machine à courant continu.....	4
Figure I-5 : le stator	7
Figure I-6 : le rotor	7
Figure I-7 : le collecteur et les balais	8
Figure I-8 : Principe de fonctionnement de la machine à courant continu	9
Figure I-9 : moteur à excitation série	10
Figure I-10 : moteur à excitation shunt	11
Figure I-11 : : moteur à excitation séparée.....	12
Figure I-12 : moteur à excitation composée.....	12
Figure I-13 : : Moteur à courant continu Maxon RE 16 utilisé dans cette étude	19
Figure I-14 : Modèle Simulink du moteur à courant continu à vide	21
Figure I-15 : Modèle Simulink du moteur à courant continu en charge	21
Figure I-16 : Réponse du moteur à courant continu à vide	23
Figure I-17 : Réponse du moteur à courant continu on charge.....	24
Figure II-1 : Illustration intuitive du principe de la commande MPC (analogie de conduite automobile.	36
Figure III-1 : schéma Simulink de commande PID appliqué au MCC	61
Figure III-2 : Réponse du moteur MCC commandé par un régulateur PID en présence d'une perturbation de charge.....	62
Figure III-3 : schéma Simulink de commande MPC appliqué au MCC	64
Figure III-4 : Réponse du moteur MCC commandé par un contrôleur MPC en présence d'une perturbation de charge.....	65
Figure III-5 : Réponse du moteur MCC à une chute de tension d'alimentation sans commande....	69
Figure III-6 : Comparaison des performances des contrôleurs PID et MPC face à une chute de tension d'alimentation.	71
Figure III-7 : Réponse du moteur MCC à une charge mécanique échelon sans commande.	73
Figure III-8 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une perturbation de charge mécanique échelon appliquée à $t=0,05$ s	74
Figure III-9 : Réponse du moteur MCC soumis à une perturbation mécanique sinusoïdale en boucle ouverte.....	76
Figure III-10 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une perturbation mécanique sinusoïdale appliquée au moteur MCC.	78
Figure III-11 : Réponse du moteur MCC soumis à une perturbation mécanique transitoire en boucle ouverte.....	81
Figure III-12 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une perturbation mécanique transitoire appliquée au moteur MCC.	82
Figure III-13 : Réponse du moteur MCC soumis à une augmentation de la résistance d'induit en boucle ouverte.....	85
Figure III-14 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une variation de la résistance d'induit du moteur MCC.....	87

Figure III-15 : Réponse du moteur MCC soumis à une variation du moment d'inertie en boucle ouverte.....	89
Figure III-16 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une variation du moment d'inertie du moteur MCC.	91

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Comparaison entre les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif Adaptée.....	5
Tableau I-2 : Tableau des paramètres du moteur utilisé	19
Tableau II-1 : Comparaison entre la boucle ouverte et la boucle fermée. [16][17]	30
Tableau II-2 : Comparaison entre la commande PID et la commande MPC.[24][25][28]	41
Tableau III-1 : Paramètres du régulateur PID	61
Tableau III-2 : Paramètres du contrôleur MPC	64
Tableau III-3 : Perturbations études	68
Tableau III-4 : paramètres de chute de tension d'alimentation	69
Tableau III-5 : paramètres de charge mécanique échelon	72
Tableau III-6 : Paramètres de charge mécanique sinusoïdale.....	76
Tableau III-7 : paramètres de charge mécanique transitoire.....	80
Tableau III-8 : paramètres variation de la résistance d'induit.....	84
Tableau III-9 : paramètre de variation de l'inertie J	88
Tableau III-10 : Comparaison globale des performances des commandes PID et MPC.	92

Sommaire

RESUME	I
Remerciement	IV
Dédicaces	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VIII
Sommaire	IX
Introduction générale	XIII
Chapitre I: Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée	1
I.1 Introduction	2
I.2 Généralités sur les machines électriques	2
I.2.1 Machines à courant alternatif	3
I.2.2 Machines à courant continu	4
I.2.3 Comparaison entre moteurs AC et DC	5
I.2.1 Justification du choix du moteur à courant continu	5
I.3 Généralités sur les moteurs à courant continu	6
I.3.1 Définition du moteur à courant continu	6
I.3.2 Constitution du moteur à courant continu	6
I.3.3 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu	8
I.4 Types d'excitation des moteurs à courant continu	9
I.4.1 Moteur à excitation série	9
I.4.2 Moteur à excitation shunt (parallèle)	11
I.4.3 Moteur à excitation séparée	11
I.4.4 Moteur à excitation composée	12
I.5 . Justification du choix du moteur à excitation séparée	13
I.6 Modélisation mathématique du moteur	13
I.6.1 Hypothèses simplificatrices	13
I.6.2 Équation électrique	14
I.6.3 Équation mécanique	14
I.6.4 Fonction de transfert	15
I.6.5 Représentation d'état	16
I.6.6 Forme matricielle	18
I.6.7 Caractéristiques du moteur utilisé	18
I.6.8 Paramètres du moteur utilisé	19

I.7	Modélisation sous MATLAB	20
I.7.1	Modélisation du moteur à vide (Simulink)	21
I.7.2	Modélisation du moteur en charge	21
I.8	Etude par programmation (script)	21
I.8.1	Simulation du moteur à vide.....	22
I.8.2	Simulation du moteur en charge.....	24
I.9	Conclusion	25
Chapitre II: Études des commandes PID et MPC en vue de les appliquer au moteur à courant continu à excitation séparée.....		27
II.1	Introduction	28
II.2	Généralités sur les systèmes de commande.....	28
II.2.1	Système en boucle ouverte	29
II.2.2	Système en boucle fermée.....	29
II.2.3	Justification du choix de la boucle fermée.....	29
II.2.4	Comparaison entre boucle ouverte et boucle fermée.....	30
II.2.5	Importance du feedback dans les systèmes de commande.....	30
II.3	Définition de la Commande PID	31
II.3.1	Structure générale du régulateur PID	31
II.3.2	Action proportionnelle (P)	32
II.3.3	Action intégrale (I).....	32
II.3.4	Action dérivée (D)	32
II.3.5	Avantages et limites du PID	32
II.4	Implémentation de la commande PID sous MATLAB	33
II.5	Simulation de la commande PID	33
II.6	Commande prédictive MPC	34
II.6.1	Définition de la commande MPC	34
II.6.2	Principe de fonctionnement de la commande MPC.....	34
II.6.3	Exemple explicatif du fonctionnement du MPC	35
II.6.4	Modèle mathématique de la commande MPC	36
II.6.5	Horizon de prédiction et horizon de commande	37
II.6.6	Fonction de coût.....	37
II.6.7	Contraintes du système	38
II.6.8	Processus d'optimisation dans la commande MPC	38

II.6.9	Avantages et limites de la commande MPC	39
II.7	Implémentation de la commande MPC sous MATLAB	40
II.8	Simulation de la commande MPC	41
II.9	Comparaison préliminaire entre la commande PID et la commande MPC	41
II.10	Conclusion.....	42
Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations		44
III.1	Introduction :.....	60
III.2	Couplage du contrôleur PID avec le moteur MCC	60
III.2.1	Schéma Simulink du système PID-MCC.....	60
III.2.2	Paramètres du régulateur PID (script)	61
III.2.3	Résultats de programmation	61
III.2.4	Analyse des résultats	62
III.3	Couplage du contrôleur MPC avec le moteur MCC	63
III.3.1	Schéma Simulink du système MPC-MCC.....	63
III.3.2	Paramètres du régulateur MPC	64
III.3.3	Résultats de programmation	65
III.3.4	Analyse des résultats	65
III.4	Présentation des perturbations appliquées au moteur	66
III.4.1	Définition d'une perturbation	67
III.4.2	Types de perturbations possibles	67
III.4.3	Perturbations étudiées.....	68
III.5	Étude des perturbations	68
III.5.1	Chute de tension d'alimentation.....	68
III.5.2	Charge mécanique de type échelon.....	72
III.5.3	Charge mécanique sinusoïdale	75
III.5.4	Charge mécanique transitoire	80
III.5.5	Variation de la résistance d'induit (R)	83
III.5.6	Variation de l'inertie J	88
III.6	Comparaison des commandes PID et MPC	92
III.7	Discussion	93
III.8	Conclusion.....	94
Conclusion générale.....		94
Perspectives		96

Références.....	97
ANNEXE.....	100

Introduction générale

Les moteurs électriques occupent une place essentielle dans les systèmes industriels modernes. Parmi les différents types de moteurs, le moteur à courant continu (MCC) reste l'un des action-neurs grâce à sa simplicité de fonctionnement, sa facilité de commande et sa capacité à fournir une bonne précision de vitesse et de couple.

Avec le développement des systèmes automatisés et des techniques de commande avancées, la modélisation et la simulation des moteurs électriques sont devenues des étapes indispensables avant toute pratique. La modélisation permet de représenter mathématiquement le comportement du système afin d'analyser ses performances dynamiques et d'étudier différentes stratégies de commande.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la modélisation et à la simulation d'un moteur à courant continu. L'objectif principal est d'étudier le comportement dynamique du moteur puis de comparer les performances de deux méthodes de commande : la commande PID et la commande prédictive MPC.

La commande PID est l'une des méthodes les plus utilisées dans l'industrie grâce à sa simplicité de conception et sa bonne efficacité dans plusieurs applications. Cependant, cette commande peut présenter certaines limites face aux systèmes complexes et aux perturbations. Pour cette raison, nous allons également étudié la commande prédictive MPC qui représente une technique moderne capable d'anticiper le comportement futur du système afin d'améliorer les performances et la robustesse.

Ce travail sera organisé en trois axes :

Après une introduction générale :

- Le premier axe sera consacré à la modélisation mathématique et à la simulation du mcc sous Simulink.
- Le deuxième axe présentera l'étude des commandes PID et MPC ainsi que leurs simulations.
- Le troisième axe sera dédié à la validation des résultats et à la comparaison des performances des deux méthodes de commande en présence de perturbations.

Enfin, une conclusion générale résumera les principaux résultats obtenus ainsi que les perspectives futures de ce travail.

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

I.1 Introduction

Le (MCC) occupe une place importante dans les applications industrielles grâce à ses bonnes performances dynamiques et sa simplicité de commande. Il est largement utilisé dans plusieurs domaines tels que les systèmes automatisés, la robotique, les véhicules électriques et les entraînements industriels.

La modélisation mathématique d'un moteur à courant continu constitue une étape essentielle pour l'analyse et la conception des systèmes de commande. Cette modélisation permet de représenter le comportement dynamique du moteur à partir des équations électriques et mécaniques qui régissent son fonctionnement.[2][7]

Dans ce chapitre, nous présentons d'abord quelques généralités sur les moteurs à courant continu ainsi que leurs différents types d'excitation. Ensuite, nous justifions le choix du moteur à excitation séparée utilisé dans cette étude. Enfin, nous développons le modèle mathématique du moteur et sa simulation afin d'étudier son comportement dynamique à vide et en charge. [1][3].

I.2 Généralités sur les machines électriques

Les machines électriques sont des dispositifs permettant la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique, ou inversement. Elles occupent une place très importante dans les systèmes industriels modernes grâce à leurs nombreuses applications dans les domaines de l'automatisation, du transport, de la robotique et de la production industrielle. [3][5]

Les machines électriques sont généralement classées en deux grandes catégories

- les machines à courant alternatif.
- les machines à courant continu.

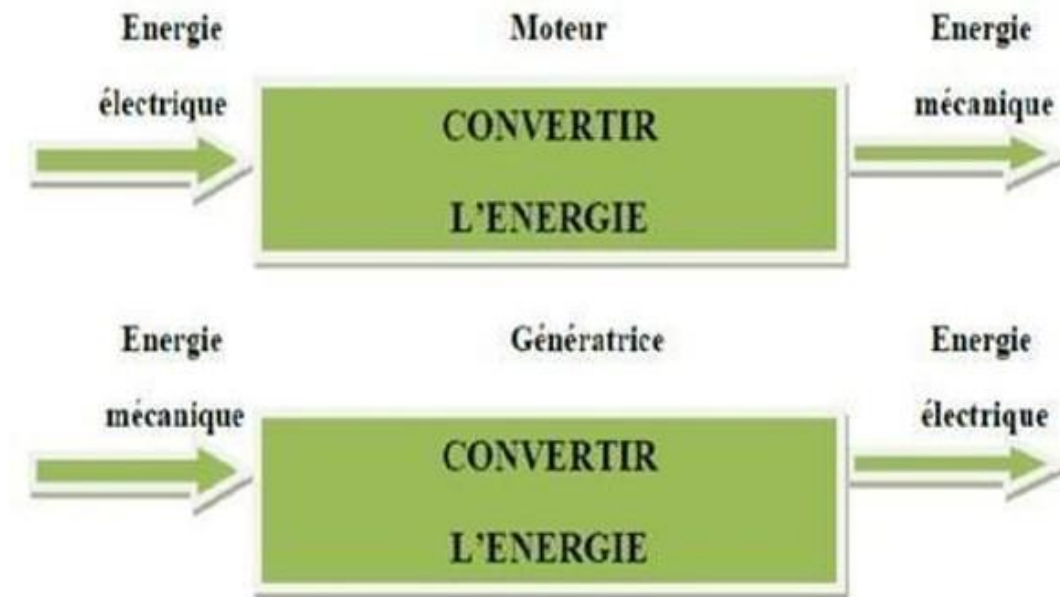


Figure I-1 : Conversion d'énergie de la machine à courant continu.

I.2.1 Machines à courant alternatif

Les (MCA) fonctionnent avec une alimentation alternative. Parmi les machines les plus utilisées, on trouve :

- les moteurs synchrones.
- les moteurs asynchrones.

Ces moteurs sont largement utilisés dans l'industrie grâce à leur robustesse, leur simplicité de construction et leur faible coût de maintenance.

Cependant, leur commande peut être dans certaines applications nécessitant une grande précision de vitesse et de couple. [5].

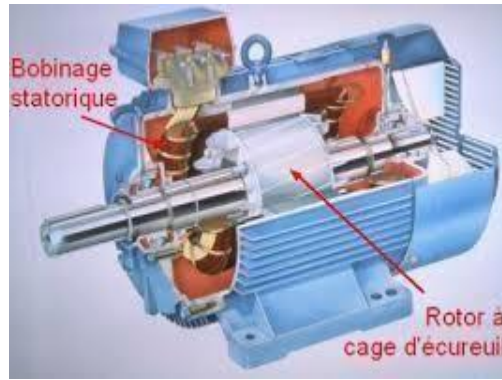


Figure I-2 : : machine à courant alternatif asynchrone

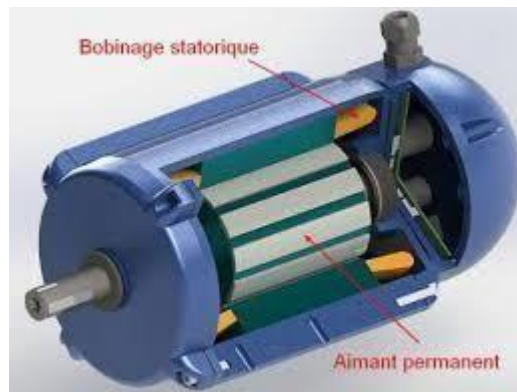


Figure I-3 : machine à courant alternatif synchrone

I.2.2 Machines à courant continu

Les machines (MCC) fonctionnent à l'aide d'une alimentation continue. Elles sont connues pour leur facilité de commande, leur réponse dynamique rapide et leur capacité à fournir un couple élevé au démarrage.

Grâce à ces caractéristiques, les moteurs à courant continu sont particulièrement adaptés aux applications nécessitant une commande précise de la vitesse. [5][6]

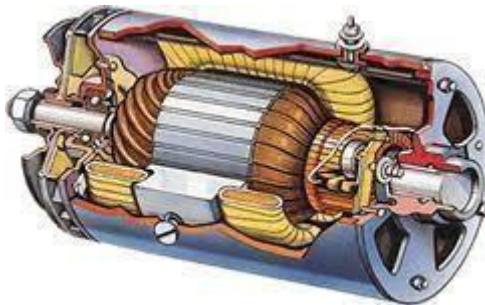


Figure I-4: machine à courant continu

I.2.3 Comparaison entre moteurs AC et DC

Les moteurs à courant alternatif et les moteurs à courant continu sont largement utilisés dans les applications industrielles. Cependant, ils présentent des caractéristiques différentes selon le type d'application. Le tableau suivant présente une comparaison entre les deux types de moteurs [3][5][6].

Tableau I-1 : Comparaison entre les moteurs à courant continu et les moteurs à courant alternatif Adaptée

Critère	Moteur à courant alternatif (AC)	Moteur à courant continu (DC)
Alimentation	Courant alternatif	Courant continu
Structure	Plus simple	Plus complexe
Maintenance	Faible	Plus importante
Commande de vitesse	Plus complexe	Plus simple
Couple de démarrage	Moyen	Élevé
Réponse dynamique	Moyenne	Rapide
Précision de commande	Moyenne	Élevée

I.2.1 Justification du choix du moteur à courant continu

Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur le moteur à courant continu en raison de plusieurs avantages techniques.

Tout d'abord, ce type de moteur offre une commande de vitesse simple et précise, ce qui le rend particulièrement adapté aux études de régulation automatique.

Ensuite, le moteur à courant continu présente une réponse dynamique rapide ainsi qu'un couple de démarrage élevé, ce qui facilite l'analyse du comportement transitoire du système.

De plus, la modélisation mathématique du moteur à courant continu reste relativement simple par rapport à certaines machines à courant alternatif, ce qui permet

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

une implémentation plus accessible sous MATLAB.

Enfin, ce choix est particulièrement pertinent dans notre travail puisque l'objectif principal est l'étude comparative entre une commande classique (PID) et une commande avancée (MPC), nécessitant un système facilement modélisable et contrôlable.

I.3 Généralités sur les moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu sont parmi les machines électriques les plus utilisées dans les systèmes industriels nécessitant une commande précise de la vitesse et du couple. Ils transforment l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation grâce au phénomène d'interaction entre le champ magnétique et le courant électrique circulant dans l'induit.

Les moteurs à courant continu se caractérisent par :

- une bonne précision de réglage de vitesse.
- un couple de démarrage élevé.
- une réponse dynamique rapide.
- une facilité de commande.

Grâce à ces avantages, ils sont utilisés dans plusieurs applications industrielles telles que les convoyeurs, les robots, les ascenseurs, les machines-outils et les véhicules électriques. [2]

I.3.1 Définition du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est une machine électrique tournante capable de convertir l'énergie électrique continue en énergie mécanique. [2]

I.3.2 Constitution du moteur à courant continu

Le (MCC) est constitué de plusieurs éléments essentiels assurant son bon fonctionnement. Les principaux composants sont :

- le stator.
- le rotor (induit).
- le collecteur.
- les balais.

Le stator :

Le stator est la partie fixe du moteur Il produit le champ magnétique nécessaire au fonctionnement du moteur grâce aux aimants permanents ou aux enroulements d'excitation.



Figure I-5 : le stator

Le rotor (induit):

Le rotor est la partie tournante du moteur. Il contient les conducteurs parcourus par le courant électrique. Sous l'effet du champ magnétique, un couple électromagnétique est créé, provoquant ainsi la rotation du moteur.



Figure I-6 : le rotor

Le collecteur:

Le collecteur est un dispositif monté sur le rotor. Il permet d'inverser le sens du courant dans les enroulements afin de maintenir la rotation du moteur dans le même sens..

Les balais

Les balais assurent le contact électrique entre la partie fixe et la partie tournante du moteur. Ils transmettent le courant électrique vers le collecteur.[15].

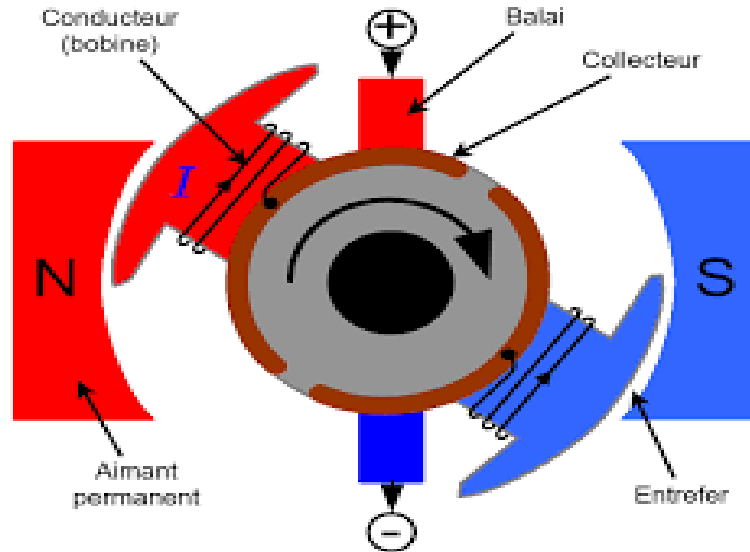


Figure I-7 : le collecteur et les balais

I.3.3 Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Le fonctionnement du moteur à courant continu repose sur le principe de l'interaction entre un champ magnétique et un conducteur parcouru par un courant électrique.

Lorsque le courant électrique traverse les conducteurs de l'induit placés dans le champ magnétique créé par le stator, une force électromagnétique apparaît selon la loi de Laplace. Cette force génère un couple électromagnétique qui provoque la rotation du rotor.

Au cours de la rotation, une force contre-électromotrice est produite dans l'induit. Cette tension s'oppose à la tension d'alimentation et influence le comportement dynamique du moteur.

Ainsi, le moteur transforme l'énergie électrique fournie en énergie mécanique de rotation.[8]

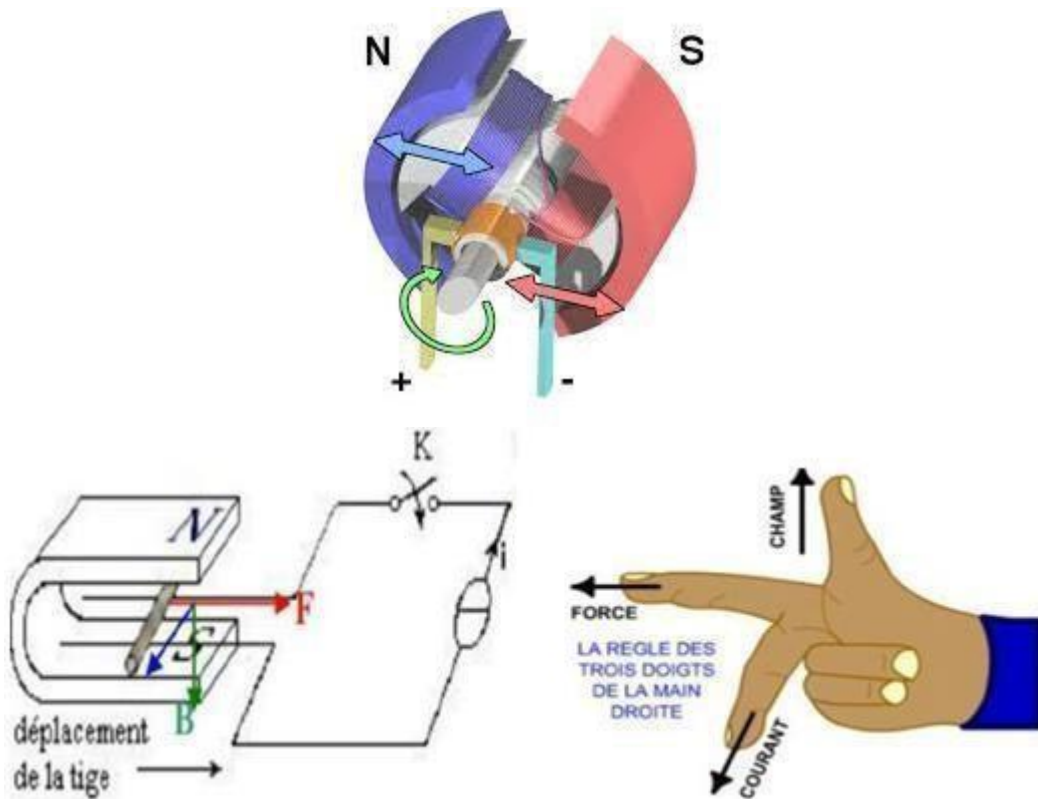


Figure I-8 : Principe de fonctionnement de la machine à courant continu

I.4 Types d'excitation des moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu se distinguent selon la manière dont le circuit d'excitation est alimenté. On distingue principalement quatre types d'excitation :

- moteur à excitation série.
- moteur à excitation shunt (parallèle).
- moteur à excitation séparée.
- moteur à excitation composée.[9].

I.4.1 Moteur à excitation série

Dans ce type de moteur, l'enroulement d'excitation est connecté en série avec l'induit. Ainsi, le même courant traverse à la fois le circuit d'induit et le circuit d'excitation.

Ce type de moteur présente un couple de démarrage très élevé, ce qui le rend adapté aux applications nécessitant un fort couple au démarrage, comme les grues et les démarreurs.

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

Cependant, sa vitesse varie fortement avec la charge, ce qui rend sa commande moins stable.[6]e.

Depuis leur mise en place il y a plus de soixante-dix ans, les codes-barres ont donc été pour les entreprises un atout majeur, les aidant à faire fonctionner leurs activités d'une façon plus efficace, ainsi qu'à suivre l'acheminement de leurs produits à chaque étape du cycle de production, de vente et d'après-vente : de la conception, de la fabrication, de l'achat et de la vente à la réparation.[16]

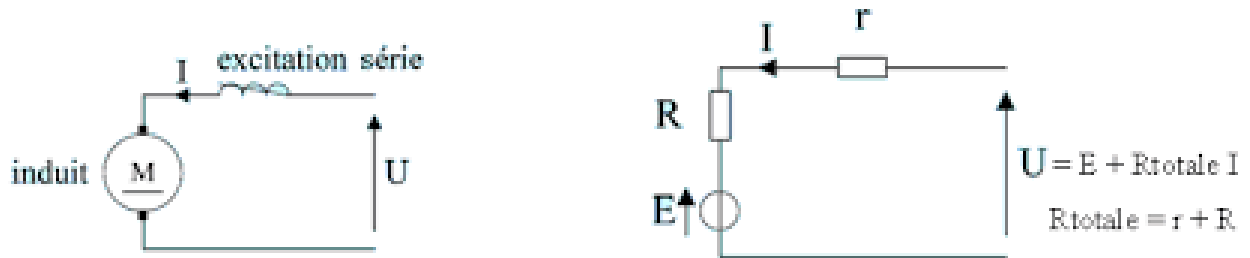


Figure I-9 : moteur à excitation série

Les équations

$$\left\{ \begin{array}{l} u_a = (R_a + R_s)I_a + (L_a + L_s) \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{Eq. I.1}) \\ E = k\Phi(I_a)\Omega \quad (\text{Eq. I.2}) \\ C_{em} = k\Phi(I_a)I_a \quad (\text{Eq. I.3}) \end{array} \right.$$

I.4.2 Moteur à excitation shunt (parallèle)

Dans ce moteur, l'enroulement d'excitation est branché en parallèle avec l'induit.

La tension appliquée aux deux circuits est identique. Ce moteur offre une vitesse relativement stable et une commande plus régulière que le moteur série. Cependant, son couple de démarrage reste plus faible.[6]

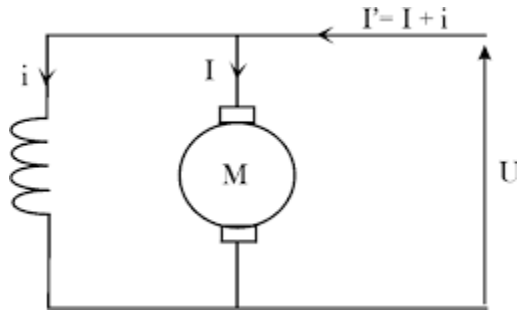


Figure I-10 : moteur à excitation shunt

Les équations

$$\begin{cases} u_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E & \text{(Eq. I.4)} \\ E = k\Phi(I_f)\Omega & \text{(Eq. I.5)} \\ C_{em} = k\Phi(I_f)I_a & \text{(Eq. I.6)} \end{cases}$$

I.4.3 Moteur à excitation séparée

Dans ce type de moteur, le circuit d'excitation et le circuit d'induit sont alimentés par deux sources indépendantes.

Cette configuration permet un contrôle précis et indépendant du flux magnétique et du courant d'induit. Le moteur à excitation séparée offre une excellente stabilité de vitesse, une bonne réponse dynamique et une commande très flexible.[7]

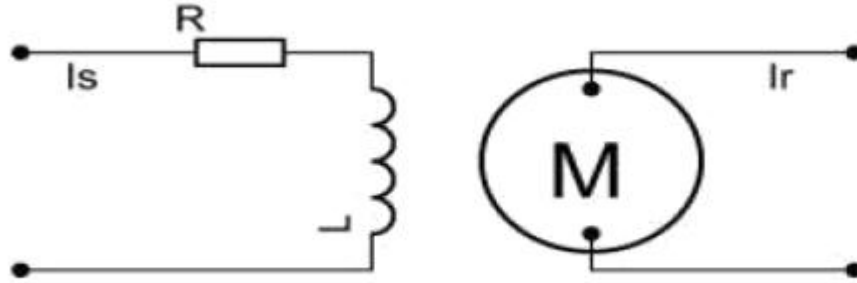


Figure I-11 : : moteur à excitation séparée

Les équations

$$\begin{cases} u_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E & \text{(Eq. I.7)} \\ E = k\Phi(I_f)\Omega & \text{(Eq. I.8)} \\ C_{em} = k\Phi(I_f)I_a & \text{(Eq. I.9)} \end{cases}$$

I.4.4 Moteur à excitation composée

Ce moteur combine les caractéristiques des moteurs série et shunt. Il possède à la fois un enroulement série et un enroulement parallèle.

Il permet d'obtenir un compromis entre un fort couple de démarrage et une vitesse relativement stable. Cependant, sa structure est plus complexe. [9]:

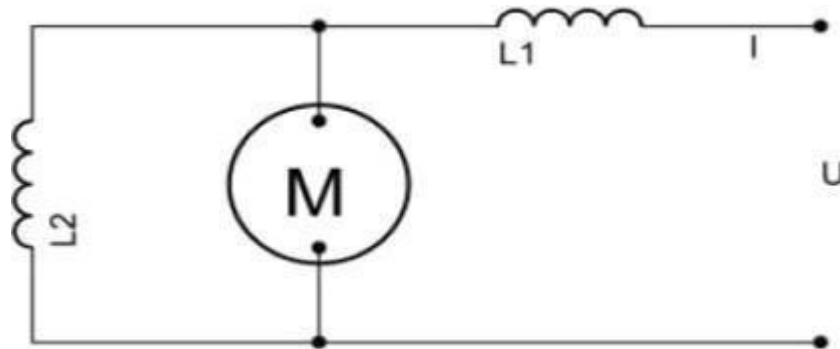


Figure I-12 : moteur à excitation composée

Les équations

$$\begin{cases} u_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E & \text{(Eq. I.10)} \\ E = K(\Phi_f \pm \Phi_s)\Omega & \text{(Eq. I.11)} \\ C_{em} = k\Phi(I_a)I_a & \text{(Eq. I.12)} \end{cases}$$

I.5 Justification du choix du moteur à excitation séparée

Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur le moteur à courant continu à excitation séparée pour plusieurs raisons techniques et académiques.

Tout d'abord, ce type de moteur offre une meilleure stabilité de vitesse par rapport au moteur à excitation série, dont la vitesse varie fortement en fonction de la charge.

Ensuite, contrairement au moteur shunt, le moteur à excitation séparée permet un contrôle indépendant du courant d'induit et du flux d'excitation, ce qui offre une plus grande flexibilité dans la commande. Par ailleurs, le moteur à excitation composée présente une structure plus complexe, ce qui rend sa modélisation et son analyse plus difficiles dans le cadre d'un travail académique de simulation et de commande.

Le moteur à excitation séparée présente également une réponse dynamique satisfaisante ainsi qu'une grande précision de commande, ce qui le rend particulièrement adapté à l'implémentation de stratégies de commande avancées telles que le PID et la commande prédictive MPC.

Enfin, ce type de moteur est largement utilisé comme modèle de référence dans les études académiques liées à la modélisation, à la simulation et à la commande des systèmes électriques.

Pour toutes ces raisons, le moteur à courant continu à excitation séparée constitue le choix le plus approprié pour ce travail. [2]

I.6 Modélisation mathématique du moteur

I.6.1 Hypothèses simplificatrices

Afin de simplifier l'étude mathématique du moteur à courant continu à excitation séparée, certaines hypothèses sont adoptées :

- le flux magnétique d'excitation est supposé constant
- les pertes magnétiques sont négligées
- les effets de saturation magnétique sont ignorés
- la réaction de l'induit est négligée
- les paramètres électriques et mécaniques du moteur sont supposés constants.

Ces hypothèses permettent d'obtenir un modèle mathématique simplifié tout en conservant un comportement dynamique représentatif du moteur réel. [3]

I.6.2 Équation électrique

Le circuit électrique de l'induit du moteur à courant continu peut être modélisé en appliquant la loi des mailles de Kirchhoff.

La tension d'alimentation appliquée à l'induit est donnée par : [1][2]

$$u(t) = Ri(t) + \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{Eq. I.13})$$

où :

- $u(t)$: tension d'alimentation de l'induit (V)
- R : résistance de l'induit (Ω)
- L : inductance de l'induit (H)
- $i(t)$: courant de l'induit (A)
- $e(t)$: force contre-électromotrice (V)

La force contre-électromotrice est proportionnelle à la vitesse angulaire du moteur :

$$e(t) = K_e \omega(t) \quad (\text{Eq. I.14})$$

où :

- K_e : constante de force contre-électromotrice.
- $\omega(t)$: vitesse angulaire (rad/s).

En remplaçant $e(t)$ dans l'équation précédente, on obtient :[7]

$$u(t) = Ri(t) + \frac{di(t)}{dt} + K_e \omega(t) \quad (\text{Eq. I.15})$$

Cette équation représente le comportement électrique du moteur.

I.6.3 Équation mécanique

Le comportement mécanique du moteur à courant continu est décrit à partir de la deuxième loi de Newton appliquée au mouvement de rotation.

L'équation mécanique du moteur s'écrit comme suit : [1]

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = C_q(t) - C_r(t) - f\omega(t) \quad (\text{Eq. I.16})$$

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

où :

- J : moment d'inertie du rotor (kg.m²)
- $\omega(t)$: vitesse angulaire (rad/s)
- $C_e(t)$: couple électromagnétique (N.m)
- $C_r(t)$: couple résistant (charge) (N.m)
- f : coefficient de frottement visqueux

Le couple électromagnétique est proportionnel au courant de l'induit : [3]

$$C_e(t) = K_t i(t) \quad (\text{Eq. I.17})$$

où :

- K_t : constante de couple moteur

En remplaçant cette relation dans l'équation mécanique, on obtient : [2]

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = K_t i(t) - C_r(t) - f\omega(t) \quad (\text{Eq. I.18})$$

Cette équation représente le comportement mécanique dynamique du moteur.[12]

I.6.4 Fonction de transfert

Afin d'obtenir la fonction de transfert du moteur à courant continu, nous appliquons la transformation de Laplace aux équations électriques et mécaniques du système, en supposant des conditions initiales nulles.

L'équation électrique devient : [1][11]

$$U(s) = RI(s) + LsI(s) + K_e \Omega \quad (\text{Eq. I.19})$$

L'équation mécanique devient :

$$Js\Omega(s) = K_t I(s) - C_r(s) - f\Omega(s) \quad (\text{Eq I.20})$$

Dans le cas d'un fonctionnement à vide, on considère

$$C_r(s)=0$$

L'équation mécanique devient alors :

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

$$Js'\Omega(s) = KtI(s) - f'\Omega(s) \quad (\text{Eq I.21})$$

En réorganisant :

$$Js'\Omega(s) + f'\Omega(s) = KtI(s) \quad (\text{Eq I.22})$$

D'où :

$$I(s) = \frac{(Js+f')}{Kt} \Omega(s) \quad (\text{Eq I.23})$$

En remplaçant cette expression dans l'équation électrique :

$$U(s) = R \left(\frac{Js+f'}{Kt} \Omega(s) \right) + Ls \left(\frac{Js+f'}{Kt} \Omega(s) \right) + K_e \Omega(s) \quad (\text{Eq I.24})$$

Après simplification, on obtient la fonction de transfert entre la vitesse et la tension

$$\frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{Kt}{(Ls+R)(Js+f')+K_e Kt} \quad (\text{Eq I.25})$$

La fonction de transfert finale du moteur à courant continu est donc : [1][11]

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{Kt}{LJs^2 + (Lf+RJ)s + (Rf+K_e Kt)} \quad (\text{Eq. I.26})$$

I.6.5 Représentation d'état

La représentation d'état constitue une méthode moderne de modélisation des systèmes dynamiques. Elle permet de décrire le comportement du moteur à courant continu sous forme d'un ensemble d'équations différentielles du premier ordre.

Pour le moteur à courant continu à excitation séparée, nous choisissons les variables d'état suivantes : [1][11]

$$x_{1(t)} = i(t) \quad (\text{Eq. I.27})$$

$$x_{2(t)} = \omega(t) \quad (\text{Eq. I.28})$$

avec :

- $x_{1(t)}$: courant d'induit.

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

- $x_2(t)$: vitesse angulaire

L'entrée du système est :

$$u(t) = V(t) \quad (\text{Eq I.29})$$

La sortie du système est :

$$y(t) = \omega(t) \quad (\text{Eq I.30})$$

À partir de l'équation électrique :

Nous avons : [1][11]

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + K_e \omega(t) \quad (\text{Eq I.31})$$

En isolant :

$$\frac{di(t)}{dt} \quad (\text{Eq I.32})$$

on obtient : [1][11]

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} (u(t) - Ri(t) - K_e \omega(t)) \quad (\text{Eq I.33})$$

Donc :

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{L} (u - Rx^1 - K_e x^2) \quad (\text{Eq I.34})$$

À partir de l'équation mécanique :

Nous avons : [1][11]

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = K_t i(t) - f \omega(t) - C_r(t) \quad (\text{Eq I.35})$$

Pour le modèle nominal (à vide) :

$$C_r = 0 \quad (\text{Eq I.36})$$

Donc :

$$J \frac{d\omega}{dt} = K_t i - f \omega \quad (\text{Eq I.37})$$

En isolant :

$$\frac{d\omega}{dt} \quad (\text{Eq I.38})$$

on obtient : [1][11]

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{J} (K_t x^1 - f x^2) \quad (\text{Eq I.39})$$

I.6.6 Forme matricielle

Le système peut alors être écrit sous forme matricielle :

$$\dot{X} = AX + BU \quad (\text{Eq I.40})$$

avec : [1][11]

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_e}{L} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{f}{J} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq I.41})$$

La sortie est : [1][11]

$$Y = CX + DU \quad (\text{Eq I.42})$$

avec :

$$C = [0 \ 1] \quad (\text{Eq I.43})$$

$$D[0][13]$$

I.6.7 Caractéristiques du moteur utilisé

Dans cette étude, le moteur utilisé est un moteur à courant continu à excitation séparée de type Maxon RE 16 (Ø16 mm, Graphite Brushes, 4.5 W). Les paramètres électriques et mécaniques

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

utilisés dans la modélisation ont été extraits de la fiche technique du constructeur. Ce moteur est particulièrement adapté aux applications de commande et de régulation grâce à sa faible inertie et à ses bonnes performances dynamiques.

Le modèle développé dans ce travail est basé sur les caractéristiques techniques du moteur à courant continu Maxon RE 16. Les valeurs des paramètres électriques et mécaniques, notamment la résistance d'induit, l'inductance, le moment d'inertie, le coefficient de frottement visqueux ainsi que les constantes électromécaniques, ont été utilisées pour établir la modélisation mathématique du système et réaliser les simulations sous MATLAB

Les caractéristiques techniques du moteur ont été extraites de la fiche technique du moteur Maxon RE16 utilisée comme référence pour cette étude. [4]



Figure I-13 : : Moteur à courant continu Maxon RE 16 utilisé dans cette étude

Les caractéristiques techniques du moteur Maxon RE16 présentées ci-dessus sont issues de la fiche technique du constructeur et sont fournies à titre indicatif. Les paramètres effectivement utilisés dans la modélisation mathématique et les simulations sous MATLAB sont présentés dans le tableau suivant. [4]

I.6.8 Paramètres du moteur utilisé

Tableau I-2 : Tableau des paramètres du moteur utilisé

Paramètre	Symbole	Valeur
Résistance d'induit	R	1.33 Ω
Inductance d'induit	L	0.115×10^{-3} H
Constante de couple	Kt (ou Kc)	16.3×10^{-3} N.m/A

Constante FEM	K_e	$16.3 \times 10^{-3} \text{ V.s/rad}$
Inertie	J	$9.49 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2$
Frottement visqueux	f	$1.2 \times 10^{-6} \text{ N.m.s/rad}$

Source : maxon RE16 technical data sheet [4]

I.7 Modélisation sous MATLAB

Afin de valider le modèle mathématique développé précédemment, une modélisation du moteur à courant continu à excitation séparée a été réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink. Le modèle Simulink a été construit à partir des équations électriques et mécaniques du moteur. [5]

La partie électrique est représentée par l'équation : [5]

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + K_e \omega(t) \quad (\text{Eq I.44})$$

Cette équation permet de modéliser la dynamique du courant d'induit. La partie mécanique est décrite par : [5]

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t) = K_t i_a(t) - T_L(t) \quad (\text{Eq. I.45})$$

Cette relation modélise la dynamique de la vitesse du moteur.

Le schéma bloc sous Simulink est constitué des blocs fondamentaux suivants :

- bloc Step représentant la tension d'entrée.
- blocs Sum pour les opérations de sommation.
- blocs Gain représentant les constantes du moteur.
- blocs Integrator pour résoudre les équations différentielles.
- bloc Scope pour visualiser la réponse dynamique.

La structure du modèle permet d'obtenir l'évolution temporelle du courant d'induit ainsi que de la vitesse angulaire du moteur. [5][14]

I.7.1 Modélisation du moteur à vide (Simulink)

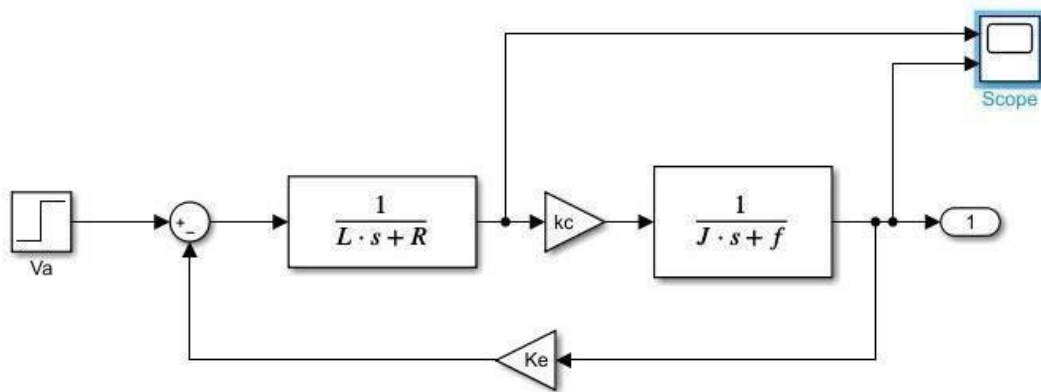


Figure I-14 : Modèle Simulink du moteur à courant continu à vide

Le modèle Simulink du moteur à courant continu à vide est construit à partir des équations électriques et mécaniques du moteur. Dans cette configuration, aucun couple de charge n'est appliqué ($T_L = 0$). Le modèle permet d'observer l'évolution de la vitesse de rotation et du courant d'induit lors du démarrage du moteur. [5]

I.7.2 Modélisation du moteur en charge

Schéma Simulink du moteur en charge

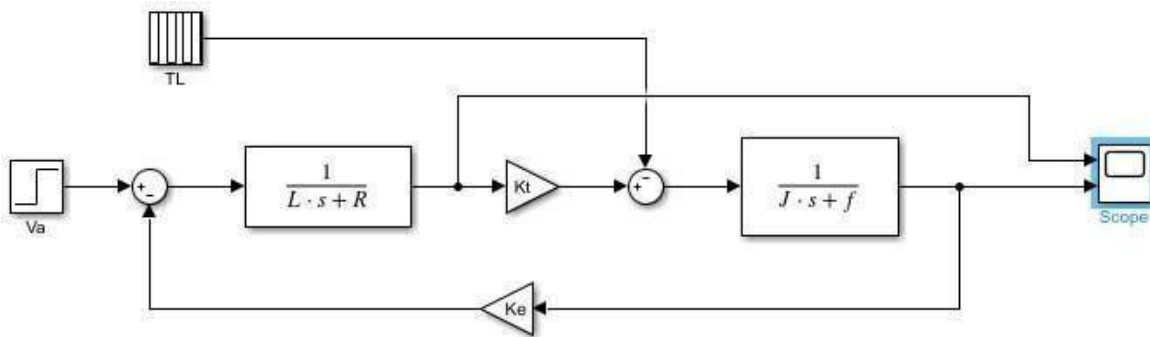


Figure I-15 : Modèle Simulink du moteur à courant continu en charge

Afin d'étudier l'influence de la charge mécanique sur les performances du moteur, un couple de charge T_L est appliqué à l'arbre du moteur. Ce modèle permet d'analyser l'effet de cette perturbation sur la vitesse, le courant d'induit et le couple électromagnétique. [5]

I.8 Etude par programmation (script)

Après la modélisation du moteur à courant continu à excitation séparée sous MATLAB, des simulations ont été réalisées afin d'analyser son comportement dynamique dans deux conditions de fonctionnement : à vide et en charge.

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

L'objectif principal de ces simulations est de valider le modèle mathématique développé et d'observer l'évolution temporelle des grandeurs principales du moteur, notamment la vitesse angulaire et le courant d'induit.

Les simulations ont été réalisées sous MATLAB à l'aide de scripts développés pour les cas de fonctionnement à vide et en charge. [5]

I.8.1 Simulation du moteur à vide

Dans cette première simulation, le moteur est étudié en fonctionnement à vide, c'est-à-dire en absence de charge mécanique externe.

Dans ce cas : [5]

$$T_L = 0 \quad (\text{Eq I.46})$$

Le moteur est alimenté par une tension continue appliquée sous forme d'entrée échelon (signal Step), permettant d'observer la réponse dynamique du système.

Les paramètres du moteur utilisés dans la simulation sont définis selon le modèle adopté. Les grandeurs observées sont :

- la vitesse angulaire $\omega(t)$
- le courant d'induit $i_a(t)$

Les résultats obtenus permettent d'évaluer :

- le temps de réponse.
- la stabilité.
- le comportement transitoire.
- la valeur en régime permanent.

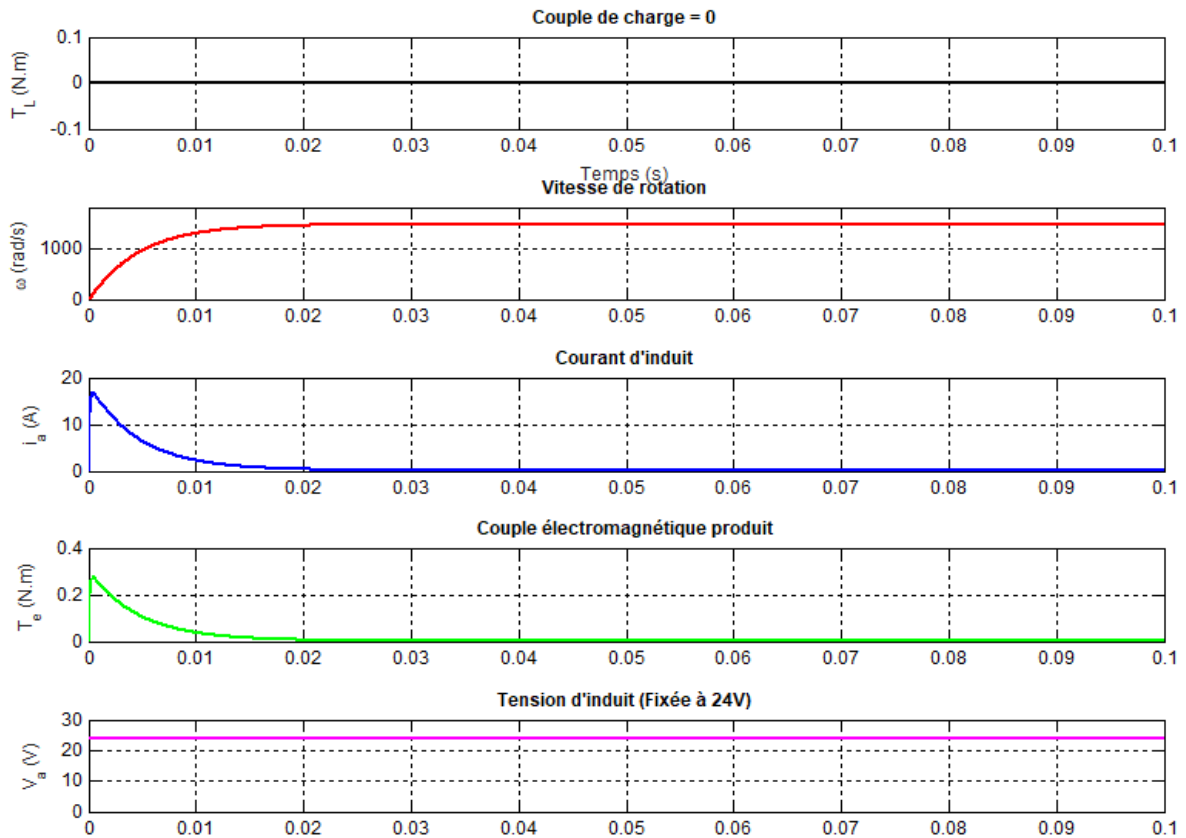


Figure I-16 : Réponse du moteur à courant continu à vide

• Analyse des résultats à vide

La figure précédente présente la réponse du moteur à courant continu fonctionnant à vide sous une tension d'alimentation constante de 24 V. En absence de couple de charge ($T_L = 0$), la vitesse de rotation augmente rapidement à partir du démarrage puis atteint un régime quasi permanent. Le courant d'induit présente une valeur élevée au démarrage avant de diminuer progressivement sous l'effet de la force contre-électromotrice. Le couple électromagnétique est également important au démarrage afin d'assurer l'accélération du moteur, puis décroît vers une valeur proche de zéro lorsque le régime permanent est atteint. Ces résultats confirment le bon comportement dynamique du modèle développé.

I.8.2 Simulation du moteur en charge

Dans cette deuxième simulation, le comportement du moteur est étudié en présence d'une charge mécanique externe.

Dans ce cas :

$$T_L \neq 0$$

Le couple résistant est introduit dans le modèle Simulink afin de représenter une perturbation mécanique appliquée au moteur.

Cette simulation permet d'évaluer la robustesse du modèle face aux variations de charge. [5]

Les grandeurs observées restent :

- la vitesse angulaire.
- le courant d'induit

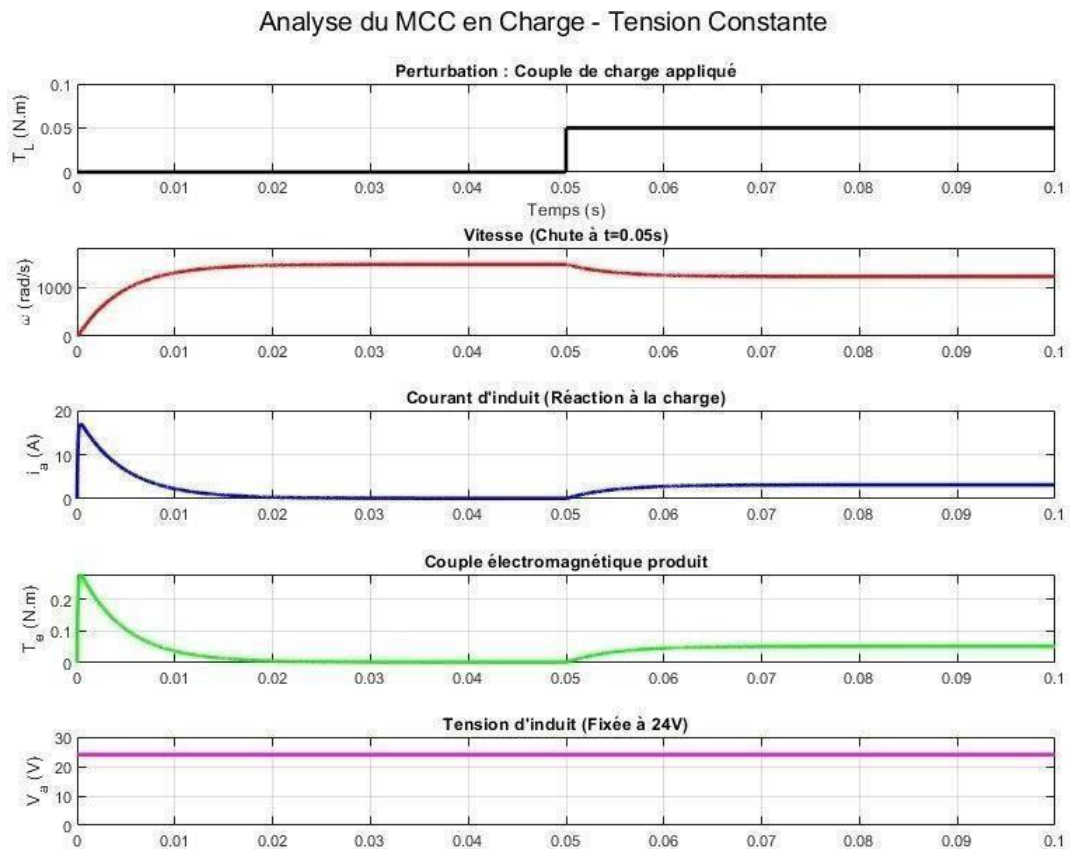


Figure I-17 : Réponse du moteur à courant continu on charge

• Analyse des résultats en charge

La figure précédente présente la réponse du moteur à courant continu en présence d'une charge mécanique appliquée à l'instant $t = 0,05$ s. Avant l'application de la charge, le moteur fonctionne dans des conditions proches du fonctionnement à vide et la vitesse augmente rapidement jusqu'à atteindre un régime quasi permanent. Lorsque le couple de charge est appliqué, une diminution de la vitesse de rotation est observée. Afin de compenser cette perturbation mécanique, le courant d'induit augmente légèrement, ce qui entraîne une augmentation du couple électromagnétique produit par le moteur. Après un court régime transitoire, le système retrouve un nouvel état de fonctionnement stable. Ces résultats mettent en évidence l'influence directe de la charge mécanique sur les performances dynamiques du moteur à courant continu.[10]

I.9 Conclusion

Au cours de ce premier chapitre, une étude générale des machines électriques a été présentée, en mettant en évidence les principales différences entre les moteurs à courant alternatif et les moteurs à courant continu.

Une comparaison entre ces deux catégories de moteurs a permis de justifier le choix du moteur à courant continu pour cette étude, grâce à sa simplicité de commande, sa rapidité de réponse dynamique et sa bonne précision de régulation.

Par la suite, les différents modes d'excitation des moteurs à courant continu ont été analysés. Cette étude a conduit au choix du moteur à excitation séparée, qui présente une grande flexibilité de commande ainsi qu'une modélisation relativement simple.

Ensuite, le modèle mathématique du moteur a été établi à partir des équations électriques et mécaniques décrivant son comportement dynamique. La fonction de transfert ainsi que la représentation d'état du système ont également été déterminées afin de disposer d'un modèle exploitable pour la commande.

Enfin, la modélisation et la simulation du moteur sous MATLAB/Simulink ont permis d'analyser son comportement aussi bien à vide qu'en charge et de valider le modèle développé.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude, à la conception et à l'implémentation des stratégies de commande PID et MPC, dans le but d'améliorer les performances dynamiques du moteur et de comparer l'efficacité de ces deux approches de commande.

Chapitre I:Modélisation et simulation du moteur à courant continu à excitation séparée

Le modèle mathématique développé dans ce chapitre constitue une étape indispensable pour la synthèse des lois de commande. À partir de ce modèle, le chapitre suivant sera consacré à l'étude et à l'implémentation des stratégies de commande PID et MPC appliquées au moteur à courant continu à excitation séparée, afin d'améliorer les performances dynamiques du système et d'assurer une régulation efficace de sa vitesse.

Chapitre II:Études des commandes PID et MPC en vue de les appliquer au moteur à courant continu à excitation séparée

II.1 Introduction

Les systèmes de commande occupent une place essentielle dans les applications industrielles modernes, en particulier dans les systèmes électromécaniques nécessitant précision, stabilité et rapidité de réponse.

Dans le cas des moteurs à courant continu, l'utilisation d'une stratégie de commande appropriée permet d'améliorer significativement les performances dynamiques, notamment en termes de régulation de vitesse, de réduction du dépassement et de robustesse face aux perturbations.

Dans ce chapitre, deux stratégies de commande seront étudiées : la commande classique PID et la commande prédictive MPC.

La commande PID constitue l'une des méthodes les plus utilisées dans l'industrie grâce à sa simplicité d'implémentation et son efficacité dans de nombreuses applications.

En parallèle, la commande prédictive MPC représente une approche plus avancée, basée sur un modèle mathématique du système et une optimisation prédictive permettant d'améliorer les performances de commande. [16][17]

II.2 Généralités sur les systèmes de commande

Les systèmes de commande jouent un rôle fondamental dans le pilotage et la régulation des systèmes dynamiques industriels. Leur objectif principal est de contrôler le comportement d'un système afin d'obtenir une sortie conforme aux performances souhaitées.

Dans le domaine des moteurs électriques, les systèmes de commande permettent de réguler différentes grandeurs physiques telles que la vitesse, le couple ou la position.

De manière générale, un système de commande comprend :

- Une entrée de référence.
- Un contrôleur.
- Le système à commander.
- Une sortie.
- Éventuellement une boucle de rétroaction (feedback).

Selon leur structure, les systèmes de commande peuvent être classés en deux grandes catégories: les systèmes En boucle ouverte et les systèmes en boucle fermée. [16][17]

II.2.1 Système en boucle ouverte

Un système de commande en boucle ouverte est un système dans lequel la sortie n'est pas mesurée ni comparée à la consigne.

Dans ce type de commande, l'action de contrôle dépend uniquement de l'entrée de commande, sans tenir compte du comportement réel du système.

La structure générale d'un système en boucle ouverte est simple, mais elle présente une sensibilité importante aux perturbations et aux variations des paramètres. [16][17]

II.2.2 Système en boucle fermée

Dans un système de commande en boucle fermée, la sortie du système est mesurée et comparée à la consigne.

L'erreur obtenue entre la valeur souhaitée et la valeur réelle est utilisée par le contrôleur pour corriger automatiquement le comportement du système.

Ce type de commande offre une meilleure précision, une meilleure stabilité ainsi qu'une meilleure robustesse face aux perturbations.

Cependant, sa structure est plus complexe qu'un système en boucle ouverte. [16][17]

II.2.3 Justification du choix de la boucle fermée

Dans cette étude, le choix d'un système de commande en boucle fermée a été retenu plutôt qu'une commande en boucle ouverte.

Ce choix est motivé par plusieurs raisons techniques.

Tout d'abord, la commande en boucle ouverte ne permet pas de mesurer la sortie réelle du Système, ce qui empêche toute correction automatique en cas d'erreur ou de perturbation. Dans le cas du moteur à courant continu, la vitesse peut être affectée par différents facteurs tels que les variations de charge mécanique, les perturbations externes ou les incertitudes sur les paramètres du modèle.

Une commande en boucle ouverte serait incapable de compenser ces effets, ce qui entraînerait une dégradation des performances.

En revanche, la commande en boucle fermée permet de comparer en permanence la vitesse réelle à la consigne souhaitée et d'ajuster automatiquement l'action de commande.

Ce choix est particulièrement justifié dans notre travail, puisque les stratégies PID et MPC reposent toutes deux sur le principe de rétroaction afin d'assurer une régulation précise et robuste de la vitesse du moteur.

II.2.4 Comparaison entre boucle ouverte et boucle fermée

Tableau II-1 : Comparaison entre la boucle ouverte et la boucle fermée. [16][17]

Critère	Boucle ouverte	Boucle fermée
Feedback	Non	Oui
Précision	Faible	Élevée
Stabilité	Sensible	Meilleure
Robustesse	Faible	Bonne
Complexité	Simple	Plus complexe

II.2.5 Importance du feedback dans les systèmes de commande

Le feedback (rétroaction) constitue un élément fondamental dans les systèmes de commande modernes.

Son rôle principal est de mesurer la sortie réelle du système et de la comparer à la consigne désirée afin de calculer l'erreur de commande.

Cette erreur est ensuite utilisée par le contrôleur pour ajuster automatiquement le signal de commande et corriger le comportement du système.

L'utilisation du feedback présente plusieurs avantages :

- Amélioration de la précision.
- Réduction de l'erreur statique.
- Meilleure stabilité du système.
- Compensation des perturbations externes.
- Meilleure robustesse face aux variations des paramètres du système.

Dans le cas du moteur à courant continu, le feedback permet de maintenir la vitesse désirée même en présence de variations de charge mécanique. [16][17]

II.3 Définition de la Commande PID

La commande PID (Proportionnelle – Intégrale – Dérivée) est l'une des stratégies de commande les plus utilisées dans les systèmes industriels en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de son efficacité dans de nombreuses applications.

Elle permet d'améliorer les performances dynamiques d'un système en corrigeant l'erreur entre la consigne désirée et la sortie réelle du système.

Le contrôleur PID agit à travers trois actions complémentaires :

- l'action proportionnelle (P).
- l'action intégrale (I).
- l'action dérivée (D).

La combinaison de ces trois actions permet d'obtenir une meilleure précision, une réponse plus rapide et une meilleure stabilité du système. [21]

$$\text{erreur} = \text{consigne} - \text{sortie}$$

II.3.1 Structure générale du régulateur PID

L'expression mathématique du régulateur PID est donnée par : [17]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Eq. II.1})$$

où :

- $u(t)$: signal de commande
- $e(t)$: erreur de commande
- K_p : gain proportionnel
- K_i : gain intégral
- K_d : gain dérivé

Dans le domaine de Laplace, le régulateur PID s'écrit : [16]

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (\text{Eq. II.2})$$

$$e(t) = \text{consigne} - \text{sortie}$$

II.3.2 Action proportionnelle (P)

L'action proportionnelle produit un signal de commande directement proportionnel à l'erreur instantanée.

Sa relation est : [16]

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (\text{Eq I.3})$$

Cette action permet d'accélérer la réponse du système.

Cependant, une valeur élevée de K_p peut provoquer un dépassement important ou des oscillations.

II.3.3 Action intégrale (I)

L'action intégrale permet d'éliminer l'erreur statique en accumulant l'erreur dans le temps. Elle est définie par : [16]

$$u_I(t) = K_i \int e(t) dt \quad (\text{Eq. II.4})$$

Cette action améliore la précision du système.

Cependant, une valeur élevée de K_i peut ralentir la réponse et provoquer des oscillations.

II.3.4 Action dérivée (D)

L'action dérivée agit sur la vitesse de variation de l'erreur. Elle est donnée par : [16]

$$u_D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Eq. II.5})$$

Cette action permet d'anticiper le comportement futur du système et d'améliorer la stabilité. Cependant, elle est sensible au bruit de mesure.

II.3.5 Avantages et limites du PID

Avantages :

- Simplicité d'implémentation.
- Efficacité industrielle.
- Bonne stabilité.

- Amélioration de la précision.

Limites :

- Réglage parfois difficile ;
- Sensibilité aux perturbations complexes ;
- Performances limitées pour systèmes multivariables.[21][29]

II.4 Implémentation de la commande PID sous MATLAB

Afin d'implémenter la commande PID sous l'environnement MATLAB, deux approches peuvent être utilisées.

La première consiste à construire manuellement le régulateur à partir de ses trois actions fondamentales : proportionnelle, intégrale et dérivée, en utilisant les blocs élémentaires de Simulink. [16]

La seconde approche consiste à utiliser directement le bloc standard PID Controller fourni par MATLAB, ce qui simplifie considérablement la mise en œuvre pratique.

Le principe général repose sur une commande en boucle fermée, dans laquelle la sortie du système est comparée à la consigne afin de générer une erreur de commande.

Cette erreur est ensuite traitée par le régulateur PID pour produire le signal de commande appliqué au système.

Cette implémentation constitue une étape essentielle avant l'application du régulateur au modèle du moteur à courant continu étudié dans ce travail.[16]

II.5 Simulation de la commande PID

Des simulations ont été réalisées afin d'évaluer les performances du moteur commandé par un régulateur PID.

Les grandeurs principales observées sont :

- la vitesse angulaire.
- le courant d'induit.
- éventuellement le signal de commande.

Les performances analysées concernent :

- le temps de réponse.
- le dépassement.

- l'erreur statique.
- la stabilité du système.

L'objectif principal est de vérifier la capacité du régulateur PID à améliorer la régulation de vitesse du moteur. [16]

II.6 Commande prédictive MPC

La commande prédictive basée sur modèle, connue sous le nom de Model Predictive Control (MPC), est une stratégie de commande avancée largement utilisée dans les systèmes industriels complexes nécessitant précision, robustesse et prise en compte des contraintes du système.

Contrairement aux méthodes classiques telles que le PID, la commande MPC repose sur un modèle mathématique du système afin de prédire son comportement futur sur un horizon temporel donné.

À chaque instant d'échantillonnage, le contrôleur calcule la séquence optimale de commandes permettant de minimiser une fonction de coût, tout en respectant les contraintes imposées au système.

Grâce à cette approche prédictive, le MPC offre des performances élevées en termes de rapidité, stabilité et robustesse face aux perturbations. [18][19]

II.6.1 Définition de la commande MPC

La commande prédictive MPC est une technique de commande automatique utilisant un modèle mathématique du système afin de prédire son évolution future et de déterminer l'action de commande optimale.

Le principe repose sur la résolution répétitive d'un problème d'optimisation à chaque instant de commande, en tenant compte de l'état actuel du système ainsi que des contraintes physiques éventuelles.

Le MPC est particulièrement adapté aux systèmes dynamiques complexes, multi-variables ou soumis à des perturbations importantes. [18][19]

II.6.2 Principe de fonctionnement de la commande MPC

Le fonctionnement de la commande MPC repose sur plusieurs étapes successives :

- **Mesure de l'état actuel**

Le contrôleur reçoit les informations actuelles du système, telles que la vitesse ou le courant.

- **Prédiction du comportement futur**

À l'aide du modèle mathématique du système, le contrôleur prédit l'évolution future des sorties sur un horizon de prédiction.

- **Optimisation**

Une fonction de coût est minimisée afin de déterminer la meilleure séquence de commande. Cette fonction cherche généralement à :

- Minimiser l'erreur de suivi.
- Limiter l'effort de commande.
- Améliorer la stabilité.

- **Application de la commande**

Seule la première commande calculée est appliquée au système.

- **Répétition du processus**

À l'instant suivant, le calcul est recommencé avec les nouvelles mesures. [18][19]

II.6.3 Exemple explicatif du fonctionnement du MPC

- **Illustration intuitive du principe MPC**

Afin de mieux comprendre le principe de la commande prédictive MPC, on peut comparer son fonctionnement à la conduite d'un véhicule.

Lorsqu'un conducteur conduit une voiture, il n'agit pas uniquement en fonction de la position actuelle du véhicule, mais il anticipe également les événements futurs, tels qu'un virage, un obstacle ou un ralentissement de circulation.

En fonction de cette prédiction, il ajuste à l'avance l'accélération, le freinage ou la direction afin d'optimiser la trajectoire du véhicule.

De manière similaire, la commande MPC utilise un modèle mathématique pour prédire le comportement futur du système et calculer l'action de commande optimale

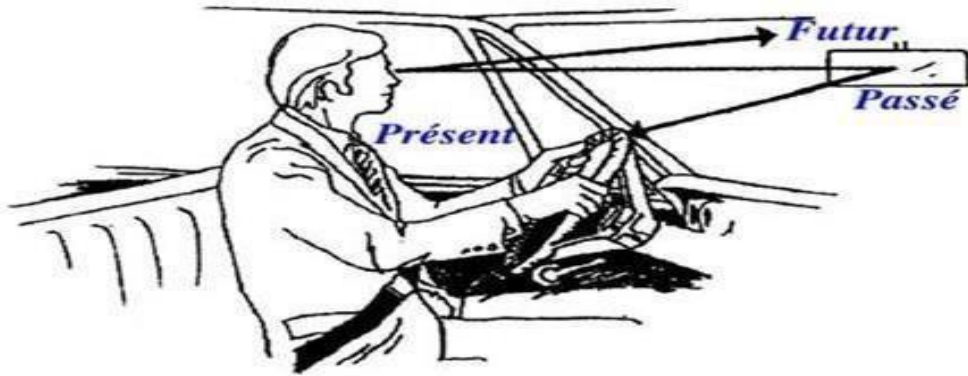


Figure II-1 : Illustration intuitive du principe de la commande MPC
(analogie de conduite automobile).

II.6.4 Modèle mathématique de la commande MPC

La commande prédictive MPC repose sur un modèle mathématique du système, généralement exprimé sous forme d'une représentation d'état. Le modèle discret utilisé par le contrôleur peut s'écrire comme suit : [18]

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (\text{Eq. II.6})$$

où :

- $x(k)$: vecteur d'état.
- $u(k)$: vecteur de commande.
- A : matrice d'état.
- B : matrice d'entrée.

La sortie du système est donnée par : [19]

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (\text{Eq. II.7})$$

où :

- $y(k)$: vecteur de sortie ;
- C : matrice de sortie ;
- D : matrice de transmission directe.

À partir de ce modèle, le contrôleur prédit l'évolution future du système sur un horizon de prédiction N_p .

II.6.5 Horizon de prédiction et horizon de commande

La commande prédictive MPC repose sur le concept de prédiction du comportement futur du système sur un intervalle temporel donné.

Deux paramètres fondamentaux interviennent dans cette approche :

- N_p : horizon de prédiction.
- N_c : horizon de commande. [19][18]

• Horizon de prédiction

L'horizon de prédiction représente le nombre d'instants futurs sur lesquels le contrôleur prédit l'évolution du système.

Il permet d'anticiper le comportement futur des sorties à partir de l'état actuel du système.

Un horizon de prédiction plus long permet généralement une meilleure anticipation, mais augmente la complexité du calcul. [18][19]

• Horizon de commande

L'horizon de commande représente le nombre d'actions de commande optimisées par le contrôleur.

En général :

$$N_c \leq N_p$$

- N_p : horizon de prédiction
- N_c : horizon de commande

Après cet horizon, la commande est supposée constante. [18][19]

II.6.6 Fonction de coût

Afin de déterminer la meilleure commande possible, le MPC minimise une fonction de coût.

Cette fonction permet de quantifier la qualité de la commande en tenant compte de plusieurs objectifs :

- minimiser l'erreur entre la consigne et la sortie ;
- limiter les variations brusques de commande ; améliorer la stabilité globale du système.

Une forme générale de la fonction de coût est : [18] [19]

$$J = \sum_{k=1}^{N_p} (r(k) - y(k))^2 + \lambda \sum_{k=1}^{N_c} \Delta u(k)^2 \quad (\text{Eq I.8})$$

où :

- $r(k)$: consigne
- $y(k)$: sortie prédite.
- $\Delta u(k)$: variation de commande.
- λ : coefficient de pondération.

$$u(k) = u(k - 1) + \Delta u(k) \quad (\text{Eq. II.9})$$

II.6.7 Contraintes du système

L'un des principaux avantages de la commande MPC est sa capacité à prendre en compte les contraintes physiques du système.

Ces contraintes peuvent concerner :

- les limites de tension.
- les limites de courant.
- les limites de vitesse.
- les contraintes mécaniques.

Par exemple : [18]

$$0 \leq V_a \leq 220V \quad (\text{Eq. II.10})$$

$$0 \leq i_a \leq i_{max} \quad (\text{Eq. II.11})$$

Cette capacité constitue un avantage majeur par rapport aux régulateurs classiques comme le PID.

II.6.8 Processus d'optimisation dans la commande MPC

L'optimisation constitue le cœur fondamental de la commande prédictive MPC.

À chaque instant d'échantillonnage, le contrôleur résout un problème d'optimisation afin de déterminer la meilleure séquence de commande permettant d'obtenir les performances souhaitées.

L'objectif principal de cette optimisation est de trouver un compromis entre :

- La précision du suivi de consigne ;
- La réduction de l'effort de commande ;
- Le respect des contraintes physiques du système.

Le contrôleur évalue plusieurs scénarios possibles de commande, prédit leurs effets futurs sur le comportement du système, puis sélectionne la solution optimale minimisant la fonction de coût.

Cette opération est répétée en temps réel à chaque nouvelle mesure du système.

II.6.9 Avantages et limites de la commande MPC

La commande prédictive MPC présente plusieurs avantages significatifs qui expliquent son utilisation croissante dans les applications industrielles modernes.

- **Avantages :**

a) Précision élevée

Grâce à la prédiction basée sur un modèle mathématique, le MPC offre une régulation précise et un excellent suivi de consigne.

b) Anticipation du comportement futur

Contrairement aux méthodes classiques réactives, le MPC anticipe l'évolution future du système avant de prendre une décision.

c) Gestion des contraintes

Le MPC permet d'intégrer directement les limites physiques du système :

- Tension.
- Courant.
- Vitesse.
- Contraintes mécaniques.

d) Bonne robustesse face aux perturbations

Le contrôleur peut mieux gérer les variations de charge et les perturbations externes.

e) Adapté aux systèmes complexes

Le MPC est particulièrement efficace pour :

- Systèmes multivariables.
- Systèmes dynamiques complexes.
- Systèmes industriels avancés. [22][27]

f) Limites

Malgré ses nombreux avantages, la commande MPC présente certaines limitations.

g) Complexité de calcul

Le processus d'optimisation nécessite une puissance de calcul plus importante.

h) Dépendance au modèle

Les performances du MPC dépendent fortement de la qualité du modèle mathématique utilisé.

i) Implémentation plus complexe

Sa mise en œuvre est plus difficile qu'un régulateur classique PID. [22]

II.7 Implémentation de la commande MPC sous MATLAB

L'implémentation de la commande prédictive MPC sous MATLAB peut être réalisée à l'aide du bloc standard MPC Controller fourni par l'environnement MATLAB.

Contrairement aux régulateurs classiques, le contrôleur MPC nécessite un modèle mathématique du système, généralement sous forme de représentation d'état.

Le fonctionnement général repose sur une structure en boucle fermée dans laquelle :

- La consigne est fournie au contrôleur.
- Le modèle du système permet la prédiction.
- Le contrôleur calcule la commande optimale.
- La sortie mesurée est réinjectée par rétroaction.

Cette structure permet de représenter le principe général du fonctionnement du MPC avant son application au moteur à courant continu étudié dans ce travail. [19]

II.8 Simulation de la commande MPC

Des simulations ont été réalisées afin d'évaluer les performances du moteur commandé par la stratégie MPC.

Les performances observées concernent :

- la vitesse angulaire ;
- le courant d'induit ;
- le signal de commande ;
- la robustesse face aux perturbations.

Les critères d'analyse sont :

- temps de réponse ;
- dépassement ;
- précision ;
- stabilité ;
- respect des contraintes.

L'objectif principal est de comparer les performances du MPC avec celles du régulateur PID.

[19]

II.9 Comparaison préliminaire entre la commande PID et la commande MPC

Après l'étude théorique et la simulation des deux stratégies de commande, une comparaison préliminaire peut être établie entre la commande PID et la commande prédictive MPC.

Le tableau suivant présente les principales différences entre les deux méthodes :

Tableau II-2 : Comparaison entre la commande PID et la commande MPC.[24][25][28]

Critère	Commande PID	Commande MPC
Principe	Réaction à l'erreur actuelle	Prédiction du comportement futur
Complexité	Simple	Élevée

Implémentation	Facile	Plus complexe
Modèle mathématique requis	Pas nécessairement	Oui
Gestion des contraintes	Limitée	Excellente
Robustesse aux perturbations	Moyenne	Bonne
Temps de calcul	Faible	Plus élevé
Adaptation aux systèmes complexes	Limitée	Très bonne
Performance globale	Bonne	Excellente

II.10 Conclusion

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté l'étude des stratégies de commande appliquées au moteur à courant continu à excitation séparée.

Dans un premier temps, les principes fondamentaux des systèmes de commande ont été introduits, avec une distinction entre les systèmes en boucle ouverte et en boucle fermée, ainsi que l'importance du feedback dans la régulation automatique.

Ensuite, la commande PID a été étudiée à travers sa définition, sa structure, ses différentes actions (proportionnelle, intégrale et dérivée), ainsi que son implémentation sous MATLAB.

Par la suite, la commande prédictive MPC a été présentée comme une méthode de commande avancée basée sur un modèle mathématique du système, la prédiction du comportement futur et un processus d'optimisation.

Une comparaison théorique entre les deux méthodes a permis de mettre en évidence les avantages du MPC en termes de précision, robustesse et gestion des contraintes, malgré une complexité plus importante.[26][30]

Chapitre II:Études des commandes PID et MPC en vue de les appliquer au moteur à courant continu à excitation séparée

Le chapitre suivant sera consacré à l'analyse comparative des performances des deux commandes en présence de perturbations appliquées au moteur.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

III.1 Introduction :

Après avoir étudié la modélisation du moteur à courant continu à excitation séparée ainsi que les principes des commandes PID et MPC dans les chapitres précédents, il est désormais nécessaire d'évaluer le comportement du système en boucle fermée.

Dans ce chapitre, les contrôleurs PID et MPC sont d'abord couplés au modèle du moteur afin d'assurer la régulation de sa vitesse. Une fois l'architecture de commande mise en place, différentes perturbations sont appliquées au système afin d'analyser leur influence sur les performances dynamiques du moteur.

L'étude porte notamment sur les perturbations mécaniques, électriques et paramétriques susceptibles d'apparaître lors du fonctionnement réel du moteur, la stabilité et la précision des deux stratégies de commande.

Enfin, une comparaison détaillée des performances obtenues avec les commandes PID et MPC est présentée afin de mettre en évidence les avantages et les limites de chacune d'elles dans un environnement perturbé.

III.2 Couplage du contrôleur PID avec le moteur MCC

Afin d'évaluer les performances du régulateur PID dans la commande de vitesse du moteur à courant continu à excitation séparée, le contrôleur PID a été couplé au modèle du moteur développé au chapitre précédent. Le système est configuré en boucle fermée, où la vitesse réelle du moteur est continuellement mesurée et comparée à une vitesse de référence. L'erreur obtenue est traitée par le régulateur PID qui génère la tension d'induit nécessaire pour corriger le comportement du moteur et assurer le suivi de la consigne. Cette structure permet d'améliorer la précision de régulation, de réduire l'erreur statique et de maintenir la stabilité du système lors des différentes conditions de fonctionnement.

III.2.1 Schéma Simulink du système PID-MCC

Afin d'étudier le comportement du moteur à courant continu en boucle fermée, nous avons implémenté un régulateur PID sous MATLAB et l'avons couplé au modèle du moteur. Cette structure permet d'assurer le suivi de la vitesse de référence tout en améliorant les performances

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Dynamiques du système. Le schéma global de la commande PID appliquée au moteur à courant continu est présenté par la figure III.1

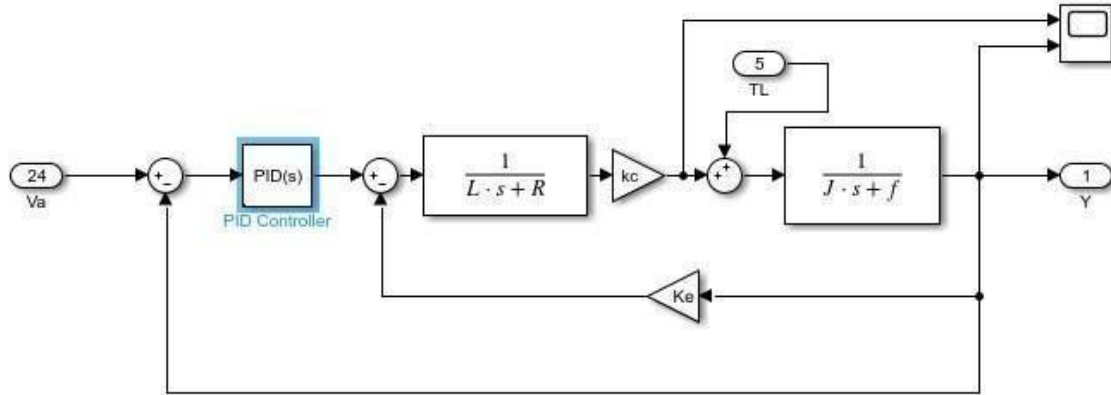


Figure III-1 : schéma Simulink de commande PID appliqué au MCC

Le schéma de la Figure III.1 représente l'association du régulateur PID avec le modèle du moteur à courant continu à excitation séparée.

III.2.2 Paramètres du régulateur PID (script)

Afin de déterminer les paramètres du régulateur PID, nous avons développé un programme sous MATLAB permettant de simuler le comportement dynamique du moteur à courant continu à excitation séparée. Après plusieurs essais et ajustements des gains du contrôleur, nous avons retenu les valeurs assurant un suivi rapide de la consigne avec un faible dépassement et une bonne stabilité. Les paramètres finalement adoptés sont présentés dans le tableau III.1

Tableau III-1 : Paramètres du régulateur PID

Paramètre	Valeur
Kp	0.038 v/(rad/s)
Ki	5 v/rad
Kd	0.000005 V·s ² /rad

III.2.3 Résultats de programmation

Afin d'évaluer les performances du régulateur PID, nous avons réalisé plusieurs simulations sous MATLAB en appliquant une consigne de vitesse de 1000 rad/s ainsi qu'un couple de

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Charge perturbateur de 0,05 N.m introduit à l'instant $t = 0,05$ s. Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes de la figure III.2.

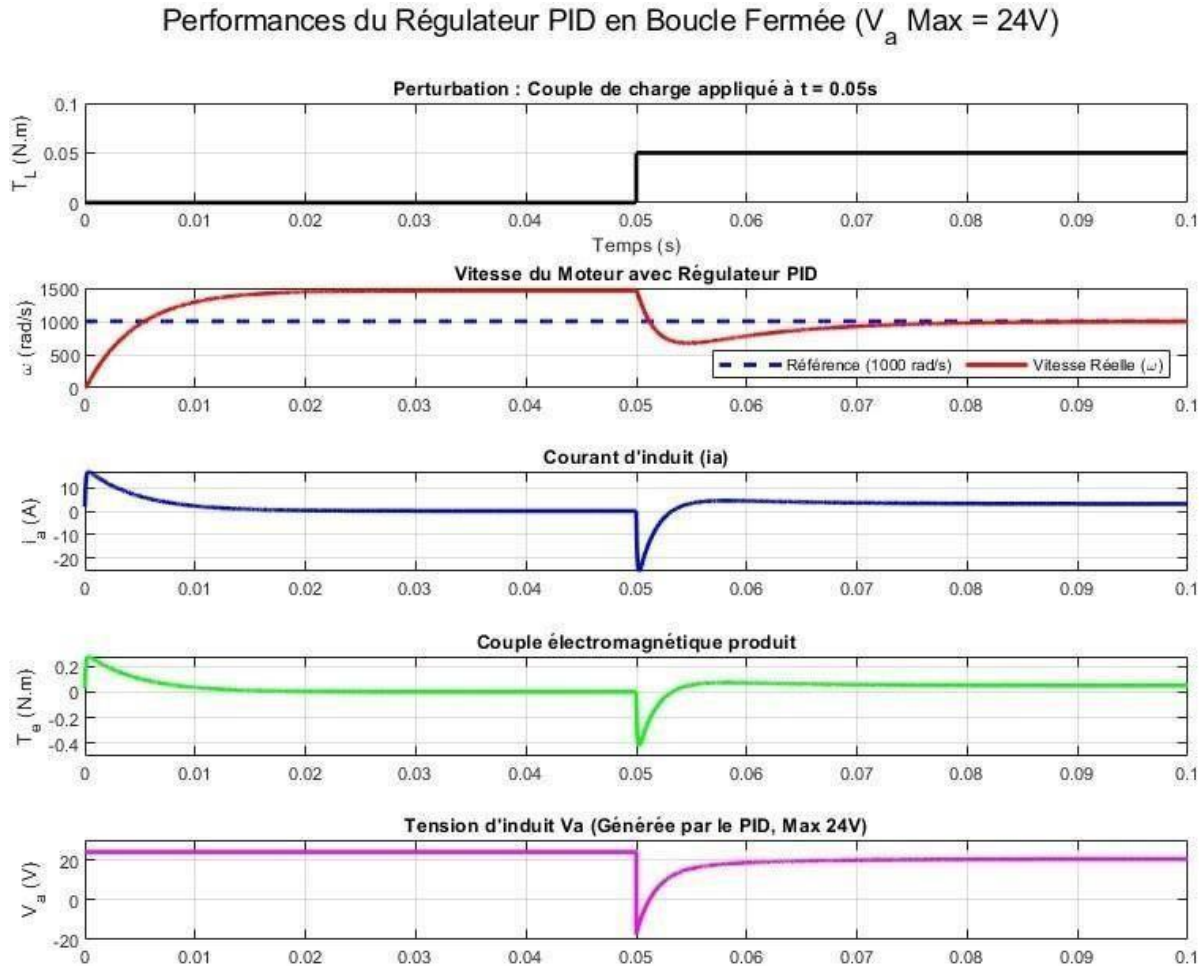


Figure III-2 : Réponse du moteur MCC commandé par un régulateur PID en présence d'une perturbation de charge.

III.2.4 Analyse des résultats

Les simulations que nous avons réalisées montrent que le régulateur PID assure un suivi rapide et précis de la vitesse de référence fixée à 1000 rad/s. Nous avons observé que la vitesse du moteur atteint la consigne en environ 0,01 s avec un dépassement très faible.

Nous avons également constaté qu'au démarrage, le courant d'induit atteint une valeur voisine de 18 A avant de diminuer progressivement jusqu'à une valeur proche de 0 A le moteur atteint son régime permanent.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

À l'instant $t = 0,05$ s, nous avons appliqué un couple de charge perturbateur de $0,05$ N.m. Nous avons observé une légère diminution de la vitesse qui passe momentanément d'environ 1000 rad/s à près de 950 rad/s, avant de retrouver rapidement sa valeur de référence grâce à l'action du régulateur PID.

Nous avons remarqué aussi une augmentation du courant d'induit ainsi que de la tension d'alimentation appliquée au moteur, le courant passant d'une valeur voisine de 0 A à environ 3 A, tandis que la tension d'induit augmente d'environ 17 V à près de 20 V afin de compenser l'effet de la perturbation.

Nous avons constaté que le couple électromagnétique produit par le moteur augmente après l'application de la charge et atteint une valeur proche de $0,05$ N.m, ce qui permet d'équilibrer le couple résistant imposé et d'assurer le maintien de la vitesse autour de la consigne.

Les résultats que nous avons obtenus montrent ainsi que le régulateur PID permet de maintenir la stabilité du système et d'assurer une bonne précision de suivi malgré la présence d'une perturbation mécanique.

III.3 Couplage du contrôleur MPC avec le moteur MCC

Nous avons mené une étude avec la commande prédictive MPC, pour évaluer les performances de cette commande sur la vitesse du moteur à courant continu à excitation séparée.

Contrairement au régulateur PID, le contrôleur MPC utilise un modèle mathématique du système afin de prédire l'évolution future de la vitesse du moteur sur un horizon de prédiction donné. A chaque instant d'échantillonnage, une commande optimale est calculée afin de minimiser l'erreur de suivi tout en respectant les contraintes imposées au système.

Cette approche permet d'améliorer les performances dynamiques du moteur et d'augmenter sa robustesse face aux perturbations et aux variations des conditions de fonctionnement.

III.3.1 Schéma Simulink du système MPC-MCC

Nous avons implémenté le contrôleur prédictif MPC sous MATLAB et l'avons couplé au modèle du moteur. Le schéma global du contrôleur MPC appliqué au moteur à courant continu est présenté par la figure III.3.

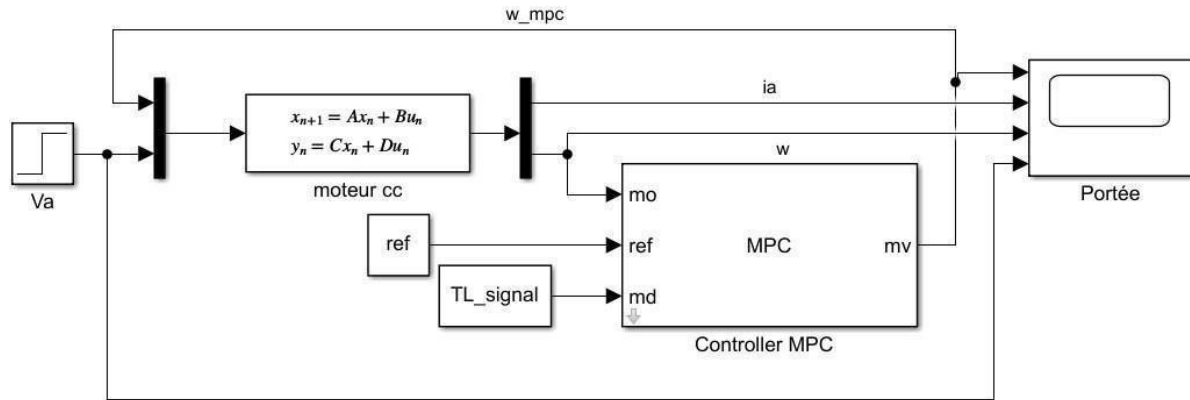


Figure III-3 : schéma Simulink de commande MPC appliqué au MCC

Le schéma de la Figure III-3 représente l'association du contrôleur prédictif MPC avec le modèle du moteur à courant continu à excitation séparée.

III.3.2 Paramètres du régulateur MPC

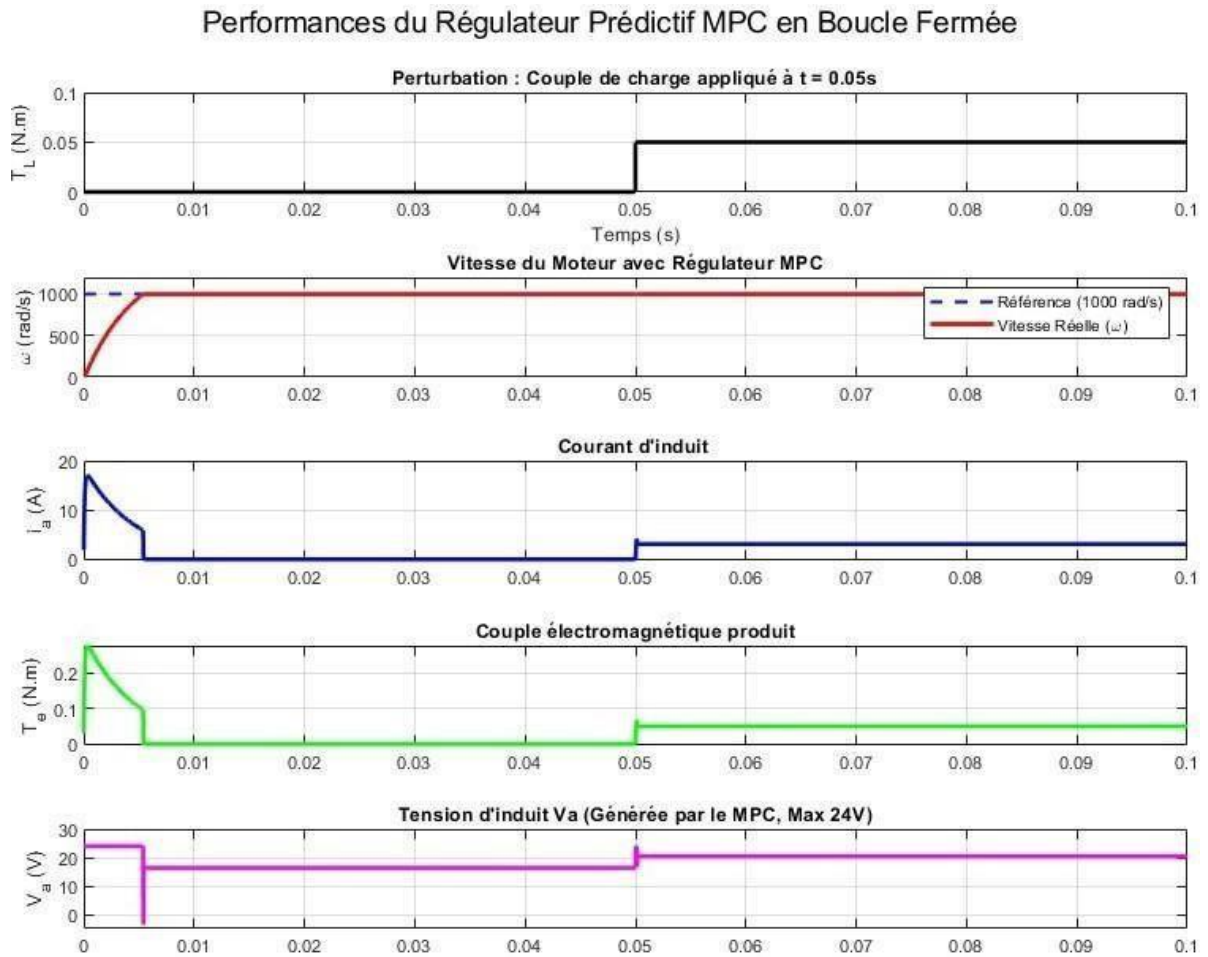
Afin de configurer le contrôleur prédictif MPC, nous avons développé un programme sous MATLAB basé sur le modèle discret du moteur. Les horizons de prédiction et de commande ainsi que les matrices de pondération ont été choisis de manière à obtenir un bon compromis entre rapidité de réponse et robustesse face aux perturbations. Les paramètres retenus sont présentés dans le tableau III.2.

Tableau III-2 : Paramètres du contrôleur MPC

Paramètre	Valeur
Np	20 s
Nc	5 s
Q	1000 rad/s
R	0.5 Ω

III.3.3 Résultats de programmation

Afin d'évaluer les performances du contrôleur prédictif MPC, nous avons réalisé plusieurs modélisations sous MATLAB en imposant une vitesse de référence égale à 1000 rad/s. Nous avons également appliqué un couple de charge perturbateur de 0,05 N.m à l'instant $t = 0,05$ s afin d'étudier la robustesse du système. Les résultats obtenus sont présentés par les courbes de la figure III.4.



III.3.4 Analyse des résultats

Les simulations que nous avons réalisées montrent que le contrôleur prédictif MPC assure un suivi rapide et précis de la vitesse de référence fixée à 1000 rad/s. Nous avons observé que la vitesse du moteur atteint la consigne après environ 0,005 s avec un dépassement pratiquement nul.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Nous avons également constaté qu'au démarrage, le courant d'induit atteint une valeur voisine de 18 A avant de décroître progressivement vers une valeur proche de 0 A lorsque le moteur atteint son régime permanent.

À l'instant $t = 0,05$ s, nous avons appliqué un couple de charge perturbateur de 0,05 N.m. Nous avons observé une légère diminution de la vitesse, qui passe momentanément d'environ 1000 rad/s à près de 980 rad/s, avant de retrouver très rapidement sa valeur de référence grâce à la stratégie prédictive du contrôleur MPC.

Une augmentation du courant d'induit ainsi que de la tension d'alimentation appliquée au moteur menée par le MPC afin de compenser l'effet de la perturbation. Le courant d'induit augmente momentanément jusqu'à une valeur voisine de 2 A, tandis que la tension d'induit passe d'environ 17 V à près de 19 V.

Nous avons remarqué que le couple électromagnétique produit par le moteur augmente après l'application de la charge et atteint une valeur proche de 0,05 N.m, ce qui permet de compenser efficacement le couple résistant appliqué tout en maintenant la vitesse proche de la consigne.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que la commande MPC permet d'assurer une meilleure précision de suivi et une plus grande rapidité de correction face aux perturbations. Grâce à son caractère prédictif, elle offre une réponse plus stable et un comportement dynamique plus performant que celui obtenu avec le régulateur PID.

III.4 Présentation des perturbations appliquées au moteur

Les perturbations constituent des signaux ou des phénomènes indésirables susceptibles de modifier le comportement nominal d'un système dynamique. Dans le domaine de la commande des moteurs électriques, elles peuvent provoquer des écarts entre la consigne souhaitée et la réponse réelle du système. L'étude des perturbations est donc essentielle pour évaluer la robustesse d'une stratégie de commande et sa capacité à maintenir les performances du système mal-gré les variations des conditions de fonctionnement.

Nous avons appliqué plusieurs perturbations au moteur à courant continu afin d'analyser leur impact sur la vitesse de rotation et d'évaluer les performances des commandes PID et MPC. Ces

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Perturbations comprennent des variations de la tension d'alimentation, des perturbations mécaniques ainsi que des modifications de certains paramètres du moteur.

III.4.1 Définition d'une perturbation

Une perturbation est une action externe ou interne non désirée qui influence le comportement d'un système sans faire partie de la commande principale. Elle peut modifier les variables d'état du système et entraîner une dégradation de ses performances. Dans le cas d'un moteur à courant continu, une perturbation peut provoquer une variation de la vitesse, du courant ou du couple, ce qui peut éloigner le système de son point de fonctionnement souhaité.

L'objectif d'un système de commande performant est de réduire l'effet de ces perturbations afin de maintenir la stabilité, la précision et la qualité de la réponse du système.

III.4.2 Types de perturbations possibles

Dans les systèmes de commande des moteurs à courant continu, plusieurs types de perturbations peuvent apparaître et influencer le comportement dynamique du système. Ces perturbations peuvent être classées en différentes catégories selon leurs origines et leurs natures.

Les principales perturbations rencontrées sont :

- Les perturbations électriques : elles sont liées aux variations de la tension d'alimentation ou du courant électrique alimentant le moteur.
- Les perturbations mécaniques : elles résultent généralement des variations de charges appliquées à l'arbre du moteur et peuvent prendre différentes formes (échelon, sinusoïdale, transitoire, etc.).
- Les perturbations paramétriques : elles correspondent aux variations des paramètres internes du moteur, tels que la résistance de l'induit, l'inductance ou le moment d'inertie.

L'étude de ces perturbations permet d'évaluer la robustesse des stratégies de commande et leur capacité à maintenir les performances du moteur malgré les variations des conditions de fonctionnement.

III.4.3 Perturbations étudiées

Nous avons retenu six perturbations afin d'évaluer la robustesse des commandes PID et MPC appliquées au moteur à courant continu. Ces perturbations (tableau III-3) représentent différentes situations susceptibles d'apparaître lors du fonctionnement réel du système.

Tableau III-3 : Perturbations étudiées

Type de perturbation	Perturbation étudiée
Perturbation électrique	Chute de tension d'alimentation
Perturbation mécanique	Charge mécanique échelon
Perturbation mécanique	Charge mécanique sinusoïdale
Perturbation mécanique	Charge mécanique transitoire
Perturbation paramétrique	Variation de la résistance d'induit (R_a)
Perturbation paramétrique	Variation du moment d'inertie (J)

III.5 Étude des perturbations

III.5.1 Chute de tension d'alimentation

III.5.1.1 Description de la perturbation

La chute de tension d'alimentation représente une perturbation électrique fréquemment rencontrée dans les systèmes industriels. Elle peut être causée par des variations du réseau électrique, des pertes dans les câbles ou une surcharge de l'alimentation. Cette perturbation réduit l'énergie fournie au moteur et peut entraîner une diminution de sa vitesse ainsi qu'une dégradation de ses performances dynamiques. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de cette perturbation sur le moteur à courant continu et d'analyser la capacité des contrôleurs PID et MPC à compenser ses effets. Le tableau III-4 représente des paramètres de chute de tension d'alimentation.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Tableau III-4 : paramètres de chute de tension d'alimentation

Paramètre	Valeur
Tension initiale	24 V
Tension après perturbation	12 V
Instant d'application	0.05 s
Couple de charge appliqué	0.012 N.m

III.5.1.2 Résultats sans commande

Afin d'étudier l'influence d'une chute de tension d'alimentation sur le comportement du moteur à courant continu en boucle ouverte, nous avons développé un programme sous MATLAB permettant de réduire la tension d'induit de 24 V à 12 V à l'instant $t = 0,05$ s. Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes de la figure III.5.

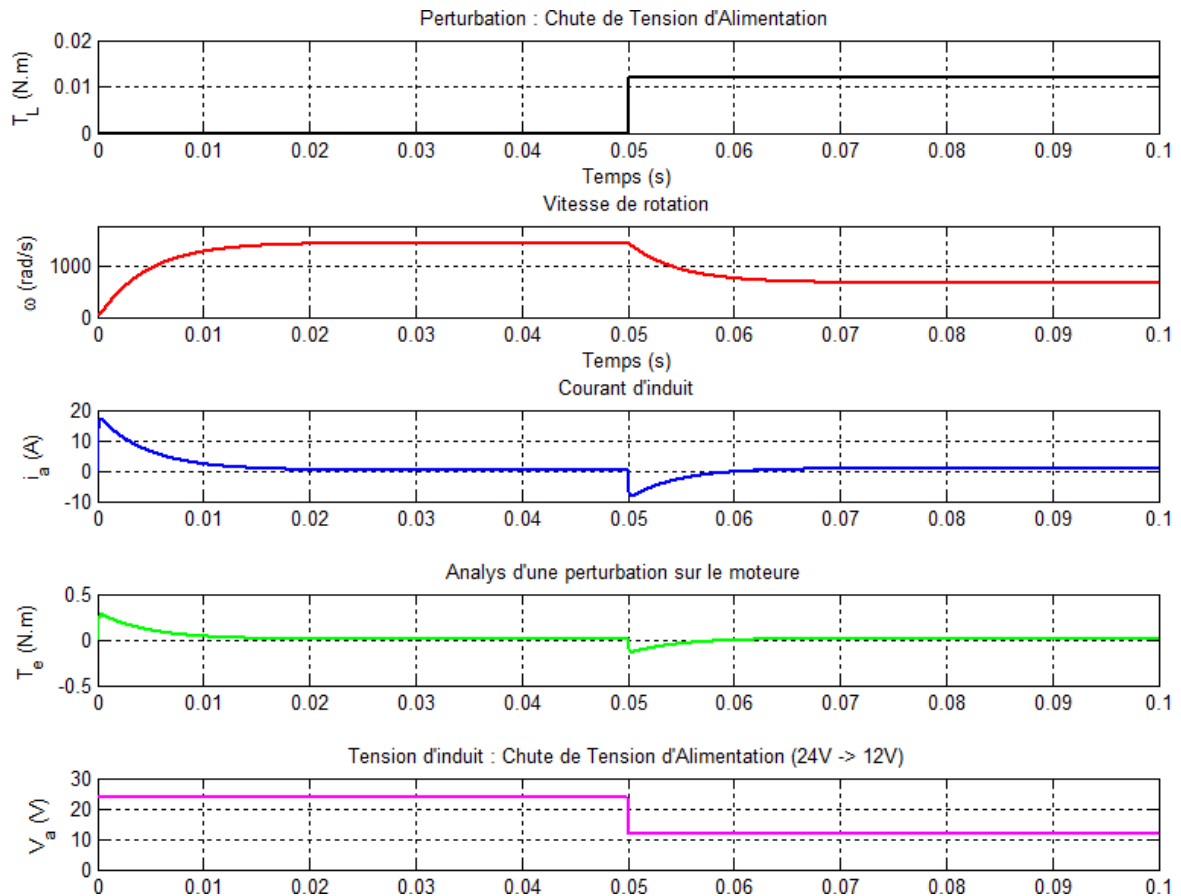


Figure III-5 : Réponse du moteur MCC à une chute de tension d'alimentation sans commande.

- **Analyse des résultats**

Les simulations que nous avons réalisées montrent qu'avant l'application de la perturbation, le moteur atteint une vitesse proche de 1400 rad/s sous une tension d'alimentation constante de 24

V. Nous avons également observé que le courant d'induit diminue progressivement d'environ 18 A au démarrage jusqu'à une valeur proche de 0 A lorsque le moteur atteint son régime permanent.

À l'instant $t = 0,05$ s, nous avons appliqué une chute de tension d'alimentation de 24 V à 12 V. Nous avons constaté que cette perturbation provoque une diminution importante de la vitesse de rotation, qui passe d'environ 1400 rad/s à une valeur voisine de 800 rad/s

Nous avons également remarqué que le courant d'induit devient négatif juste après l'application de la perturbation, atteignant une valeur minimale proche de -8 A, avant de revenir progressivement vers une valeur proche de 2 A. De même, le couple électromagnétique diminue fortement en passant d'une valeur proche de 0 N.m à environ -0,10 N.m, ce qui traduit une diminution de la capacité du moteur à fournir le couple nécessaire.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que le moteur en boucle ouverte est fortement sensible aux variations de la tension d'alimentation et qu'il ne possède aucun mécanisme permettant de maintenir la vitesse autour de sa valeur nominale.

III.5.1.3 Résultats avec PID et MPC

Afin d'évaluer les performances des contrôleurs PID et MPC face à une chute de tension d'alimentation, nous avons implémenté les deux stratégies de commande sous MATLAB et comparé leurs comportements avec celui du moteur en boucle ouverte. Les résultats obtenus sont présentés par les courbes de la figure III.6.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

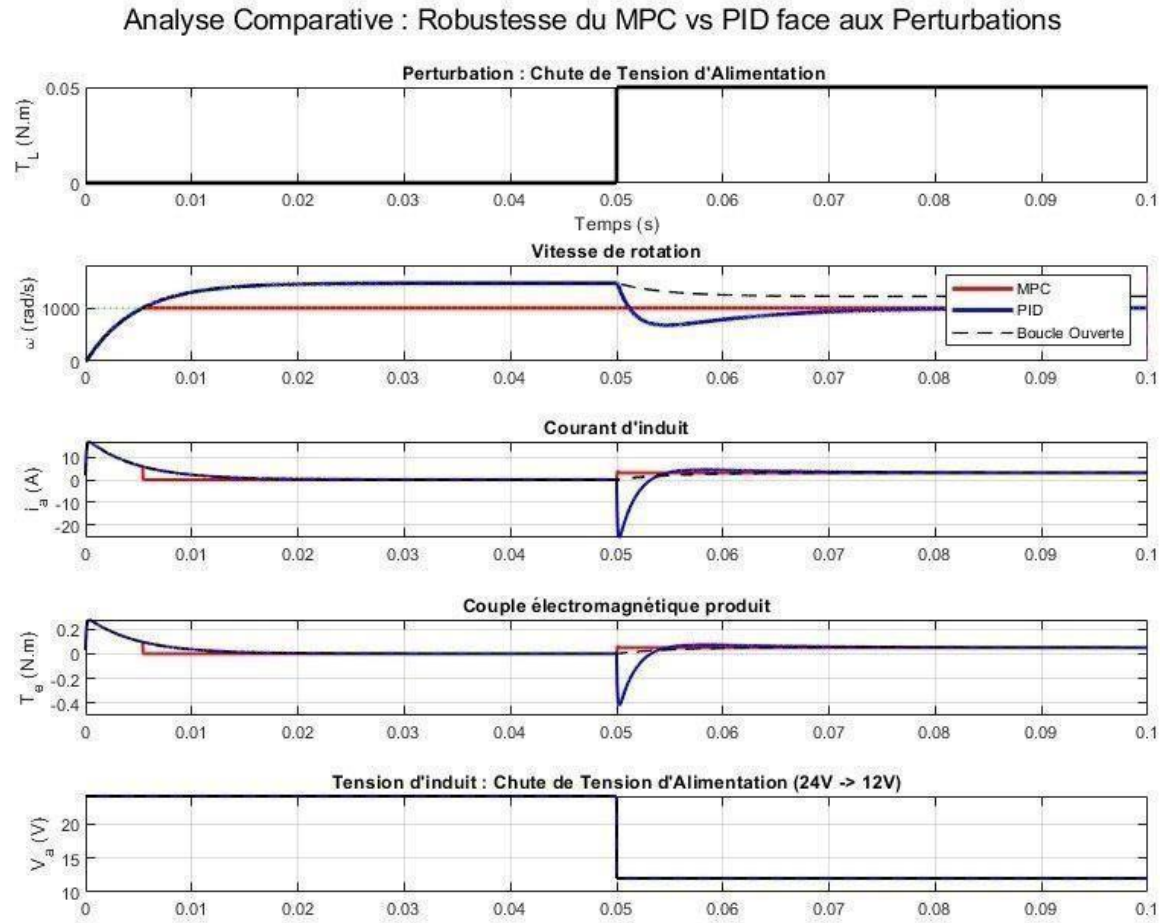


Figure III-6 : Comparaison des performances des contrôleurs PID et MPC face à une chute de tension d'alimentation.

• Analyse des résultats

Les simulations que nous avons réalisées montrent que les deux stratégies de commande permettent d'améliorer les performances du moteur par rapport au fonctionnement en boucle ouverte.

Nous avons observé qu'avant l'application de la perturbation, les deux contrôleurs assurent un suivi satisfaisant de la vitesse de référence fixée à 1000 rad/s.

À l'instant $t = 0,05$ s, nous avons introduit une chute de tension d'alimentation de 24 V à 12 V. Nous avons constaté qu'en boucle ouverte, cette perturbation entraîne une diminution importante de la vitesse, qui passe d'environ 1400 rad/s à près de 1200 rad/s. En revanche, avec

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Les commandes PID et MPC, la vitesse reste proche de la consigne et ne descend qu'à environ 900 rad/s avec le PID et 980 rad/s avec le MPC.

Nous avons également remarqué que le courant d'induit présente une variation importante après la perturbation, atteignant une valeur minimale voisine de -20 A avec le PID, alors que la ré-ponse du MPC reste plus modérée et plus stable.

En comparant les résultats obtenus, nous pouvons confirmer que la commande MPC présente une meilleure robustesse et une meilleure précision de régulation que la commande PID. Et cela grâce à sa capacité d'anticipation, qui permet de réduire davantage les variations de vitesse et d'améliorer la stabilité du système face aux perturbations électriques.

III.5.2 Charge mécanique de type échelon

III.5.2.1 Description de la perturbation

La charge mécanique échelon représente une perturbation mécanique fréquemment rencontrée dans les systèmes électromécaniques. Elle correspond à l'application soudaine d'un couple résistant sur l'arbre du moteur. Cette perturbation permet d'évaluer la capacité du système à maintenir ses performances lorsque la charge augmente brusquement. Afin de réaliser cette étude, nous avons développé un programme sous MATLAB permettant d'appliquer la perturbation considérée au modèle du moteur à courant continu à excitation séparée. Les paramètres de simulation retenus pour cette étude sont présentés dans le tableau III-5

Tableau III-5 : paramètres de charge mécanique échelon

Paramètre	Valeur
Tension d'alimentation	24 V
Couple de charge initial	0 N.m
Couple de charge appliqué	0.05 N.m
Instant d'application	0.05 s

III.5.2.2 Résultats sans commande

Afin d'étudier l'influence d'une charge mécanique échelon sur le comportement du moteur en boucle ouverte, nous avons développé un programme sous MATLAB permettant d'appliquer

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

un couple de charge de 0,05 N.m à l'instant $t = 0,05$ s. Les résultats obtenus sont présentés par les courbes de la figure III-7

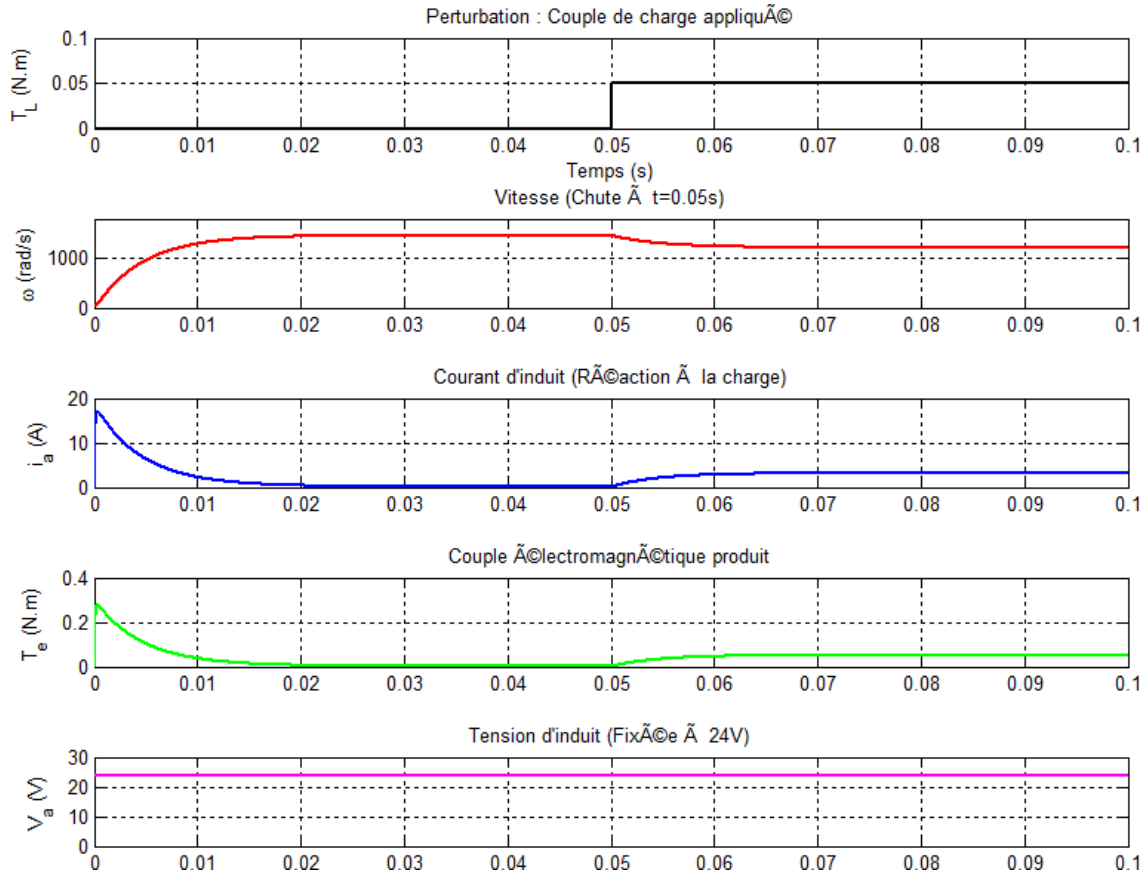


Figure III-7 : Réponse du moteur MCC à une charge mécanique échelon sans commande.

• Analyse des résultats

Les simulations montrent qu'avant l'application de la perturbation, le moteur accélère progressivement et atteint une vitesse voisine de 1400 rad/s. Nous avons aussi observé que le courant d'induit atteint une valeur maximale proche de 18 A au démarrage avant de décroître progressivement vers une valeur voisine de 0 A en régime permanent.

À l'instant $t = 0,05$ s, nous avons appliqué un couple de charge de 0,05 N.m. Nous avons remarqué une diminution brutale de la vitesse de rotation, qui passe d'environ 1400 rad/s à une valeur proche de 1200 rad/s, traduisant l'effet de la charge mécanique sur le système.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Une augmentation du courant d'induit est obtenue, passant d'une valeur proche de 0 A à environ 3 A, ainsi qu'une augmentation du couple électromagnétique qui atteint une valeur voisine de 0,05 N.m afin de compenser partiellement l'effet de la perturbation.

Les résultats que nous avons obtenus montrent qu'en boucle ouverte, le moteur demeure sensible aux variations de charge et ne parvient pas à retrouver sa vitesse initiale.

III.5.2.3 Résultats avec PID et MPC

Nous avons implémenté les deux stratégies de commande sous MATLAB et comparé leurs réponses avec celle obtenue en boucle ouverte pour la perturbation de type échelon. Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes de la figure III-8.

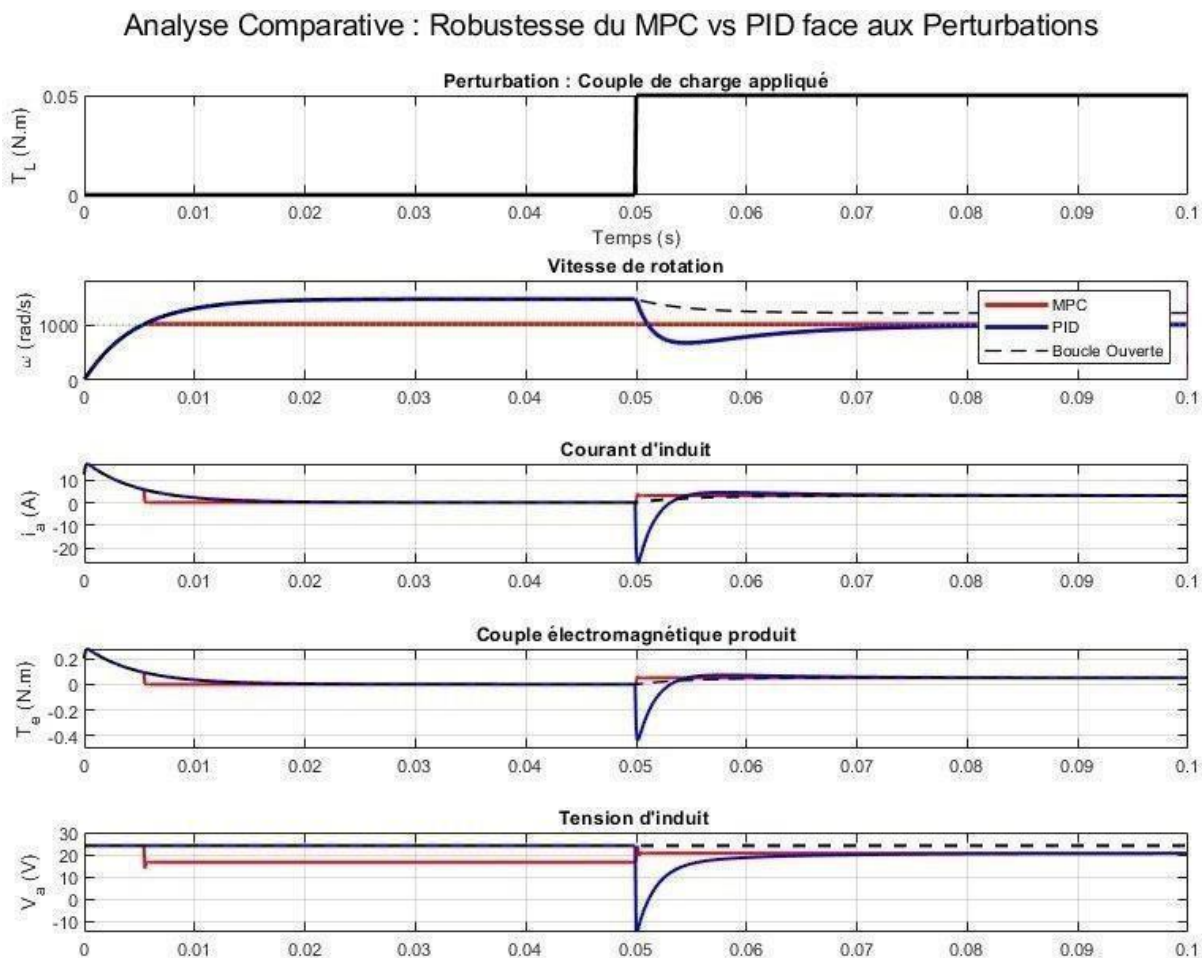


Figure III-8 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une perturbation de charge mécanique échelon appliquée à $t=0,05$ s

III.5.2.4 Analyse comparative des résultats

Les simulations montrent que les deux stratégies de commande améliorent considérablement le comportement du moteur face à une charge mécanique échelon.

Nous avons observé qu'avant l'application de la perturbation, les deux contrôleurs assurent un suivi satisfaisant de la vitesse de référence fixée à 1000 rad/s.

À l'instant $t = 0,05$ s, nous avons appliqué un couple de charge de 0,05 N.m. Nous avons constaté qu'en boucle ouverte, la vitesse chute jusqu'à une valeur proche de 1200 rad/s. En présence du régulateur PID, la vitesse ne descend qu'à environ 950 rad/s, tandis qu'avec la commande MPC, elle reste voisine de 980 rad/s avant de revenir rapidement à la consigne.

Nous avons également remarqué que le courant d'induit augmente afin de fournir le couple électromagnétique nécessaire à la compensation de la charge appliquée. Celui-ci atteint environ 3 A avec la commande PID, alors qu'il reste légèrement plus faible et plus progressif avec la commande MPC.

Nous pouvons conclure que la commande MPC assure une meilleure robustesse et une meilleure précision de suivi que la commande PID. Grâce à sa capacité de prédiction, elle permet de limiter davantage les variations de vitesse et d'améliorer la stabilité du système face aux perturbations mécaniques.

III.5.3 Charge mécanique sinusoïdale

III.5.3.1 Description de la perturbation

La perturbation sinusoïdale représente une charge mécanique variable appliquée à l'arbre du moteur sous forme périodique. Ce type de perturbation permet de reproduire certaines conditions réelles de fonctionnement où le couple résistant varie continuellement dans le temps. Dans cette étude, nous avons développé un programme sous MATLAB permettant d'appliquer une charge mécanique sinusoïdale au modèle du moteur à courant continu à excitation séparée. Les paramètres de simulation retenus pour cette étude sont présentés dans le tableau III-6.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Tableau III-6 : Paramètres de charge mécanique sinusoïdale

Paramètre	Valeur
Tension d'alimentation	24 V
Instant d'application de la perturbation	0.05 s
Type de perturbation	Charge mécanique sinusoïdale
Couple moyen de charge	0.02 N.m
Amplitude de la perturbation	0.05 N.m
Fréquence de la perturbation	50 Hz
Durée de simulation	III.5 s

III.5.3.1 Résultats sans commande

Afin d'étudier l'influence d'une charge mécanique sinusoïdale sur le comportement du moteur en boucle ouverte, nous avons réalisé plusieurs simulations sous MATLAB en appliquant une perturbation périodique de fréquence 50 Hz à partir de l'instant $t = 0,05$ s. Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes de la figure III-9.

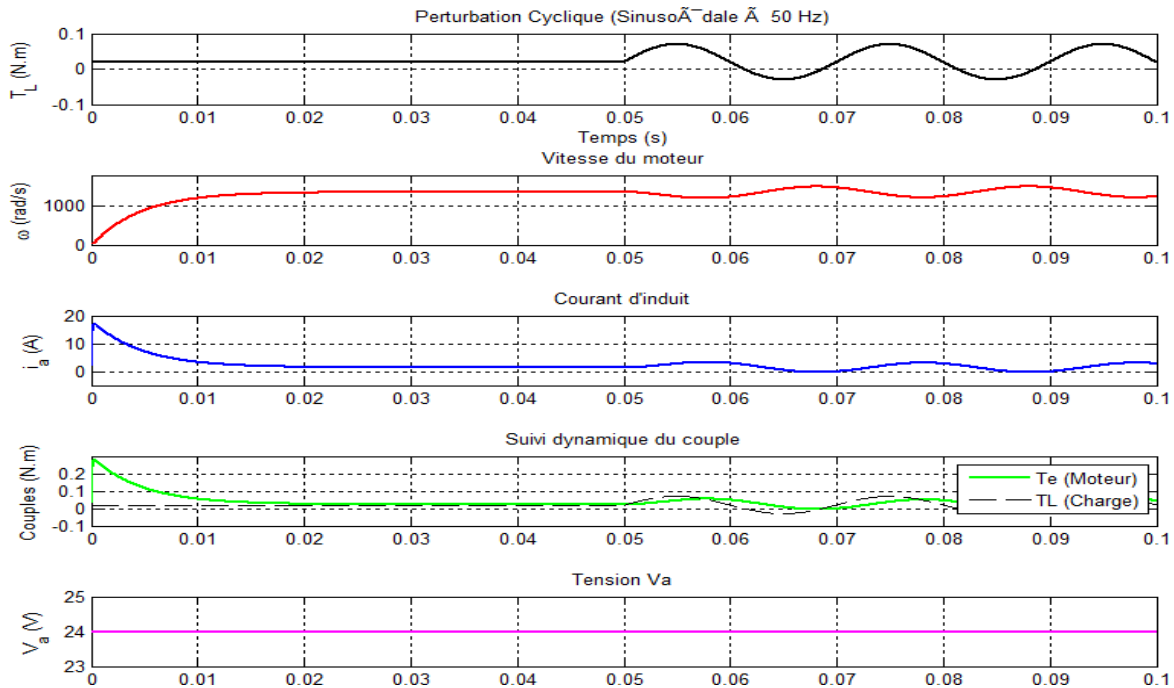


Figure III-9 : Réponse du moteur MCC soumis à une perturbation mécanique sinusoïdale en boucle ouverte.

- **Analyse des résultats**

Les simulations montrent qu'avant l'application de la perturbation, le moteur accélère progressivement et atteint une vitesse voisine de 1500 rad/s sous une tension d'alimentation constante de 24 V. Nous avons également observé que le courant d'induit atteint une valeur maximale proche de 18 A au démarrage avant de décroître progressivement vers une valeur voisine de 0 A en régime permanent.

À l'instant $t = 0,05$ s, nous avons appliqué une charge mécanique sinusoïdale de fréquence 50 Hz. Nous avons constaté que la vitesse du moteur commence à osciller autour de sa valeur nominale avec des variations comprises entre environ 1200 rad/s et 1500 rad/s sous l'effet des fluctuations périodiques du couple résistant.

Nous avons aussi observé que le courant d'induit présente des oscillations périodiques dont l'amplitude varie entre environ 0 A et 3 A. Le couple électromagnétique produit par le moteur

Suit lui aussi les variations du couple de charge et oscille autour d'une valeur voisine de 0,05 N.m afin de maintenir l'équilibre dynamique du système.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que le moteur fonctionnant en boucle ouverte est sensible aux perturbations périodiques. Les oscillations observées au niveau de la vitesse et du courant traduisent l'absence d'un mécanisme de compensation capable de maintenir une vitesse constante.

III.5.3.3 Résultats avec PID et MPC

Afin d'évaluer l'efficacité des commandes PID et MPC face à une charge mécanique sinusoïdale, nous avons réalisé des simulations sous MATLAB/Simulink en appliquant une perturbation périodique de fréquence 50 Hz à partir de l'instant $t = 0,05$ s. Les courbes obtenues, présentées à la figure III-10, permettent de comparer les réponses du moteur en boucle ouverte avec celles obtenues en présence des régulateurs PID et MPC.

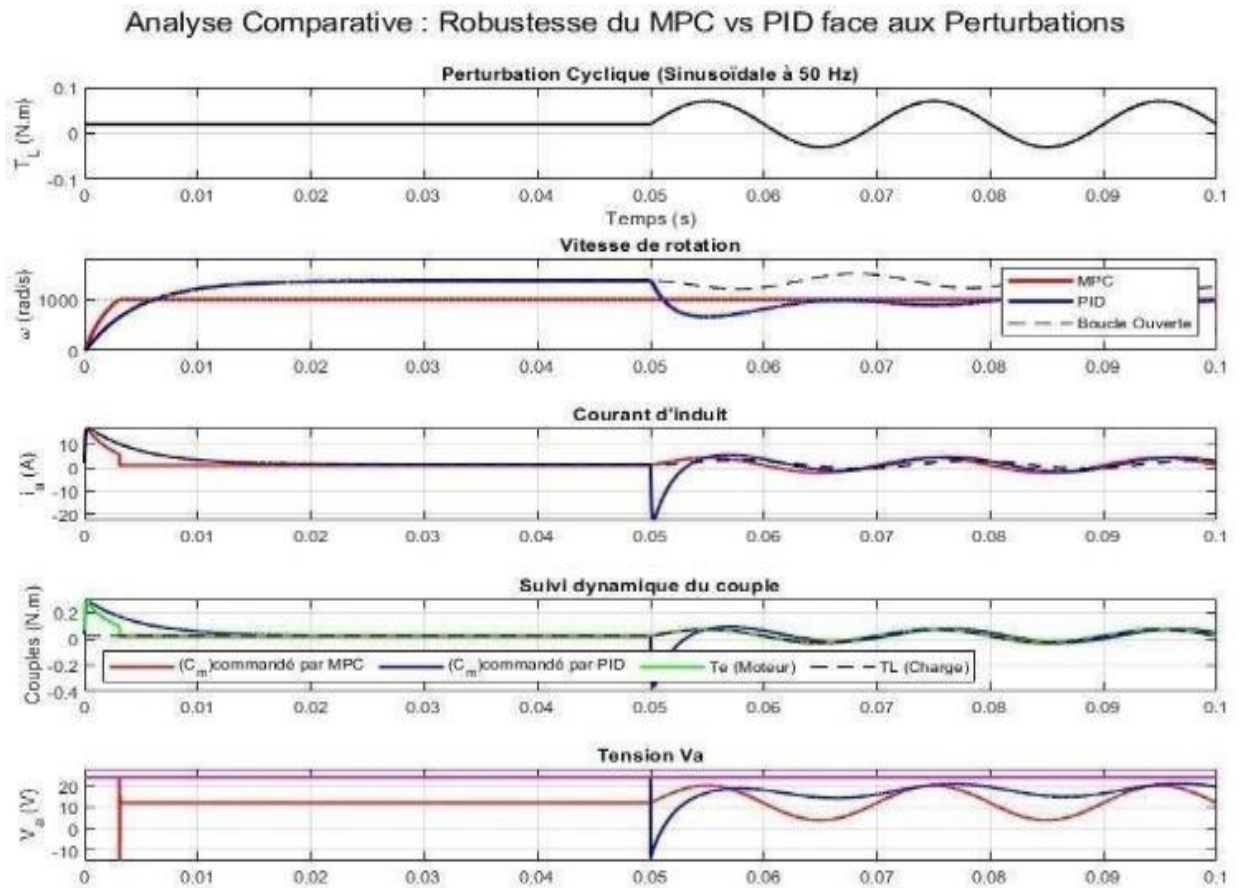


Figure III-10 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une perturbation mécanique sinusoïdale appliquée au moteur MCC.

III.5.3.4 Analyse comparative des résultats

Les résultats obtenus montrent que les deux stratégies de commande améliorent considérablement le comportement du moteur face à une perturbation mécanique sinusoïdale.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Nous avons observé qu'avant l'application de la perturbation, la vitesse du moteur atteint la valeur de référence fixée à environ 1000 rad/s. À l'instant $t = 0,05$ s, une charge mécanique sinusoïdale de fréquence 50 Hz est appliquée au système.

En boucle ouverte, nous avons constaté que la vitesse du moteur présente des oscillations importantes comprises entre environ 1200 rad/s et 1400 rad/s, qui suivent directement les variations du couple de charge. Les fluctuations apparaissent également au niveau du courant d'induit, dont les valeurs varient approximativement entre -2 A et 4 A, ainsi qu'au niveau du couple électromagnétique.

Avec le régulateur PID, nous avons observé une réduction significative des oscillations de la vitesse, celle-ci restant comprise entre environ 950 rad/s et 1050 rad/s. Toutefois, les variations du courant d'induit demeurent relativement importantes afin de compenser les fluctuations du couple résistant.

Nous avons constaté que le contrôleur MPC assure un suivi plus précis de la vitesse de référence. Les oscillations observées sont plus faibles, la vitesse restant proche de 1000 rad/s avec des variations limitées à quelques dizaines de rad/s, et la réponse du système demeure plus stable malgré les variations continues de la charge.

Globalement, les deux commandes permettent d'améliorer la robustesse du moteur par rapport au fonctionnement en boucle ouverte. Cependant, nous avons remarqué que la commande MPC offre une meilleure capacité d'anticipation et une réjection plus efficace de la perturbation sinusoïdale, ce qui se traduit par une meilleure qualité de régulation.

III.5.4 Charge mécanique transitoire

III.5.4.1 Description de la perturbation

La perturbation mécanique transitoire correspond à l'application temporaire d'un couple résistant pendant une courte durée. Ce type de perturbation représente des situations réelles telles que la prise ou le relâchement d'une charge par un bras robotisé, un choc mécanique ou une surcharge momentanée.

Dans cette étude, nous avons appliqué un couple de charge de 0,05 N.m entre $t=0,04$ s et $t=0,06$ s. Cette perturbation permet d'évaluer la capacité du moteur à supporter une variation brusque et temporaire de la charge mécanique. Sur le tableau III-7 sont rassemblés les paramètres de charge mécanique transitoire.

Tableau III-7 : paramètres de charge mécanique transitoire

Paramètre	Valeur
Tension d'alimentation	24 V
Type de perturbation	Impulsion de charge
Couple appliqué	0.05 N.m
Début de la perturbation	0.04 s
Fin de la perturbation	0.06 s
Durée de l'impulsion	0.02 s
Durée de simulation	0.1 s

III.5.4.2 Résultats sans commande

Afin d'étudier l'influence d'une charge mécanique transitoire sur le comportement du moteur en boucle ouverte, nous avons réalisé plusieurs simulations sous MATLAB en appliquant une

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

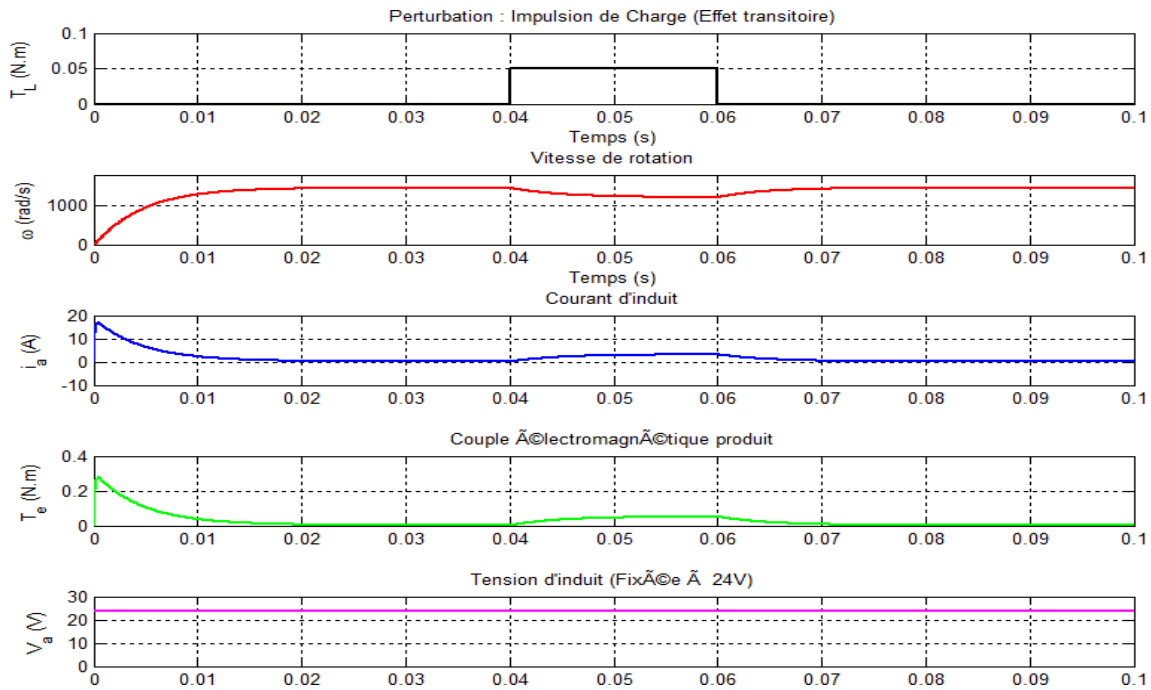


Figure III-11 : Réponse du moteur MCC soumis à une perturbation mécanique transitoire en boucle ouverte.

impulsion de charge de 0,05 N.m entre les instants $t = 0,04$ s et $t = 0,06$ s. Les résultats obtenus sont présentés par les courbes de la figure III-11.

• Analyse des résultats

Les simulations que nous avons réalisées montrent qu'avant l'application de la perturbation, le moteur accélère progressivement et atteint une vitesse voisine de 1400 rad/s sous une tension d'alimentation constante de 24 V. Nous avons également observé que le courant d'induit atteint

Une valeur maximale proche de 18 A au démarrage avant de décroître progressivement vers une valeur voisine de 0 A en régime permanent.

Entre les instants $t = 0,04$ s et $t = 0,06$ s, nous avons appliqué une impulsion de charge de 0,05 N.m. Nous avons constaté une diminution temporaire de la vitesse de rotation, qui passe d'environ 1400 rad/s à une valeur voisine de 1200 rad/s, suivie d'un retour progressif vers sa valeur initiale après la disparition de la perturbation.

Nous avons également observé une augmentation du courant d'induit, qui passe d'une valeur proche de 0 A à environ 3 A, ainsi qu'une augmentation du couple électromagnétique produit par le moteur, celui-ci atteignant une valeur voisine de 0,05 N.m pendant la durée d'application de la charge.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Les résultats que nous avons obtenus montrent que le moteur en boucle ouverte est sensible aux perturbations transitoires et ne possède aucun mécanisme permettant de maintenir une vitesse constante en présence d'une variation brusque de la charge.

III.5.4.3 Résultats avec PID et MPC

Afin d'évaluer les performances des régulateurs PID et MPC face à une charge mécanique transitoire, nous avons implémenté les deux stratégies de commande sous MATLAB et comparé leurs réponses à celle obtenue en boucle ouverte. Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes de la figure III-12

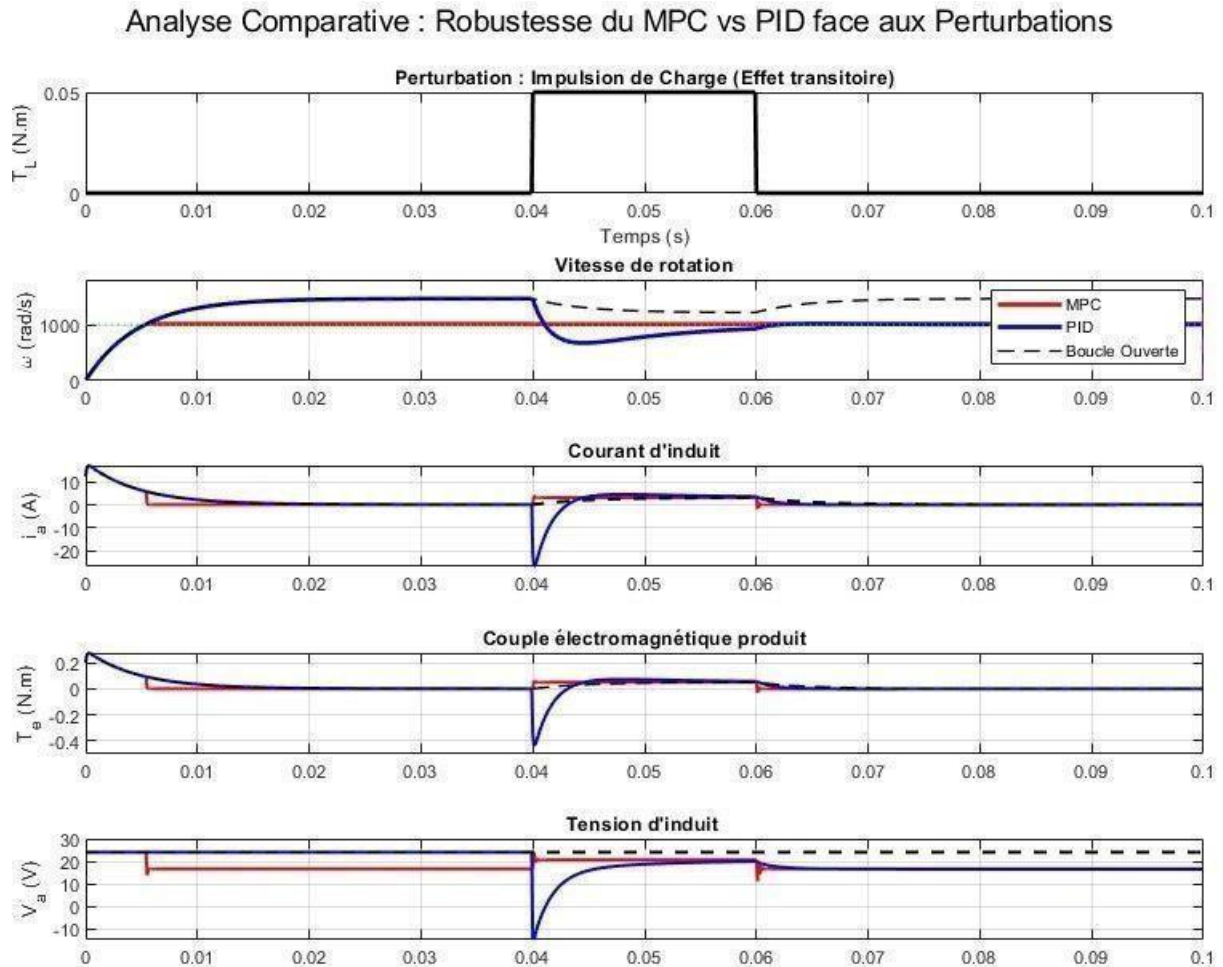


Figure III-12 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une perturbation mécanique transitoire appliquée au moteur MCC.

III.5.4.4 Analyse comparative des résultats.

Les simulations que nous avons réalisées montrent que les deux stratégies de commande permettent d'améliorer considérablement le comportement du moteur face à une perturbation transitoire.

Nous avons observé qu'avant l'application de la charge, les deux contrôleurs assurent un suivi satisfaisant de la vitesse de référence fixée à 1000 rad/s.

Entre les instants $t = 0,04$ s et $t = 0,06$ s, nous avons appliqué une impulsion de charge de 0,05 N.m. Nous avons constaté qu'en boucle ouverte, la vitesse du moteur chute jusqu'à une valeur voisine de 1200 rad/s, tandis qu'en présence du régulateur PID, elle ne descend qu'à environ 950 rad/s. Avec la commande MPC, la vitesse reste très proche de la consigne et atteint une valeur minimale voisine de 980 rad/s avant de revenir rapidement à 1000 rad/s.

Nous avons également observé que le courant d'induit augmente momentanément afin de fournir le couple électromagnétique nécessaire à la compensation de la charge appliquée. Celui-ci atteint environ 3 A avec le régulateur PID, tandis que la réponse obtenue avec le contrôleur MPC demeure plus progressive et plus stable.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que la commande MPC assure une réponse plus rapide et une meilleure stabilité que la commande PID. Grâce à sa capacité de prédiction, elle permet de réduire davantage les variations de vitesse et d'améliorer la robustesse du système face aux perturbations transitoires.

III.5.5 Variation de la résistance d'induit (R)

III.5.5.1 Description de la perturbation

La variation de la résistance d'induit constitue une perturbation paramétrique fréquemment observée dans les moteurs à courant continu. Elle est généralement provoquée par l'échauffement des conducteurs lors du fonctionnement prolongé du moteur.

Lorsque la température augmente, la résistance électrique de l'induit s'élève, ce qui modifie les caractéristiques électriques du système et peut affecter ses performances dynamiques.

Afin de réaliser cette étude, nous avons développé un programme sous MATLAB permettant de simuler l'effet d'une variation de la résistance d'induit sur le comportement du moteur à cou-

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

rant continu à excitation séparée. Les paramètres de simulation retenus pour cette étude sont présentés dans le tableau III.8.

Tableau III-8 : paramètres variation de la résistance d'induit

Paramètre	Valeur
Type de perturbation	Variation paramétrique
Paramètre modifié	Résistance d'induit (R_a)
Valeur initiale	1.33 Ω
Valeur finale	1.995 Ω
Variation	+50 %
Instant d'application	0.05 s
Tension d'alimentation	24 V
Durée de simulation	0.1 s

III.5.5.2 Résultats sans commande

Afin d'étudier l'influence d'une variation de la résistance d'induit sur le comportement du moteur en boucle ouverte, nous avons réalisé plusieurs simulations sous MATLAB en faisant varier la résistance d'induit à l'instant $t = 0,05$ s. Les résultats obtenus sont présentés par les courbes de la figure III.13.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

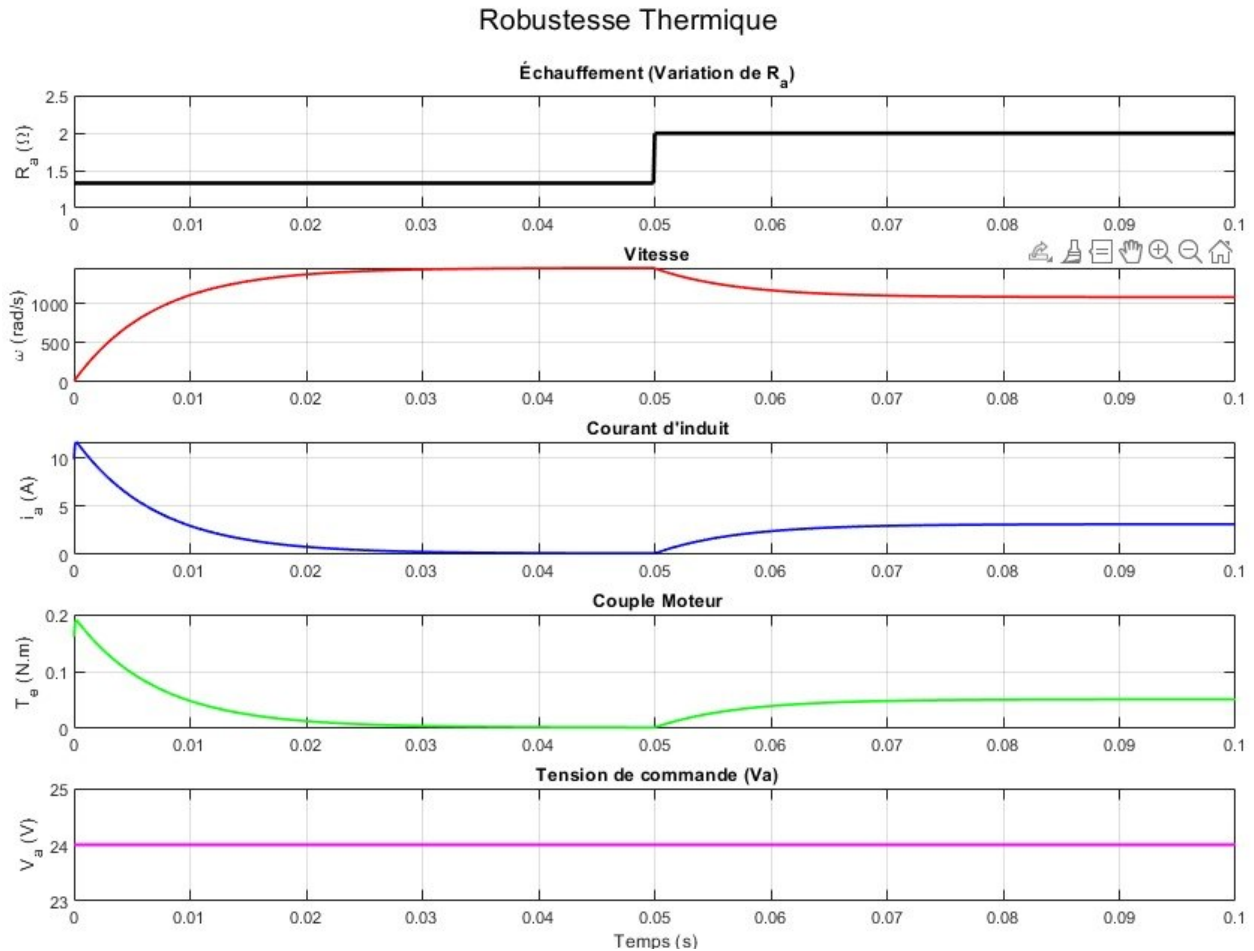


Figure III-13 : Réponse du moteur MCC soumis à une augmentation de la résistance d'induit en boucle ouverte.

• Analyse des résultats

Les simulations que nous avons réalisées montrent qu'avant l'application de la perturbation, le moteur atteint une vitesse voisine de 1458 rad/s sous une tension d'alimentation constante de 24

V. Nous avons également observé que le courant d'induit diminue progressivement d'environ 12 A au démarrage jusqu'à une valeur proche de 0 A lorsque le moteur atteint son régime permanent.

À l'instant $t = 0,05$ s, nous avons augmenté la résistance d'induit afin de simuler l'effet de l'échauffement du moteur. Nous avons observé une diminution progressive de la vitesse de

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

rotation, qui passe d'environ 1458 rad/s à une valeur proche de 1085 rad/s après l'application de la perturbation.

Nous avons également constaté une augmentation du courant d'induit, celui-ci passant d'une valeur proche de 0 A à environ 3 A., Nous avons également observé une augmentation du couple électromagnétique produit par le moteur, celui-ci passant d'une valeur proche de 0 N·m à environ 0,06 N·m afin de compenser l'augmentation de la résistance d'induit et maintenir le fonctionnement du moteur.

Les résultats que nous avons obtenus montrent qu'en absence de commande, le moteur demeure sensible aux variations paramétriques et ne peut pas maintenir sa vitesse nominale lorsque les paramètres électriques du système sont modifiés.

III.5.5.3 Résultats avec PID et MPC

Afin d'évaluer les performances des régulateurs PID et MPC face à une variation de la résistance d'induit, nous avons implémenté les deux stratégies de commande sous MATLAB et comparé leurs réponses à celle obtenue en boucle ouverte. Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes de la figure III-14.

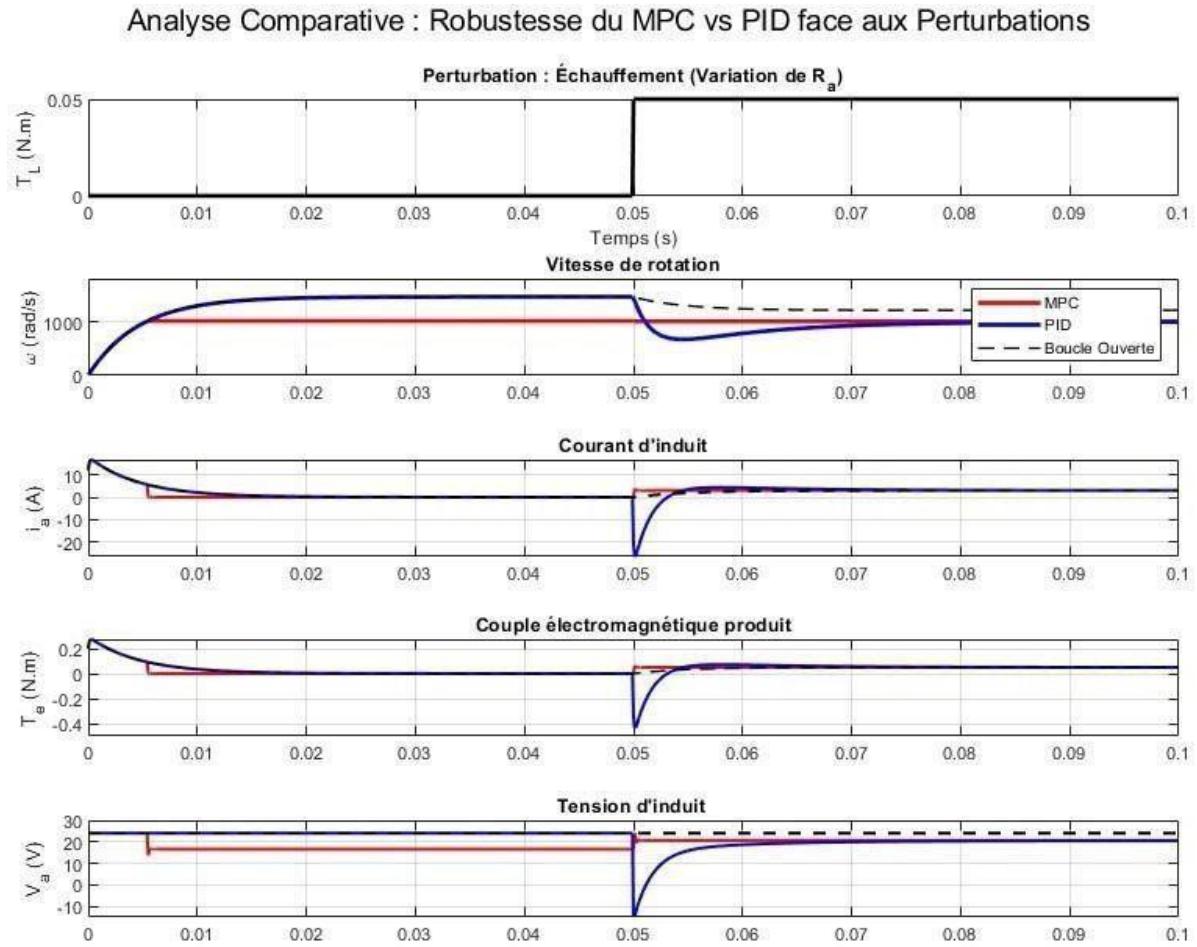


Figure III-14 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une variation de la résistance d'induit du moteur MCC.

III.5.5.4 Analyse comparative des résultats

Les simulations que nous avons réalisées montrent que les deux stratégies de commande permettent d'améliorer les performances du moteur par rapport au fonctionnement en boucle ouverte.

Nous avons observé qu'avant l'application de la perturbation, les deux contrôleurs assurent un suivi satisfaisant de la vitesse de référence fixée à 1000 rad/s.

À l'instant $t = 0.05$ s, nous avons introduit une variation de la résistance d'induit afin de représenter l'effet de l'échauffement. Nous avons constaté qu'en boucle ouverte, cette perturbation entraîne une diminution importante de la vitesse de rotation jusqu'à une valeur proche de 1200 rad/s.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Nous avons également observé que les régulateurs PID et MPC permettent de maintenir la vitesse proche de la valeur de référence. Avec le régulateur PID, la vitesse atteint une valeur minimale voisine de 950 rad/s, tandis qu'avec le contrôleur MPC, elle reste comprise autour de 980 rad/s.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que la commande MPC présente une meilleure robustesse et une meilleure précision de régulation que la commande PID. Grâce à sa capacité d'anticipation, le contrôleur MPC permet de réduire davantage les variations de vitesse et d'améliorer la stabilité du système.

III.5.6 Variation de l'inertie J

III.5.6.1 Description de la perturbation

La variation du moment d'inertie constitue une perturbation paramétrique mécanique susceptible d'apparaître lorsqu'une charge supplémentaire est couplée à l'arbre du moteur ou lorsque les caractéristiques mécaniques du système évoluent au cours du fonctionnement.

Une augmentation de l'inertie rend le système plus difficile à accélérer ou à décélérer, ce qui modifie sa dynamique et peut affecter ses performances transitoires.

Afin de réaliser cette étude, nous avons développé un programme sous MATLAB permettant de simuler l'influence d'une variation du moment d'inertie sur le comportement du moteur à courant continu à excitation séparée. Les paramètres de simulation retenus pour cette étude sont présentés dans le tableau III.9.

Tableau III-9 : paramètre de variation de l'inertie J

Paramètre	Valeur
Type de perturbation	Variation paramétrique
Paramètre modifié	Moment d'inertie (J)
Valeur initiale	$(9.49 \times 10^{-7}) \text{ kg.m}^2$
Valeur finale	(10J)
Facteur de variation	$\times 10$
Instant d'application	0.005 s

Tension d'alimentation	24 V
Durée de simulation	0.1 s

III.5.6.2 Résultats sans commande

Afin d'étudier l'influence d'une variation du moment d'inertie sur le comportement du moteur

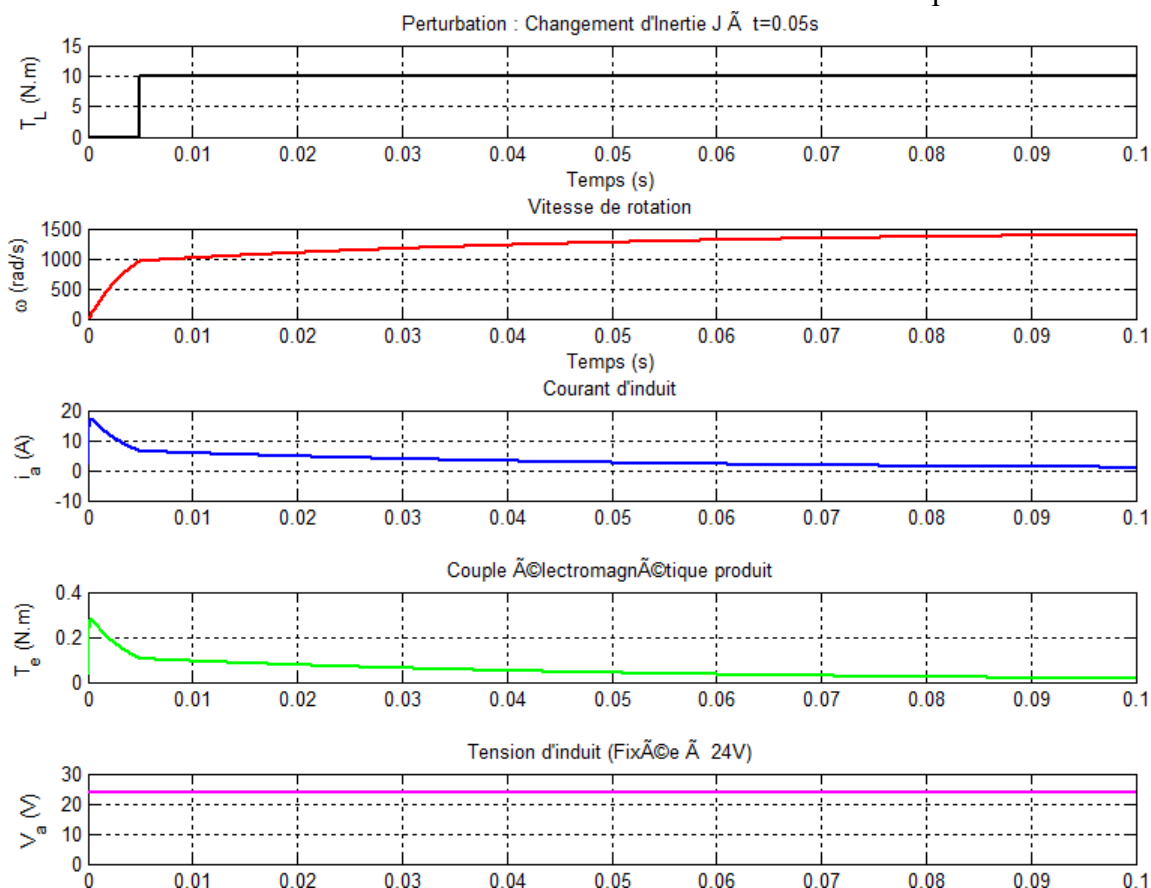


Figure III-15 : Réponse du moteur MCC soumis à une variation du moment d'inertie en boucle ouverte.

en boucle ouverte, nous avons réalisé plusieurs simulations sous MATLAB en augmentant le moment d'inertie à l'instant $t = 0,005$ s. Les résultats obtenus sont présentés par les courbes de la figure III.15.

• Analyse des résultats

Les simulations que nous avons réalisées montrent qu'avant l'application de la perturbation, le moteur accélère normalement sous une tension d'alimentation constante de 24 V. Nous avons

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Également observé que le courant d'induit atteint une valeur maximale proche de 18 A au démarrage avant de décroître progressivement vers une valeur voisine de 0 A lorsque le moteur atteint son régime permanent.

À l'instant $t = 0,005$ s, nous avons multiplié le moment d'inertie par un facteur égal à dix afin de simuler une augmentation importante de la charge mécanique. Nous avons observé une modification du comportement dynamique du système ainsi qu'un ralentissement de la réponse du moteur. La vitesse de rotation augmente progressivement et atteint une valeur voisine de 1400 rad/s après l'application de la perturbation.

Nous avons également constaté une diminution progressive du courant d'induit, celui-ci passant d'une valeur proche de 2 A à environ 1 A, ainsi qu'une réduction du couple électromagnétique produit par le moteur, qui diminue d'une valeur voisine de 0,05 N.m à près de 0,02 N.m. Ces variations traduisent la dégradation des performances dynamiques du moteur provoqué par l'augmentation du moment d'inertie.

Les résultats que nous avons obtenus montrent qu'en boucle ouverte, le moteur est sensible aux variations du moment d'inertie et ne dispose d'aucun mécanisme de compensation permettant de maintenir les performances dynamiques du système.

III.5.6.3 Résultats avec PID et MPC

Afin d'évaluer les performances des régulateurs PID et MPC face à une variation du moment d'inertie, nous avons implémenté les deux stratégies de commande sous MATLAB et comparé leurs réponses à celle obtenue en boucle ouverte. Les résultats obtenus sont illustrés par les courbes de la figure III.16.

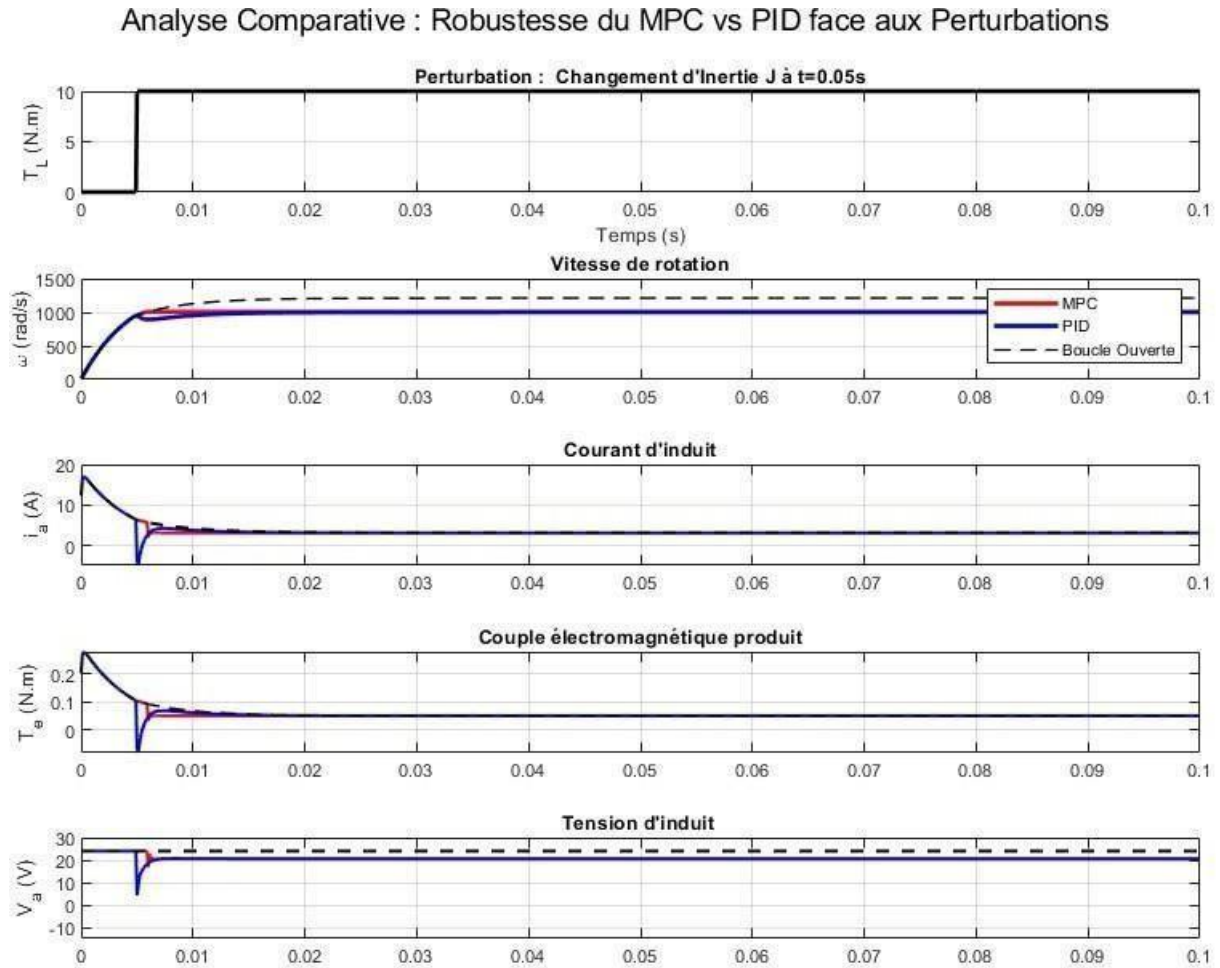


Figure III-16 : Comparaison des performances des commandes PID et MPC face à une variation du moment d'inertie du moteur MCC.

III.5.6.4 Analyse comparative des résultats

Les simulations que nous avons réalisées montrent que les deux stratégies de commande améliorent significativement le comportement du moteur face à une variation du moment d'inertie.

Nous avons observé qu'avant l'application de la perturbation, les deux contrôleurs assurent un suivi satisfaisant de la vitesse de référence fixée à 1000 rad/s.

À l'instant $t = 0,005 s$, nous avons multiplié le moment d'inertie du système par dix. Nous avons constaté qu'en boucle ouverte, cette variation modifie la dynamique du moteur et dégrade ses performances de suivi, la vitesse augmente jusqu'à une valeur proche de 1200 rad/s.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Nous avons également observé que les régulateurs PID et MPC permettent de maintenir la vitesse proche de la consigne. Avec le régulateur PID, la vitesse atteint une valeur minimale proche de 950 rad/s, alors qu'avec la commande MPC, elle reste voisine de 980 rad/s.

Nous avons également remarqué que le courant d'induit augmente temporairement jusqu'à environ 3 A afin de fournir le couple électromagnétique nécessaire à la compensation de la variation d'inertie. Le couple électromagnétique atteint alors une valeur voisine de 0,05 N.m.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que la commande MPC présente une meilleure robustesse et une réponse plus progressive que la commande PID. Grâce à sa stratégie prédictive, le contrôleur MPC permet de mieux compenser les variations des paramètres mécaniques et d'assurer une meilleure stabilité du système.

III.6 Comparaison des commandes PID et MPC

Tableau III-10 : Comparaison globale des performances des commandes PID et MPC.

Perturbation étudiée	Performance PID	Performance MPC	Contrôleur le plus per- formant
Chute de tension d'alimentation	Bonne compensation	Très bonne compensation	MPC
Charge mécanique échelon	Bonne réponse	Réponse plus rapide	MPC
Charge mécanique sinusoïdale	Suivi correct	Suivi plus précis	MPC
Charge mécanique transitoire	Bonne robustesse	Très bonne robustesse	MPC
Variation de la résistance (R_a)	Bonne adaptation	Meilleure adaptation	MPC
Variation de l'inertie (J)	Bonne stabilité	Meilleure stabilité	MPC

Les différentes simulations réalisées dans ce travail ont permis d'évaluer les performances des commandes PID et MPC face à plusieurs perturbations appliquées au moteur à courant continu.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Les résultats obtenus montrent que les deux stratégies de commande permettent d'améliorer significativement le comportement du moteur par rapport à la boucle ouverte. Dans tous les cas étudiés, les régulateurs réduisent les écarts de vitesse provoqués par les perturbations et contribuent à maintenir la stabilité du système.

Le régulateur PID présente une structure simple, facile à mettre en œuvre et nécessitant un faible coût de calcul. Il offre de bonnes performances pour la plupart des perturbations étudiées et permet une correction efficace des erreurs de vitesse.

La commande prédictive MPC fournit cependant des performances supérieures dans la majorité des scénarios. Grâce à sa capacité de prédiction basée sur le modèle du système, elle anticipe l'évolution future des variables et adapte l'action de commande de manière optimale.

Les simulations montrent notamment que la commande MPC assure un meilleur rejet des perturbations, une réponse plus rapide, une meilleure robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et un maintien plus précis de la vitesse de référence.

Ainsi, bien que la commande PID reste une solution simple et efficace pour de nombreuses applications industrielles, la commande MPC apparaît comme la stratégie la plus performante pour les systèmes soumis à des perturbations importantes ou à des variations de paramètres.

III.7 Discussion

Les résultats obtenus confirment l'importance de l'utilisation d'une stratégie de commande adaptée pour garantir les performances d'un moteur à courant continu dans des conditions de fonctionnement réelles.

Les différentes perturbations appliquées au système ont montré que le comportement du moteur peut être fortement affecté par des variations électriques, mécaniques ou paramétriques. En absence de commande, ces perturbations entraînent des écarts significatifs de vitesse ainsi qu'une dégradation des performances dynamiques.

L'utilisation des commandes PID et MPC permet de réduire considérablement ces effets. Le régulateur PID offre une solution simple et efficace, largement utilisée dans les applications industrielles, tandis que la commande MPC fournit une meilleure qualité de régulation grâce à

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Sa capacité d'anticipation., tandis que la commande MPC fournit une meilleure qualité de régulation grâce à sa capacité d'anticipation.

Toutefois, les performances supérieures de la commande MPC s'accompagnent d'une complexité de calcul plus importante ainsi que de la nécessité de disposer d'un modèle précis du système.

Le choix entre PID et MPC dépend donc du niveau de performance recherché, des contraintes de calcul disponibles et des exigences de l'application considérée.

III.8 Conclusion

Dans ce chapitre, les commandes PID et MPC ont été couplées au modèle du moteur à courant continu afin d'évaluer leurs performances en présence de différentes perturbations.

Plusieurs scénarios ont été étudiés, notamment une chute de tension d'alimentation, des perturbations mécaniques de différentes formes ainsi que des variations des paramètres internes du moteur. Les simulations réalisées sous MATLAB ont permis d'analyser le comportement du système en boucle ouverte et en boucle fermée.

Les résultats obtenus montrent que les deux stratégies de commande améliorent significativement la stabilité et la précision de la régulation. Cependant, la commande MPC présente globalement les meilleures performances en termes de robustesse, de rejet des perturbations et de maintien de la vitesse de référence.

Cette étude met ainsi en évidence l'intérêt de la commande prédictive pour les systèmes soumis à des conditions de fonctionnement variables et confirme son potentiel pour les applications industrielles nécessitant un haut niveau de performance.

Conclusion générale

Au cours de ce travail, une étude approfondie de la commande d'un moteur à courant continu à excitation séparée a été réalisée, avec un intérêt particulier porté à la comparaison entre une stratégie de commande classique PID et une stratégie de commande avancée basée sur la commande prédictive MPC.

Chapitre III: Résultats et analyses de L'implémentation des commandes MPC et PID en présence des perturbations

Dans un premier temps, une étude générale des machines électriques a permis de situer le moteur à courant continu parmi les différentes technologies existantes, tout en justifiant le choix du moteur à courant continu à excitation séparée comme système d'étude, en raison de sa simplicité de modélisation, de sa flexibilité de commande et de sa pertinence académique.

Ensuite, la modélisation mathématique du moteur a été développée à partir des équations électriques et mécaniques décrivant son fonctionnement dynamique. La fonction de transfert ainsi que la représentation d'état du système ont été établies, puis une modélisation sous MATLAB a été réalisée afin de valider le comportement dynamique du moteur.

Par la suite, deux stratégies de commande ont été étudiées.

La première concerne la commande PID, reconnue pour sa simplicité d'implémentation et son efficacité dans de nombreuses applications industrielles.

La seconde concerne la commande prédictive MPC, méthode plus avancée reposant sur la prédiction du comportement futur du système et l'optimisation de la commande.

Enfin, une analyse comparative des performances des deux commandes a été menée à travers plusieurs simulations réalisées sous MATLAB, en présence de perturbations électriques, mécaniques et paramétriques appliquées au moteur.

Les résultats obtenus montrent que la commande PID permet d'assurer une régulation satisfaisante de la vitesse et une bonne stabilité du système, mais présente certaines limitations face aux perturbations importantes et aux variations paramétriques.

En revanche, la commande MPC offre de meilleures performances en termes de robustesse, stabilité, réduction du dépassement et précision de régulation, grâce à sa capacité de prédiction et à son processus d'optimisation.

Ainsi, malgré une complexité de mise en œuvre plus élevée, la commande MPC apparaît comme une solution particulièrement performante pour la commande des moteurs électriques dans des environnements dynamiques perturbés.

Ce travail a permis de consolider les connaissances en modélisation, simulation et commande des systèmes dynamiques, tout en mettant en évidence l'intérêt des techniques modernes de commande dans les applications industrielles.

Perspectives

En perspective de ce travail, plusieurs pistes d'amélioration et de développement peuvent être envisagées.

Tout d'abord, il serait intéressant de réaliser une implémentation expérimentale en temps réel des stratégies de commande étudiées afin de valider les résultats de simulation obtenus sous MATLAB sur un système physique réel.

Ensuite, cette étude pourrait être étendue à d'autres stratégies de commande avancées, telles que la commande adaptative, la logique floue (Fuzzy Logic) ou encore les techniques basées sur l'intelligence artificielle, afin de comparer leurs performances avec celles de la commande MPC.

Par ailleurs, une étude plus approfondie pourrait intégrer des perturbations plus complexes, telles que les variations de la tension d'alimentation, les incertitudes paramétriques ou encore des perturbations multiples appliquées simultanément.

Il serait également envisageable d'appliquer cette approche de commande à d'autres types de machines électriques, notamment les moteurs à courant alternatif et les moteurs synchrones, largement utilisés dans les applications industrielles modernes.

Enfin, une optimisation plus poussée des paramètres du contrôleur MPC pourrait permettre d'améliorer davantage les performances du système en termes de rapidité, de robustesse et d'efficacité énergétique.

Références

Mathematical Modeling of a DC Motor with Separate Excitation, Tekhnê, Vol. 15, No. 1, 2018. Tekhnê – Mathematical Modeling of a DC Motor with Separate Excitation.

[2] Electrical Equivalent Circuit Based Modeling and Analysis of Direct Current Motors, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, 2012.

[3] DC Machine – ScienceDirect Topics. ScienceDirect Topics – DC Machine.

[4] Control of Separately Excited DC Motor, De Gruyter. De Gruyter – Control of Separately Excited DC Motor.

[5] MDPI – DC Motor Drive System Modelling. MDPI – DC Motor Drive System Modelling.

[6] DC Motor: Construction, Working Principle, Types and Equations. <https://www.electrical4u.com/dc-motor/>.

[7] Mathematical Model of Separately Excited DC Motor. <https://electricalacademia.com/dc-machines/mathematical-model-separately-excited-dc-motor/>.

[8] DC Motor Theory and Equations. <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/>.

[9] DC Machines Course. <https://nptel.ac.in/courses/108105017>.

[10], *DC Motors*. <https://eng.libretexts.org/>.

[11] R. Krishnan, *Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control*, Prentice Hall, 2001.

[12] DC Motor Speed Characteristics. <https://eng.libretexts.org/>.

[13] Modeling and Control of DC Motor Drive Systems, *Energies*. <https://www.mdpi.com/journal/energies>.

[14] Modeling and Simulation of Separately Excited DC Motor. <https://ieeexplore.ieee.org/>.

- [15] Electric Machines and Drives. <https://link.springer.com/>.
- [16] K. J. Åström, T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed., ISA, 1995.
- [17] K. J. Åström, R. M. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*, Princeton University Press, 2008. <https://fbsbook.org/>.
- [18] E. F. Camacho, C. Bordons, *Model Predictive Control*, 2nd ed., Springer, 2007. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-84628-580-9>.
- [19] J. B. Rawlings, D. Q. Mayne, M. M. Diehl, *Model Predictive Control: Theory, Computation, and Design*, 2nd ed., 2022. <https://sites.engineering.ucsb.edu/~jbraw/mpc/>
- [20] M. Sahin, "Designing MPC Algorithms for Velocity Control of Brushed DC Motor and Verification with SIL Tests," *Automatika*, vol. 64, no. 3, pp. 399–407, 2023. <https://hrcak.srce.hr/en/clanak/456227>.
- [21] Reza Akbari-Hasanjani, Shahram Javadi, Reza Sabbaghi-Nadooshan, "DC Motor Speed Control by Self-Tuning Fuzzy PID Algorithm," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2015. <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0142331214535619>.
- [22] Pikaso Pal et al., "Optimal PID Controller Design for Speed Control of a Separately Excited DC Motor: A Firefly Based Optimization Approach," *International Journal of Soft Computing Mathematics and Control*, 2015. https://www.researchgate.net/publication/288038644_Optimal_PID_Controller_Design_for_Speed_Control_of_a_Separately_Excited_DC_Motor_A_Firefly_Based_Optimization_Approach.
- [23] Mohamed Lamine Hamida, Hakim Denoun, Arezki Fekik, Sundarapandian Vaidyanathan, "Control of Separately Excited DC Motor with Series Multi-Cells Chopper Using PI–Petri Nets Controller," *Nonlinear Engineering*, vol. 8, no. 1, 2019. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.1515/nleng-2017-0174/html>.
- [24] Prakansha Sulakhe, V. P. Rajderkar, Tushar Guhe, "Comparison Between PID and SMC Controller to Control the Speed of DC Separately Excited Motor," *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Springer, 2024.

[25] Priyansh Gautam et al., "A Comparative Study of Distinct Speed Controllers for a Separately Excited DC Motor (SEDM)," *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*.

[26] A. M. Almawla, M. J. Hussein and A. T. Abdullah, "A Comparative Study of DC Motor Speed Control Techniques Using Fuzzy, SMC and PID," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 57, no. 2, pp. 397–406, 2024. <https://www.iieta.org/journals/jesa/paper/10.18280/jesa.570209>.

[27] A. G. Abdullah, M. A. Ibrahim and A. S. Saleh, "Performance Enhancing Speed Control of a DC Motor Based on an Artificial Neural Network," *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, vol. 57, no. 5, pp. 1489–1495, 2024. <https://www.iieta.org/journals/jesa/paper/10.18280/jesa.570524>.

[28] A. O. de Souza *et al.*, "Control and Performance Analyses of a DC Motor Using Optimized PIDs and Fuzzy Logic Controller," *Results in Control and Optimization*, vol. 13, 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266672072300108X>

[29] M. J. Hasan, "Comparison of Speed Control for Separately Excited DC Motor by Using PID(Z) and PID(S) Controller," *International Journal of Computer Applications*, vol. 185, no. 2, pp. 22–28, 2023. <https://www.ijcaonline.org/archives/volume185/number2/32678-2023922673/>.

[30] L. Patel, "Evaluating Motor Control: A Comparative Study of Conventional and Intelligent Controllers for Separately Excited DC Motors," *Applied Physics, Material Sciences, and Engineering Journal*, vol. 12, no. 4, 2024. <https://cspjournals.org/journals/apmsej/templates/article-template.php?id=378>

ANNEXE

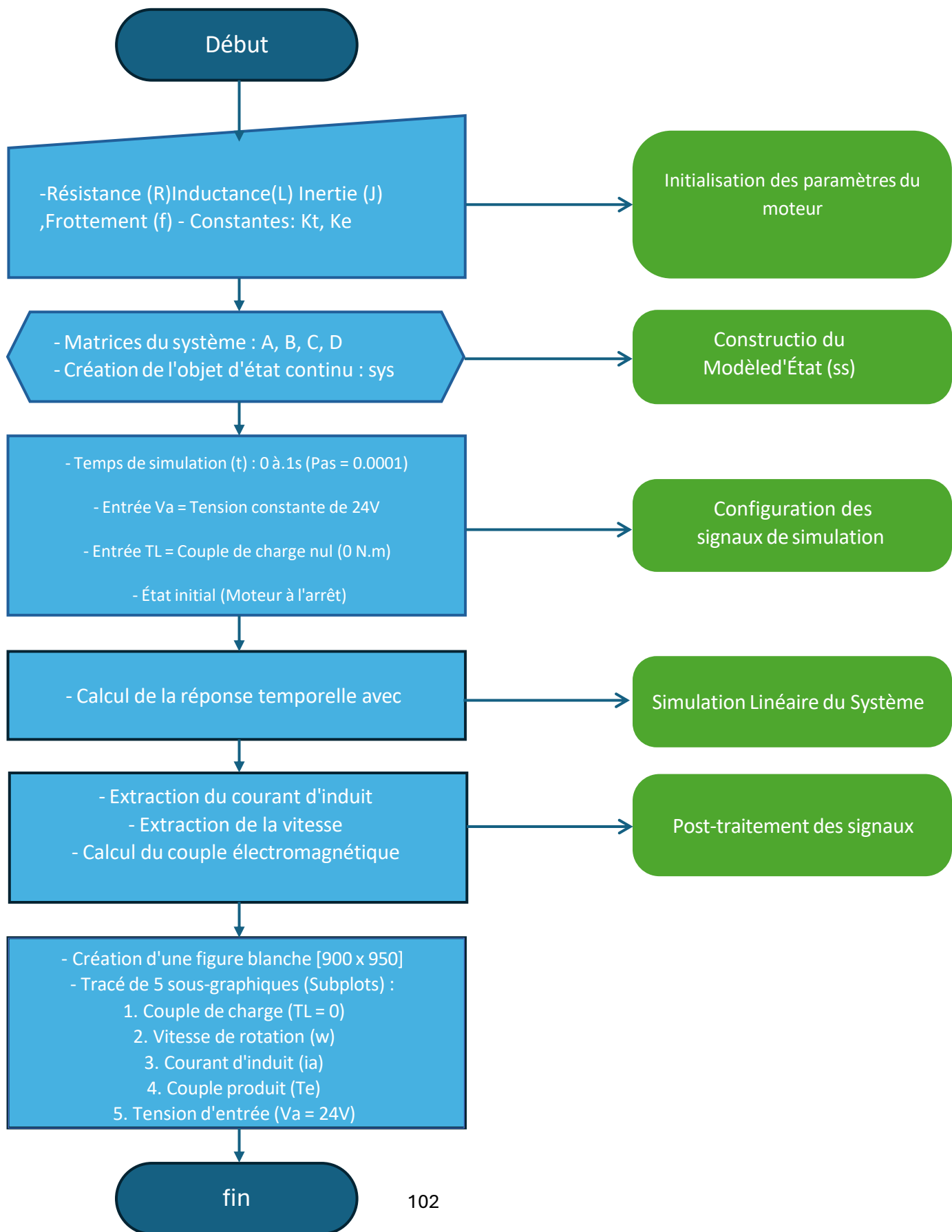
Annexe A :Fiche technique référence du moteur Maxon RE16

Brand	Maxon
Nominal voltage	24 V
Terminal Resistance	0.975 Ohm
Terminal Inductance	0.03 mH
Torque constant	4.2 mNm/A
Speed constant	2280 rpm/V
Speed Torque Gradient	529 rpm/mNm
Mechanical Time constant	7.36 ms
Rotor Inertia	1.33 gcm ²
Thermal Resistance Housing Ambient	30 K/W
Thermal resistance Winding Housing	8.5 K/W
Thermal Time constant winding	10.8 s
No load speed	13200 rpm
Thermal Time constant motor	504 s
Ambient Temperature	-20 - +65 Deg C
Max winding Temperature	+85 Deg C
Bearing Type	Sleeve Bearing
Max speed	16000 rpm
Axial play	0.05 - 0.15 mm
Radial play	0.014 mm
Max Axial load	0.8 N
Max Radial load	1.5 N, 5 mm from flange
No load current	87.6 mA
Number of pole pairs	1

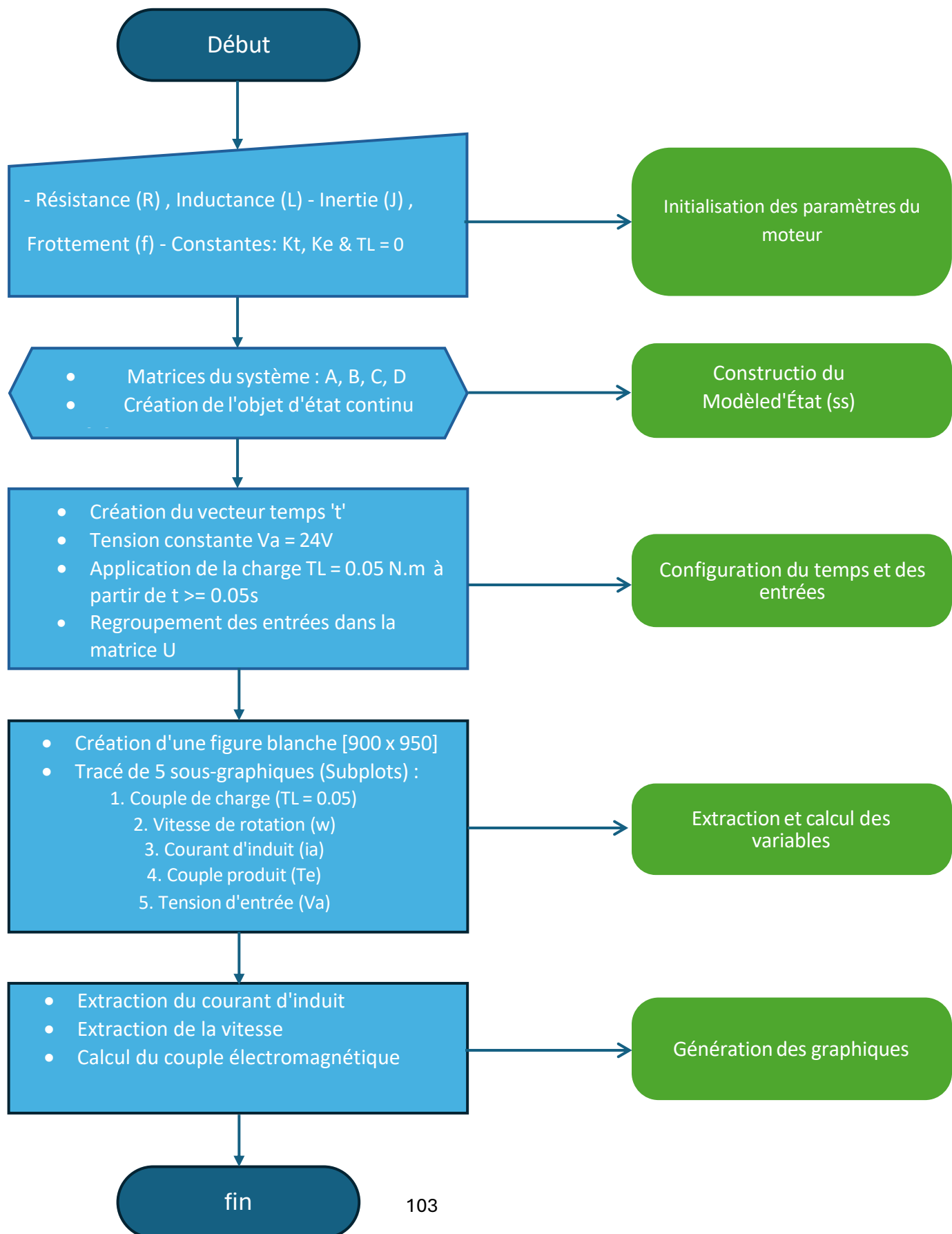
Number of commutator segments	7
Weight	40 gm
Nominal speed	11500 rpm
Nominal Torque	2.67 mNm
Nominal current	0.72 A
Stall Torque	25.8 mNm
Stall current	6.16 A
Max Efficiency	74 %

Remarque : Cette fiche technique est fournie à titre indicatif afin de présenter les caractéristiques du moteur Maxon. Les paramètres utilisés pour la modélisation et les simulations sont ceux présentés dans le Chapitre 1 et dans les scripts MATLAB correspondants.

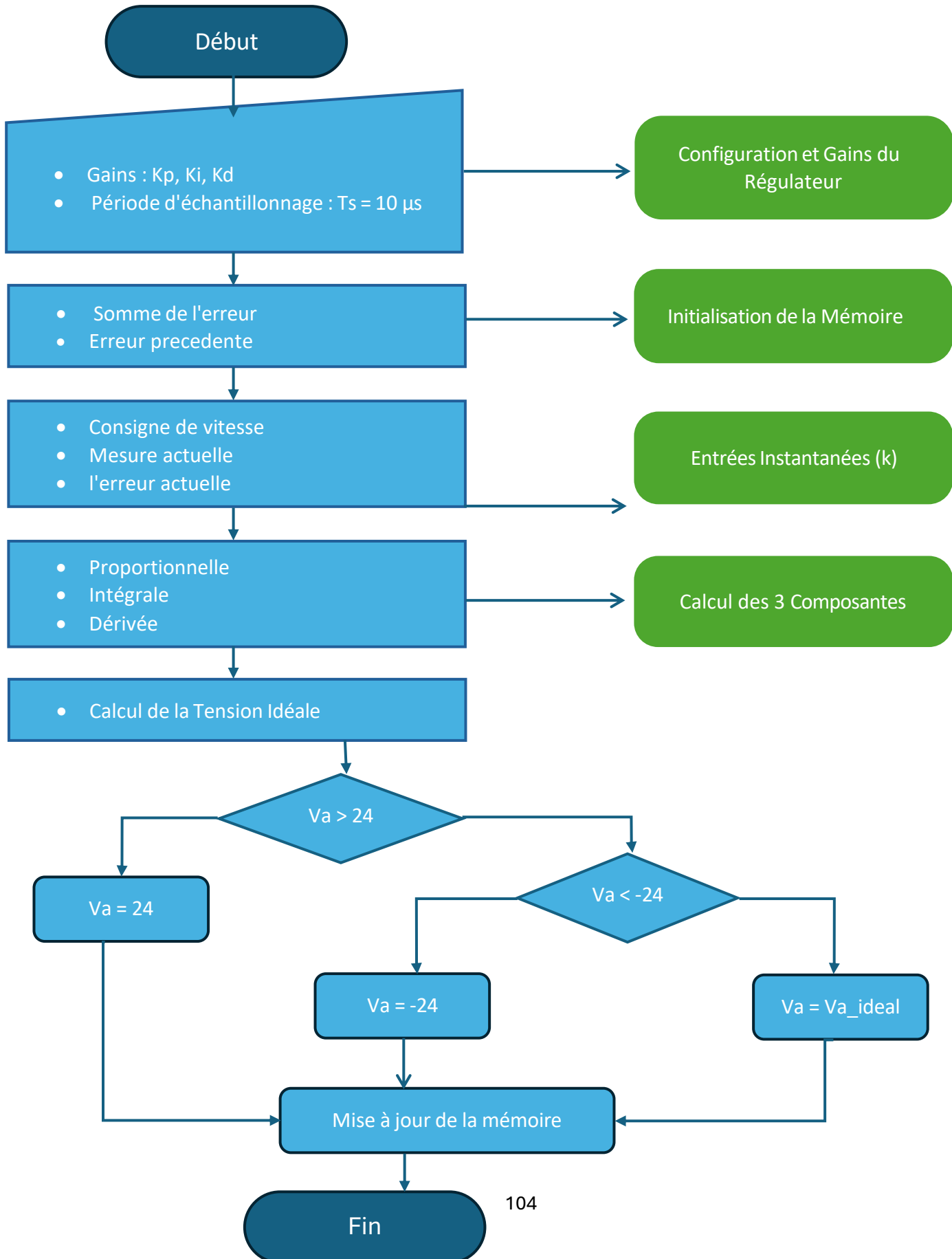
Annexe B : Organigramme du programme de moteur à vide



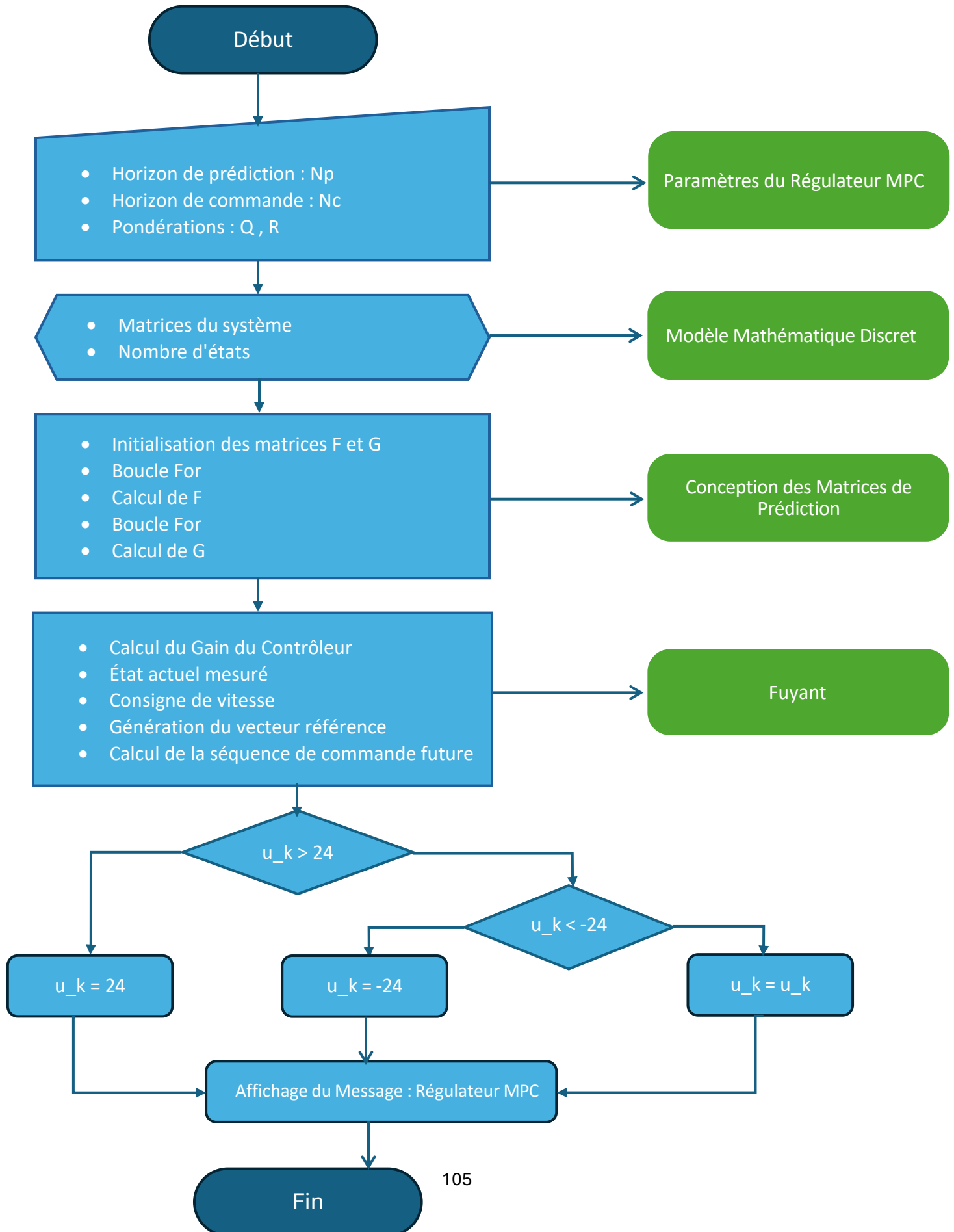
Annexe C : Organigramme du programme de moteur en charge

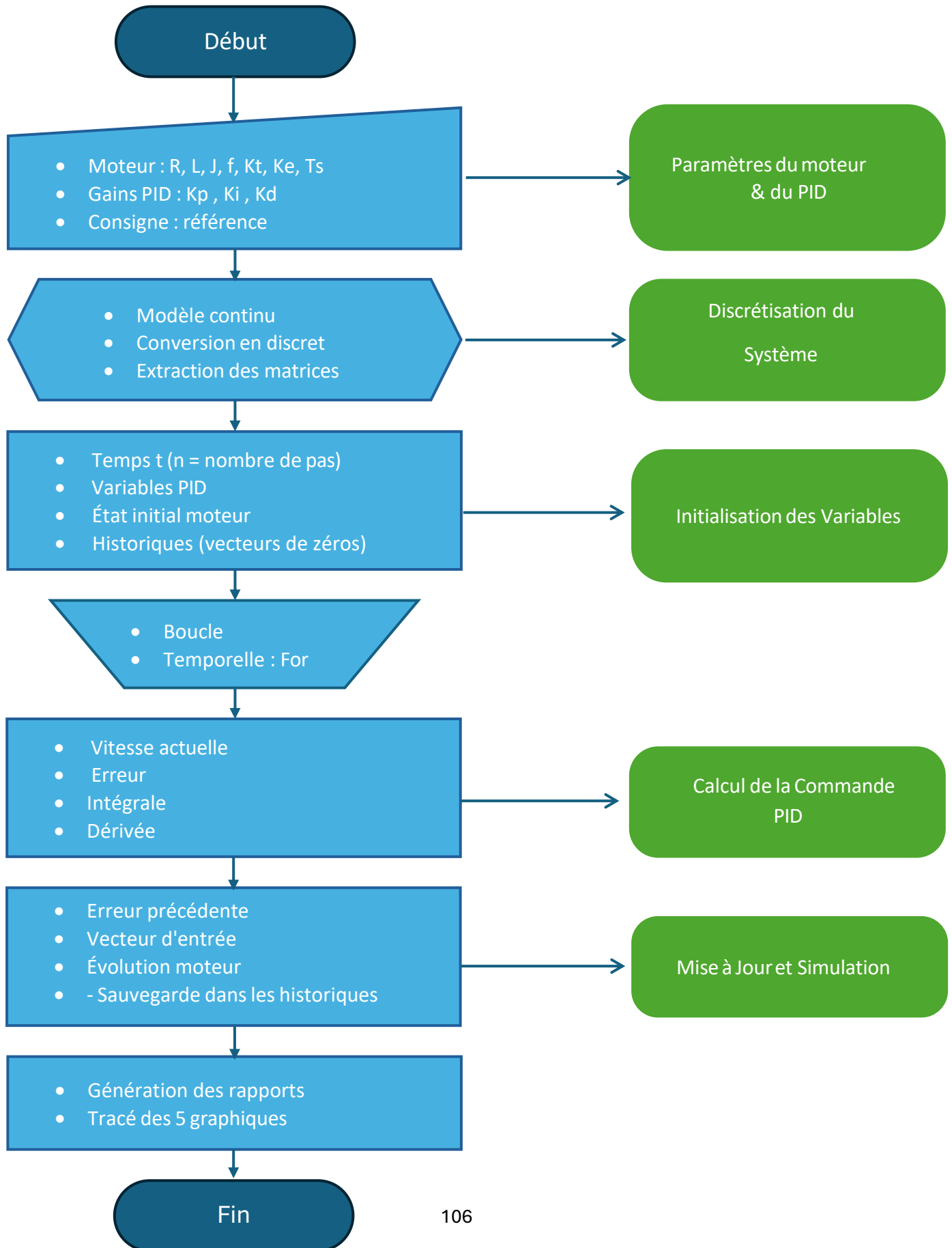


Annexe D : Organigramme du programme du contrôleur MPC



Annexe E : Organigramme du programme du contrôleur MPC





Annexe G : Organigramme du programme du contrôleur MPC appliqué au mcc

