

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



## **MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Electrotechnique

**Spécialité** : Commandes électriques

**Par** : BENARRADJ Akram

BENABBOU Zakaria

### **Sujet**

**Validation expérimentale d'une loi commande pour un moteur à courant continu à base d'une carte dSPACE DS1104**

Soutenu publiquement, le 17 / 06 / 2025 , devant le jury composé de :

Mr YACOUBI Boumediene	MAA	Université de Tlemcen	Président
Mme GHLAM Karima	MCA	Université de Tlemcen	Examineur
Mr LOUCIF Mourad	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr MECHERNENE Abdelkader	MCA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2024 / 2025

---

## Dedicaces 1

Je dédie ce travail :

- à la mémoire de ma grand-mère Sabria et de mon oncle Nacer ;
- à la personne qui ma donné la vie, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère ;
- à mon père, Abdel Allah, qui ma tout appris, pour tous les sacrifices qu'il a faits afin de me voir réussir. Aucune dédicace ne peut exprimer toute mon admiration, ma reconnaissance et mon affection sincère pour vous, mes chers parents
- à mes très chers frères Nadir, Rayan et ma sœur ;
- à ma tante, mes oncles et mes cousins ;
- à toutes mes amis : Kheirdinne BELDJILALI, Omar CHOUITI, Younes BELHADJI, Yousra, Ibtissem, Wahiba, Fatima ;
- à mon équipe de laboratoire : Houcine, Walid, Imad, Zaki, Baghdad, Abdelghani ;
- à mes collègues du master en commande électrique ;
- à mon binôme Zakaria qui a été comme un ami et un frère ;
- à tous les enseignants qui m'ont enseigné tout au long de ma carrière universitaire ;

**Et enfin, merci à moi-même.  
Merci d'avoir toujours été moi.**

Akram BENARRADJ  
Tlemcen, le 25 mai 2025

Je dédie ce modeste travail :

- à mon père et à ma mère, que Dieu les protège et les préserve, pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté pour réussir ;
- à mes chers frères Younes et Ayoub ;
- à mon binôme Akram qui a été comme un ami et un frère ;
- à ma cher ami Khaoula ;
- à toutes mes amis : Islem, Aymen, Ayoub, Hichem, Walid, Younes ;
- à tous les enseignants qui m'ont enseigné tout au long de ma carrière universitaire ;
- à ma famille y compris mes oncles mes grands-parents et tous ceux qui ont eu l'intention de m'aider à atteindre ce succès ;

**Et enfin, merci à tous.**

Zakaria BENABBOU  
Tlemcen, le 25 mai 2025

---

## Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu de m'avoir donné le courage et la volonté d'accomplir ce travail modeste.

Nous exprimons nos plus sincères remerciements à Monsieur encadreur, Dr Mourad LOUCIF, Maitre de conférence à l'université de Tlemcen, qui était pour nous comme un enseignant, un frère et un ami pour sa bonne humeur, ses orientations, ses conseils, ses encouragements et sa disponibilité, qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Un grand merci à Monsieur et co-encadreur, Dr Abdelkader MECHERNENE, Maitre de conférence à l'université de Tlemcen, qui nous a beaucoup aidé dans la réalisation de ce travail. Nous avons grandement bénéficié des conseils et des retours qui ont permis d'identifier et de corriger nos erreurs. Merci pour tout ce que vous avez fait pour nous.

Nous remercions également le Monsieur Boumediene YACOUBI, Maitre assistant à l'université de Tlemcen, de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire de Master.

Nos remerciements les plus sincères vont aussi à Madame GHLAM Karima, Maitre de conférence à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'évaluer et d'examiner ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer nos profonde gratitude aux Messieurs Sidi Mohammed MILIANI et Younes DRIS, tout deux Professeur et Maitre de conférence respectivement, enseignants à l'université de Tlemcen, pour leurs conseils et leur patience.

Nous n'oublions pas de remercier tous les enseignants qui ont déployé tous leurs efforts pour assurer ma formation.

Nous remercions également nos amis et frères, Walid BENMAHDI et Houcine OUAHRANI.

Zakaria BENABBOU / Akram BENARRADJ  
Tlemcen, le 25 mai 2025

# TABLE DES MATIÈRES

DEDICACES 1	i
DEDICACES 2	ii
REMERCIEMENTS	iii
NOMENCLATURE	xi
GLOSSAIRE	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
<b>I GÉNÉRALITÉS ET MODÉLISATION DES MOTEURS À COURANT CONTINU</b>	<b>3</b>
I.1 INTRODUCTION	4
I.2 CONSTITUTION DU MOTEUR À COURANT CONTINU	4
I.2.1 Partie fixe (stator)	5
I.2.2 Partie mobile (induit)	6
I.2.3 Collecteur	6
I.2.4 Balais	7
I.3 DIFFÉRENTES EXPRESSIONS DE LA MACHINE À COURANT CONTINU À EX- CITATION SÉPARÉE	7
I.3.1 Force électromotrice	7
I.3.2 Couple électromagnétique	8
I.3.3 Puissance électromagnétique	8
I.4 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT	8
I.5 BILAN DE PUISSANCE	8
I.6 RENDEMENT DU MOTEUR À COURANT CONTINU	9
I.7 TYPES D'EXITATIONS DU MOTEURS À COURANT CONTINU	9
I.7.1 Moteur à excitation série	10
I.7.1-a Caractéristiques	10
I.7.2 Moteur à excitation shunt	10
I.7.2-a Caractéristiques	10
I.7.3 Moteur à excitation composée	11
I.7.3-a Caractéristiques	11
I.7.4 Moteur à excitation indépendante (séparée)	11
I.7.4-a Caractéristiques	12
I.8 MOTEUR À COURANT CONTINU À AIMANT PERMANENT	12

I.9	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES MOTEURS À COURANT CONTINU . . .	12
I.9.1	Inconvénients . . . . .	12
I.10	MODÉLISATION DE MOTEUR À COURANT CONTINU . . . . .	13
I.10.1	Équations de moteur à courant continu à excitation indépendante . . . . .	13
I.10.2	Ecriture les équations électriques et mécaniques dans le domaine de Laplace : . . . . .	13
I.10.3	Schéma bloc de moteur à courant continu . . . . .	14
I.11	CONCLUSION . . . . .	14
<b>II</b>	<b>IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES D'UN MOTEUR À COURANT CONTINU</b>	<b>15</b>
II.1	INTRODUCTION . . . . .	16
II.2	MÉTHODES D'IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DU MOTEUR . . . . .	16
II.3	MÉTHODES CLASSIQUE . . . . .	16
II.3.1	Mesure des résistances $R_a$ et $R_f$ . . . . .	16
II.3.2	Détermination des inductances $L_a$ et $L_f$ . . . . .	17
II.3.3	Détermination de la constante de la F.C.E.M. . . . .	20
II.3.4	Détermination du coefficient de frottement visqueux $f_v$ . . . . .	21
II.3.5	Détermination de moment l'inertie . . . . .	22
II.4	MÉTHODE MOINDRE CARRÉ RÉCURSIVE . . . . .	23
II.4.1	Objectif de la méthode . . . . .	24
II.4.2	Formulation générale . . . . .	24
II.4.3	Application sur les équations de moteur à cc . . . . .	24
II.4.3-a	Identification des paramètres électriques . . . . .	24
II.4.3-b	Identification des paramètres mécanique . . . . .	24
II.4.4	Les étapes de la méthode des moindres carrés réursive . . . . .	25
II.5	COMPARAISON DES VALEURS OBTENUES PAR LES DEUX MÉTHODES . . . . .	31
II.6	VALIDATION . . . . .	32
II.7	INTERPRÉTATION DE LA VALIDATION . . . . .	34
II.8	CONCLUSION . . . . .	34
<b>III</b>	<b>SIMULASTION ET RÉGULATION DE MOTEUR À COURANT CONTINU</b>	<b>35</b>
III.1	INTRODUCTION . . . . .	36
III.2	HACHEUR . . . . .	36
III.2.1	Hacheur série (Buck) . . . . .	36
III.2.1-a	Principe de fonctionnement . . . . .	37
III.2.2	Hacheur à deux quadrants . . . . .	37
III.2.2-a	Structure de l'hacheur deux quadrants . . . . .	38
III.2.2-b	Principe de fonctionnement . . . . .	38
III.2.3	Hacheur à quatre quadrants . . . . .	39
III.2.3-a	Fonctionnement . . . . .	39
III.3	TECHNIQUE DE COMMANDE <i>MLI</i> . . . . .	40
III.3.1	Principe de la technique <i>MLI</i> . . . . .	41
III.4	RÉGULATEUR <i>PI</i> . . . . .	42
III.4.1	Structure d'un régulateur <i>PI</i> . . . . .	42
III.4.2	Méthode par compensation de pôle . . . . .	43
III.4.2-a	Calcul du régulateur de courant . . . . .	43

III.4.2-b Calcul du régulateur de vitesse . . . . .	44
III.4.3 Méthode Tune de la librairie Matlab . . . . .	45
III.4.3-a Régulateur de courant . . . . .	45
III.4.3-b Régulateur de vitesse . . . . .	47
III.5 SIMULATIONS DE LA COMMANDE DE LA MACHINE À COURANT CONTINU . . . . .	48
III.5.1 Résultats de simulation . . . . .	49
III.5.2 Interprétation des résultats . . . . .	50
III.6 CONCLUSION . . . . .	50
<b>IV COMMANDE (MCC) AVEC LA CARTE DSPACE DS1104 . . . . .</b>	<b>51</b>
IV.1 INTRODUCTION . . . . .	52
IV.2 CARTE DSPACE DS1104 . . . . .	52
IV.2.1 Présentation . . . . .	52
IV.2.2 Architecture . . . . .	53
IV.2.3 Panneau de connexion . . . . .	54
IV.3 CONTROL DESK . . . . .	55
IV.3.1 Zone d'application . . . . .	55
IV.3.2 Nouveau projet sur ControlDesk . . . . .	55
IV.3.2-a Créer un nouveau projet + expérience . . . . .	56
IV.3.3 Sauvegarder des données . . . . .	60
IV.4 CÔTÉ IMPLÉMENTATION . . . . .	63
IV.4.1 Description générale . . . . .	64
IV.4.1-a Différentes parties du banc d'essai . . . . .	65
IV.5 ONDULEUR DE TENSION (FONCTION HACHEUR) . . . . .	65
IV.6 SCHÉMA DE MONTAGE EXPÉRIMENTAL . . . . .	66
IV.7 MESURES DES GRANDEURS PHYSIQUES : . . . . .	66
IV.7.1 Mesure de vitesse . . . . .	66
IV.7.1-a Explication de modèle Simulink . . . . .	67
IV.7.2 Mesure de courant . . . . .	67
IV.7.2-a Explication de modèle Simulink . . . . .	68
IV.7.3 Mesure de tension . . . . .	68
IV.7.3-a Explication de modèle simulink . . . . .	68
IV.8 RÉGLAGE DE COURANT . . . . .	68
IV.8.1 Rapport cyclique (duty cycle) . . . . .	69
IV.8.2 Résultats de réglage de courant . . . . .	70
IV.8.3 Interprétation des résultats de courant . . . . .	71
IV.9 RÉGLAGE DE VITESSE . . . . .	71
IV.9.1 Explication du modèle Simulink . . . . .	72
IV.9.1-a Boucle de vitesse . . . . .	72
IV.9.1-b Boucle de courant . . . . .	72
IV.9.2 Résultats obtenus . . . . .	74
IV.9.3 Interprétation des résultats . . . . .	76
IV.10 CONCLUSION . . . . .	77
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE . . . . .</b>	<b>78</b>

---

ANNEXE A : MATÉRIEL UTILISÉ POUR FAIRE L'IDENTIFICATION	1
ANNEXE B : CONDITIONS DE LA SIMULASTION	4
ANNEXE C : MATÉRIEL UTILSE POUR LA COMMANDE	6

# TABLE DES FIGURES

I.1	Différentes parties de moteur à courant continu [11]	4
I.2	Inducteur complet d'un moteur à courant continu [11]	5
I.3	Induit complet d'un moteur à courant continu [11]	6
I.4	Balais-collecteur d'un moteur à courant continu [11]	7
I.5	Bilan de puissance de la machine à courant continu	9
I.6	Machine à courant continu à excitation série	10
I.7	Machine à courant continu à excitation shunt	10
I.8	Machine à courant continu à excitation composée	11
I.9	Machine à courant continu à excitation séparée	11
I.10	Machine à courant continu à aimant permanent	12
I.11	Schéma bloc de moteur à courant continu sous Matlab/Simulink	14
II.1	Montage du mesure la résistance d'induit $R_a$	16
II.2	Montage du mesure la résistance d'inducteur $R_f$	17
II.3	Montage du mesure de l'inductance d'induit $L_a$	18
II.4	Montage du mesure l'inductance d'inducteur $L_f$	18
II.5	Montage pour la détermination constante $K_e$	20
II.6	Courbe de tension $V_a$ en fonction du courant $I_f$	20
II.7	Détermination du coefficient de frottement visqueux $f_v$	21
II.8	Couple $C_{em}$ en fonction de vitesse $\omega_r$	22
II.9	Essai de ralentissement (Laché)	23
II.10	Vitesse $\omega_r$ de l'essai expérimental	25
II.11	Courant $I_a$ de l'essai expérimental	25
II.12	Modèle Simulink du moteur à courant continu	25
II.13	Command window de Matlab	26
II.14	Estimation des paramètres (Parameter estimation)	26
II.15	Entrés des données (input data)	27
II.16	Sorties des données (output data)	27
II.17	Données variables (Variables Data)	28
II.18	Estimation des paramètres (Parameters estimate)	28
II.19	Options de simulation (Simulation options)	29
II.20	Options d'optimisation (Optimization options)	29
II.21	estimation de départ (Start estimation)	30
II.22	Résultats final d'estimation	30
II.23	Courbes des trajectoires des estimation	31
II.24	Courbe de comparaison vitesse $\omega_r$ classique	32
II.25	Courbe de comparaison courant $I_a$ classique	32

II.26	Courbe de comparaison vitesse $\omega_r$ moindre carré récursive	33
II.27	Courbe de comparaison courant $I_a$ moindre carré récursive	33
III.1	Principe d'hacheur	36
III.2	Structure d'un hacheur série	37
III.3	Structure d'hacheur deux quadrants	38
III.4	Principe de fonctionnement d'un hacheur à deux quadrants	39
III.5	Structure d'un hacheur à quatre quadrants	39
III.6	Tension aux bornes de la charge [17]	40
III.7	Principe du fonctionnement d'un hacheur quatre quadrants	40
III.8	Courbes montre principe de la commande MLI	41
III.9	Structure de régulateur $PI$	42
III.10	Détermination des paramètres de régulateur $PI$ courant	45
III.11	Interface d'un régulateur $PI$ "Tune"	46
III.12	Proposition de réglage tune	46
III.13	Valeurs de régulateur $PI$ choisi	47
III.14	Détermination de Régulateur $PI$ vitesse	47
III.15	Bloc de simulation de commande machine à courant continu	48
III.16	Courbe de vitesse $\omega_r$	49
III.17	Courbe de courant $I_a$	49
III.18	Courbe de couple $C_{em}$	49
III.19	Courbe de vitesse $\omega_r$ pour vitesse de références variable	50
IV.1	Structure de contrôle en temps réel [19]	52
IV.2	Carte DSPACE DS1104 [16].	53
IV.3	Architecture de la carte DS1104 [18].	53
IV.4	Panneau de connexion CLP1104 [18].	54
IV.5	Interface de ControlDesk	55
IV.6	Première étape pour créer un project	56
IV.7	Deuxième étape pour créer un project	56
IV.8	Troisième étape pour créer un project	57
IV.9	Quatrième étape pour créer un project	57
IV.10	Cinquième étape	58
IV.11	Différentes parties de la fenêtre de ControlDesk	59
IV.12	Icône Go Online	59
IV.13	Icône Start Measuring	60
IV.14	Icône Go Offline	60
IV.15	Sauvegarder des données	61
IV.16	Exporter des données	61
IV.17	Programme Matlab pour chargement des données	62
IV.18	Processus de développement d'une méthode de contrôle sur le banc de démonstration	63
IV.19	Photo du banc d'essai expérimental	64
IV.20	Onduleur de tension SEMIKRON	65
IV.21	Schéma équivalent de montage réel	66

---

IV.22	Mesure de vitesse . . . . .	67
IV.23	Mesure de courant . . . . .	67
IV.24	Mesure de tension . . . . .	68
IV.25	Modèle de réglage de courant d'induit . . . . .	69
IV.26	Représentation rapport cyclique (duty cycle) . . . . .	69
IV.27	Courbe de courant d'induit $I_a$ en boucle ouverte . . . . .	70
IV.28	Courbe de tension en en boucle ouverte . . . . .	70
IV.29	Courbe de courant d'inducteur $I_f$ . . . . .	71
IV.30	Modèle Simulink globale . . . . .	72
IV.31	Fenêtre de ControlDesk pour la commande . . . . .	73
IV.32	Courbe de vitesse pour valeur de référence fix . . . . .	74
IV.33	Courbe de vitesse pour valeur de référence variable . . . . .	74
IV.34	Courbe de courant pour valeur de référence variable . . . . .	75
IV.35	Courbe de tension . . . . .	75
IV.36	Modulation de largeur d'impulsion . . . . .	76
37	Plaque signalétique de la machine à courant continu. . . . .	1
38	Voltemètre pour mesurer la tension . . . . .	2
39	Ampèremètre pour mesurer le courant . . . . .	2
40	Plaque signalétique de la génératrice tachymètre . . . . .	3
41	Paramètres bloc DC machine . . . . .	5
42	Capteur de courant $AC/DC$ $i30s$ . . . . .	6
43	Fiche technique de Capteur de courant $AC/DC$ $i30s$ [24] . . . . .	7
44	Capteur de tension GDP-100 . . . . .	8
45	Fiche technique de capteur de tension $GDP - 100$ [23] . . . . .	9
46	Encodeur de vitesse Baumer-GI355 . . . . .	10
47	Fiche technique d'encodeur de vitesse Baumer-GI355 [25] . . . . .	11
48	Onduleur de tension . . . . .	12
49	Fiche technique d'onduleur de tension SEMIKRON [22] . . . . .	13

---

## Nomenclature

Les symboles a abréviation utilisés dans cette mémoire sont présents dans le tableau suivant :

### Grandeurs électriques et mécaniques du moteur à courant continu

Nom	Symbole	Unité
Perte fer	$P_{fe}$	$W$
Perte joule	$P_j$	$W$
Perte mécanique	$P_m$	$W$
Perte magnétiques	$P_{mag}$	$W$
Puissance absorbée	$P_a$	$W$
Puissance utile	$P_u$	$W$
Rapport cyclique	$\alpha$	–
Régulateur classique	$PI$	–
Rendement	$\mu$	%
Resistance de l'inducteur	$R_f$	$\Omega$
Resistance de l'induit	$R_a$	$\Omega$
Temps de ralentissement	$T_r$	$s$
Tension aux bornes de l'inducteur	$V_f$	$V$
Tension aux bornes de l'induit	$V_a$	$V$
Tension aux bornes de diode	$V_d$	$V$
Tension aux bornes de transistor	$V_T$	$V$
Vitesse de rotation	$\omega_r$	$rad/s$
Champ magnétique	$\vec{B}$	$Tesla$
Coefficient de frottement visqueux	$f_v$	$N.s/rad$
Coefficients d'intégration	$K_i$	–
Coefficients de proportionnalité	$K_p$	–

Constants de temps électrique	$\tau_e$	$s$
Constante de temps mécanique	$\tau_m$	$s$
Constante de la force électromotrice	$K_e$	$V.s/rad$
Couple de frottement sec	$C_s$	$N.m$
Couple résistant	$C_r$	$N.m$
Couple de pertes	$C_p$	$N.m$
Couple électromagnétique	$C_{em}$	$N.m$
Courant de l'inducteur	$I_f$	$A$
Courant de l'induit	$I_a$	$A$
Force électromagnétique	$\vec{F}$	$N.m$
Flux d'inducteur	$\phi$	$Wb$
Force électromotrice	$E$	$V$
Fréquence	$f$	$Hz$
Impédance de l'inducteur	$Z_f$	$\Omega$
Impédance de l'induit	$Z_a$	$\Omega$
Inductance de l'inducteur	$L_f$	$H$
Inductance de l'induit	$L_a$	$H$
Inductance mutuelle entre l'induit et l'inducteur	$M_{fd}$	$H$
Longueur de conducteur	$L$	$m$
Moment d'inertie	$J$	$kg.m^2$
Nombre de conducteur	$N$	–
Nombre de paire de pôles	$P$	–
Nombre de paire de voie parallèle	$a$	–
Période	$T$	$ms$

---

## Glossaire

<b>Acronyme</b>	<b>Signification</b>
A/N	Analogique / Numérique
ADC	Analogique / Numérique convertisseur
CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
$FT_{bf}$	Fonctions de transfert en boucle fermée
$FT_{bo}$	Fonctions de transfert en boucle ouverte
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
DS1104	Carte Dspace 1104
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
MCC	Moteur à courant continu
PMW	Pulse width Modulation
RLS	Recursive Least Squares

---

## Introduction générale

Les systèmes électromécaniques jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles, robotiques et de transport. Parmi eux, le moteur à courant continu (MCC) reste un élément fondamental grâce à sa simplicité de commande, sa linéarité, et ses bonnes performances dynamiques. La commande efficace d'un MCC nécessite cependant une connaissance précise de ses paramètres dynamiques, qui ne sont pas toujours fournis ou constants.

Dans ce contexte, l'objectif de ce projet de fin d'étude master consiste à modéliser un moteur à courant continu, d'étudier en simulation son association avec un convertisseur DC-DC, puis de synthétiser différentes stratégies pour sa commande. Enfin, un travail expérimental qui aura pour but d'identifier les paramètres du modèle du moteur considéré et d'implanter une commande en employant le système de prototypage rapide dSPACE DS1104. Plusieurs essais expérimentaux seront réalisés pour vérifier les performances en poursuite et en régulation de l'association « moteur-hacheur » en boucle fermée.

Le travail que nous avons réalisé au sein du laboratoire pédagogique de commande des machines, faculté de Technologie, Université de Tlemcen, s'articule autour de quatre chapitres.

- Le premier chapitre est consacré aux généralités et modélisation du moteur à courant continu et les composants du moteur, les types d'excitation, les équations fondamentales décrivant le comportement électrique et mécanique du MCC. Une modélisation simplifiée en espace d'état est également proposée afin de préparer la conception de la commande.
- Le deuxième chapitre présente les méthodes expérimentales utilisées pour identifier les paramètres essentiels du moteur (résistance, inductance, constante de couple, inertie, frottements...). En utilisant la méthode classique puis la méthode de moindre carré et fait une comparaison entre eux. Les résultats obtenus sont comparés avec les valeurs théoriques ou nominales.
- Le troisième chapitre concerne les types d'hacheurs et la commande de modulation

de largeur d'impulsion, calcul des correcteurs PI tous ça pour faire une régulation de la vitesse par simulation et tire les différents résultats.

- Le chapitre final aborde l'environnement de développement (ControlDesk, MATLAB/Simulink), les étapes d'implémentation du contrôle sur la carte dSPACE1104 et des essais réalisés de la commande du moteur en temps réels puis tire les résultats expérimentaux constatés.

À travers cette étude, l'objectif est non seulement de maîtriser les outils d'identification et de commande des systèmes électromécaniques, mais également de les mettre en œuvre sur une plateforme matérielle performante en conditions réelles.

Enfin, nous concluons ce document par une synthèse et des perspectives d'avenir.

## Chapitre I

# Généralités et modélisation des moteurs à courant continu

### SOMMAIRE

---

I.1	INTRODUCTION . . . . .	4
I.2	CONSTITUTION DU MOTEUR À COURANT CONTINU . . . . .	4
I.2.1	Partie fixe (stator) . . . . .	5
I.2.2	Partie mobile (induit) . . . . .	6
I.2.3	Collecteur . . . . .	6
I.2.4	Balais . . . . .	7
I.3	DIFFÉRENTES EXPRESSIONS DE LA MACHINE À COURANT CONTINU À EXCITATION SÉPARÉE . . . . .	7
I.3.1	Force électromotrice . . . . .	7
I.3.2	Couple électromagnétique . . . . .	8
I.3.3	Puissance électromagnétique . . . . .	8
I.4	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT . . . . .	8
I.5	BILAN DE PUISSANCE . . . . .	8
I.6	RENDEMENT DU MOTEUR À COURANT CONTINU . . . . .	9
I.7	TYPES D'EXCITATIONS DU MOTEURS À COURANT CONTINU . . . . .	9
I.7.1	Moteur à excitation série . . . . .	10
I.7.2	Moteur à excitation shunt . . . . .	10
I.7.3	Moteur à excitation composée . . . . .	11
I.7.4	Moteur à excitation indépendante (séparée) . . . . .	11
I.8	MOTEUR À COURANT CONTINU À AIMANT PERMANENT . . . . .	12
I.9	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES MOTEURS À COURANT CONTINU . . . . .	12
I.9.1	Inconvénients . . . . .	12
I.10	MODÉLISATION DE MOTEUR À COURANT CONTINU . . . . .	13
I.10.1	Équations de moteur à courant continu à excitation indépendante . . . . .	13
I.10.2	Ecriture les équations électriques et mécaniques dans le domaine de Laplace : . . . . .	13
I.10.3	Schéma bloc de moteur à courant continu . . . . .	14
I.11	CONCLUSION . . . . .	14

---

## I.1 Introduction

Le moteur à courant continu, souvent appelé moteur CC, est un dispositif électromécanique qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à l'interaction entre un champ magnétique et un courant électrique. Ce type de moteur est l'un des plus anciens et dans diverses applications industrielles, domestiques et automobiles, en raison de sa simplicité de commande, sa fiabilité et sa capacité à fournir un couple élevé à basse vitesse.

Les moteurs à courant continu sont particulièrement appréciés dans les systèmes nécessitant une variation précise de la vitesse ou du couple, comme dans les trains électriques, les robots, les ventilateurs, les jouets motorisés ou encore les équipements de production automatisés [1].

Dans ce chapitre, nous allons examiner la constitution et les principes de base du fonctionnement des machines à courant continu, ainsi que les différents types d'excitations de moteurs. Nous aborderons également les avantages et les limites du moteur à courant continu.

## I.2 Constitution du moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu sont principalement composés de :

- L'inducteur (stator).
- L'induit (rotor).
- Le collecteur et balais.

La figure I.1 montre la structure générale d'un moteur à courant continu :

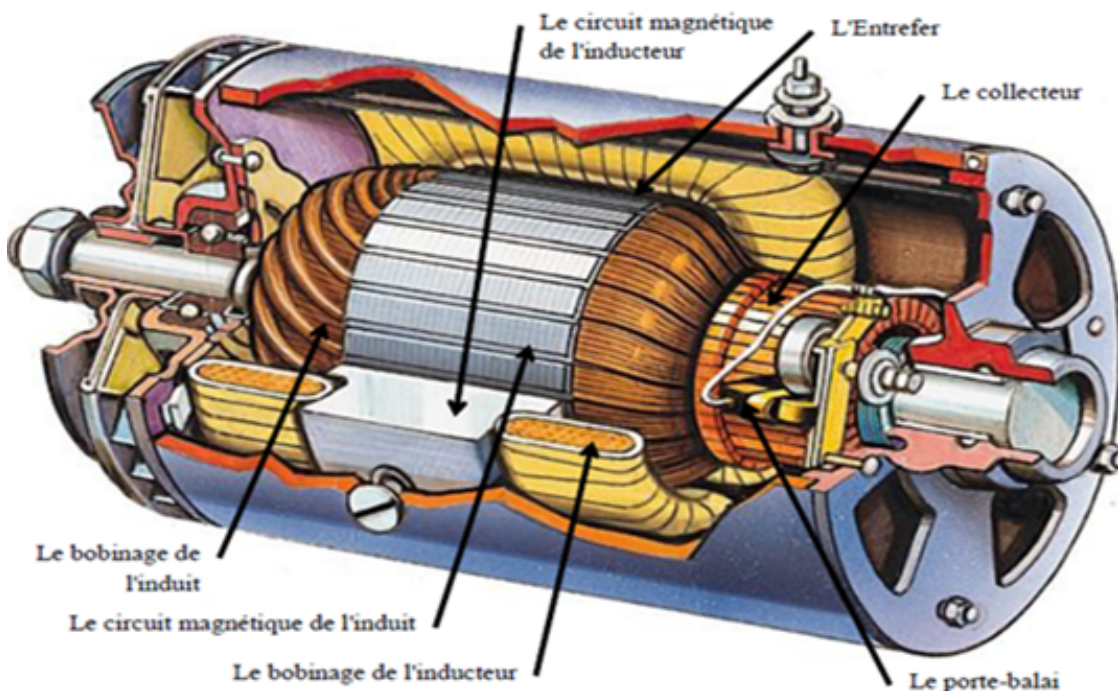


FIGURE I.1 – Différentes parties de moteur à courant continu [11]

### I.2.1 Partie fixe (stator)

Il s'agit de la partie fixe du moteur (le stator étant une exception). Il est muni d'un bobinage parcouru par le courant inducteur et produisant le champ d'excitation magnétique dans le moteur. C'est pourquoi on l'appelle aussi courant d'excitation et bobines excitatrices tel qu'il est représenté sur la figure I.2.

La partie fixe comporte :

1. **La carcasse (ou culasse) :**

elle sert à :

- Supporter les différentes parties de la machine.
- Refermer le champ magnétique.

2. **Les pièces polaires :**

Les pièces polaires sont constituées de tôles feuilletées (pour réduire les pertes par courants de Foucault) et permettent de supporter les bobines d'excitation de la machine. Elles permettent donc de produire un champ d'induction .

3. **L'enroulement d'excitation :**

Il est monté sur les pièces polaires et l'ensemble forme un électro-aimant. Lorsque l'enroulement est parcouru par un courant, il produit un champ magnétique [1].

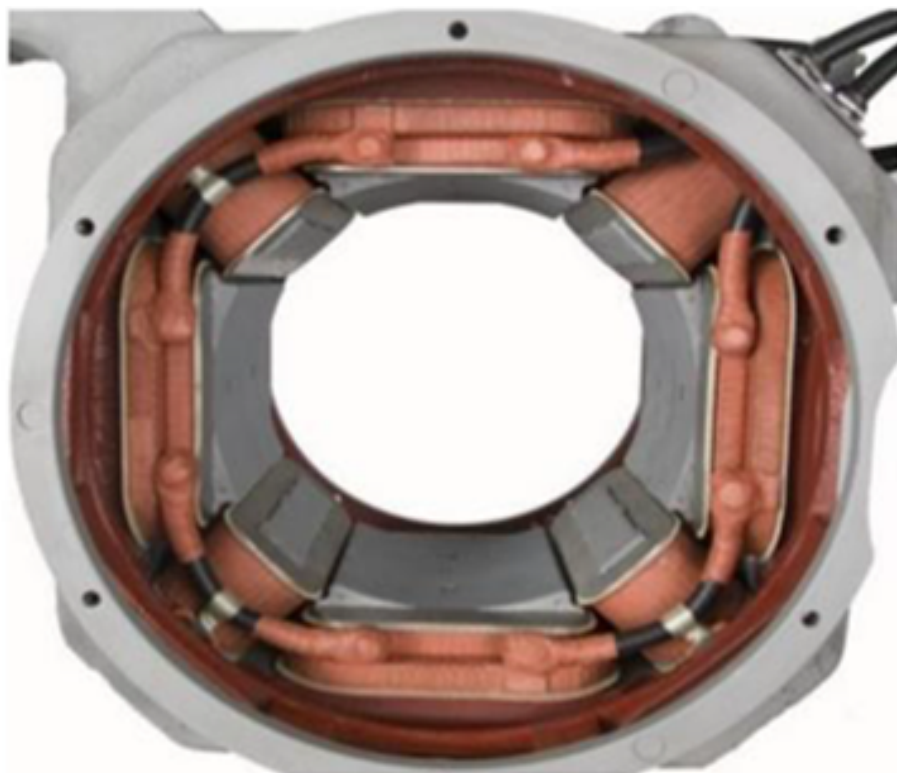


FIGURE I.2 – Inducteur complet d'un moteur à courant continu [11]

### I.2.2 Partie mobile (induit)

Il s'agit de la partie tournante du moteur, également appelée rotor. Il est de forme cylindrique, avec une surface encochée permettant de fixer un bobinage à  $(P)$  paires de pôles, exactement comme l'inducteur. L'induit entre les pièces polaires. Il se compose de l'axe, du noyau, des enroulements et du collecteur. Sa structure est un noyau de fer feuilleté pour réduire les pertes par courant Foucault tel qu'il est représenté sur la figure I.3.[1]

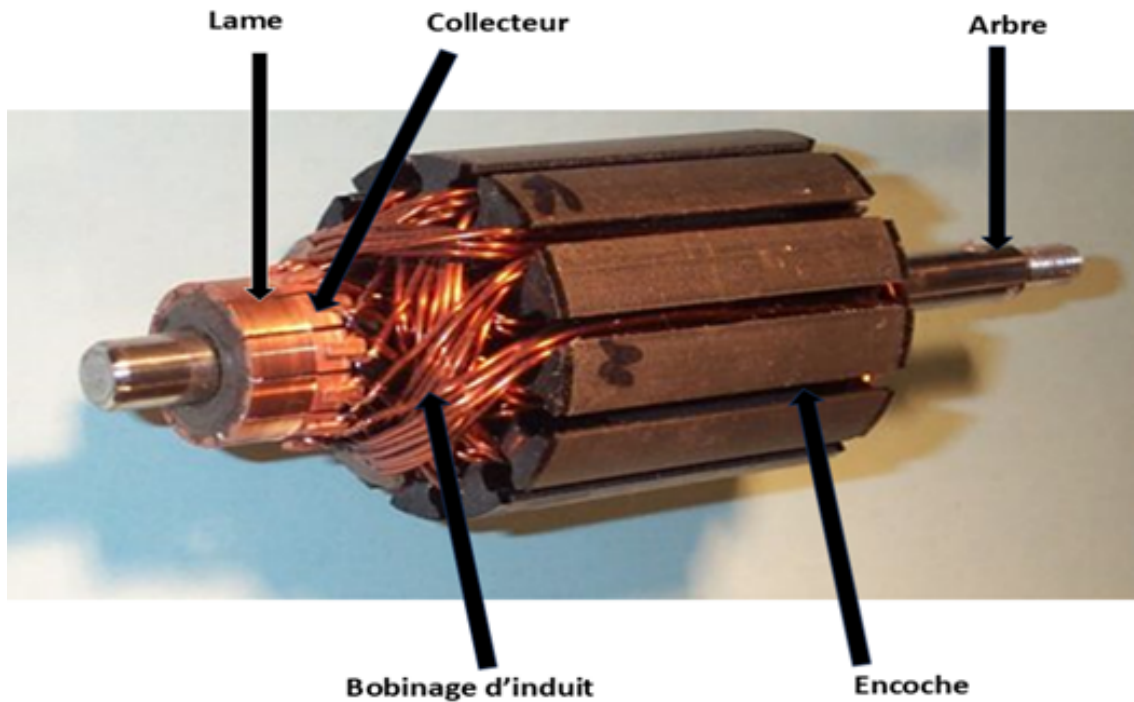


FIGURE I.3 – Induit complet d'un moteur à courant continu [11]

### I.2.3 Collecteur

Il se compose de lames de cuivre isolées les unes des autres et de l'axe par du mica. Les extrémités des lames possèdent de petites encoches auxquelles sont soudées les spires de l'induit.

Pour expliquer le rôle du collecteur, nous allons considérer que la machine fonctionne en mode générateur. Son but est de produire une tension. Un courant unidirectionnel est ainsi créé dans la charge connectée à ses bornes. Cependant, la rotation du rotor dans le champ d'induction permet d'obtenir une force électromotrice alternative. Il faut donc réaliser un redresseur de tension. C'est le rôle du collecteur montré dans la figure I.4 [1] [2].

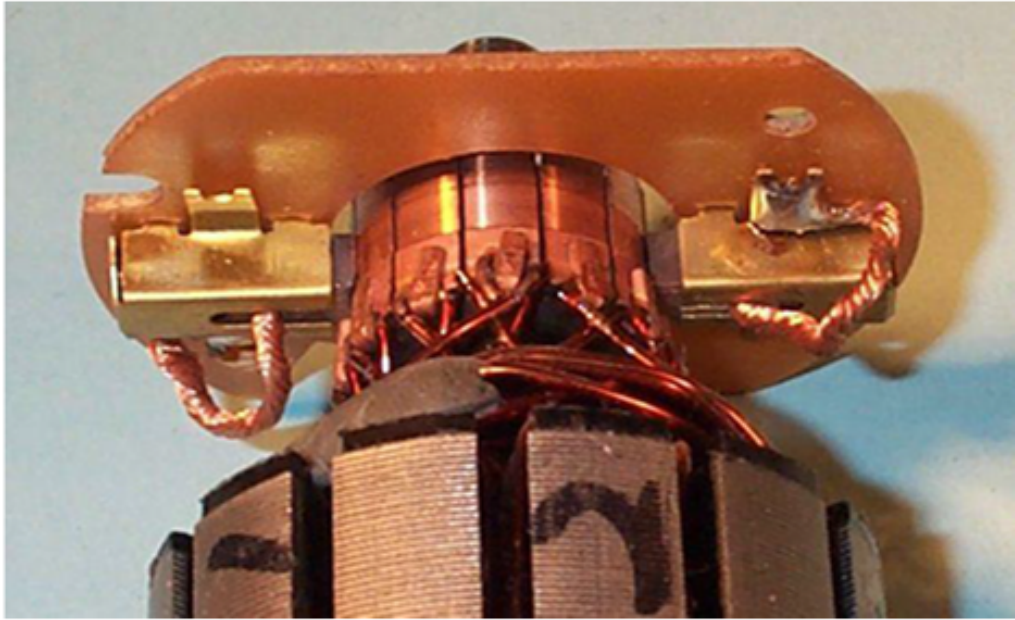


FIGURE I.4 – Balais-collecteur d'un moteur à courant continu [11]

#### I.2.4 Balais

Les balais frottent contre le collecteur et permettent de récolter la force électromotrice induite. Ils sont en carbone montré dans la figure précédente [1].

### I.3 Différentes expressions de la machine à courant continu à excitation séparée

La tension aux bornes de l'induit est donnée par l'équation suivante :

$$V_a = R_a \cdot I_a + L_a \frac{dI}{dt} + E \quad (\text{I.1})$$

Le courant de l'induit étant constant, en régime permanent d'où :

$$V_a = R_a \cdot I_a + E \quad (\text{I.2})$$

#### I.3.1 Force électromotrice

Une spire soumise à l'action d'un champ magnétique variable développe, selon la loi de Faraday, une force électromotrice (*f.e.m.*) à ses bornes I.3 [3].

$$E = \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{I.3})$$

Ce phénomène est d'une immense importance, car il est à l'origine du fonctionnement des moteurs, comme l'indique la formule (I.4) suivante [4] :

$$E = \frac{PN\phi\Omega}{2\pi a} \quad (\text{I.4})$$

On exprime alors la *f.e.m.* de la *MCC* de manière plus condensée par la relation (I.5) :

$$E = K_e \cdot \Omega \quad (\text{I.5})$$

### I.3.2 Couple électromagnétique

Chaque conducteur est le siège d'un effort qui crée un couple sur l'arbre. Leur somme génère le couple électromagnétique  $C_{em}$  [3].

L'expression du couple électromagnétique est donnée par se formule (I.6) :

$$C_{em} = \frac{PN\phi I_a}{2\pi a} \quad (\text{I.6})$$

Suivant la relation issue de la loi de Laplace, le couple dépend du flux sous un pôle ( $\Phi$  en Wb), du courant total d'induit ( $I$  en A) et du nombre de conducteurs ( $N$ ).

Nous exprimons alors le couple sur l'arbre de la MCC de manière plus condensée par la relation (I.7) :

$$C_{em} = K_m \cdot I_a \quad (\text{I.7})$$

### I.3.3 Puissance électromagnétique

La puissance électromagnétique que l'inducteur transmet au rotor par l'action du couple électromagnétique  $C_{em}$  est donnée par (I.8) :

$$P_{em} = E \cdot I \quad (\text{I.8})$$

## I.4 Principe de fonctionnement

Pour comprendre son principe de fonctionnement, nous allons considérer que l'inducteur et l'induit sont électriquement séparés. Nous sommes donc dans le cas d'un moteur à excitation indépendante.

On alimente l'excitation du moteur. Celui-ci crée un champ d'induction de direction constante. De plus, on applique un courant circule dans le rotor.

La loi de Laplace affirme qu'une induction produit une force sur un conducteur de longueur active  $L$  (la partie soumise à l'induction) parcouru par un courant  $I$ . Le sens de cette force est donné par la règle des trois doigts de la main droite [3].

$$d\vec{F} = Idl \wedge \vec{B} \quad (\text{I.9})$$

Le pouce indique le sens du champ magnétique  $\vec{B}$  ;

L'index indique le sens de la force électromagnétique  $\vec{F}$  ;

Le majeur indique le sens de la circulation du courant  $I$  le long de la longueur  $L$ .

À un instant donné, la force appliquée sur le conducteur est  $\vec{F} = \vec{B}IL$  constante, car l'induction magnétique est uniforme et orthogonale le long de l'entrefer [5].

## I.5 Bilan de puissance

Le bilan des puissances résume toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique. Les pertes dans la machine à courant continu sont subdivisées en différentes catégories qui sont :

- Les pertes magnétique.
- Les pertes Joules.

– Les pertes mécaniques.

Pertes	Pertes magnétiques $P_{mag}$	Pertes joules $P_j$	Pertes mécanique $P_{mc}$
Causes	Elles sont dues à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le fer.	Pertes dans l'induit et l'inducteur dues aux résistances des bobinages.	Elles sont dues aux frottements des diverses pièces en mouvement.
Remèdes	Utilisation de matériaux à cycles d'hystérésis étroits et feuilletage de l'induit.	Éviter l'échauffement par ventilation.	Utilisation de roulements et de lubrifiants.

Le bilan, peut être résumé à l'aide du schéma suivant I.5 :

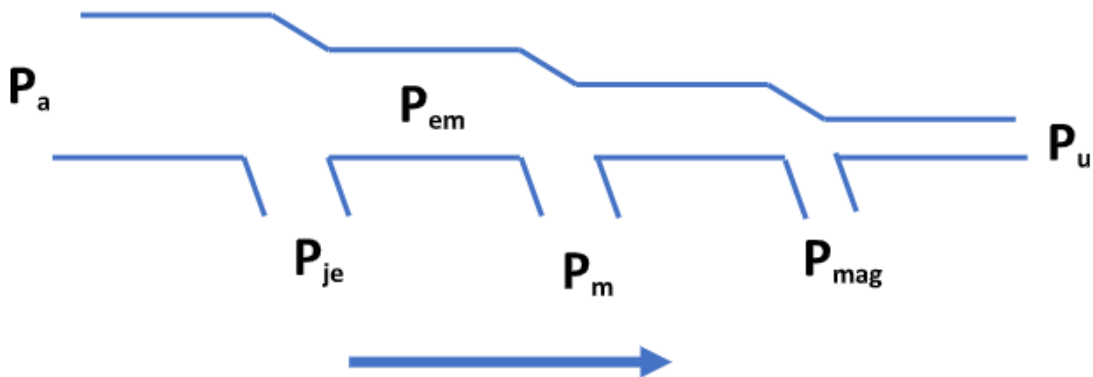


FIGURE I.5 – Bilan de puissance de la machine à courant continu

## I.6 Rendement du moteur à courant continu

Du fait de ces différentes pertes, le rendement d'une machine à courant continu est la puissance utile divisée par la puissance absorbée.

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I.10})$$

## I.7 Types d'excitations des moteurs à courant continu

Étant donné que les moteurs à courant continu sont utilisés dans une grande variété d'applications, selon le mode d'excitation, il existe quatre types de moteurs adaptés aux différentes tâches dans le secteur industriel [5] :

- Le moteur à excitation série.
- Le moteur à excitation shunt.
- Le moteur à excitation composée.
- Le moteur à excitation séparée.

### I.7.1 Moteur à excitation série

Le moteur à excitation série est constitué de deux enroulements l'induit et l'inducteur, montés en série et parcourus par un même courant  $I_a$  sous une tension  $V_a$  [8].

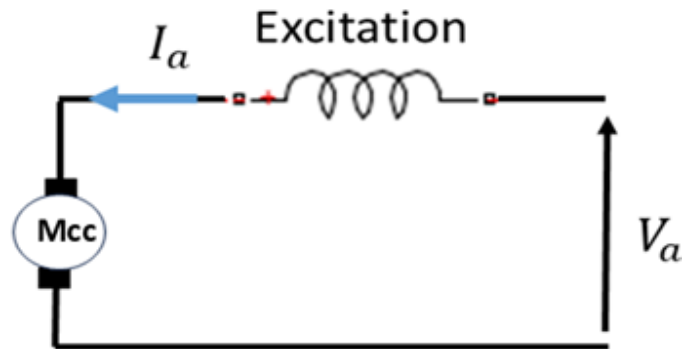


FIGURE I.6 – Machine à courant continu à excitation série

#### I.7.1-a Caractéristiques

Parmi les caractéristiques du moteur à excitation série, on cite :

- Un couple de démarrage important .
- Une faible stabilité de vitesse .
- Un courant d'excitation élevé [8] [10].

### I.7.2 Moteur à excitation shunt

On peut utiliser une seule alimentation pour l'induit et l'inducteur. Il suffit de placer l'enroulement inducteur en parallèle avec l'enroulement d'induit [8].

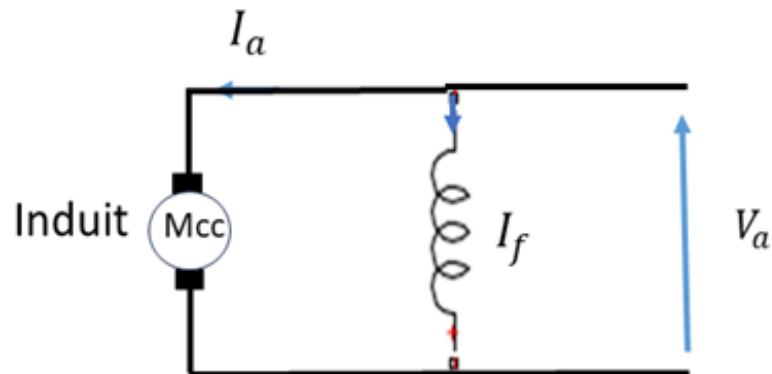


FIGURE I.7 – Machine à courant continu à excitation shunt

#### I.7.2-a Caractéristiques

Ce moteur a les caractéristiques suivantes :

- Un fort couple de démarrage et une instabilité de vitesse .
- L'absence de l'emballement [8] [10].

### I.7.3 Moteur à excitation composée

Il porte deux enroulements inducteurs dont l'un est placé en série avec l'induit et l'autre en parallèle.[8]

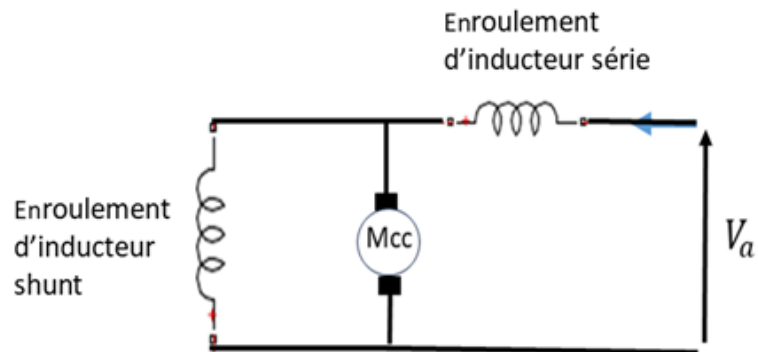


FIGURE I.8 – Machine à courant continu à excitation composée

#### I.7.3-a Caractéristiques

- Un couple de démarrage plus fort.
- Il a une meilleure stabilité.
- Il peut fonctionner à faible charge sans risque d'emballement [8] [10].

### I.7.4 Moteur à excitation indépendante (séparée)

L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale (celle de l'induit) [8].

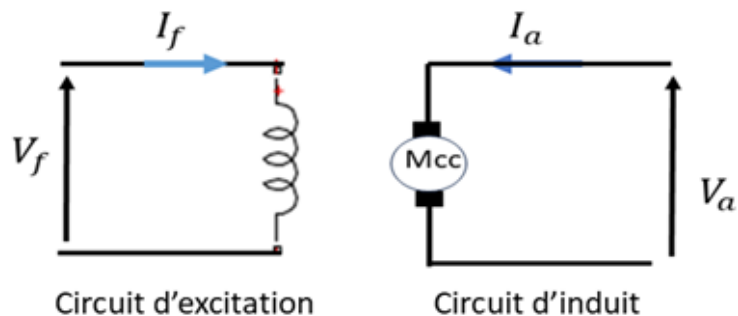


FIGURE I.9 – Machine à courant continu à excitation séparée

### I.7.4-a Caractéristiques

Ce moteur possède les caractéristiques suivantes :

- Une plage de régulation de vitesse très grande.
- Une linéarité tension/vitesse, courant/couple [8] [10].

## I.8 Moteur à courant continu à aimant permanent

Cette technologie de moteur permet une réalisation économique de moteur. En général de faible puissance pour des usages multiples( automobile, audiovisuel, robotique, etc).



FIGURE I.10 – Machine à courant continu à aimant permanent

## I.9 Avantages et inconvénients des moteurs à courant continu

L'avantage principal du moteur à courant continu est la possibilité de faire varier sa vitesse en lui appliquant une tension plus ou moins grande. Son principal inconvénient est le système de commutation qui implique des frottements et des phénomènes d'étincelle qui tendent à endommager les balais qui assurent le contact électrique avec le collecteur.[6]

### I.9.1 Inconvénients

- **Entretien régulier :**  
Présence de balais et d'un collecteur qui s'usent avec le temps (frottement → entretien et remplacement).
- **Moins robuste que les moteurs asynchrones :**  
Sensibles à l'usure mécanique et aux conditions de fonctionnement difficiles.
- **Coût plus élevé :**  
Surtout dans les grandes puissances, à cause de la complexité de conception.
- **Bruit et étincelles :**  
Les frottements entre balais et collecteur génèrent du bruit et parfois des étincelles.

– **Rendement parfois inférieur :**

Les pertes mécaniques (frottement) réduisent l'efficacité globale par rapport aux moteurs sans balais [6].

## I.10 Modélisation de moteur à courant continu

Le moteur à courant continu peut être modélisé à partir des équations électriques et mécaniques. Ces équations nous permettront de mieux comprendre le fonctionnement réel du moteur à courant continu.

Côté électrique, nous pouvons dire que le moteur à courant continu se compose d'un circuit d'induit et d'un circuit inducteur. L'induit de la *MCC* est constitué d'une résistance ( $R_a$ ) et d'une inductance ( $L_a$ ) en série avec une source de tension commandée  $E(t)$  proportionnelle à la vitesse  $\omega_r(t)$ .

D'un point de vue mécanique, nous pouvons représenter le moteur à courant continu par l'inertie de l'induit.[7].

Pour modéliser le moteur à courant continu en simplifiant, les hypothèses suivantes sont adoptées :

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé (donc que le flux est une fonction linéaire des courants)
- On néglige l'effet de peau
- On néglige la réaction magnétique de l'induit [8].

### I.10.1 Équations de moteur à courant continu à excitation indépendante

– **Equations électriques :**

$$V_a = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{I.11})$$

$$V_f = R_f \cdot I_f + L_f \cdot \frac{dI_f}{dt} \quad (\text{I.12})$$

Avec :  $E = K_e \cdot \omega_r$

– **Equations mécaniques :**

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + f_v \cdot \omega_r \quad (\text{I.13})$$

Avec :  $C_{em} = K_e \cdot I_a$

### I.10.2 Ecriture les équations électriques et mécaniques dans le domaine de Laplace :

– **Equations électriques :**

$$V_a(P) = (R_a + L_a P) I_a(P) + E(P) \quad (\text{I.14})$$

$$E(P) = K_e \cdot \omega_r(P) \quad (\text{I.15})$$

En tire  $I_a(P)$  à parti les équations précédentes (I.14)(I.15).

$$I_a(P) = \frac{V_a(P) - K_e \cdot \omega_r(P)}{R_a + L_a P} \quad (\text{I.16})$$

– **Equations mécaniques :**

$$C_{em}(P) - C_r(P) = (f_v + JP)\omega_r(p) \quad (\text{I.17})$$

$$C_{em}(P) = K_e \cdot I_a(P) \quad (\text{I.18})$$

En tire  $\omega_r(P)$  a parti les equations précédentes(I.17)(I.18).

$$\omega_r(P) = \frac{K_e \cdot I_a(P) - C_r(P)}{f_v + JP} \quad (\text{I.19})$$

### I.10.3 Schéma bloc de moteur à courant continu

On peut réaliser le schéma bloc de moteur à courant continu à partir de ces deux équations. (I.16) et (I.19). Comme le montre dans la figure suivante (I.11) :

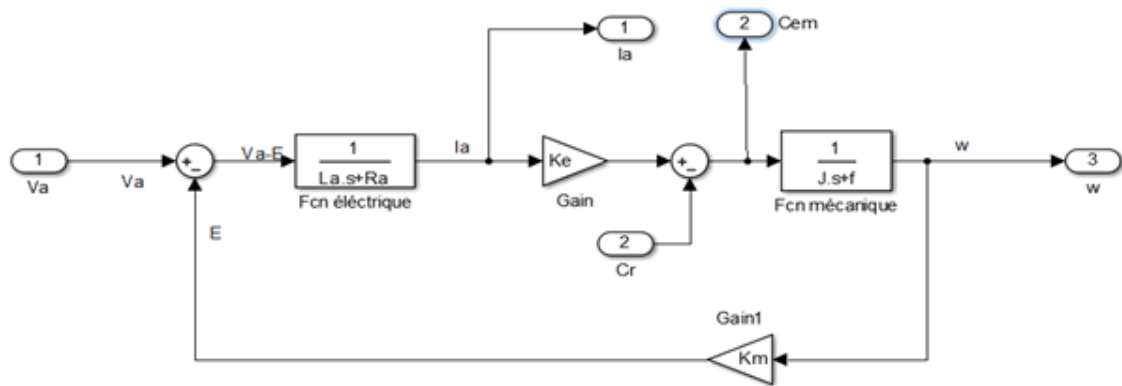


FIGURE I.11 – Schéma bloc de moteur à courant continu sous Matlab/Simulink

## I.11 Conclusion

En conclusion, le moteur à courant continu est un type de moteur électrique très utilisé pour sa facilité de commande grâce à la simplicité des équations comme nous l'avons vu dans la modélisation présentée dans ce chapitre.

Pour réaliser une modélisation efficace, il est essentiel de déterminer les valeurs appropriées des paramètres du moteur. Cela nécessite une identification précise de la machine à l'aide de méthodes adéquates. Ce qui sera présenté dans le chapitre suivant.

## Chapitre II

---

# Identification des paramètres d'un moteur à courant continu

### SOMMAIRE

---

II.1	INTRODUCTION . . . . .	16
II.2	MÉTHODES D'IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES DU MOTEUR . . . . .	16
II.3	MÉTHODES CLASSIQUE . . . . .	16
II.3.1	Mesure des résistances $R_a$ et $R_f$ . . . . .	16
II.3.2	Détermination des inductances $L_a$ et $L_f$ . . . . .	17
II.3.3	Détermination de la constante de la F.C.E.M. . . . .	20
II.3.4	Détermination du coefficient de frottement visqueux $f_v$ . . . . .	21
II.3.5	Détermination de moment l'inertie . . . . .	22
II.4	MÉTHODE MOINDRE CARRÉ RÉCURSIVE . . . . .	23
II.4.1	Objectif de la méthode . . . . .	24
II.4.2	Formulation générale . . . . .	24
II.4.3	Application sur les équations de moteur à cc . . . . .	24
II.4.4	Les étapes de la méthode des moindres carrés récursive . . . . .	25
II.5	COMPARAISON DES VALEURS OBTENUES PAR LES DEUX MÉTHODES . . . . .	31
II.6	VALIDATION . . . . .	32
II.7	INTERPRÉTATION DE LA VALIDATION . . . . .	34
II.8	CONCLUSION . . . . .	34

---

## II.1 Introduction

L'identification des paramètres du moteur à courant continu implique de réaliser des tests afin d'identifier les paramètres électrique et mécanique. Électrique la mesure de la résistance de l'induit  $R_a$ , l'inductance de l'induit  $L_a$ , l'inductance du bobinage  $L_f$  et  $M$ , ainsi que la constante de force électromotrice  $K_e$ . Mécanique tel que le coefficient de friction  $f$  et le moment d'inertie  $J$  à l'aide de l'essai de lâché (ralentissement).

## II.2 Méthodes d'identification des paramètres du moteur

On dispose de plusieurs techniques pour identifier les paramètres des machines à courant continu. On retrouve parmi ces techniques :

1. Technique directe aussi appelée technique classique.
2. Technique de moindre carré.

On va donc déterminer ces paramètres avec ces deux méthodes.

## II.3 Méthodes classique

### II.3.1 Mesure des résistances $R_a$ et $R_f$

- Pour déterminer la résistance de l'induit ( $R_a$ ), nous utilisons la technique volt-ampérométrique. À cet effet, nous mesurons le courant ( $I_a$ ) et la tension ( $V_a$ ) d'induit, sans l'excitation du moteur. Nous alimentons le moteur par une tension continue en variant le courant d'induit passant par la valeur nominale avec le montage suivant (II.1) :

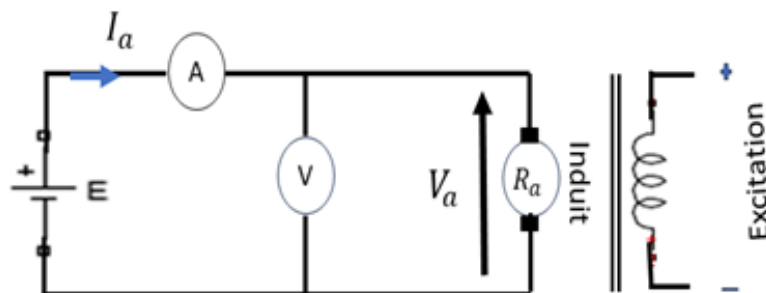
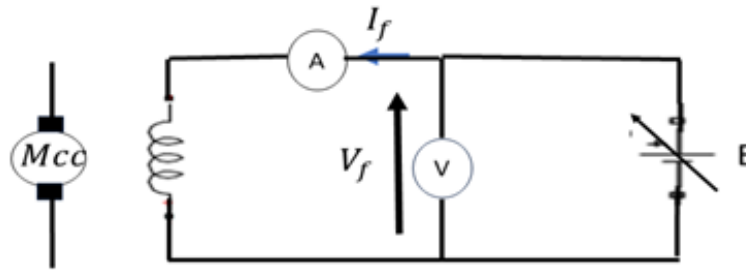


FIGURE II.1 – Montage du mesure la résistance d'induit  $R_a$

- Pour déterminer la résistance d'inducteur ( $R_f$ ), nous utilisons la technique volt-ampérométrique. À cet effet, nous mesurons le courant d'excitation ( $I_f$ ) et la tension d'excitation ( $V_f$ ) d'inducteur du moteur avec ce montage (II.2) :

FIGURE II.2 – Montage du mesure la résistance d'inducteur  $R_f$ 

On détermine la résistance d'induit  $R_a$  et la résistance d'inducteur  $R_f$  grâce à la loi d'Ohm :

$$R_a = \frac{V_a}{I_a} \quad (\text{II.1})$$

$$R_f = \frac{V_f}{I_f} \quad (\text{II.2})$$

Les tableaux suivants représentent les résultats obtenus :

TABLE II.1 – Tableau de mesures de la résistance  $R_a$ 

$V_a$ (V) mesurée	21	26.5	28.2
$I_a$ (A) mesurée	2	2.5	2.7
$R_a$ ( $\Omega$ )calculée	10.5	10.6	10.44444

TABLE II.2 – Tableau de mesures de la résistance  $R_f$ 

$V_f$ (V) mesurée	155	198	235
$I_f$ (A) mesurée	0.08	1	0.12
$R_f$ ( $\Omega$ )calculée	1937.5	1980	1958.33333

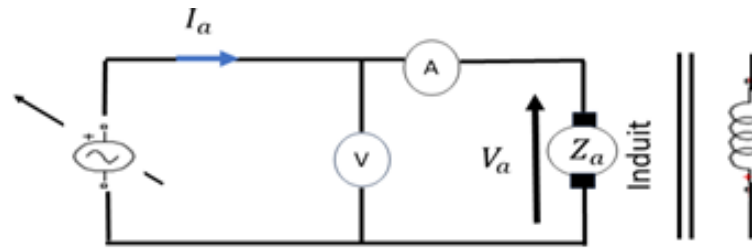
On prend la valeur moyenne des résistances  $R_a$  et  $R_f$  :

$$R_a = 10,51\Omega$$

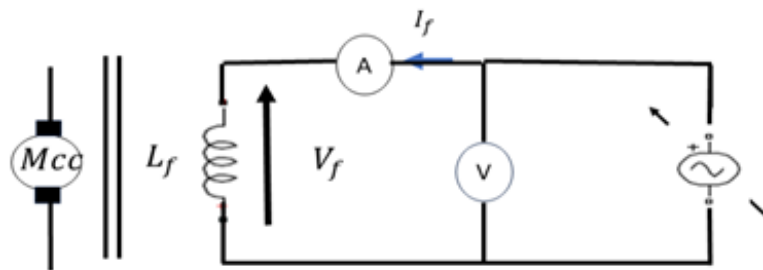
$$R_f = 1958,61\Omega$$

### II.3.2 Détermination des inductances $L_a$ et $L_f$

- Pour déterminer l'inductance de l'induit ( $L_a$ ), nous alimentons l'induit du moteur par une tension alternative ( $V_a$ ). À cet effet, nous mesurons le courant ( $I_a$ ) et la tension alternative ( $V_a$ ) d'induit, pour différentes valeurs. On déduit la valeur de l'inductance ( $L_a$ ) à travers l'impédance moyenne ( $Z_a$ ) avec ce montage suivant II.3 [12] :

FIGURE II.3 – Montage du mesure de l'inductance d'induit  $L_a$ 

- Pour déterminer l'inductance de l'inducteur ( $L_f$ ), nous alimentons l'inducteur du moteur par tension alternative ( $V_f$ ). À cet effet, nous mesurons le courant ( $I_f$ ) et la tension alternative ( $V_f$ ) d'inducteur, pour différentes valeurs. Et on déduire la valeur de l'inductance ( $L_f$ ) à travers l'impédance moyenne ( $Z_f$ ) avec ce montage suivant II.4 [12] :

FIGURE II.4 – Montage du mesure l'inductance d'inducteur  $L_f$ 

On détermine l'impédance d'induit  $Z_a$  et l'impédance d'inducteur  $Z_f$  grâce à la loi d'Ohm :

$$Z_a = \frac{V_a}{I_a} \quad (\text{II.3})$$

$$Z_f = \frac{V_f}{I_f} \quad (\text{II.4})$$

Les tableaux suivants représentent les résultats obtenus :

TABLE II.3 – Tableau de mesures pour déterminer l'impédance d'induit  $Z_a$ 

$V_a$ (V) mesurée	118	105	73
$I_a$ (A) mesurée	1.7	1.5	1
$Z_a$ ( $\Omega$ )calculée	69.411	70	73

TABLE II.4 – Tableau de mesures pour déterminer l'impédance d'inducteur  $Z_f$ 

$V_f(\text{V})$ mesurée	199	160	122
$I_f(\text{A})$ mesurée	0.005	0.004	0.003
$Z_f(\Omega)$ calculée	39800	40000	40666.66

On prend la valeur moyenne des impédances  $Z_a$  et  $Z_f$  :

$$Z_a = 70.8039\Omega$$

$$Z_f = 40155.55\Omega$$

Pour calculer les inductances  $L_a$  et  $L_f$  on suit les étapes suivantes :

Les équations d'impédance :

$$Z = \frac{V}{I} \quad (\text{II.5})$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} \quad (\text{II.6})$$

avec  $\omega = 2\Pi f$

En tire  $L$  :

$$L = \frac{1}{2\Pi f} \sqrt{(Z^2 - R^2)} \quad (\text{II.7})$$

On calcul  $L_a$  et  $L_{ex}$

$$L_a = \frac{1}{2\Pi f} \sqrt{(Z_a^2 - R_a^2)} \quad (\text{II.8})$$

$$L_f = \frac{1}{2\Pi f} \sqrt{(Z_f^2 - R_f^2)} \quad (\text{II.9})$$

Application numérique.

$$L_a = 0.2229H$$

$$L_f = 127.666H$$

Après ces étapes on peut calculer la constante de temps électrique  $\tau_e$  avec cette relation suivante :

$$\tau_e = \frac{L_a}{R_a} \quad (\text{II.10})$$

$$\tau_e = 0.0212s \quad (\text{II.11})$$

### II.3.3 Détermination de la constante de la F.C.E.M.

Pour calculer la constante  $K_e$  on va tracer la courbe de la caractéristique  $V_a = f(I_f)$ . En premier la machine doit fonctionner en mode génératrice et doit être entraîné à sa vitesse nominale courant nominale.

La pente de cette courbe représente  $M_{fd} \cdot \omega_r$ .

En divisant la pente par la vitesse de rotation  $\omega_r$  (en rad/s).

Nous savons que la tension d'induit à vide est donnée par la relation  $V_a = M_{fd} \cdot \omega_r \cdot I_f$ , et la costent  $K_e = M_{fd} \cdot I_f$ .

En utilise le montage suivant II.5 :

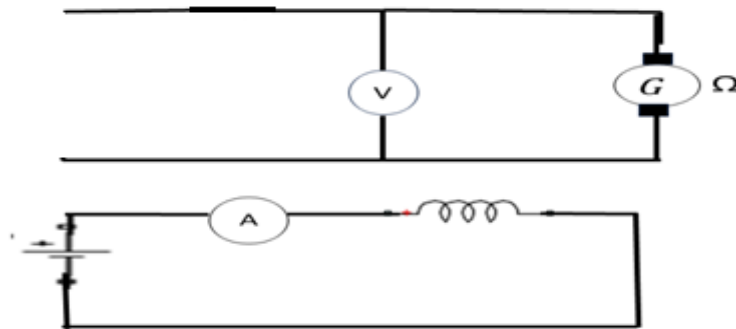


FIGURE II.5 – Montage pour la détermination constante  $K_e$

Les résultats sont donné par le tableau suivant II.5 :

TABLE II.5 – Tableau de mésures pour déterminer la constante  $K_e$

$V_a$ (V) mesurée	52	77	101	126.6	149.5	170.1	192	209	225	234	244
$I_f$ (A) mesurée	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12

A partir des résultats de ce tableau(II.5), nous pouvons trace la courbe (II.6) de  $V_a = f(I_f)$  :

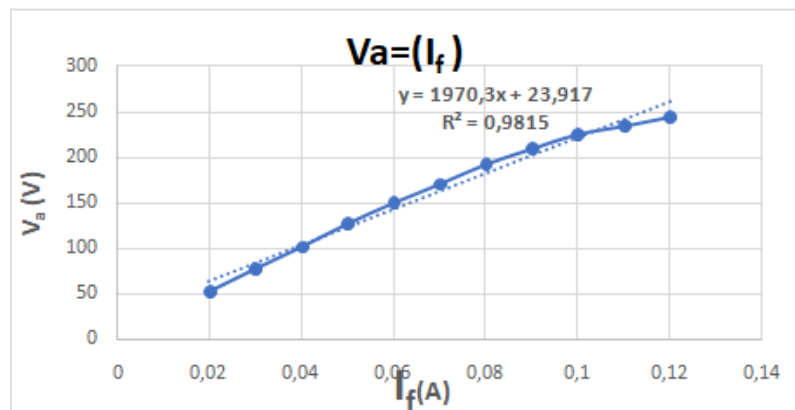


FIGURE II.6 – Courbe de tension  $V_a$  en fonction du courant  $I_f$

Le pente de cette courbe (II.6) nous donne la valeur de  $M_{fd} \cdot \omega_r = 1970,3$ .

Pour trouver la valeur de  $M_{fd}$  il suffit de diviser cette valeur par  $\omega_r$ .  
Le rotor est entraîné à une vitesse de  $\omega_r = 314(\text{rad/s})$ .

$$M_{fd} = \frac{1970,3}{314} = 6,2738H \quad (\text{II.12})$$

Le courant d'excitation est fixé à la valeur nominale. On peut déduire la valeur de la constante  $K_e$  par la relation suivante :

$$K_e = M_{fd} \cdot I_f \quad (\text{II.13})$$

$$K_e = 6,2738 \cdot 0,11$$

$$K_e = 0,6902(\text{V.s/rad})$$

### II.3.4 Détermination du coefficient de frottement visqueux $f_v$

Pour déterminer le  $f_v$  et  $C_s$ , on va tracer la courbe de caractéristique  $C_{em} = f(\omega_r)$ .  
Premièrement on garde le courant d'excitation  $I_f$  à sa valeur nominale.  
On fait varier la tension d'induit  $V_a$ . Puis, on relève les différentes valeurs du courant d'induit  $I_a$  et de la vitesse du rotor  $\omega_r$  en (rad/s) à travers un tachymètre pour chaque tension.  
Le schéma de montage est montré dans la figure (II.7) :

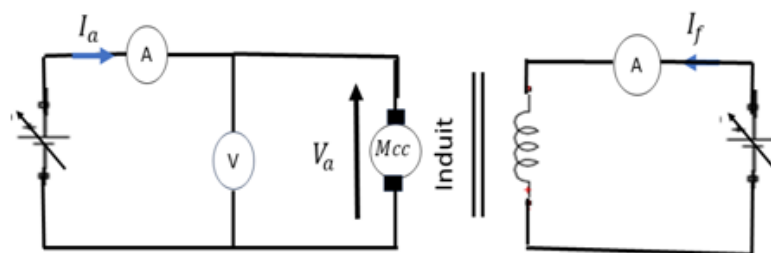


FIGURE II.7 – Détermination du coefficient de frottement visqueux  $f_v$

Pour un moteur à courant continu à excitation indépendante, le couple électromagnétique est donné par la relation (II.14) :

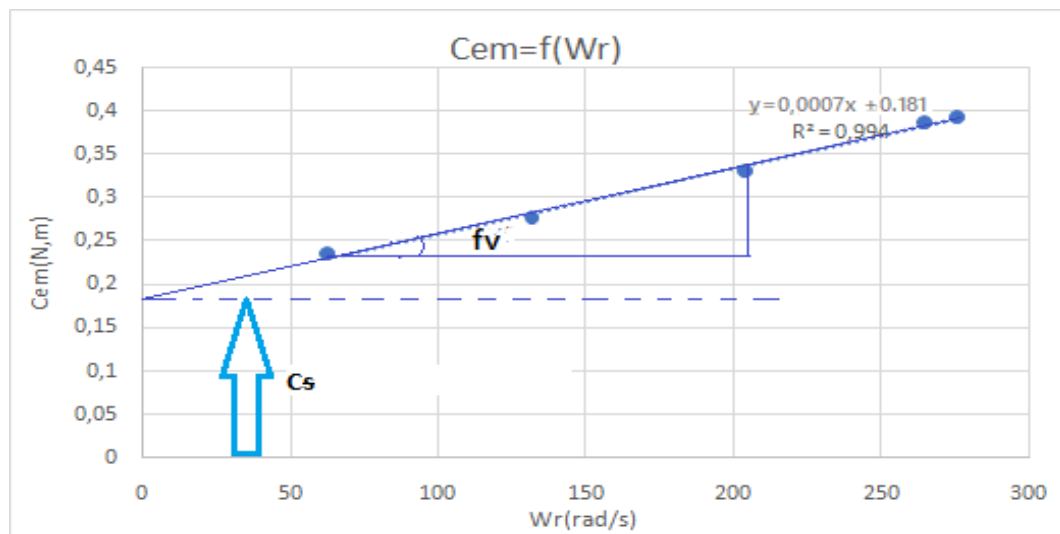
$$C_{em} = K_e \cdot I_a \quad (\text{II.14})$$

Les résultats sont donné par le tableau suivant II.6 :

TABLE II.6 – Tableau de mesures pour déterminer  $f_v$ 

$V_a$ (V)	49	100	150	200	220	235
$I_a$ (A)	0.34	0.4	0.48	0.56	0.57	0.68
$K_e$ (V.s/rad)	0.6902	0.6902	0.6902	0.6902	0.6902	0.6902
$\omega_r$ (tr/min)	601	1262	1949	2528	2633	2738
$\omega_r$ (rad/s)	62.9365	132.1563	204.0988	264.7315	275.7271	286.7226
$C_{em}$ (N.m)	0.2346	0.2760	0.3313	0.3865	0.3934	0.4693

À partir du tableau (II.6), on peut tracer le graphe de la figure (II.8) représentant le couple en fonction de la vitesse  $C_{em} = f(\omega_r)$  :

FIGURE II.8 – Couple  $C_{em}$  en fonction de vitesse  $\omega_r$ 

A partir de la figure (II.8), nous pouvons extraire le couple statique  $C_s$  et le coefficient de frottements visqueux  $f_v$ .

D'après la relation suivante avec  $C_r = 0$  :

$$C_{em} = f_v \cdot \omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (\text{II.15})$$

Donc le  $f_v$  est la pente de la courbe  $C_{em} = f(\omega_r)$

$$C_s = 0,18 \text{ N.m} \quad (\text{II.16})$$

$$f_v = \tan(\alpha) = \frac{0,33 - 0,23}{204,09 - 62,93} = 0,0007 \text{ (Nm/rad/s)} \quad (\text{II.17})$$

### II.3.5 Détermination de moment d'inertie

Le moteur est câblé avec une excitation indépendante. On fixe le courant inducteur à sa valeur nominale  $I_f$ , puis on démarre le moteur en faisant augmenter progressivement sa tension d'induit  $V_a$ . On fixe la vitesse à sa valeur nominale (3000tr/min) puis certains

temps on coupe l'alimentation. À l'aide d'une carte DS1104 et des logiciels ControlDesk et Matlab, on enregistre la courbe de décroissance de la vitesse de rotation du moteur en fonction du temps  $\omega_r(t)$  [9].

La courbe décroissance est représentée sur la figure (II.9) :

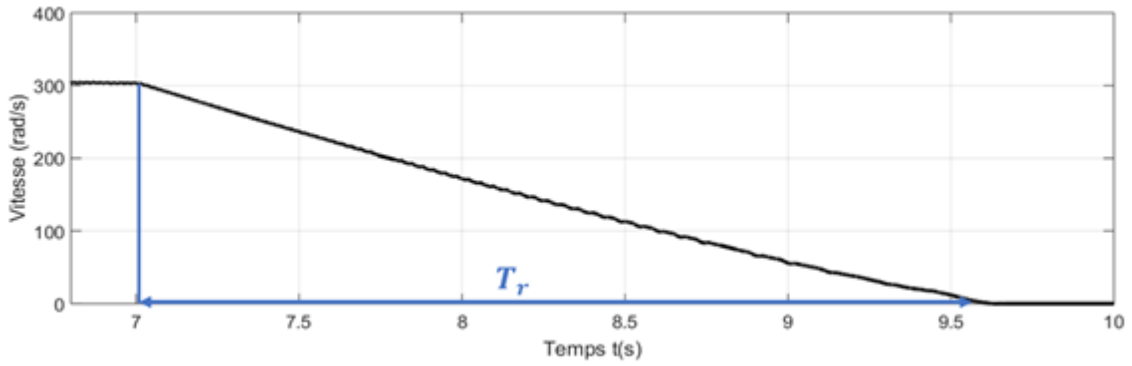


FIGURE II.9 – Essai de ralentissement (Laché)

A partir de la courbe de ralentissement (II.9), on peut tirer le temp de ralentissement  $T_r$ .

$$T_r = 2.6s \quad (\text{II.18})$$

On a l'équation mécanique ce forme de 1 order la solution de cette relation ce forme exceptionnel.

$$C_{em} = f_v \cdot \omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (\text{II.19})$$

On a suppose que la courbe est linéaire  $y=ax+b$  pour simplfier les calculs. Apré avoir connu ce dernier, on peut déduire la valeur de l'inertie  $J$  par la relation suivante.

$$J = f_v \cdot T_r = 0.0018Kg.m^2 \quad (\text{II.20})$$

Enfin, on peut calculer la constante de temps mécanique  $\tau_m$  avec cette relation suivante :

$$\tau_m = \frac{J}{f_v} \quad (\text{II.21})$$

$$\tau_m = 2.57s$$

## II.4 Méthode moindré carré réursive

La méthode des moindres carrés réursive (RLS : Recursive Least Squares), qui est une extension de la méthode classique adaptée aux systèmes temps réel ou aux données arrivant en continu.

### II.4.1 Objectif de la méthode

La méthode des moindres carrés récursive permet d'estimer dynamiquement les paramètres d'un modèle linéaire en mettant à jour l'estimation à chaque nouvel échantillon de données, sans avoir à recalculer toute la matrice de régression comme dans la version classique [26].

### II.4.2 Formulation générale

Donné par l'équation suivant (II.22) :

$$y(t) = \boldsymbol{\phi}^T(t) \boldsymbol{\theta}(t) + \xi(t) \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$y(t)$  : sortie mesurée (tension ou couple).

$\boldsymbol{\phi}^T(t)$  : vecteur de régression (composé de signaux mesurés ou dérivés).

$\boldsymbol{\theta}(t)$  : vecteur des paramètres à estimer.

$\xi(t)$  : bruit de mesure (l'erreur).[26]

### II.4.3 Application sur les équations de moteur à cc

#### II.4.3-a Identification des paramètres électriques

À partir de l'équation électrique (I.12), nous précisons que :

$$V_a = \begin{bmatrix} I & \frac{dI}{dt} & \omega(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ L \\ K_e \end{bmatrix}$$

Avec :  $y(t) = V_a$

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \begin{bmatrix} R \\ L \\ K_e \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Phi}(t) = \begin{bmatrix} I & \frac{dI}{dt} & \omega(t) \end{bmatrix}$$

#### II.4.3-b Identification des paramètres mécanique

À partir de l'équation mécanique (I.13), nous précisons que :  
on pose :

$$C_r = 0N.m$$

$$C_{em} = \begin{bmatrix} \frac{d\omega(t)}{dt} & \omega(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J \\ f_v \end{bmatrix}$$

Avec :  $y(t) = C_{em} = K_e \cdot I(t)$

$$\boldsymbol{\theta}(t) = \begin{bmatrix} J \\ f_v \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Phi}(t) = \begin{bmatrix} \frac{d\omega(t)}{dt} & \omega(t) \end{bmatrix}$$

#### II.4.4 Les étapes de la méthode des moindres carrés réursive

Dans ce mémoire nous utilisons Matlab qui permet d'appliquer cette méthode facilement pour identifier les paramètres du moteur.

- 1<sup>er</sup> étape, dans les essais pratique. On prend les courbes de vitesse  $\omega_r$  et de courant  $I_a$  de démarrage direct de moteur à courant continu par la carte DS1104.

Les courbes représentées dans les figures (II.10) et (II.11) respectivement :

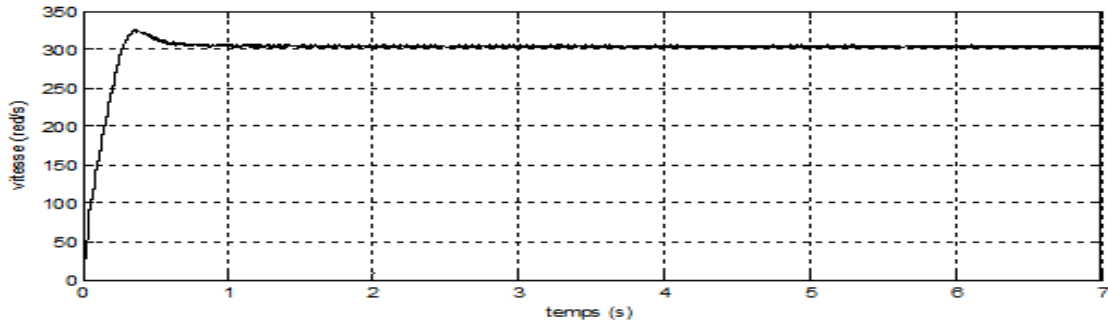


FIGURE II.10 – Vitesse  $\omega_r$  de l'essai expérimental

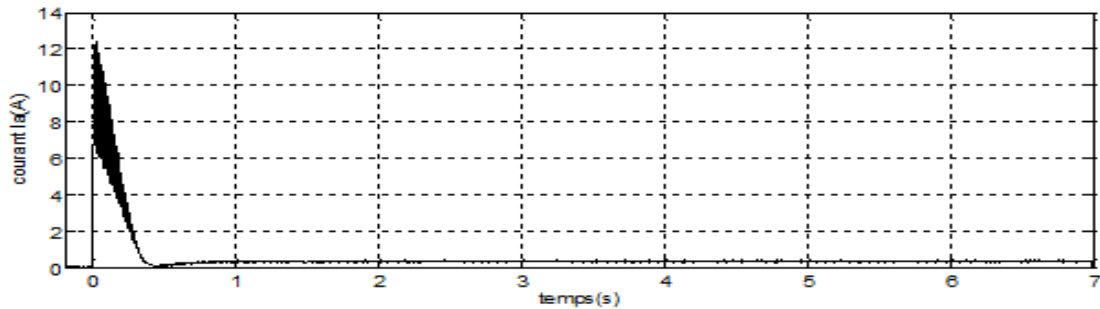


FIGURE II.11 – Courant  $I_a$  de l'essai expérimental

- Lancer le logiciel et créer le modèle de moteur à courant continu sous forme Simulink.

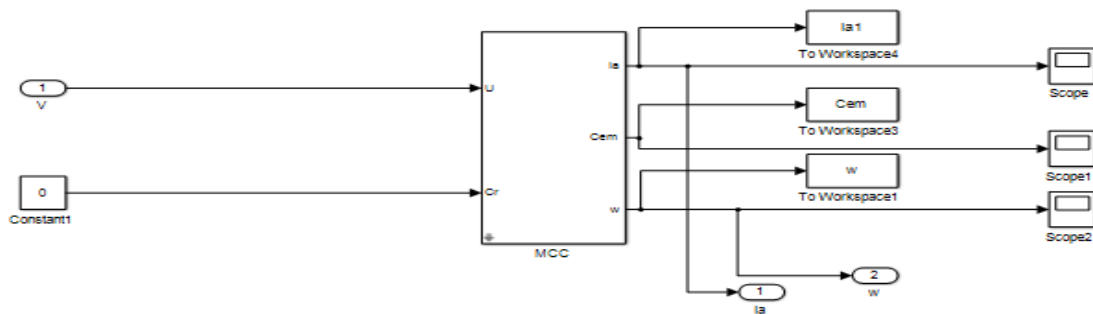


FIGURE II.12 – Modèle Simulink du moteur à courant continu

- Entrer les paramètres inconnus du moteur que l'on veut identifier et en même temps intégrer les matrices et les données en temps réel obtenues lors de l'essai pratique à l'aide de la carte DS1104 dans command window. Les valeurs des paramètres insérés sont choisies aléatoirement pour initialiser la simulation, comme illustré dans la figure ci-dessous.

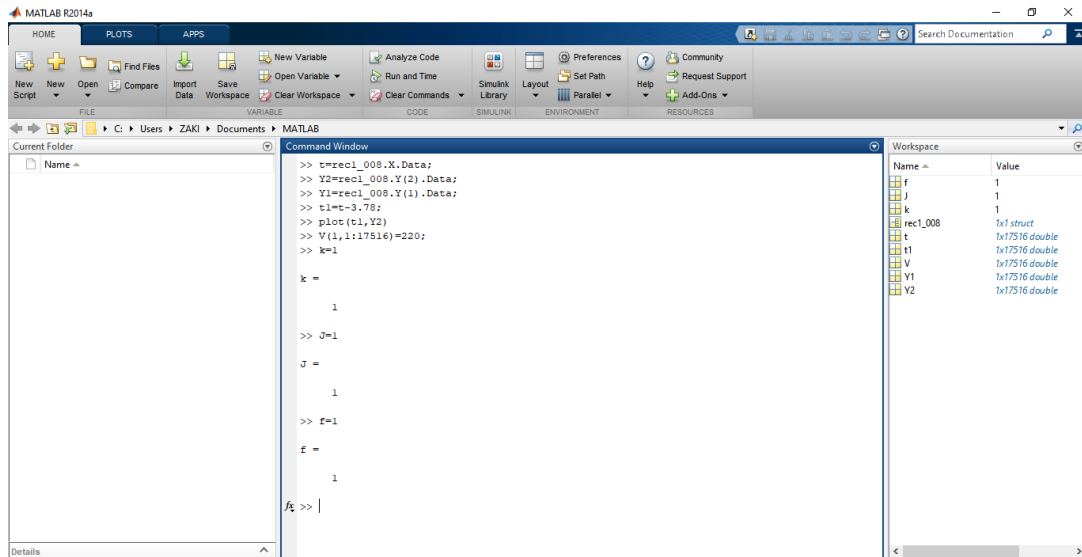


FIGURE II.13 – Command window de Matlab

- Aller vers la fenêtre «Simulink », lancer la simulation puis cliquer sur «Analyse »situé dans le menu, et choisir «paramètres Estimation ».

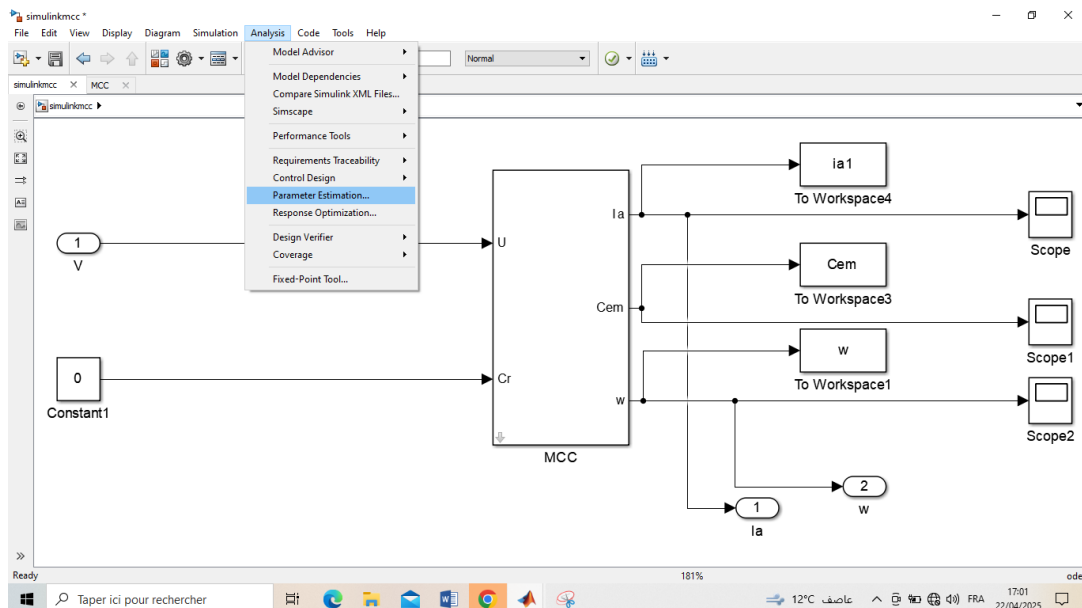


FIGURE II.14 – Estimation des paramètres (Parameter estimation)

- Cliquez sur "New Data" puis sur "Import" et insérer les entrées (Input) (tension  $V$  et le temps  $t$ ).

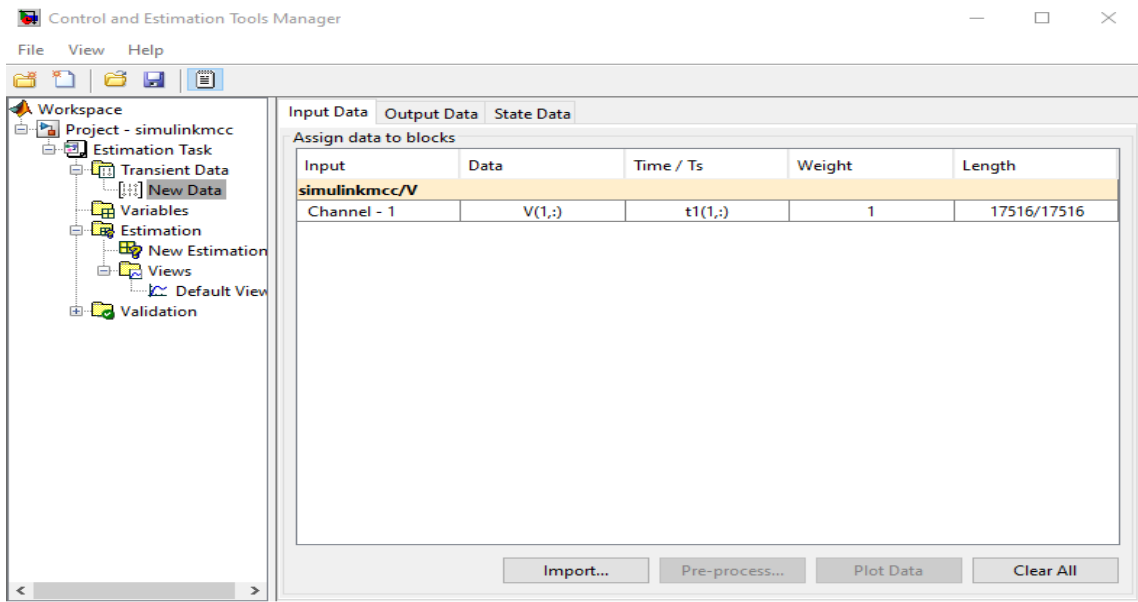


FIGURE II.15 – Entrés des données (input data)

- Après insérer les sorties qui sont les data d'essai pratique la vitesse  $\omega_r$  et courant  $I_a$ .

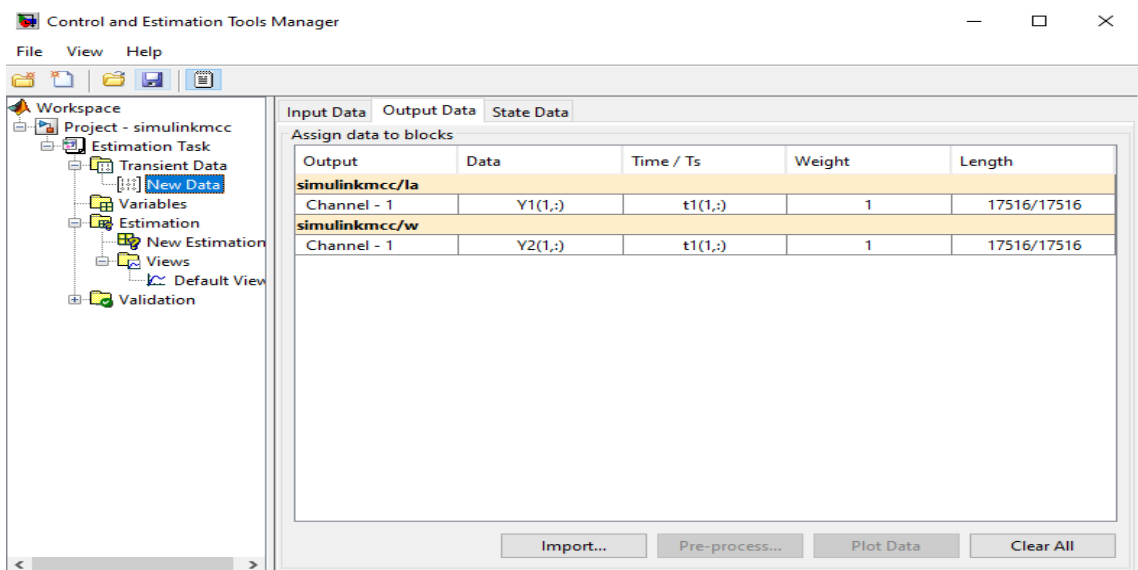


FIGURE II.16 – Sorties des données (output data)

- Sélectionner les variables ( $J, f, k$ ), on peut donner la valeur minimale et maximale des variables.

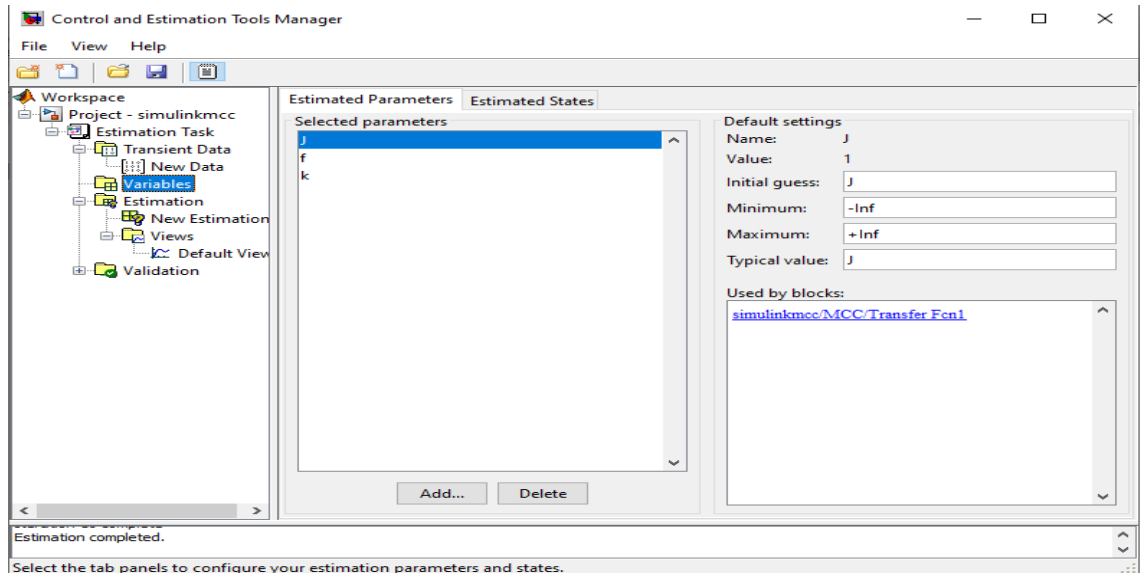


FIGURE II.17 – Données variables (Variables Data)

- Cliquer sur "New Estimation" est crochez les casses des variables ( $J, f, k$ ).

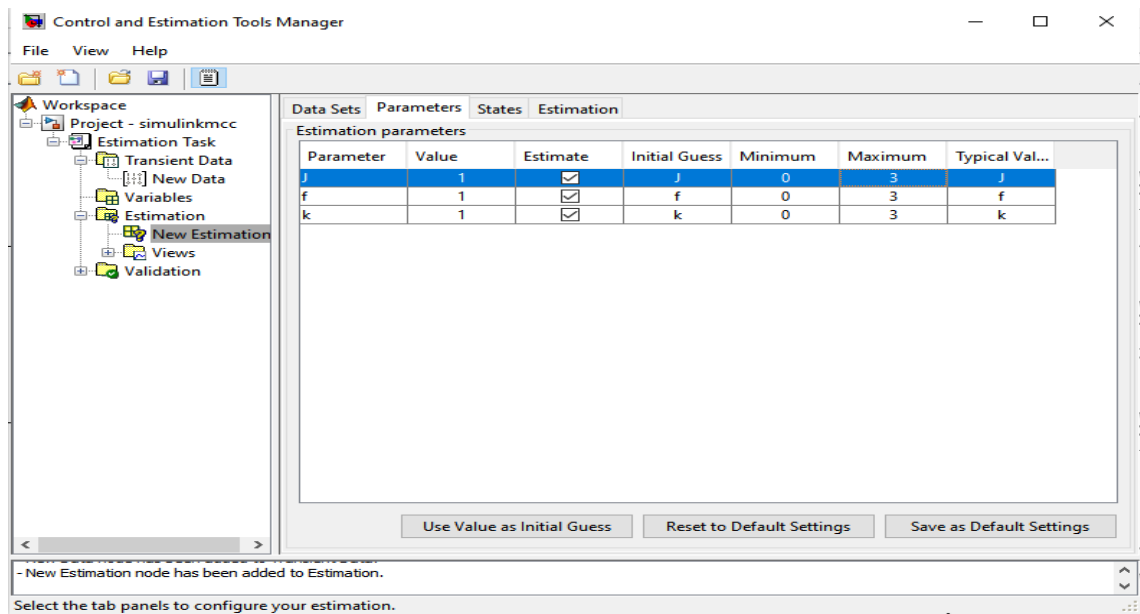


FIGURE II.18 – Estimation des paramètres (Parameters estimate)

- On choisit le temps et le type de solveur "ode4(Runge-kutta)".

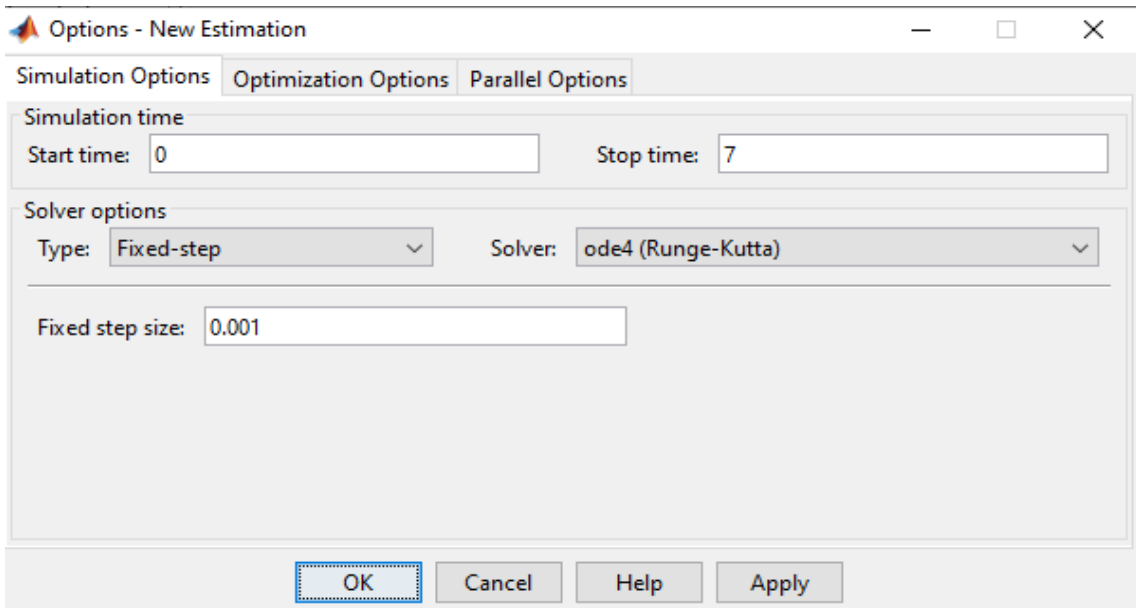


FIGURE II.19 – Options de simulation (Simulation options)

- Appuyer sur "optimization options" et choisir la méthode de moindré carré "nonlinear least squares" et même donner nombre d'itération par exemple 100 et le cliquer "ok".

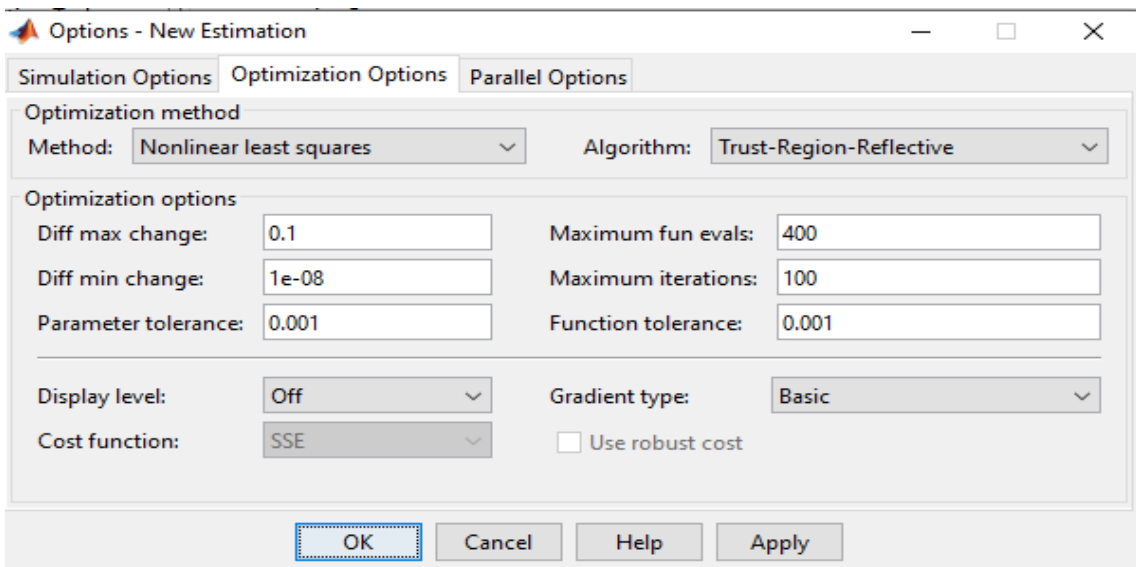


FIGURE II.20 – Options d'optimisation (Optimization options)

- Crochez "Show progress views" et cliquer "start" pour lancer estimation

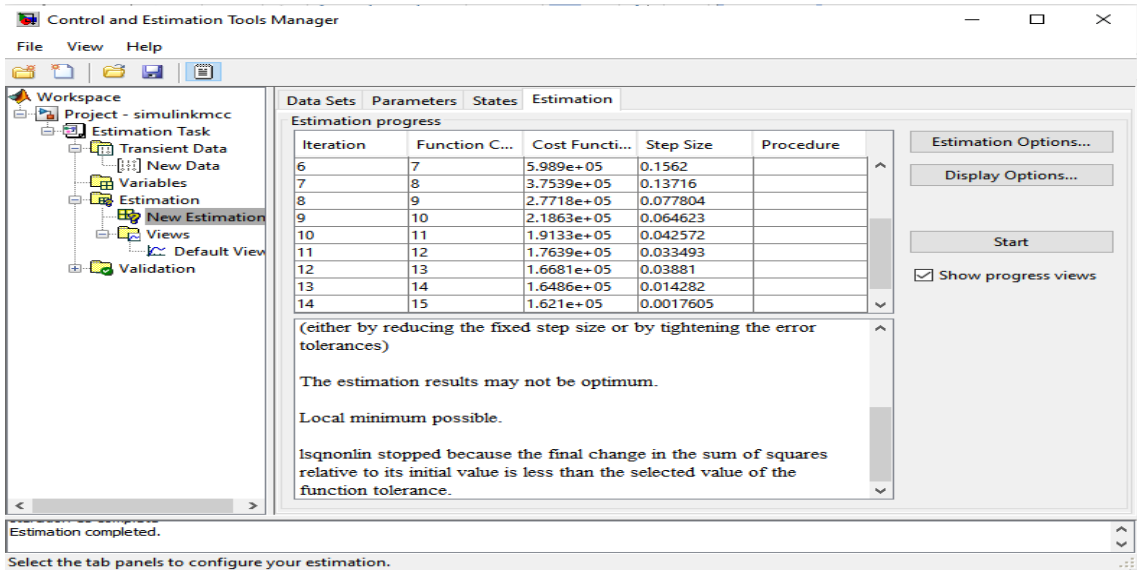


FIGURE II.21 – estimation de départ (Start estimation)

- Enfin, voilà les résultats obtenus après 15 iterations.

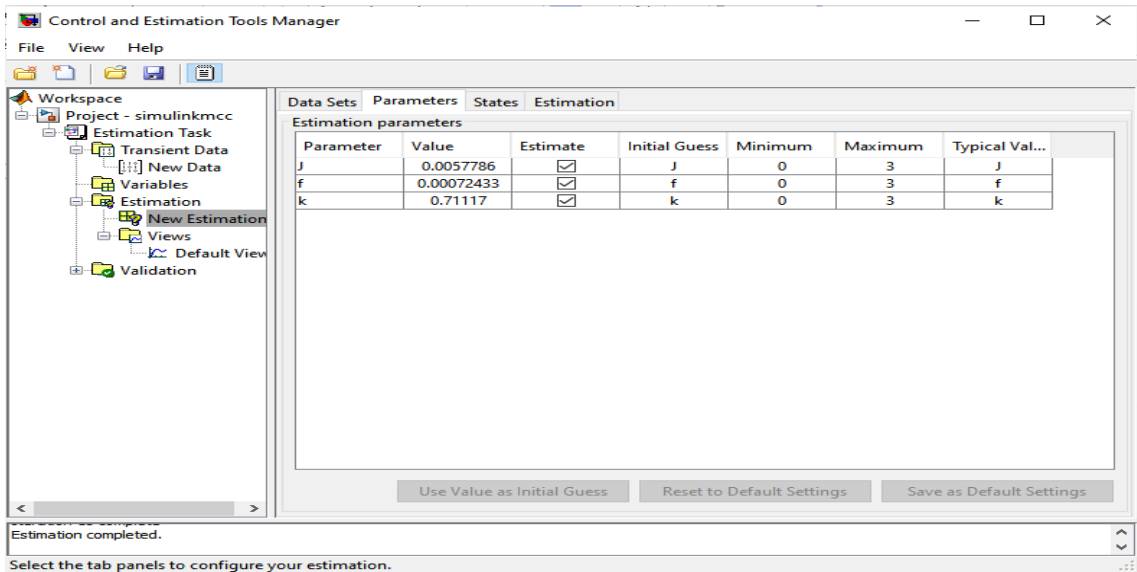


FIGURE II.22 – Résultats final d'estimation

- Les résultats se présentent sous forme de graphes représentant les trajectoires d'estimation, comme le montre la figure (II.23) ci-dessous :

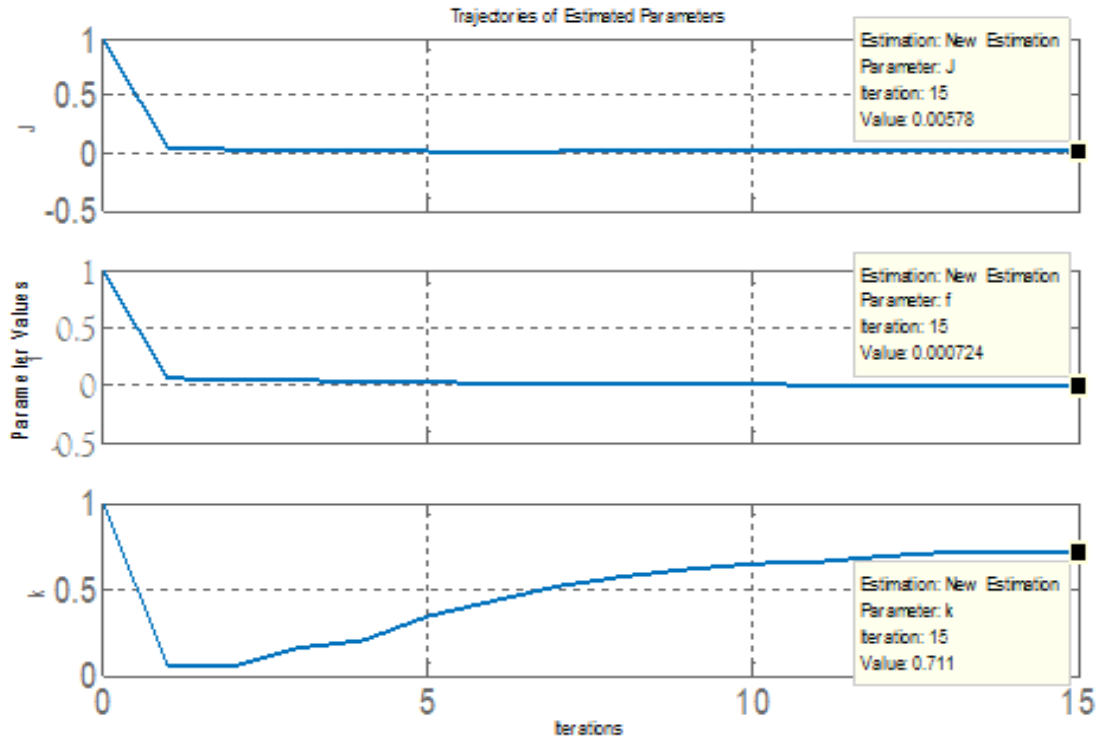


FIGURE II.23 – Courbes des trajectoires des estimation

### Remarque

Pour obtenir des bonne résultats on, en garder les mêmes valeur de  $R_a$  et  $L_a$  que nous avons trouvé dans la méthodes classique, parce que plus proche de la réalité, et pour réduire le nombre d'inconnues. Plus de données moins des inconnues résultat mieux.

## II.5 Comparaison des valeurs obtenues par les deux méthodes

TABLE II.7 – Comparaison des résultats obtenues

Paramètres	méthodes classique	méthodes moindre carré récursive
$R_a$	10.51 $\Omega$	10.51 $\Omega$
$L_a$	0.2229 $H$	0.2229 $H$
$K_e$	0.69 $V.s/rad$	0.71 $V.s/rad$
$J$	0.0018 $Kg.m^2$	0.0058 $Kg.m^2$
$f_v$	0.0007 $Nm.s/rad$	0.00072 $Nm.s/rad$

## II.6 Validation

### Résultats de la méthodes classique

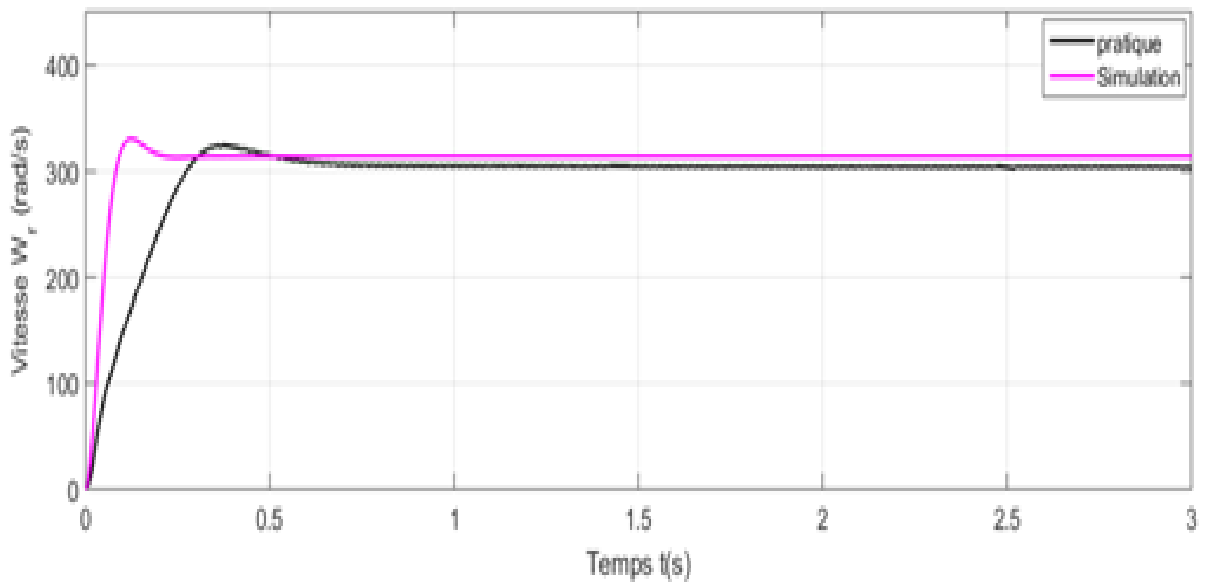


FIGURE II.24 – Courbe de comparaison vitesse  $\omega_r$  classique

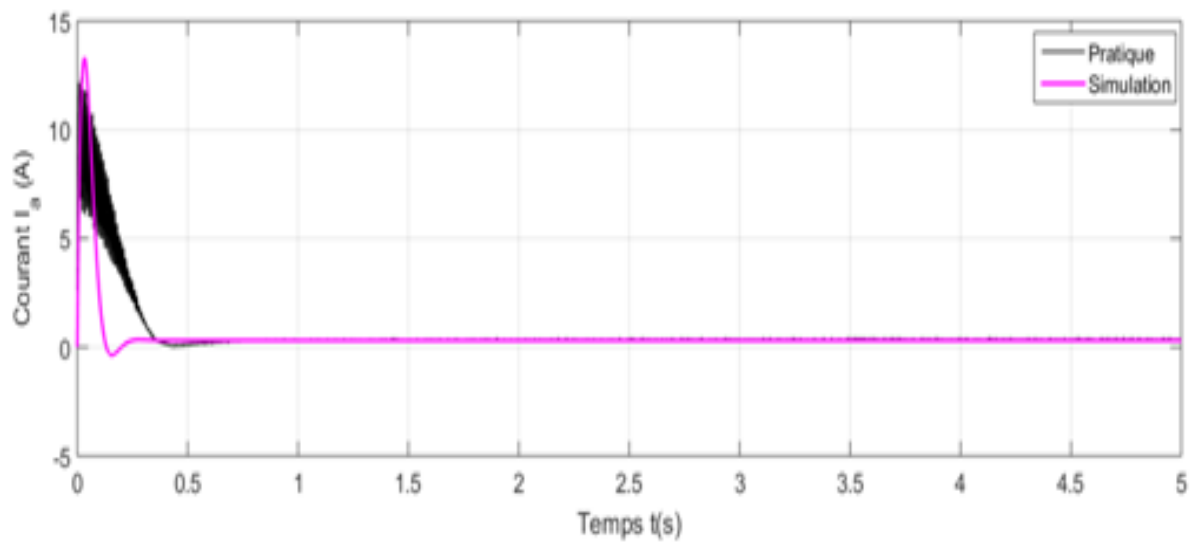
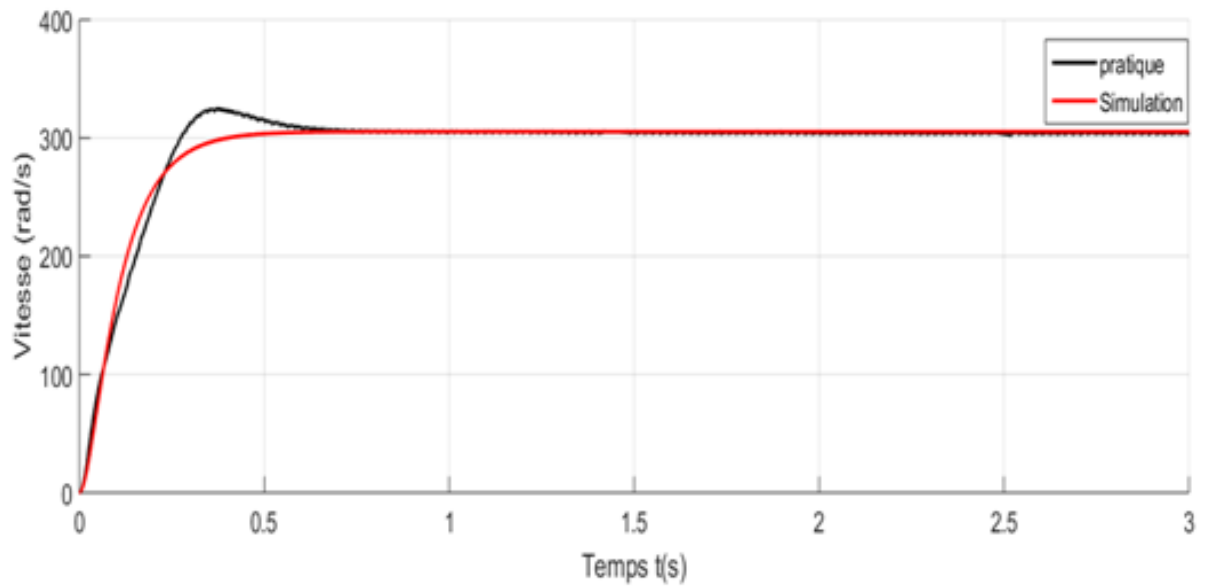
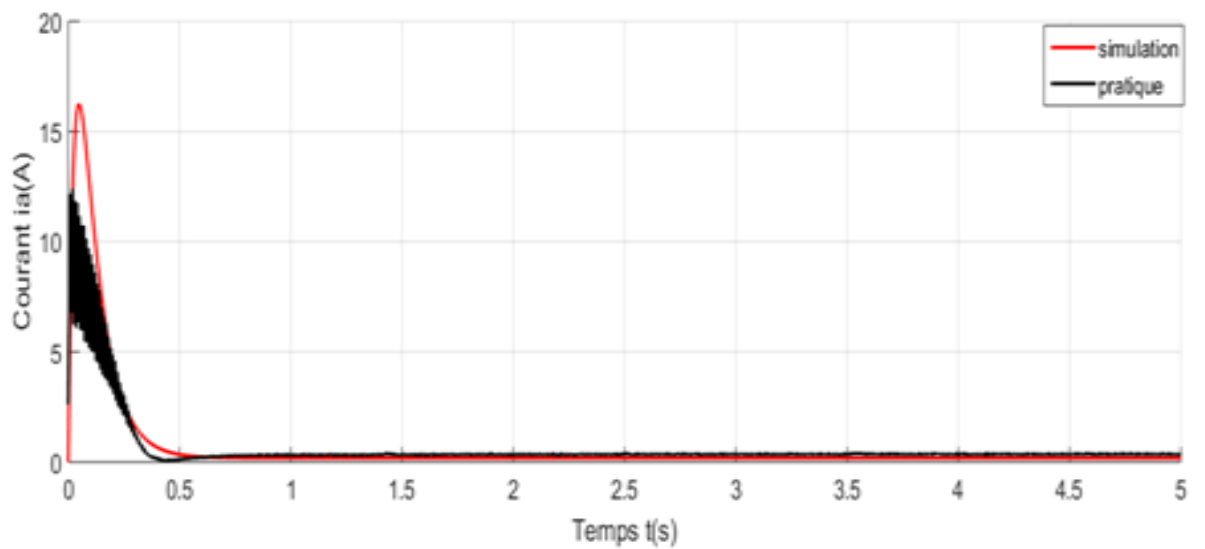


FIGURE II.25 – Courbe de comparaison courant  $I_a$  classique

## Résultats de la méthodes moindres carrés récurive

FIGURE II.26 – Courbe de comparaison vitesse  $\omega_r$  moindre carré récuriveFIGURE II.27 – Courbe de comparaison courant  $I_a$  moindre carré récurive

## II.7 Interprétation de la validation

### Interprétation méthodes classique

Les résultats obtenus par la méthode classique on remarque la vitesse simulée et la vitesse mesurée sont presque identique dans le régime permanent par contre il y a une différence dans le temps de réponse dans le régime transitoire.

### Interprétation méthodes moindres carrés récurive

La figure (II.26) représente les courbes de la vitesse en fonction de temps. On remarque que les deux courbes convergent vers la même valeur finale (300rad/s) donc sont totalement identique en régime permanent, en régime transitoire la vitesse mesurée contient un petit dépassement c'est normal au démarrage (effet mécanique) et il y a une petite différence dans le temps de réponse entre eux.

La figure (II.27) représente le courant d'induit d'un moteur à courant continu en fonction du temps, avec deux régimes distincts :

Le courant monte rapidement à une valeur maximale, puis redescend vers 0 A, car le moteur fonction à vide.

Donc le modèle de simulation est globalement valide, notamment en régime permanent et même en régime transitoire.

### Comparaison

On observe que les résultats des paramètres obtenus par la méthode de moindre carré récurive sont mieux que la méthode classique donc on utilise leurs paramètres dans la commande car cette méthode est robuste par rapport à l'autre méthode.

## II.8 Conclusion

La méthode classique est une méthode de base qui est plus utilisée basée sur les essais expérimentaux et les mesures par différents appareils et des calculs mathématiques donc il aura des erreurs de lecture quelque part donc on passe par la méthode de moindres carrés récurive pour assurer les résultats. L'identification des paramètres du moteur à courant continu est une étape fondamentale pour une commande efficace ce qui on parle dans le chapitre suivant.

## Chapitre III

---

# Simulastion et régulation de moteur à courant continu

### SOMMAIRE

---

III.1 INTRODUCTION . . . . .	36
III.2 HACHEUR . . . . .	36
III.2.1 Hacheur série (Buck) . . . . .	36
III.2.2 Hacheur à deux quadrants . . . . .	37
III.2.3 Hacheur à quatre quadrants . . . . .	39
III.3 TECHNIQUE DE COMMANDE <i>MLI</i> . . . . .	40
III.3.1 Principe de la technique <i>MLI</i> . . . . .	41
III.4 RÉGULATEUR <i>PI</i> . . . . .	42
III.4.1 Structure d'un régulateur <i>PI</i> . . . . .	42
III.4.2 Méthode par compensation de pôle . . . . .	43
III.4.3 Méthode Tune de la librairie Matlab . . . . .	45
III.5 SIMULATIONS DE LA COMMANDE DE LA MACHINE À COURANT CONTINU .	48
III.5.1 Résultats de simulation . . . . .	49
III.5.2 Interprétation des résultats . . . . .	50
III.6 CONCLUSION . . . . .	50

---

## III.1 Introduction

Les moteurs à courant continu sont largement employés dans les systèmes automatisés requérant une régulation précise de la vitesse. Pour une commande efficace, il est essentiel de sélectionner un convertisseur adapté (un hacheur), associé à une modulation de largeur d'impulsion (*MLI*) et à un dimensionnement optimal des régulateurs.

D'une part, la commande des MCC repose sur la régulation de la vitesse, paramètres essentiels pour assurer le bon fonctionnement du système motorisé. Cette régulation peut être assurée par différentes techniques, allant des méthodes classiques à base de correcteurs proportionnels-intégrateurs (*PI*) aux stratégies plus avancées comme les logiques floues ou la commande adaptative.

Donc après l'identification des paramètres et la modélisation de moteur dans le chapitre précédent permet de passer au le contrôle de ce dernier. Dans ce chapitre nous intéressons à la description des différents hacheurs et leur fonctionnement, et ensuite au dimensionnement des paramètres des régulateurs utilisés.

## III.2 Hacheur

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu (figure III.1) qui permettent de fournir une tension continue variable à partir d'une source de tension continue constante.

Pour modifier la tension, il suffit de varier la valeur moyenne de la tension de sortie en découpant la tension de la source. Cela est possible grâce à la commande de l'ouverture et de la fermeture des interrupteurs électroniques.

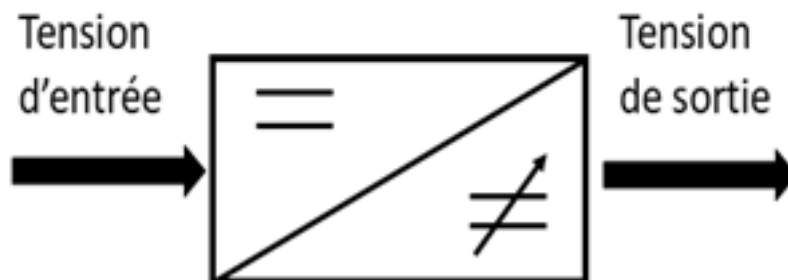


FIGURE III.1 – Principe d'hacheur

### III.2.1 Hacheur série (Buck)

Cette appellation s'explique par le fait que la tension moyenne en sortie est réduite par rapport à celle de l'entrée. Le hacheur série est constitué de deux éléments principaux :

1. Un interrupteur commandable (amorçage et blocage contrôlés) pouvant être :
  - Un transistor bipolaire
  - Un MOS-FET
  - Un IGBT
  - Ou tout autre composant similaire
2. Une diode fonctionnant comme interrupteur à commutation spontanée (amorçage et blocage non commandés).
3. L'architecture typique de ce convertisseur est illustrée dans la figure (III.2) [13].

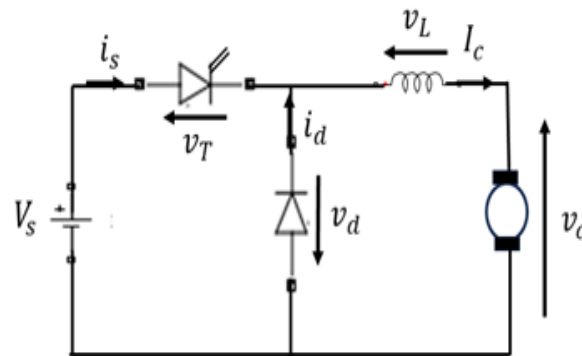


FIGURE III.2 – Structure d'un hacheur série

### III.2.1-a Principe de fonctionnement

Le cycle de fonctionnement (période  $T = 1/f$ ) comporte deux phases distinctes :

1. Première Phase [ $0 < t < \alpha T$ ]
  - Transistor en conduction (état passant)
  - Diode bloquée (polarisation inverse)
  - Durée proportionnelle au rapport cyclique  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ )
2. Deuxième Phase [ $\alpha T < t < T$ ] :
  - Transistor bloqué (état coupé)
  - Diode conductrice (état passant)
  - Durée complémentaire  $(1 - \alpha)T$

Le paramètre  $\alpha$ , appelé rapport cyclique, détermine la durée relative de la phase active [13].

### III.2.2 Hacheur à deux quadrants

Un hacheur deux quadrants combine un hacheur série et un hacheur parallèle. Il permet une inversion du courant, mais pas de la tension. Le transfert d'énergie s'effectue de la source continue vers la charge lorsque  $I_s > 0$ , et dans le sens inverse si  $I_s < 0$ . Cette structure nécessite une alimentation ( $U_e > 0$ ) capable d'accepter des courants bidirectionnels. Contrairement aux configurations unidirectionnelles, le courant  $I_s$  peut ici prendre des valeurs positives ou négatives, éliminant ainsi les modes de conduction discontinue et les

restrictions sur le changement de polarité du courant. Selon le sens de circulation, l'un des deux semi-conducteurs (transistor ou diode) entre en conduction pour assurer la continuité du transfert d'énergie [14].

### III.2.2-a Structure de l'hacheur deux quadrants

Ce montage correspond à un hacheur deux quadrants utilisant des interrupteurs réversibles en courant, avec une charge modifiée. L'exemple présenté ici est celui d'une machine à courant continu (MCC) pouvant fonctionner – sous tension constante – soit en mode moteur, soit en mode génératrice, comme illustré sur la figure (III.3) [14].

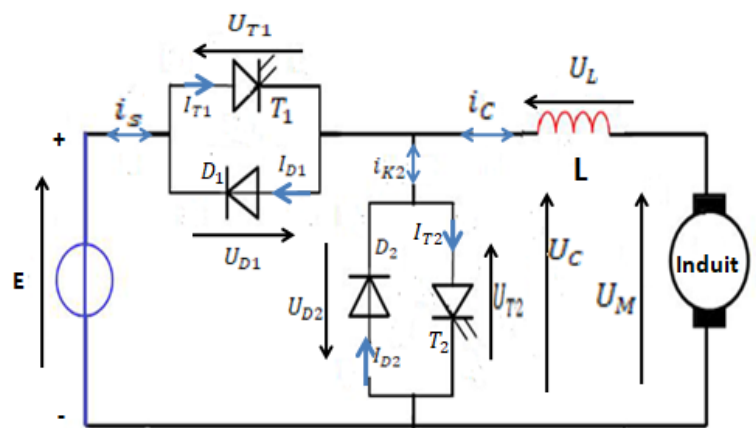


FIGURE III.3 – Structure d'hacheur deux quadrants

### III.2.2-b Principe de fonctionnement

La commande des interrupteurs électroniques est réalisée de manière complémentaire selon la séquence suivante :

1. Pendant une durée  $\alpha T$  :
  - $T_1$  est fermé ou  $D_2$  passante
  - $T_2$  est ouvert et  $D_1$  est bloquée
2. Pendant une durée  $(1 - \alpha)T$  :
  - $T_1$  est ouvert et  $D_2$  est bloquée
  - $T_2$  est fermé ou  $D_1$  passante

- a)  $0 \leq t < \alpha T$  :
  - $T_1$  est fermé et  $T_2$  ouvert
  - On a :  $U_C = E$  et  $I_T = I_C$
- b)  $\alpha T \leq t \leq T$  :
  - $T_1$  est ouvert et  $T_2$  fermé
  - On a :  $U_C = 0$  et  $I_T = 0$

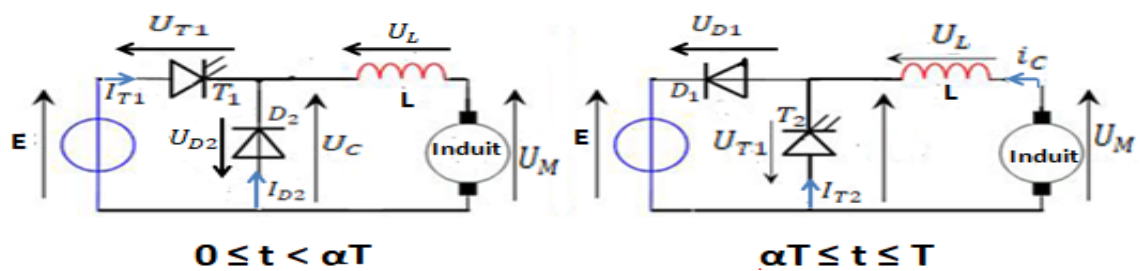


FIGURE III.4 – Principe de fonctionnement d'un hacheur à deux quadrants

### III.2.3 Hacheur à quatre quadrants

La réalisation d'une structure réversible quatre quadrants s'obtient par l'association en opposition de deux hacheurs bidirectionnels deux quadrants, respectivement constitués des interrupteurs ( $K_1, K_2, D_1, D_2$ ) et ( $K_3, K_4, D_3, D_4$ ). La tension et le courant peuvent être positifs ou négatifs [17] [21].

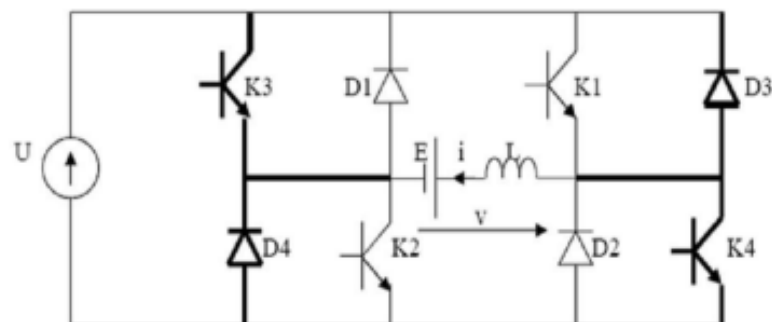


FIGURE III.5 – Structure d'un hacheur à quatre quadrants

La séquence de commande, répétée périodiquement avec une période  $T$ , s'établit comme suit :

- Fermeture des interrupteurs  $K_1$  et  $K_2$  pendant ( $0 \leq t \leq \alpha T$ )
- Fermeture des interrupteurs  $K_3$  et  $K_4$  pendant ( $\alpha T \leq t \leq T$ ) [17].

la valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge ce donné par équation (III.2).

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_S(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U dt \quad (III.1)$$

$$V_{Smoy} = U(2\alpha - 1) \quad (III.2)$$

#### III.2.3-a Fonctionnement

Désormais, le système permet d'obtenir une tension moyenne de sortie négative ( $V_{Smoy} < 0$ , voir équation (III.2)), tandis que le courant peut également prendre des valeurs négatives, autorisant ainsi un sens de rotation inverse. Lorsque le rapport cyclique  $\alpha$  évolue de 0 à 1, la tension moyenne varie continûment de  $-U$  à  $+U$ . Quatre quadrants de fonctionnement sont ainsi disponibles :

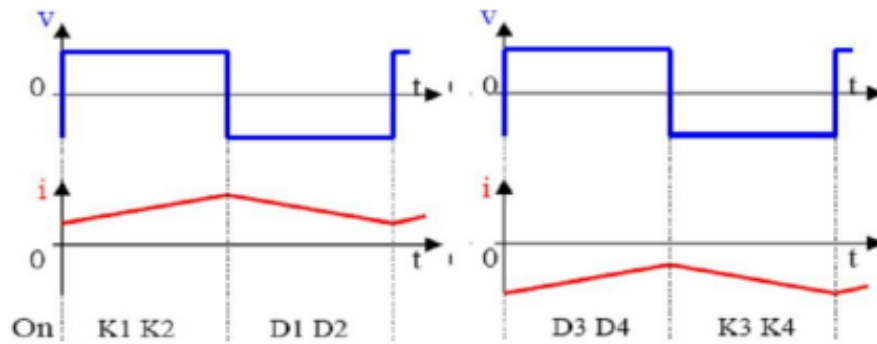


FIGURE III.6 – Tension aux bornes de la charge [17]

1.  $V > 0$  et  $I > 0$  : Rotation dans le sens premier (mode moteur)
2.  $V < 0$  et  $I > 0$  : Freinage avec récupération d'énergie
3.  $V < 0$  et  $I < 0$  : Rotation dans le sens deuxième (mode moteur)
4.  $V > 0$  et  $I < 0$  : Freinage avec récupération d'énergie

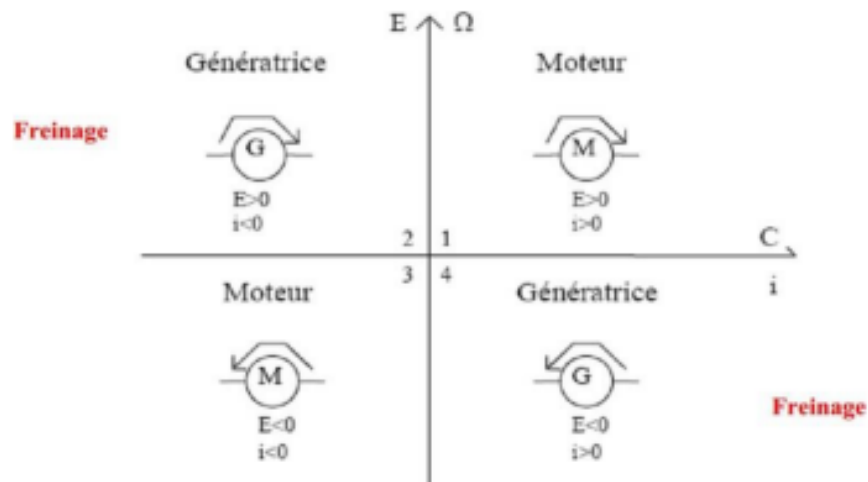


FIGURE III.7 – Principe du fonctionnement d'un hacheur quatre quadrants

### III.3 Technique de commande MLI

Qualité de la tension de sortie et techniques de commande. La performance des hacheurs est étroitement liée à leur méthode de commande. Parmi les différentes techniques disponibles, le choix dépend principalement de l'application cible. Pour les variateurs de vitesse des machines à courant continu, la Modulation par Largeur d'Impulsion (MLI) s'impose comme la solution privilégiée [20].

La MLI (modulation de largeur d'impulsion) possède de nombreuses caractéristiques d'un

système de commande. Système de commande. Une méthode simple pour contrôler la vitesse d'un moteur à courant continu (CC) est de contrôler la tension d'alimentation : plus la tension est élevée, plus la vitesse sera élevée.

Lorsqu'on applique la méthode de commande par MLI, il faut garder à l'esprit que le moteur agit comme un système passe-bas. La méthode MLI permet d'éviter les hautes fréquences, car on sait que les grands moteurs sont essentiellement inductifs, et donc qu'ils ne fonctionnent pas bien avec des fréquences élevées. Cette méthode fonctionne mieux avec des basses fréquences : une fréquence plus basse est préférable à une fréquence plus haute [20].

### III.3.1 Principe de la technique MLI

1. **Approche analogique** (systèmes traditionnels) :

- Génération de deux signaux :
  - Un signal de référence continu à amplitude variable
  - Une onde porteuse triangulaire haute fréquence
- Commutation déclenchée aux points d'intersection des signaux (détectés par comparateurs)

2. **Approche numérique** (systèmes modernes) :

- Implémentation via microprocesseur
- Combinaison :
  - D'un motif de base pour la commande des interrupteurs
  - D'une modulation HF pour le contrôle de tension

– **Application dans notre projet :**

Notre étude se concentre sur la MLI numérique, mettant en œuvre :

- La comparaison entre :
  - Une porteuse triangulaire
  - Un signal de référence continu
- La détermination des instants de commutation par analyse des intersections montré dans la figure (III.8) [15].

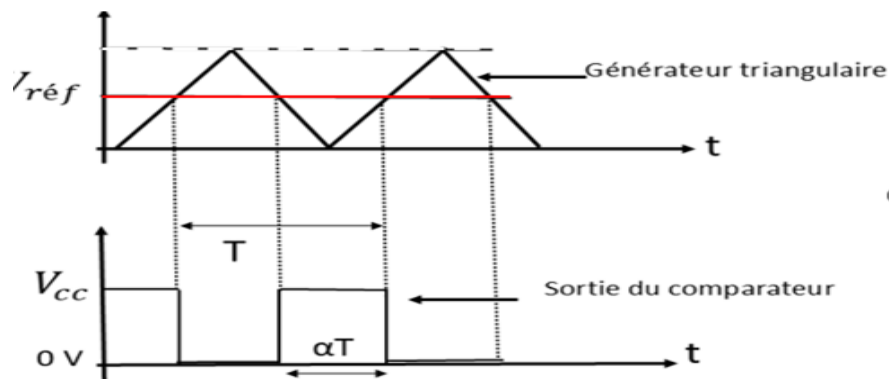


FIGURE III.8 – Courbes montre principe de la commande MLI

### III.4 Régulateur PI

Le correcteur *PI* (aussi appelé régulateur ou contrôleur *PI*) combine deux actions : une action **Proportionnelle** (*P*) et une action **Intégrale** (*I*). Il s'agit d'une implémentation classique de rétroaction (*feedback*). Un régulateur PI assure trois fonctions essentielles :

1. **Actions P et I :**

- Proportionnelle (*P*) : Accélérer la réponse du système, améliorer la rapidité de correction, réduit l'erreur.
- Intégrale (*I*) : Élimine l'erreur statique en agissant sur l'accumulation des erreurs passées.

2. **Fonctions essentielles :**

- Correction de l'erreur en régime permanent (grâce à l'action *I*)
- Réponse dynamique rapide (via l'action *P*)
- Stabilité du système (compromis *P/I*) [8].

#### III.4.1 Structure d'un régulateur PI

Le régulateur proportionnel intégral (*PI*), illustré à la figure (III.9), repose sur une structure parallèle combinant une action proportionnelle (*PI*) et une action intégrale (*I*). Sa fonction de transfert s'exprime par :

$$C(P) = K_p + \frac{K_i}{P} = \frac{K_p P + K_i}{P} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i P} \right) \quad (\text{III.3})$$

Avec :  $\frac{K_p}{K_i} = T_i$

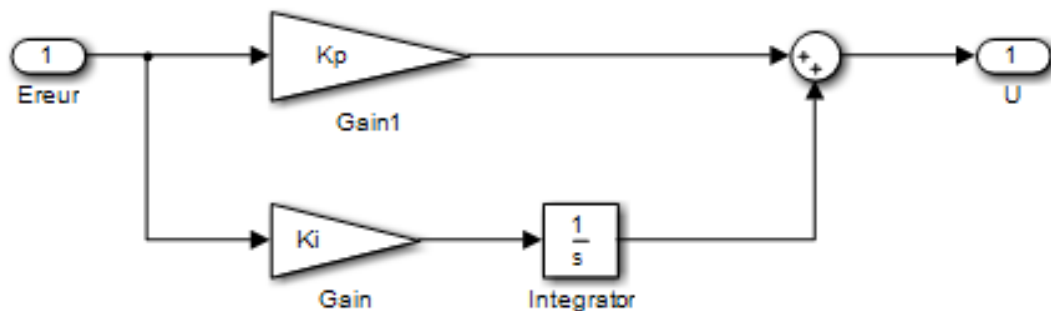


FIGURE III.9 – Structure de régulateur *PI*

Le principal avantage d'un régulateur *PI* réside dans sa capacité à éliminer l'erreur statique, grâce à son action intégrale (*I*). En effet, la commande  $u(t)$  est calculée en intégrant l'erreur  $\epsilon(t)$  : tant que celle-ci persiste, la sortie du régulateur augmente progressivement. Ainsi  $u(t)$  continue à évoluer jusqu'à ce que l'écart entre la sortie  $y(t)$  et la consigne  $y_{ref}(t)$  soit complètement annulé.

La fonction de transfert en boucle fermée du système s'exprime par la relation III.4 :

$$G_{bf}(p) = \frac{K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) C(p)}{1 + K_p \left(1 + \frac{1}{T_i p}\right) C(p)} \quad (\text{III.4})$$

Le régulateur *PI* ajoute un zéro à la fonction de transfert en boucle fermée. Ce zéro peut, dans certains cas, compenser un pôle présent dans la fonction de transfert du système à commander, simplifiant ainsi la dynamique en boucle fermée et réduisant son ordre [8].

### III.4.2 Méthode par compensation de pôle

Cette méthode s'effectue en deux étapes :

1. Compenser un pôle du système avec le zéro du régulateur, simplifiant ainsi la fonction de transfert en boucle ouverte. Cette compensation fournit une première équation pour déterminer  $K_p$  et  $K_i$ .
2. Calculer la fonction de transfert en boucle fermée et établir une seconde équation permettant de déterminer le paramètre restant du régulateur [8].

#### III.4.2-a Calcul du régulateur de courant

Les dépassements de courant représentent un enjeu critique, tant pour le convertisseur statique que pour le moteur :

- **Risque pour le convertisseur** : Les transitoires de courant peuvent endommager irréversiblement ses composants de puissance (IGBT, diodes, etc.).
- **Risque pour le moteur** : Une surintensité prolongée détruit les enroulements ou les isolants.

Pour remédier, deux mesures essentielles s'imposent :

1. **Asservissement du courant** : Contrôle actif des transitoires pour éliminer les dépassements.
2. **Limitation stricte du courant maximal** : Protection garantie du moteur et du convertisseur, même en conditions extrêmes.

Fonctions de transfert en boucle ouverte sont données par :

$$FT_{bo} = \left( \frac{K_p P + K_i}{P} \right) \cdot \left( \frac{1}{L_a P + R_a} \right) \quad (\text{III.5})$$

$$FT_{bo} = \frac{K_i}{P} \left( \frac{K_p}{K_i} P + 1 \right) \left( \frac{1/R_a}{\frac{L_a}{R_a} P + 1} \right) \quad (\text{III.6})$$

Le principe de la méthode repose sur la compensation du pôle du système en boucle ouverte par le zéro ajouté grâce au régulateur [16].

On pose :  $\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_a}{R_a}$

Après simplification on a :

$$FT_{bo} = \frac{K_i}{P} \cdot \left( \frac{1}{R_a} \right) = \frac{K_i}{R_a P} \quad (\text{III.7})$$

Fonctions de transfert en boucle fermée, cette forme de 1er ordre.

$$FT_{bf} = \frac{\frac{K_i}{R_a P}}{1 + \frac{K_i}{R_a P}} = \frac{K_i}{R_a P + K_i} \quad (\text{III.8})$$

$$FT_{bf} = \frac{K_i}{K_i} \cdot \frac{1}{\frac{R_a}{K_i} P + 1} \quad (\text{III.9})$$

Sous la forme suivante on posant :

$$FT_{bf} = \frac{1}{\tau_e P + 1} \quad (\text{III.10})$$

On a :  $\frac{R_a}{K_i} = \tau_e$

$$K_i = \frac{R_a}{\tau_e} \quad (\text{III.11})$$

$$K_p = \frac{L_a}{\tau_e} \quad (\text{III.12})$$

### III.4.2-b Calcul du régulateur de vitesse

On peut calculer le régulateur de vitesse par les étapes suivantes :  
Fonctions de transfert en boucle ouverte sont données par :

$$FT_{bo} = \left( \frac{K_p P + K_i}{P} \right) \cdot \left( \frac{1}{J P + f_v} \right) \quad (\text{III.13})$$

$$FT_{bo} = \frac{K_i}{P} \left( \frac{K_p}{K_i} P + 1 \right) \left( \frac{1/f_v}{\frac{J}{f_v} P + 1} \right) \quad (\text{III.14})$$

On pose :  $\frac{K_p}{K_i} = \frac{J}{f_v}$

Après simplification on a :

$$FT_{bo} = \frac{K_i}{P} \cdot \left( \frac{1}{f_v} \right) = \frac{K_i}{f_v P} \quad (\text{III.15})$$

Fonctions de transfert en boucle fermée, cette forme de 1er ordre.

$$FT_{bf} = \frac{\frac{K_i}{f_v P}}{1 + \frac{K_i}{f_v P}} = \frac{K_i}{f_v P + K_i} \quad (\text{III.16})$$

$$FT_{bf} = \frac{K_i}{K_i} \cdot \frac{1}{\frac{f_v}{K_i} P + 1} \quad (\text{III.17})$$

Sous la forme suivante on posant :

$$FT_{bf} = \frac{1}{\tau_m P + 1} \quad (\text{III.18})$$

On a :  $\frac{f_v}{K_i} = \tau_m$

$$K_i = \frac{f_v}{\tau_m} \quad (\text{III.19})$$

$$K_p = \frac{J}{\tau_m} \quad (\text{III.20})$$

### III.4.3 Méthode Tune de la librairie Matlab

C'est une méthode à l'aide MATLAB basé sur la fonction de transfert permet de calcul les correcteurs de PI( $K_p, K_i$ ).

#### III.4.3-a Régulateur de courant

En prendre la fonction de transfert de courant montré dans l'équation (III.21).

$$I_a(P) = \frac{1}{R_a + L_a P} \cdot V_a(P) \quad (\text{III.21})$$

En ajoute sur "MATLAB Simulink" la boucle complète (boucle fermé) montré dans la figure (III.10) :

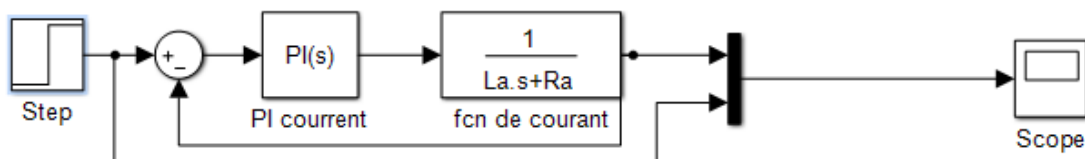


FIGURE III.10 – Détermination des paramètres de régulateur PI courant

Après en clique sur PI courant et entre dans l'icone "Tune".

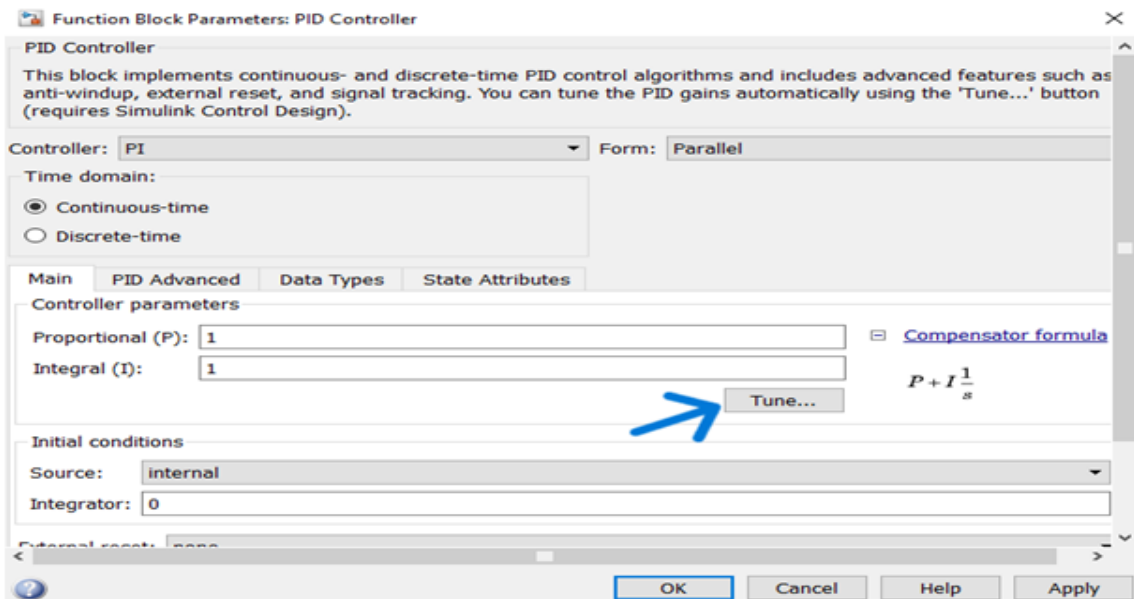


FIGURE III.11 – Interface d'un régulateur PI "Tune"

Après on va modifier la courbe pour obtenir la forme que nous souhaitons. Ensuite, appuyer sur "Uplate block".

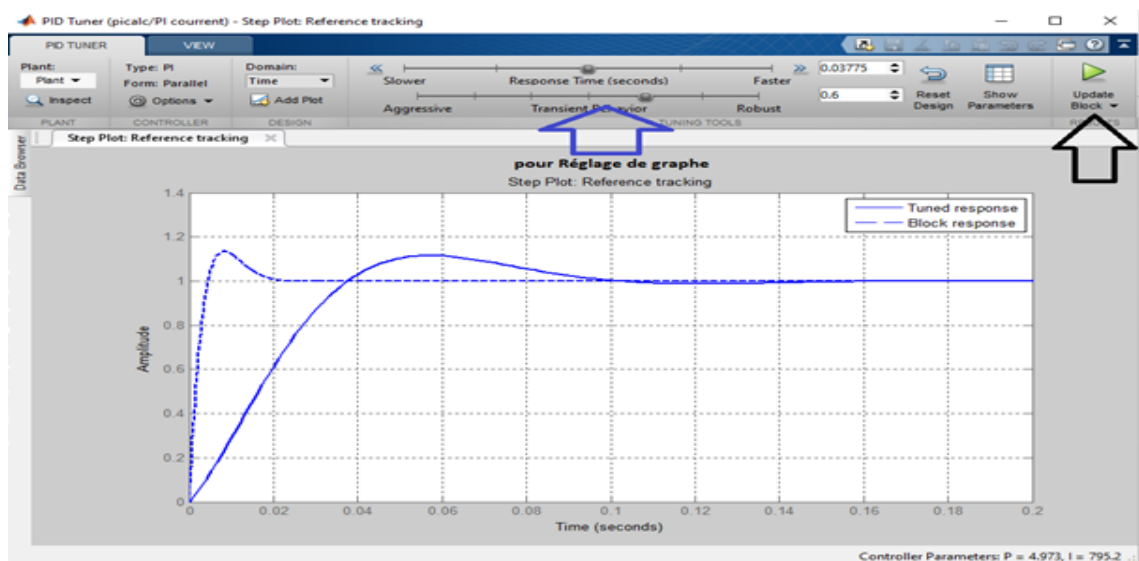


FIGURE III.12 – Proposition de réglage tune

On remarque l'existence des nouveaux valeurs de  $K_p$  et  $K_i$  en place.

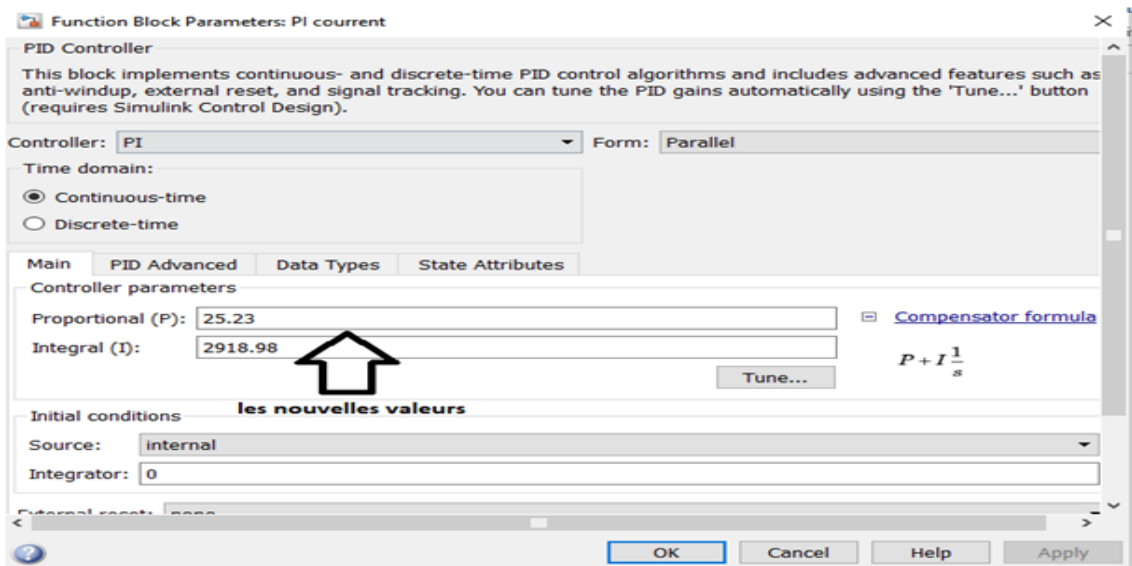


FIGURE III.13 – Valeurs de régulateur PI choisi

### III.4.3-b Régulateur de vitesse

On va prendre la fonction de transfert de la vitesse à partir de l'équation mécanique :

$$\omega_r(P) = \frac{K_e \cdot I_a(P) - C_r(P)}{f_v + JP} \quad (III.22)$$

En ajoute sur MATLAB/Simulink la fonction transfert précédente associe avec notre régulateur PI en boucle fermé montré dans la figure (III.14) :

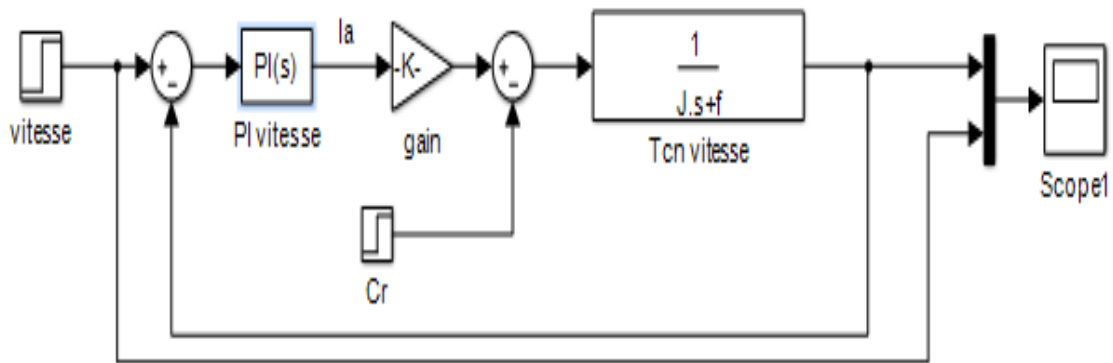


FIGURE III.14 – Détermination de Régulateur PI vitesse

Puis, on règle le deuxième correcteur PI vitesse, on suivant les mêmes étapes de réglage de correcteur PI de courant.

### Remarque

On règle le correcteur de vitesse avec considération la boucle de courant est plus rapide plus cinq fois que la boucle de vitesse.

## III.5 Simulations de la commande de la machine à courant continu

Nous avons simulé un modèle de moteur à courant continu avec un hacheur deux quadrants, avec deux boucles de régulation (boucle de vitesse et boucle de courant). Nous avons utilisé deux régulateurs PI (vitesse et courant), comme le montre la figure (III.15) suivante :

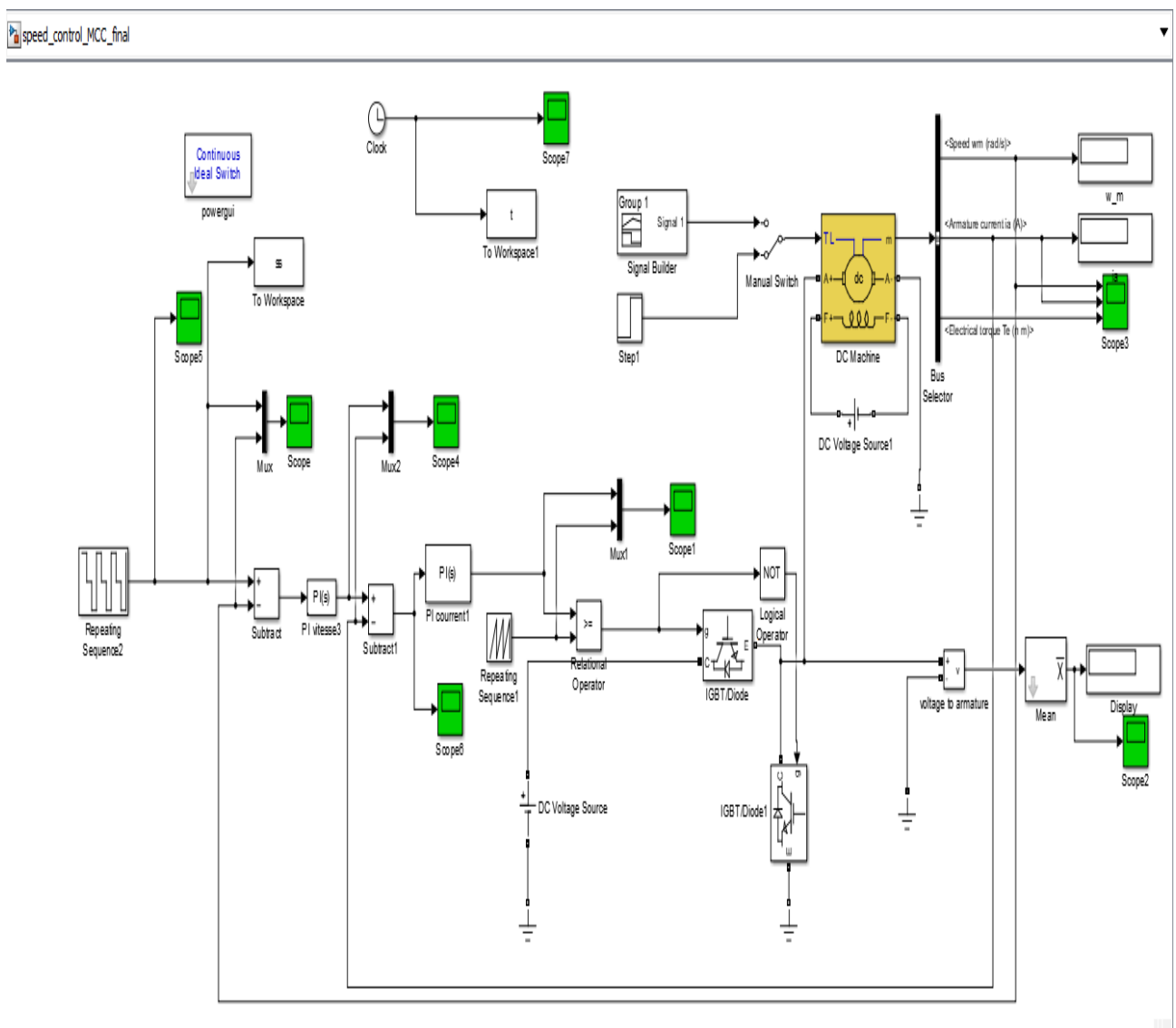


FIGURE III.15 – Bloc de simulation de commande machine à courant continu

### III.5.1 Résultats de simulation

On va appliquer un échelon de vitesse de référence  $200(\text{rad/s})$ . Ensuite, on applique un couple de résistance :

$C_r = 1.2\text{N.m}$  à partir de  $2.5 \text{ sec}$ .

Les résultats obtenus (vitesse, courant, couple) sont montrés dans les courbes suivantes :

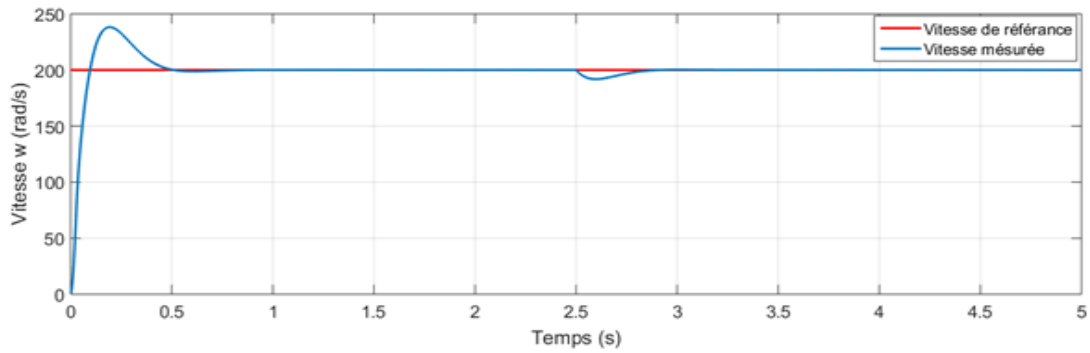


FIGURE III.16 – Courbe de vitesse  $\omega_r$

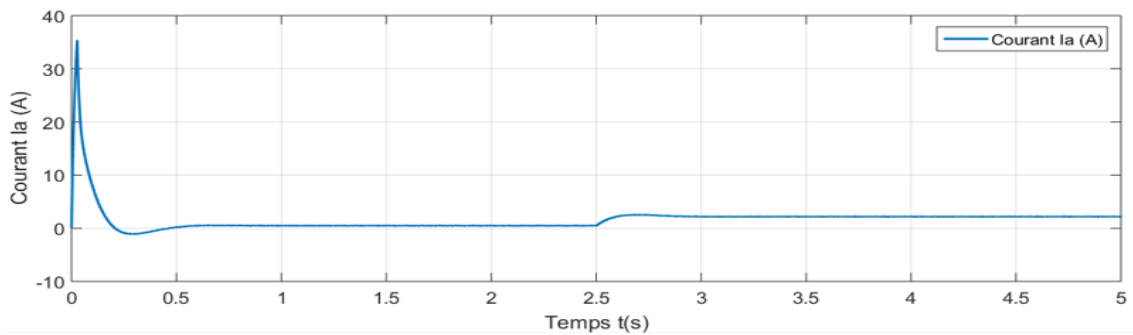


FIGURE III.17 – Courbe de courant  $I_a$

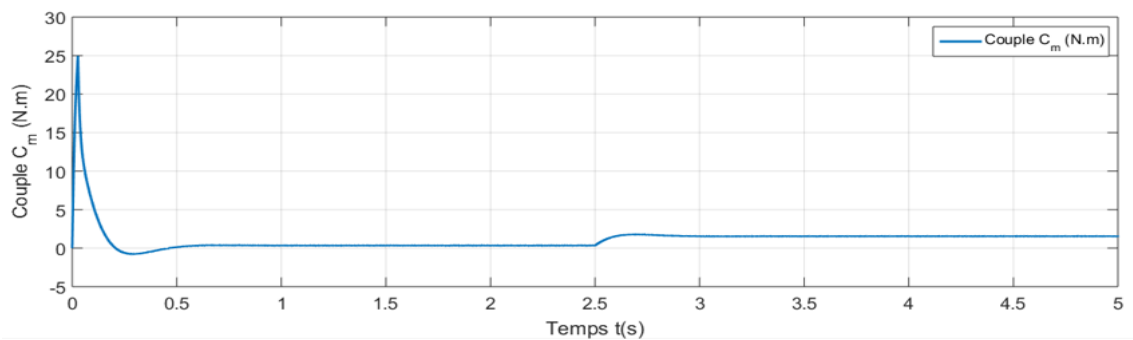


FIGURE III.18 – Courbe de couple  $C_{em}$

On va appliquer plusieurs vitesses de références. La figure III.19 représente les résultats obtenus.

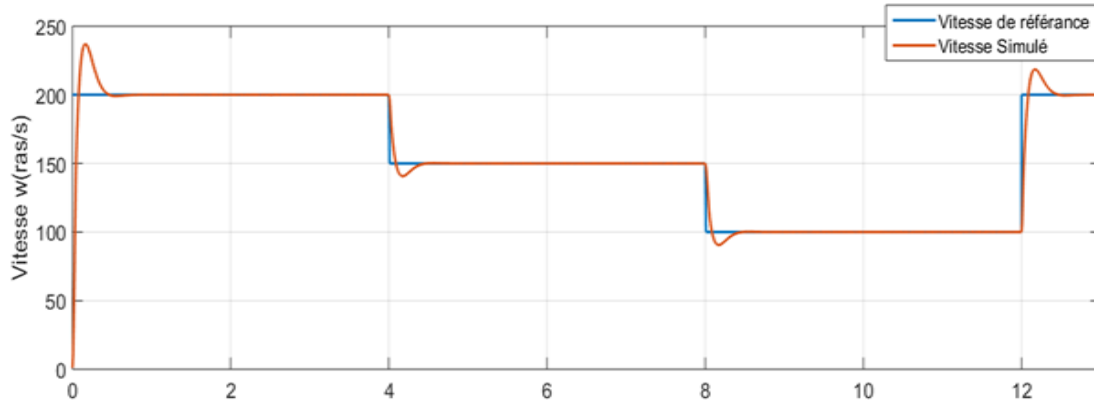


FIGURE III.19 – Courbe de vitesse  $\omega_r$  pour vitesse de références variable

### III.5.2 Interprétation des résultats

Selon la courbe de la vitesse nous remarquons la vitesse augmenté jusqu'a se stabilise à sa valeur de référence. a l'instant 2.5sec il y a une chute de vitesse par ce que nous appliquons un couple résistance mais le régulateur de vitesse il renvoie rapidement à sa valeur de référence.

On remarque aussi que le couple  $C_{em}$  est l'image du courant  $I_a$ . En démarrage, le courant augmente jusqu'à 35(A) et le couple jusqu'à 24.8(N.m). Après application du couple résistant, on observe une augmentation de l'intensité du courant qui se stabilise à une valeur constante. On assure la relation entre le couple et le courant  $C_{em} = K_e \cdot I_a$ .

On remarque aussi que la vitesse simulée suit parfaitement la vitesse de référence malgré les multiples variations de cette dernière, ce qui démontre l'efficacité des correcteurs implémentés.

## III.6 Conclusion

À l'issue d'une étude approfondie comprenant calculs analytiques et simulations numériques, nous avons déterminé les paramètres optimaux des régulateurs  $PI$  (courant et vitesse) selon la méthode de compensation des pôles et la technique dans les propriétés de MATLAB "Tune".

La simulation de la machine à courant continu (MCC), réalisée en présence et en l'absence des perturbations, a donné des résultats satisfaisants au regard des exigences de l'application visée. Le chapitre suivant sera consacré à l'étude expérimentale, laquelle s'appuiera sur les résultats théoriques développés dans le présent chapitre.

## Chapitre IV

# Commande (MCC) avec la carte dSPACE DS1104

---

### SOMMAIRE

---

IV.1 INTRODUCTION . . . . .	52
IV.2 CARTE DSPACE DS1104 . . . . .	52
IV.2.1 Présentation . . . . .	52
IV.2.2 Architecture . . . . .	53
IV.2.3 Panneau de connexion . . . . .	54
IV.3 CONTROL DESK . . . . .	55
IV.3.1 Zone d'application . . . . .	55
IV.3.2 Nouveau projet sur ControlDesk . . . . .	55
IV.3.3 Sauvegarder des données . . . . .	60
IV.4 CÔTÉ IMPLÉMENTATION . . . . .	63
IV.4.1 Description générale . . . . .	64
IV.5 ONDULEUR DE TENSION (FONCTION HACHEUR) . . . . .	65
IV.6 SCHÉMA DE MONTAGE EXPÉRIMENTAL . . . . .	66
IV.7 MESURES DES GRANDEURS PHYSIQUES : . . . . .	66
IV.7.1 Mesure de vitesse . . . . .	66
IV.7.2 Mesure de courant . . . . .	67
IV.7.3 Mesure de tension . . . . .	68
IV.8 RÉGLAGE DE COURANT . . . . .	68
IV.8.1 Rapport cyclique (duty cycle) . . . . .	69
IV.8.2 Résultats de réglage de courant . . . . .	70
IV.8.3 Interprétation des résultats de courant . . . . .	71
IV.9 RÉGLAGE DE VITESSE . . . . .	71
IV.9.1 Explication du modèle Simulink . . . . .	72
IV.9.2 Résultats obtenus . . . . .	74
IV.9.3 Interprétation des résultats . . . . .	76
IV.10 CONCLUSION . . . . .	77

---

## IV.1 Introduction

Ces dernières années, les microprocesseurs et les calculateurs sont devenus des outils de contrôle des procédés de plus en plus importants. Ils ont en effet un impact significatif sur la plupart des domaines, en particulier le génie industriel. Ce travail expérimental est réalisé au sein du laboratoire de commande des machines qui dispose des fameuses cartes dSPACE DS1104. Ce chapitre est consacré à leur description et présentation. Nous aborderons dans un premier temps l'architecture, les performances et le rôle de la carte dSPACE DS1104 dans notre travail.

Dans un second ordre, nous avons tenté d'implémenter la régulation de vitesse et de courant en temps réel sur la carte dSPACE DS1104 à l'aide de cette carte et de l'environnement MATLAB/Simulink.

## IV.2 Carte DSPACE DS1104

### IV.2.1 Présentation

Le pilotage en temps réel des systèmes continus se fait à l'aide d'un PC connecté à la carte dSPACE DS1104. La programmation se fait à l'aide de l'outil de modélisation SIMULINK, qui aide à poser le problème d'une manière graphique en utilisant les blocs interconnectés.[16]

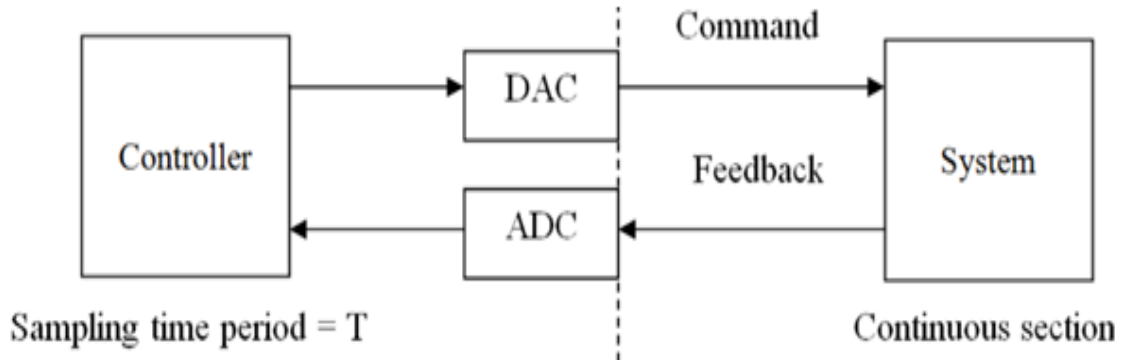


FIGURE IV.1 – Structure de contrôle en temps réel [19]

La carte DS1104 de la figure (IV.2) constitue un système électronique conçu, entre autres, pour mettre en œuvre des systèmes de commande en temps réel. Ce dispositif est particulièrement rapide, notamment grâce à l'intégration de deux processeurs. Le temps réel du système permet, d'une part, d'effectuer l'acquisition des mesures requises et, d'autre part, de générer la commande et de piloter le convertisseur de puissance [16].



FIGURE IV.2 – Carte DSPACE DS1104 [16].

### IV.2.2 Architecture

La plate-forme DSpace est organisée en trois couches distinctes, comme le montre la figure ci-dessous. De la base au sommet, on trouve : la couche de stockage, la couche de logique métier et la couche de service. Par ailleurs, la carte DS1104 intègre un DSP esclave, le *TMS320F240DSP*, dédié à la génération des signaux PWM [18].

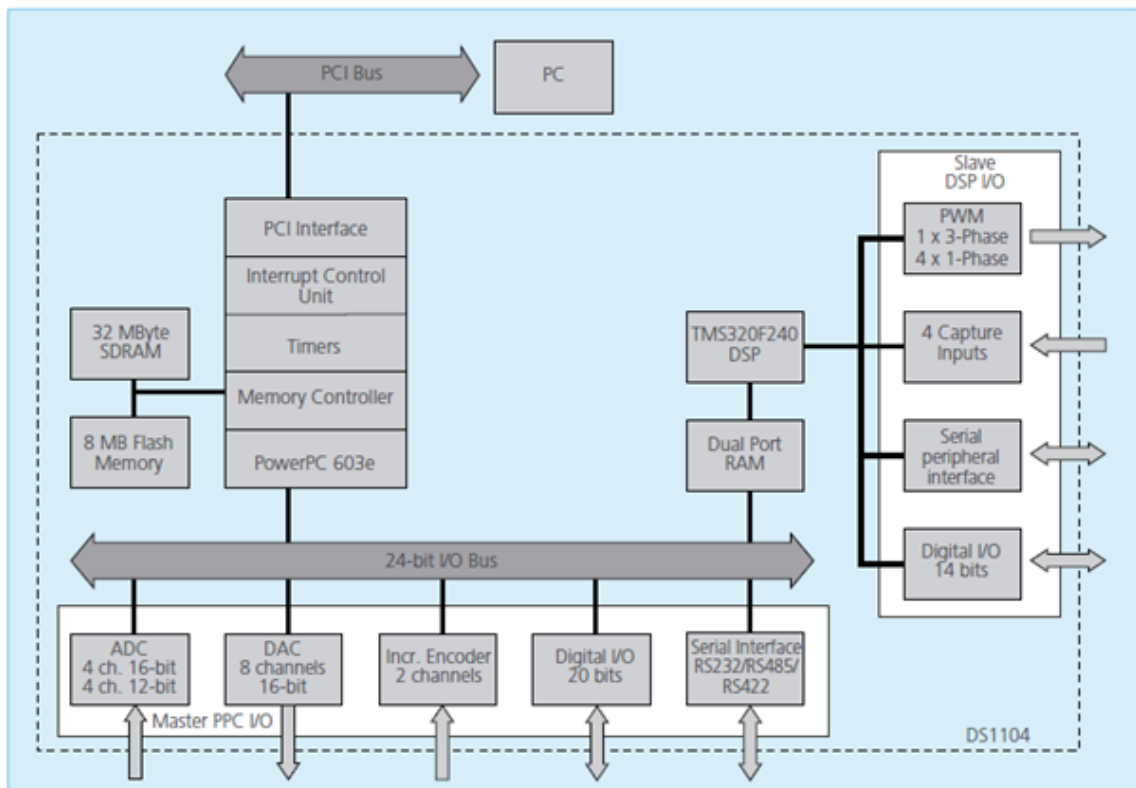


FIGURE IV.3 – Architecture de la carte DS1104 [18].

### IV.2.3 Panneau de connexion

- La carte DS1104 (Master PPC) est équipée d'un panneau de connexion comprenant :
- 8 convertisseurs analogique-numérique (ADC) avec une plage de tension d'entrée de -10V à +10V.
  - 8 convertisseurs numérique-analogique (DAC) délivrant une tension de -10V à +10V.
  - Diverses interfaces, dont des entrées/sorties numériques, des codeurs incrémentaux, etc.

Le master PPC contrôle deux types de convertisseurs analogique-numérique :

- Un convertisseur A/D (ADC1) multiplexé pour les signaux ADCH1 à ADCH4, caractérisés par :

Résolution : 16-bit

Plage de tension :  $\pm 10$  V

Marge d'erreur (Offset) :  $\pm 5$  mV

Marge d'erreur sur le gain :  $\pm 0.25$  %

Rapport signal sur bruit (SNR) :  $> 80$  dB (à 10 kHz)

- Quatre convertisseurs A/D (ADC2...ADC5) pour les signaux (ADCH5...ADCH8).

Les caractéristiques de ces convertisseurs sont :

Résolution : 12-bit

Plage de tension d'entrée :  $\pm 10$  V

Marge d'erreur (Offset) :  $\pm 5$  mV

Marge d'erreur sur le gain :  $\pm 0.5$  %

Rapport signal sur bruit :  $> 70$  dB [18].

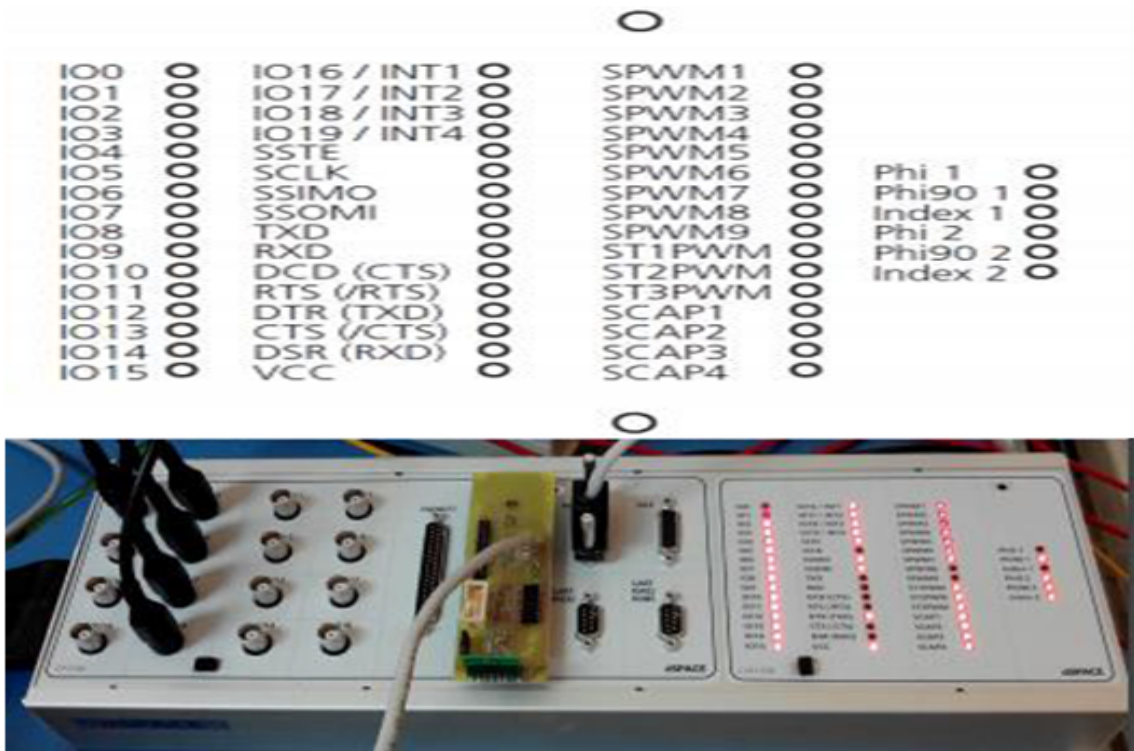


FIGURE IV.4 – Panneau de connexion CLP1104 [18].

## IV.3 Control Desk

### IV.3.1 Zone d'application

ControlDesk est un logiciel de test dSPACE pour le développement d'interfaces de contrôle conviviales. Il prend en charge toutes les tâches nécessaires et offre un environnement de travail unique, de la conception à la finalisation des expérimentations.

La modélisation s'effectue grâce à l'outil Simulink, qui facilite la formulation du problème

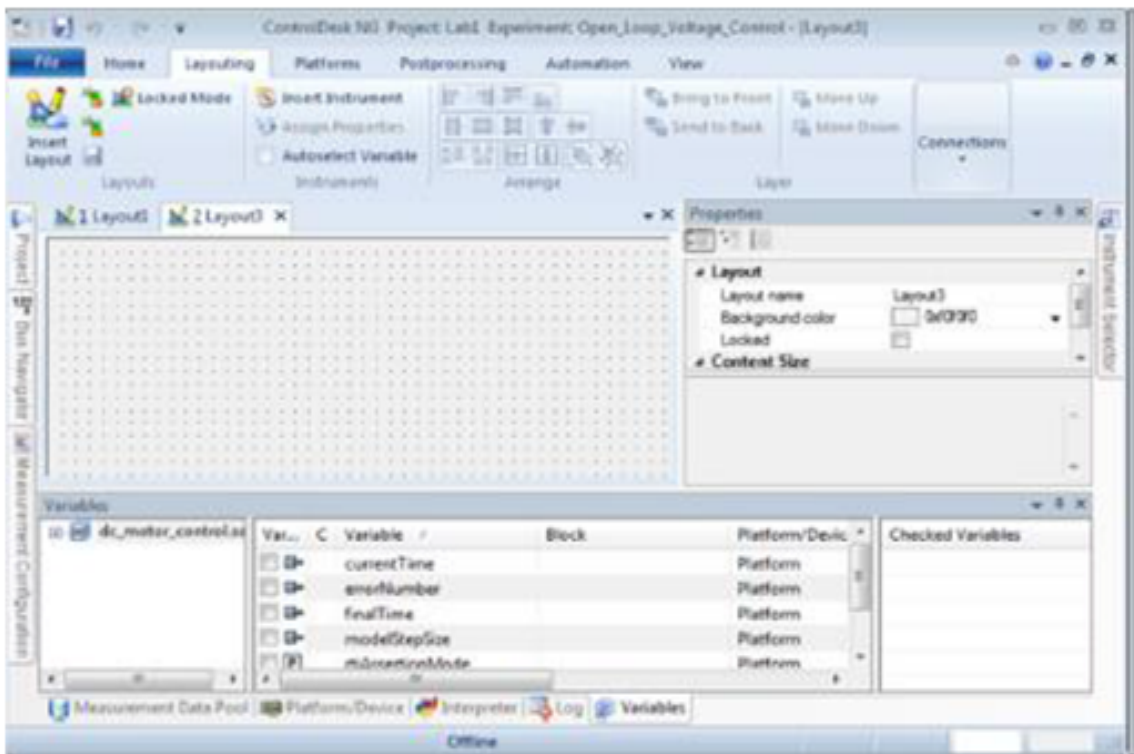


FIGURE IV.5 – Interface de ControlDesk

de manière graphique en utilisant des blocs interconnectés. En réalité, de nombreux systèmes de développement en temps réel exploités sur des DSP sont désormais équipés d'une interface Simulink qui permet la conversion des blocs Simulink en code machine exécutable sur un système basé sur DSP [3]. Cela diminue considérablement le temps nécessaire pour le développement et la conception des prototypes destinés au contrôle des systèmes. Le processus de prototypage comprend donc trois phases :

1. Construction du système de commande en utilisant les blocs de Simulink.
2. Simulation du système pour voir les résultats dans différents scénarios.
3. Exécution du modèle en temps réel à travers la carte DS1104.

### IV.3.2 Nouveau projet sur ControlDesk

Double-cliquer sur l'icône ControlDesk à partir du raccourci se trouvant sur le bureau, ou aller dans le menu démarrer de Windows et lancer le programme. La fenêtre suivante s'ouvre :

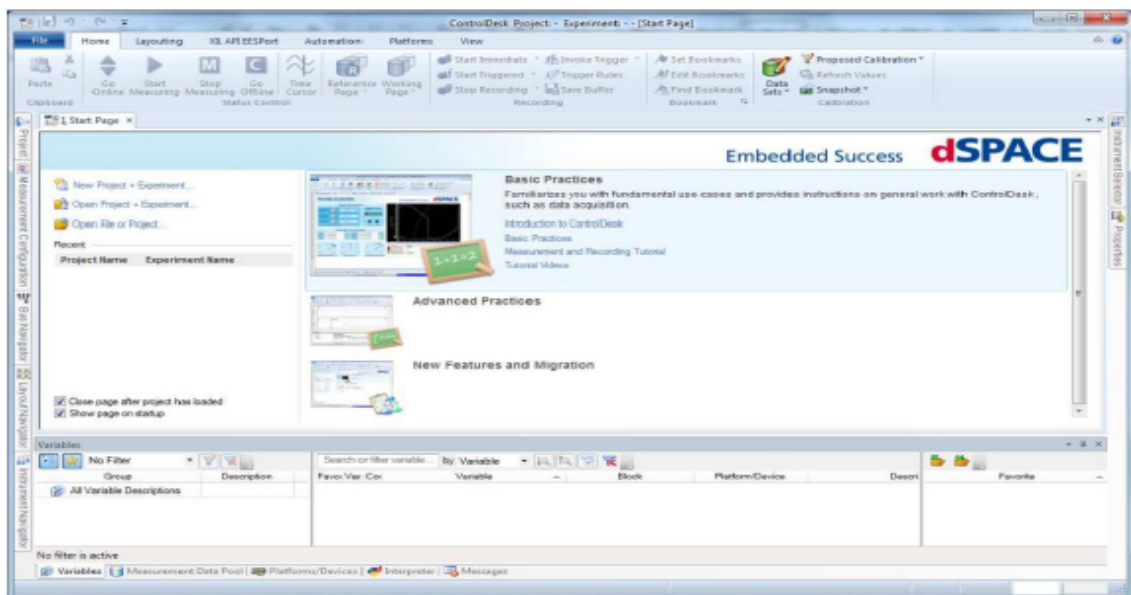


FIGURE IV.6 – Première étape pour créer un project

#### IV.3.2-a Créer un nouveau projet + expérience

- Dans le menu **File**, cliquer sur **New Project + Experiment**, puis saisir un nom (**Name of the project**) et choisir le dossier dans lequel sera enregistré le projet (Dossier de travail déjà créer).

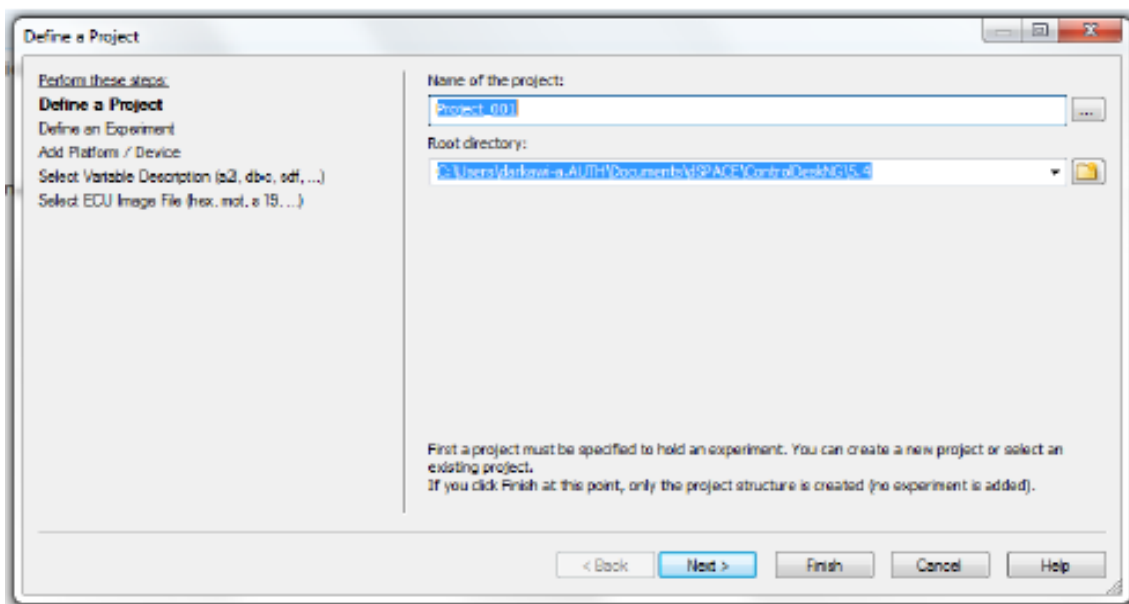


FIGURE IV.7 – Deuxième étape pour créer un project

- La fenêtre du projet s'ouvre. Saisir le nom du projet, puis cliquez sur **Next**.

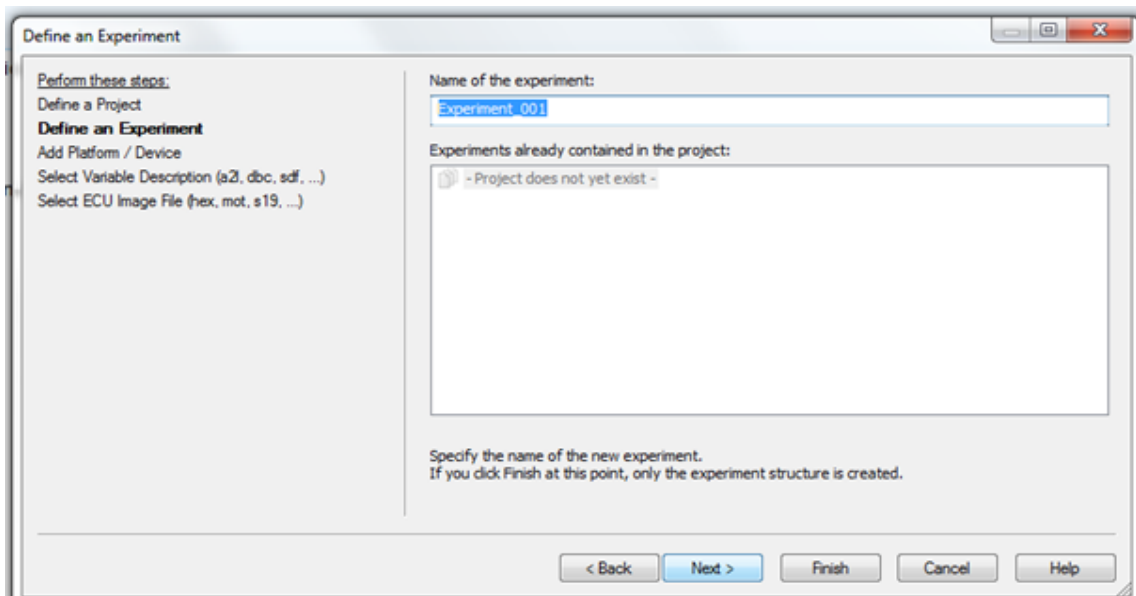


FIGURE IV.8 – Troisième étape pour créer un projet

- Vérifier et sélectionne ensuite la plateforme (**DS1104**), puis appuyé sur **Next**.

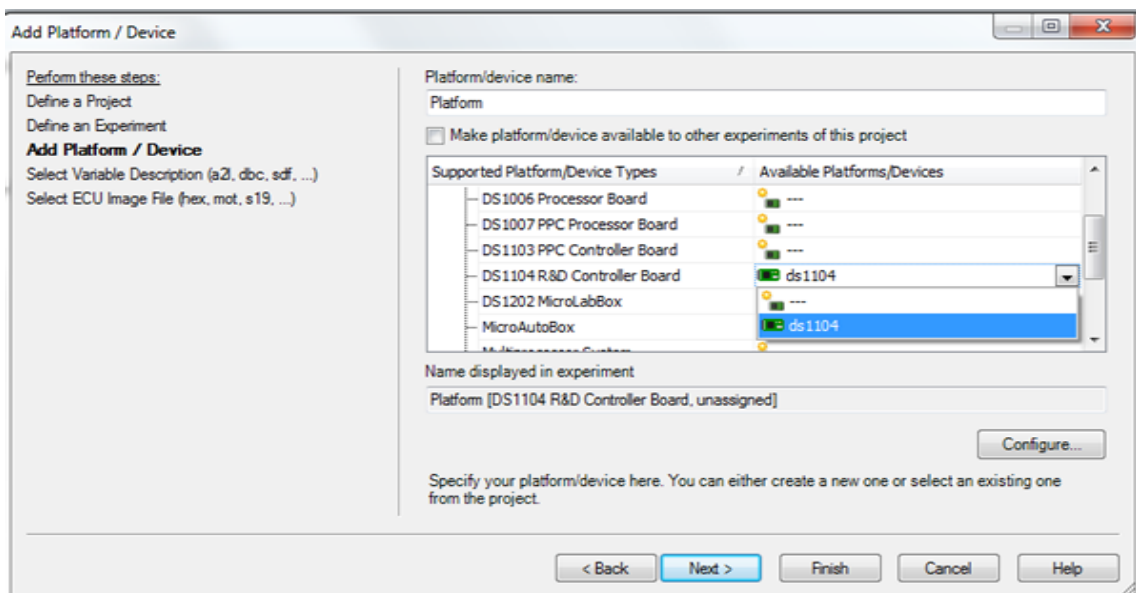


FIGURE IV.9 – Quatrième étape pour créer un projet

- Dans la boîte de dialogue sélection des variables, choisissez le fichier (**.sdf**) correspondant (fichier généré lors de l'exécution de votre modèle **Simulink** et validez par Finish.

ControlDesk exploite ce fichier (**.sdf**) pour établir la correspondance entre les variables du modèle Simulink et celles affichées ou contrôlées dans l'interface Layout.

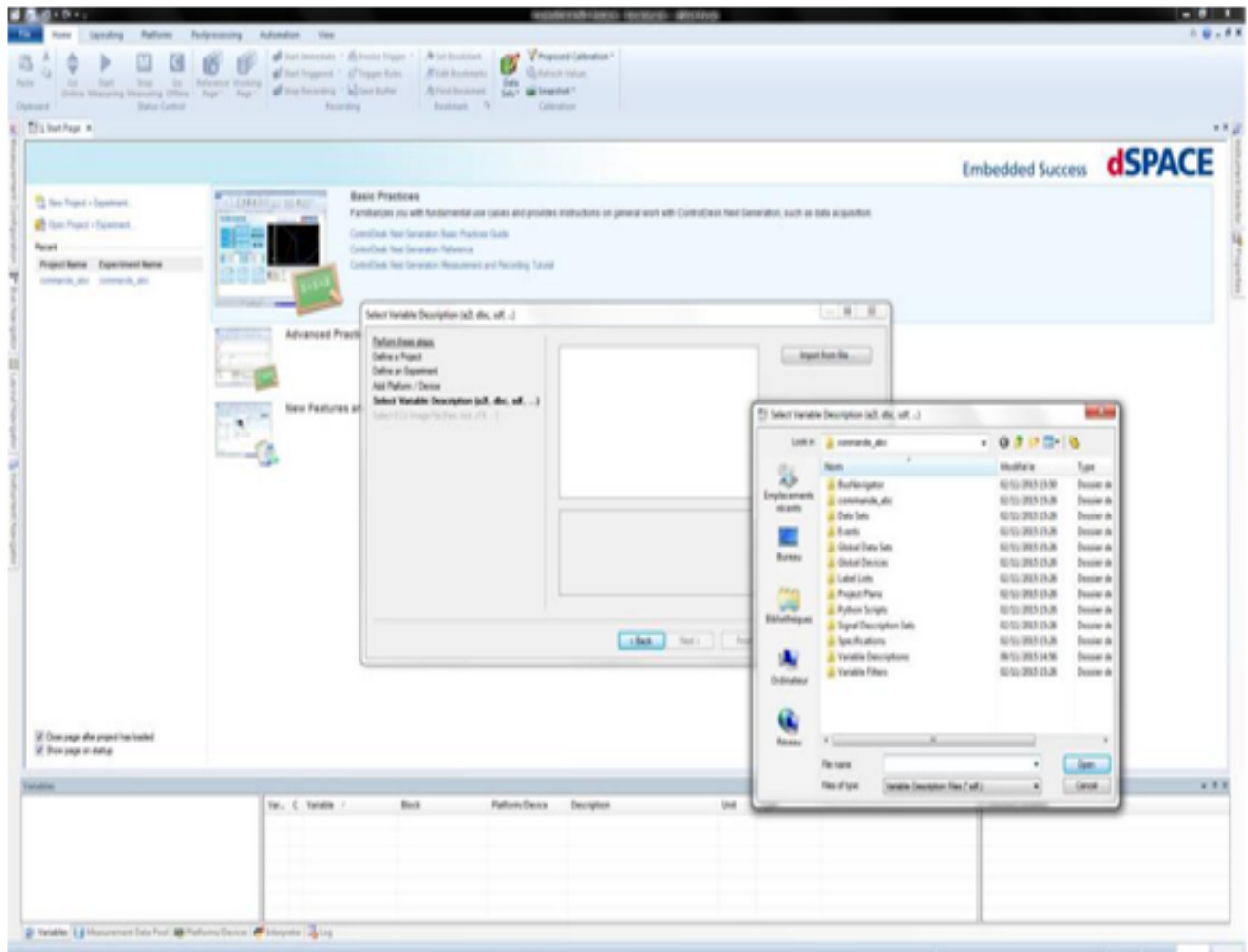


FIGURE IV.10 – Cinquième étape

- Le modèle a été créé. Ensuite, il faut concevoir un (ou plusieurs) «Layout» lié à ce projet.

Un «Layout» est une interface graphique qui permet d'intégrer des instruments de contrôle et/ou de visualisation, pour observer et/ou régler en temps réel les différentes variables du modèle.

Les variables accessibles via **Simulink** sont visibles dans la partie basse de la fenêtre des variables. L'onglet **projet** affiche le fichier (**.sdf**) choisi pour être chargé.



- Pour démarrer l'exécution du modèle, acquérir les mesures et interagir avec le programme **Simulink**, activer le mode **Measuring** en cliquant sur [**Start Measuring**].

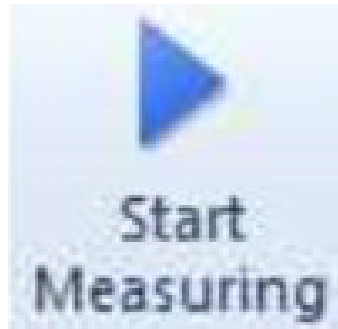


FIGURE IV.13 – Icône Start Measuring

- **Important** : Avant toute recompilation (**Build**) dans **Matlab/Simulink**, désactiver obligatoirement le mode **Online** en cliquant sur [**Go Offline**].



FIGURE IV.14 – Icôn Go Offline

- Une fois la compilation terminée, vous pourrez réactiver le mode Online pour appliquer les modifications.

### IV.3.3 Sauvegarder des données

Pour sauvegarder les données de mesure sur votre ordinateur :

1. Accéder à Measurement → View Measurement Configuration
2. Sélectionner l'onglet Recorders
3. Cliquez sur Create New Recorder
4. Attribuer un nom à l'enregistrement
5. Glisser-déposer les variables à mesurer dans le tableau Recorder montré dans la figure (IV.15)

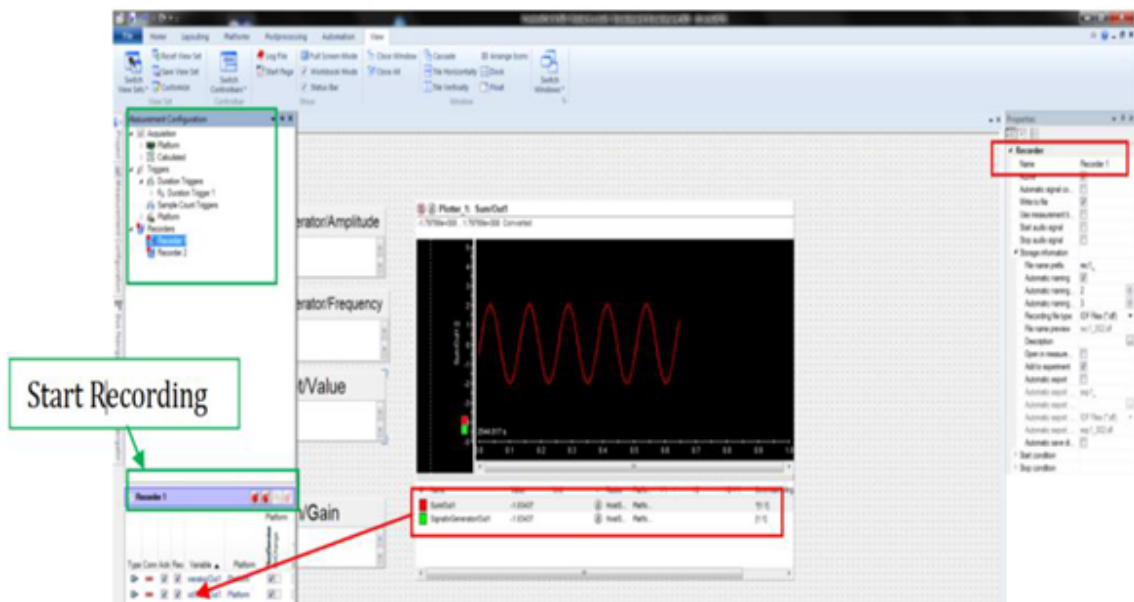


FIGURE IV.15 – Sauvegarder des données

- Le nom par défaut du fichier d'enregistrement est (**rec1.idf**).
- Pour exporter les données vers MATLAB  
Pour exporter les données vers un fichier Matlab, aller dans Project, Experiment1, Measurement Data et faite un clic droit sur le fichier(.sdf) créé, puis Export en choisissant bien le type de fichier (**.mat**) dans l'onglet Save as Type.

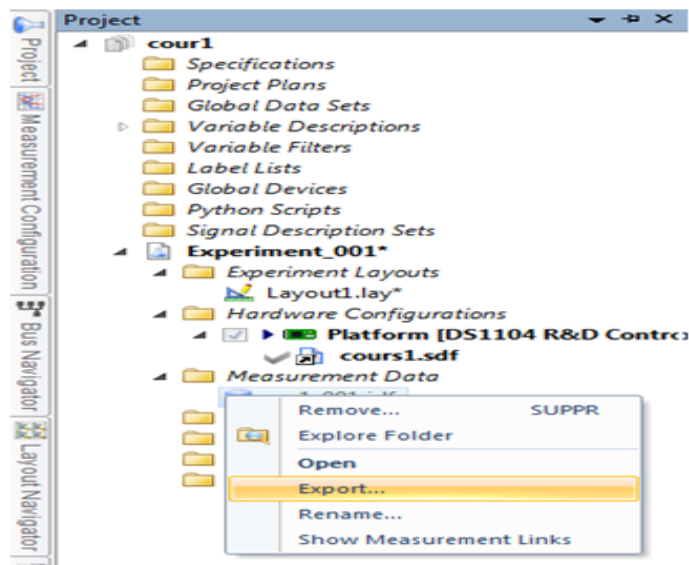


FIGURE IV.16 – Exporter des données

- Une fois le fichier (**.mat**) exporté (nommez-le : **test01.mat** et enregistrez-le dans le dossier de travail), vous pouvez le charger dans l'espace de travail MATLAB et extraire les variables en utilisant le programme de récupération des données suivant [18] :

```

=====
% Programme 1 de récupération de données sous Matlab
% Nom du fichier test01.mat
% Le fichier doit être placé dans le dossier de travail de Matlab
=====
%
load test01.mat;           % Pour charger les données, test01 est le nom de fichier (.mat)
%
temps = test01.X.Data;    % Création du vecteur temps
%
variable_1=test01.Y(1).Data; % Récupération des variables
variable_2=test01.Y(2).Data;
% ainsi de suite jusqu'à
variable_n=test01.Y(n).Data; % Variable numéro n (n : Nombre de variables enregistrées)

% ***** Tracé des courbes ***** %
figure 1;
plot(temps,variable_1); grid;

figure 2;
plot(temps, variable_2); grid;

% Fin
=====

```

FIGURE IV.17 – Programme Matlab pour chargement des données

## IV.4 Côté implémentation

Pour implémenter une loi de commande sur le banc d'essai nous passons par les étapes suivantes :

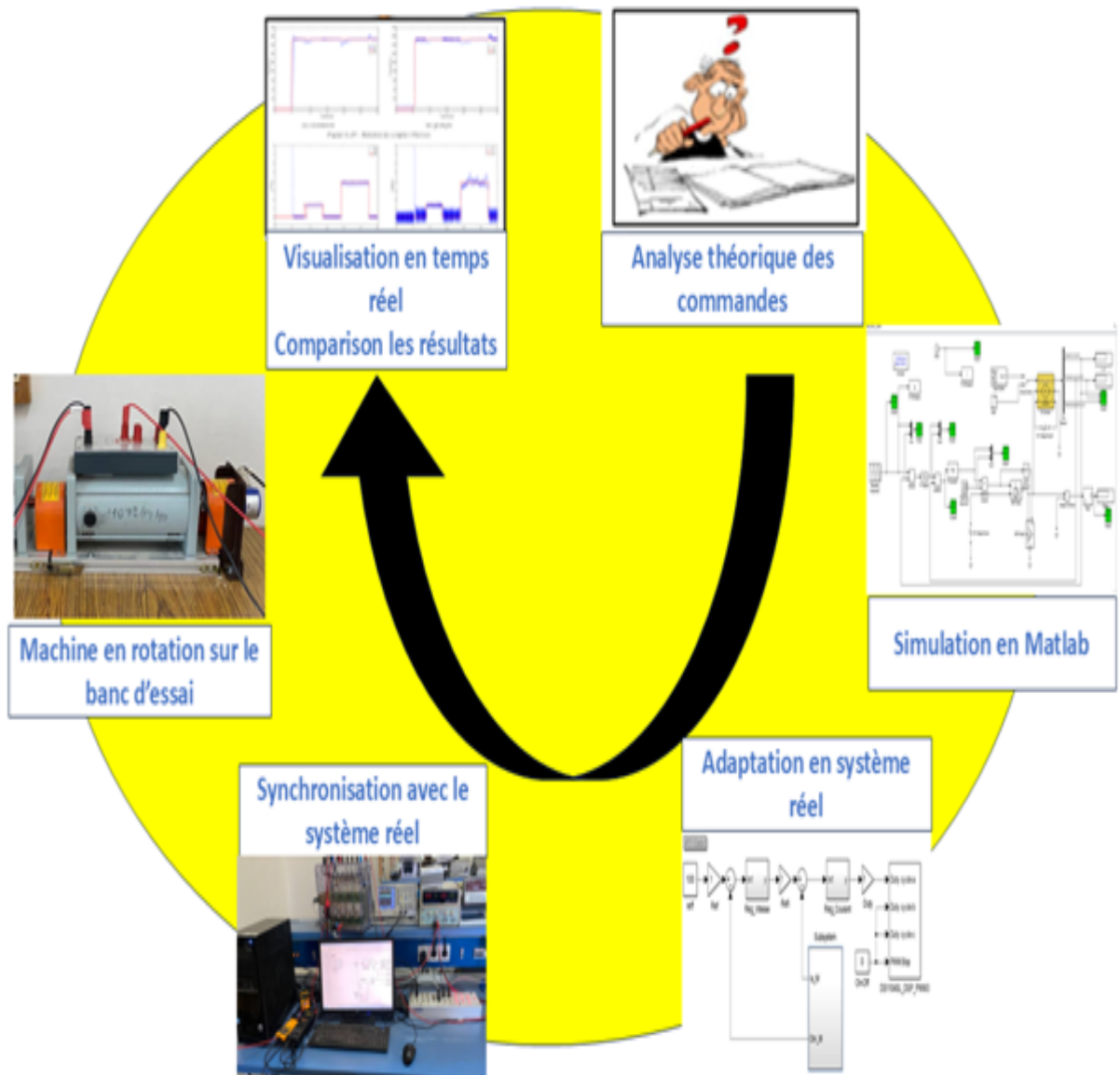


FIGURE IV.18 – Processus de développement d'une méthode de contrôle sur le banc de démonstration

### IV.4.1 Description générale

Pour valider expérimentalement la méthode de commande développée dans cette étude, nous avons réalisé un banc d'essai à figure (IV.19). Celui-ci comprend un convertisseur (Hacheur 4 quadrants) équipé des interrupteurs constitués des transistors IGBT monté en antiparallèles avec des diodes, le signal de commande de l'IGBT étant généré par une carte DS1104 basée sur un processeur dédié au traitement du signal.

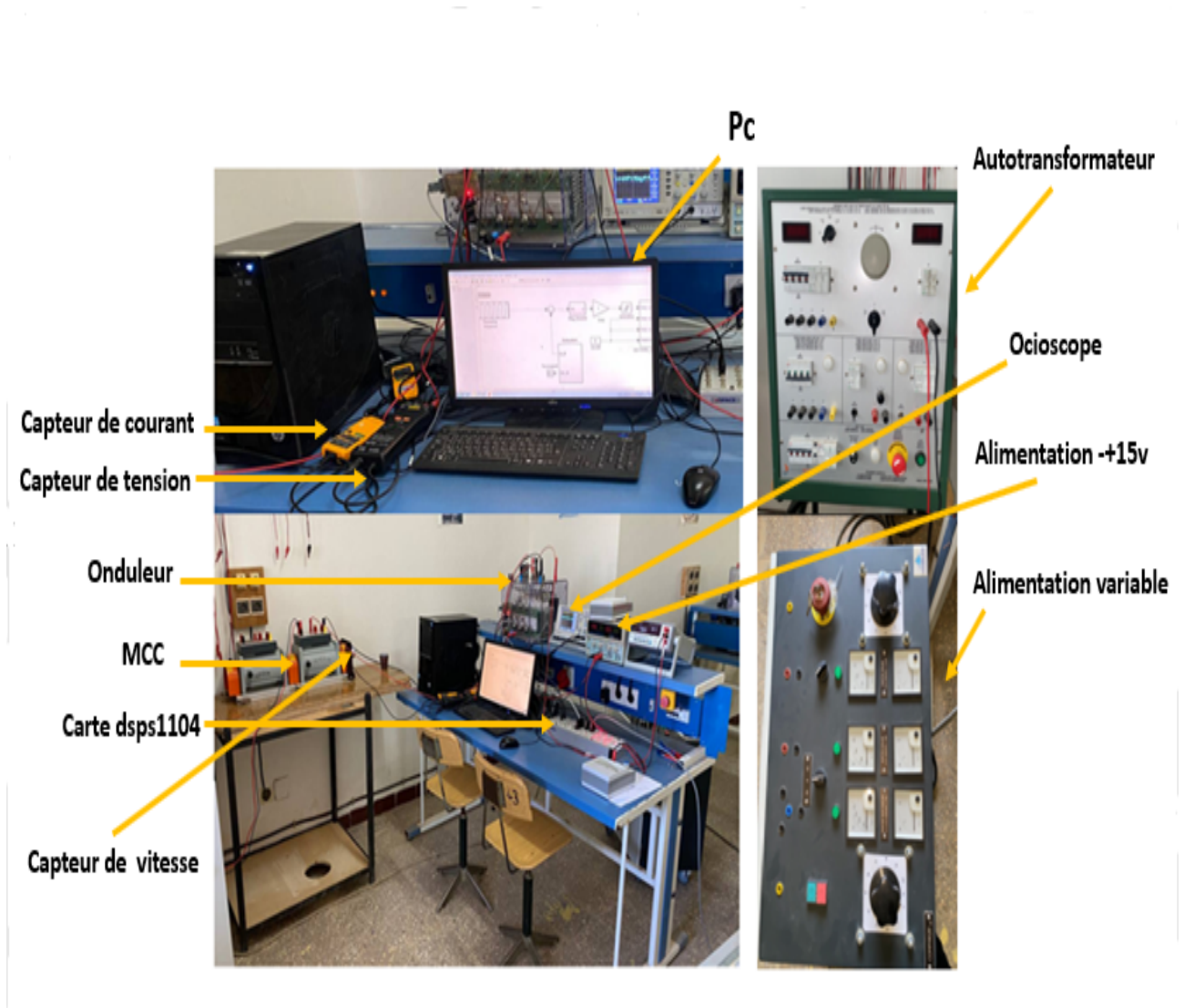


FIGURE IV.19 – Photo du banc d'essai expérimental

#### IV.4.1-a Différentes parties du banc d'essai

Notre banc d'essai est constitué par trois parties essentielles :

**1. Partie de puissance :**

- Le convertisseur (Hacheur 4 quadrants).
- La charge, qui est (*MCC*).

**2. Partie de mesure :**

- Capteur de courant (pour mesurer le courant  $I_a$ )
- Capteur de vitesse (pour mesurer la vitesse du moteur  $\omega_r$ ).
- Capteur de tension (pour visualiser la tension aux bornes de la charge)

**3. Partie de commande :**

- Carte de contrôle DS1104 (basée sur un **TMS320F240 DSP** ).
- L'ordinateur pour générer le code objet défini à partir de l'algorithme de commande.

### IV.5 Onduleur de tension (fonction hacheur)

L'installation "Semikron" ( $20kVA$ ) comprend un redresseur à diodes, un onduleur de tension triphasé et un dispositif de freinage hacheur. L'architecture modulaire de ce dispositif permet l'utilisation indépendante de chaque convertisseur statique, ouvrant ainsi la voie à diverses configurations d'alimentation. L'inverseur de tension peut être approvisionné en énergie à partir du redresseur triphasé ou d'une source de tension continue.

L'utilisation du redresseur nécessite l'installation d'une inductance de lissage ou d'une résistance de précharge. C'est pourquoi nous avons décidé d'utiliser une source de tension continue réglable pour alimenter l'onduleur. Effectivement, si l'écart de tension aux bornes des condensateurs de filtrage est significatif, il peut y avoir des fortes sollicitations de courant qui peuvent endommager les condensateurs.

La tension maximale du bus continu est de  $750V$ , cependant, pour des raisons de sécurité, pendant la phase d'essai et de validation des algorithmes de contrôle, l'onduleur reçoit une alimentation à partir d'une source de tension de  $300V$ . Représenter sur la figure (IV.20) :

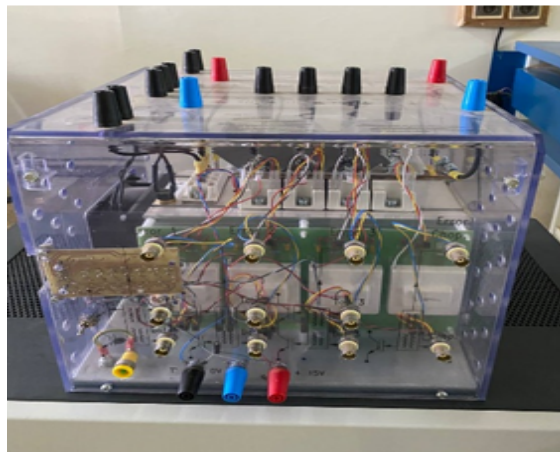


FIGURE IV.20 – Onduleur de tension SEMIKRON

Un auto transformateur alimente le montage de puissance, ce qui permet d'augmenter progressivement la tension afin d'éviter un pic de tension. Les pilotes de cette configuration sont de modèle *SKHL22* et contrôlent chacun un bras du pont (les deux IGBT d'un module). Alimentés en  $0V/+15V$  ( $160mA$  par pilote au maximum), ils fournissent une tension de  $+15V/-15V$ , ce qui permet à l'IGBT d'avoir une dynamique efficace à la fermeture et à l'ouverture, tout en minimisant les pertes lors des commutations.

## IV.6 Schéma de montage expérimental

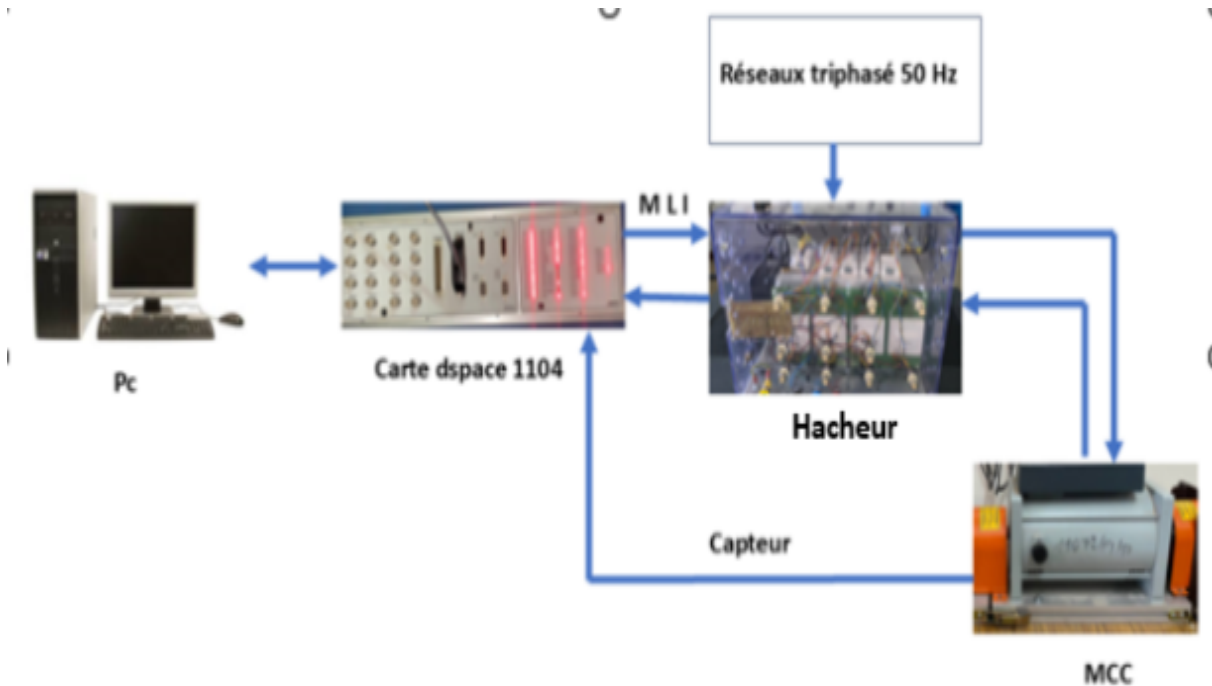


FIGURE IV.21 – Schéma équivalent de montage réel

## IV.7 Mesures des grandeurs physiques :

### IV.7.1 Mesure de vitesse

Le montage réalisé sous Simulink montré dans la figure (IV.22), pour la mesure de vitesse du *MCC* à l'aide de la carte dspace 1104.

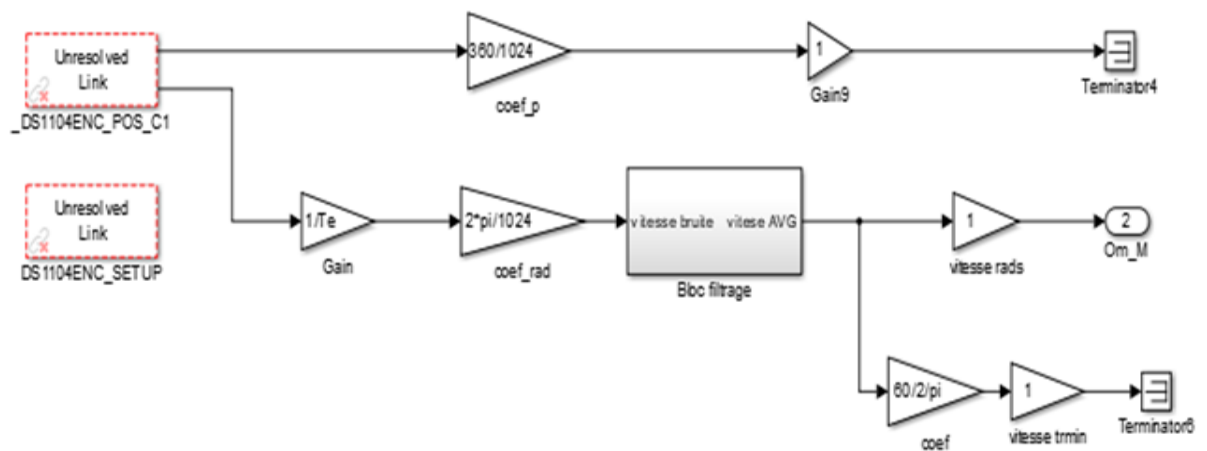


FIGURE IV.22 – Mesure de vitesse

#### IV.7.1-a Explication de modèle Simulink

On a un encodeur de position donc en sortie on va multiplier par un gain de  $360/1024$  d'après les caractéristiques de l'encodeur. Nous nous intéressons à la mesure de vitesse qui est dérivée de la position (Enc delta position) multipliée par un gain  $(1/T_e)$  où  $T_e$  est la période d'échantillonnage, puis le coefficient de l'encodeur  $(2\pi/1024)$  qui indique 1024 points dans un tour, puis un bloc de filtrage de bruit (filtrage numérique), puis un gain 1 pour afficher la vitesse en rad/s dans les barres de variable dans le « controlDesk » et un coefficient  $(60/2\pi)$  pour la vitesse en tr/min.

#### IV.7.2 Mesure de courant

Le bloc Simulink montre dans la figure (IV.23), créer pour mesure de courant de MCC à travers la carte dspace 1104.

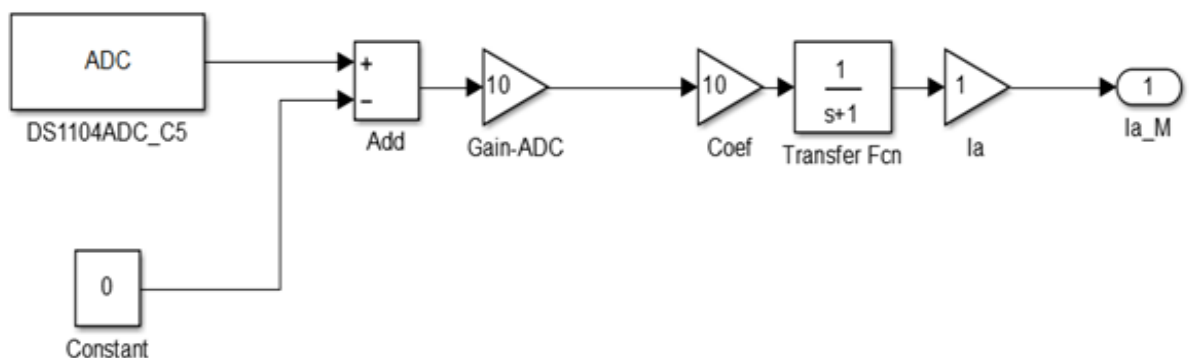


FIGURE IV.23 – Mesure de courant

#### IV.7.2-a Explication de modèle Simulink

La sortie du capteur attaque l'ADC de dSpace, puis est multipliée par un gain de 10 pour avoir la vraie valeur du moment, car tout signal acquis par l'ADC est divisé par 10. Une deuxième multiplication par un gain de 10 (coefficient du capteur) est appliquée. Comme pour la mesure de vitesse, on ajoute un filtrage passe-bas pour éliminer les bruits de mesure, puis un gain 1 pour afficher  $I_a$  dans la barre des variables du « controlDesk ».

#### IV.7.3 Mesure de tension

Le bloc Simulink montre dans la figure (IV.24), créer pour mesure de la tension de MCC à travers la carte dspace 1104.

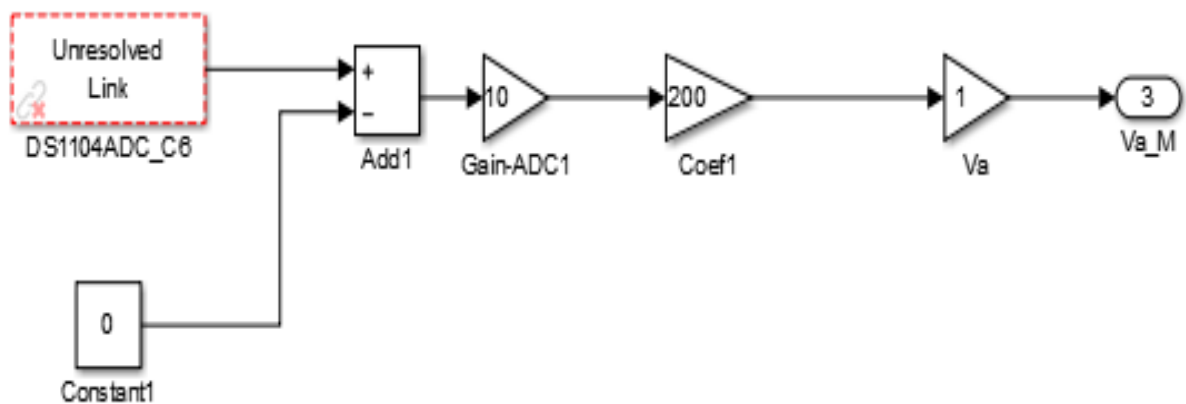


FIGURE IV.24 – Mesure de tension

#### IV.7.3-a Explication de modèle simulink

La sortie du capteur attaque l'ADC de dspace, puis est multipliée par un gain de 10 pour avoir la vraie valeur du moment, où tout signal acquis par l'ADC est divisé par 10. Une deuxième multiplication par un gain de 200 (coefficient du capteur de tension) est appliquée, puis un gain 1 pour afficher  $I_a$  dans la barre des variables du « controlDesk ».

### IV.8 Réglage de courant

On régle le courant d'induit de moteur à courant continu en boucle ouverte à travers le modèle simulink montrer dans la figure (IV.25).

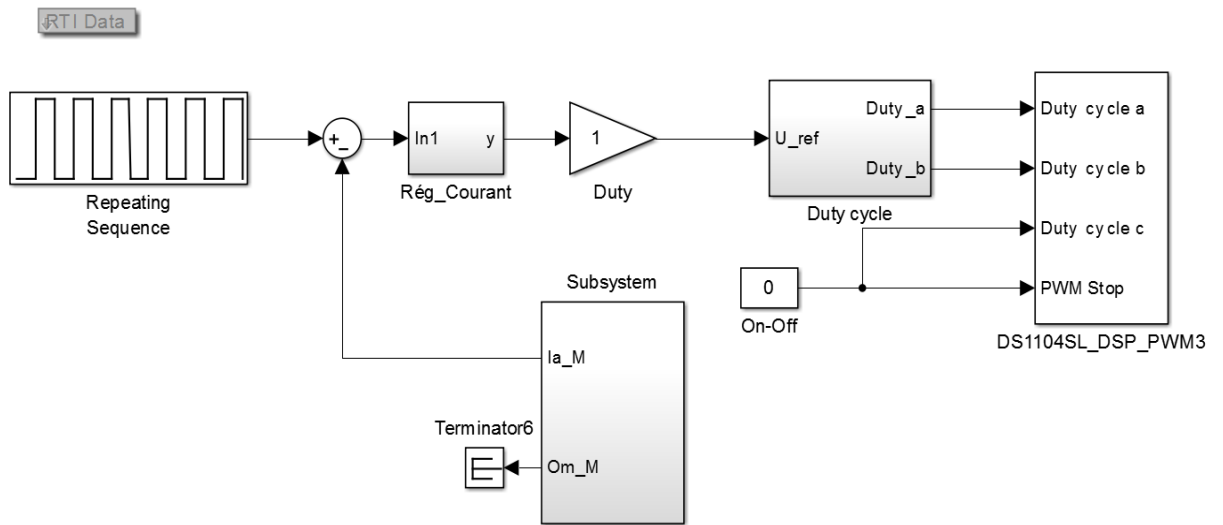


FIGURE IV.25 – Modèle de réglage de courant d’induit

### IV.8.1 Rapport cyclique (duty cycle)

La commande des interrupteurs se faire avec le bloc Duty cycle monter dans la figure (IV.26).

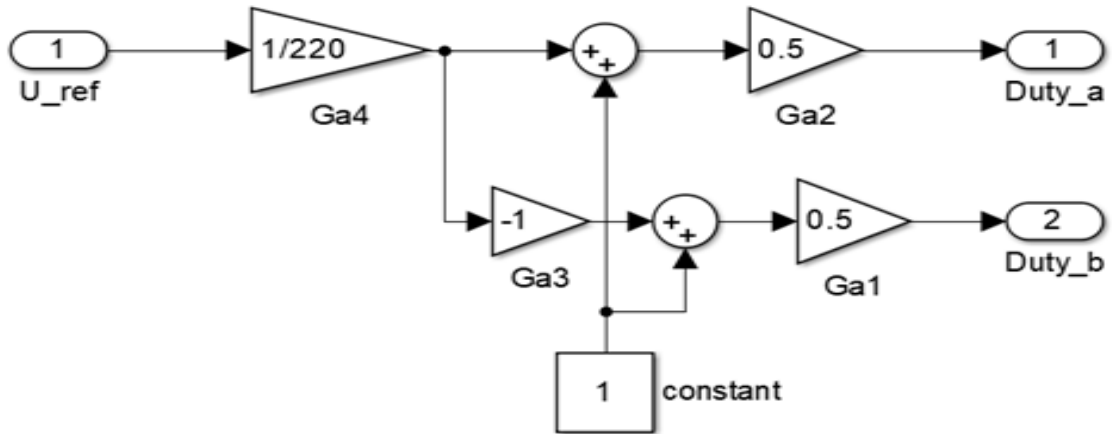


FIGURE IV.26 – Représentation rapport cyclique (duty cycle)

#### Remarque

On réglé les valeur  $K_p$  et  $K_i$  de correcteurs  $PI$  (Rég\_courant) par la méthode essai erreur

## IV.8.2 Résultats de réglage de courant

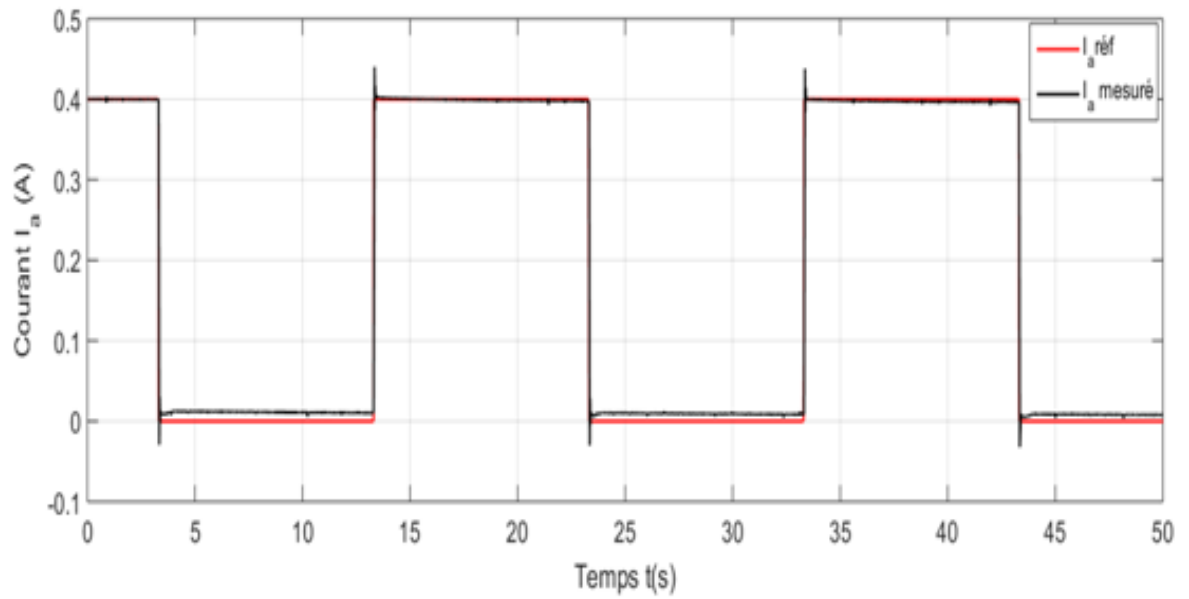
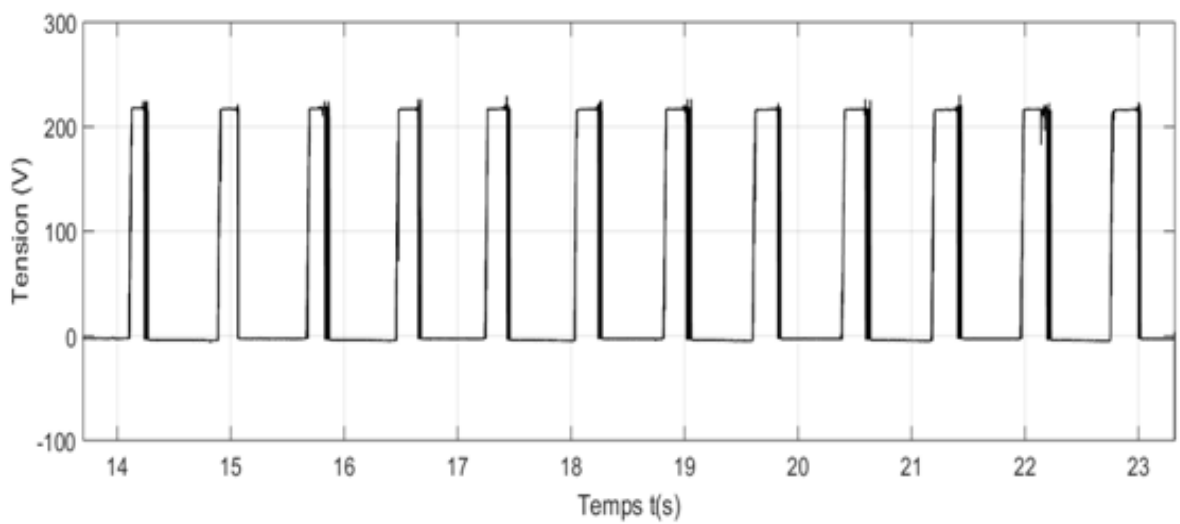
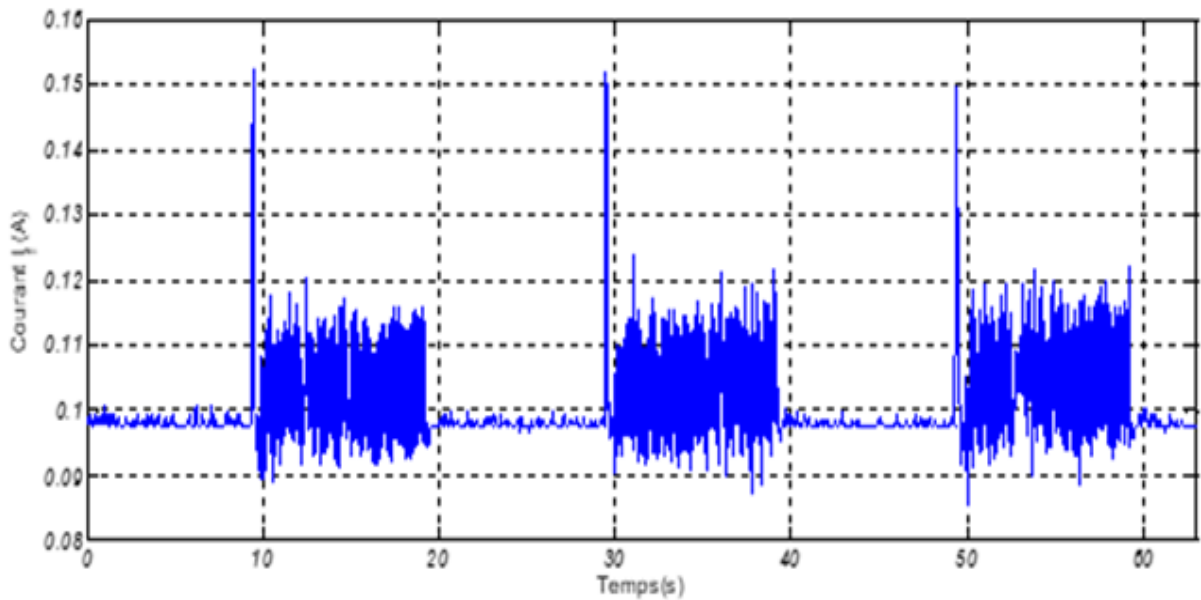
FIGURE IV.27 – Courbe de courant d'induit  $I_a$  en boucle ouverte

FIGURE IV.28 – Courbe de tension en en boucle ouverte

FIGURE IV.29 – Courbe de courant d'inducteur  $I_f$ 

### IV.8.3 Interprétation des résultats de courant

- La figure (IV.27) représente la courbe du courant mesuré  $I_a^{mesur}$  et du courant de référence  $I_a^{ref}$  en fonction du temps.

Le courant de référence  $I_a^{ref}$  suit un signal en crêteaux, alternant entre 0A et environ 0,4A toutes les 10 secondes.

Le courant mesuré  $I_a^{mesur}$  suit fidèlement la référence avec une précision remarquable.

Les légers écarts observés sont probablement dus aux dynamiques du système de commande ou aux temps de réponse du capteur.

Cela démontre l'efficacité de la régulation de courant.

- La figure IV.28 représente la courbe du tension mesuré  $V_a^{mesur}$  en fonction du temps.

La tension varie de 0V jusqu'à environ 230V, selon un signal en crêteaux (forme carrée).

La fréquence de ces crêteaux est élevée et régulière, indiquant une modulation par impulsions (*PWM*).

- Quand la machine fonctionné, nous observons de légères fluctuation dans le courant de l'inducteur comme le monter dans la figure (IV.29).

## IV.9 Réglage de vitesse

On réglerle vitesse  $\omega$  de moteur à courant continu en boucle fermée à travers le modèle simulink montrer dans la figure (IV.25).

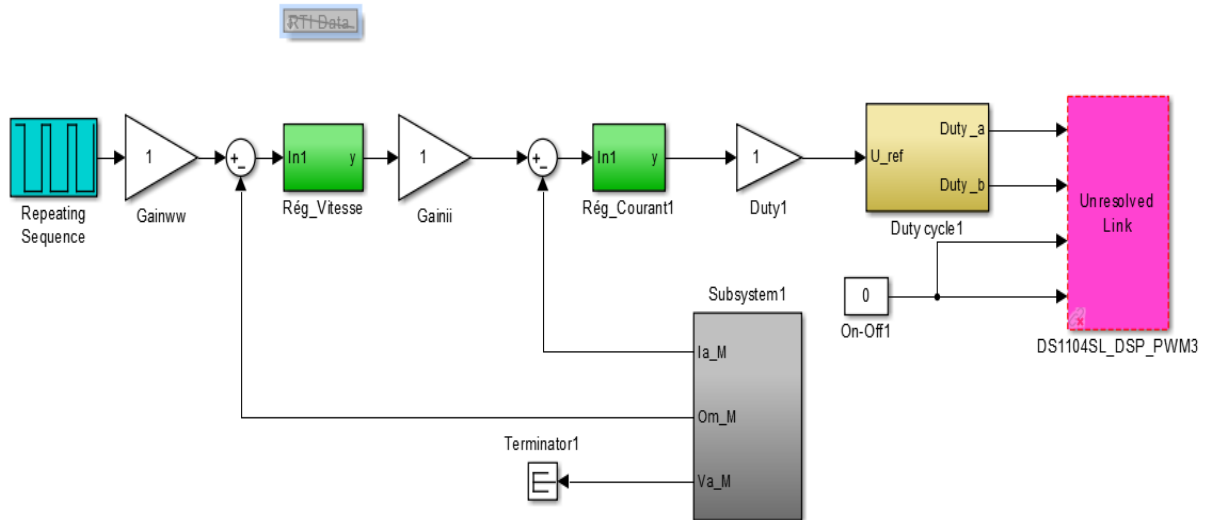


FIGURE IV.30 – Modèle Simulink globale

### IV.9.1 Explication du modèle Simulink

On a donc 2 boucles de régulation dans ce schéma

#### IV.9.1-a Boucle de vitesse

On compare la vitesse de référence (des intervalles de 0 à 2500  $tr/min$  avec une durée de 10 secondes et une fréquence de 50  $Hz$ ) à la vitesse qu'on a réglée. L'erreur identifiée cible le bloc de contrôle proportionnel-intégral pour déterminer une commande sous la forme d'un courant de référence à transmettre à la boucle de courant.

#### IV.9.1-b Boucle de courant

Le courant de référence fourni par la boucle de vitesse est comparé à la mesure de courant du MCC. Notons que le courant de référence doit être restreint à un maximum de 0.4 (A), qui représente le courant maximal requis par le MCC en mode ouvert. Le bloc de régulation PI utilisera l'écart entre  $I_{ref}$  et  $I_{mesuré}$  pour déterminer le contrôle, qui est une tension plafonnée à la tension maximale nominale de la machine (220V), incluse dans le bloc de « duty cycle ».

#### Remarque

Après lancement de la simulation et implémentation des données dans la carte dsps1104, on règle les correcteurs  $PI$  par essai-erreur en fixant  $K_i$  de la vitesse à la valeur 0 et en jouant sur la valeur de  $K_p$  jusqu'à ce que le moteur réagisse et suive la consigne. Ensuite, on fait varier  $K_i$  pour éliminer l'erreur statique.

- Pour contrôler le moteur MCC en utilisant la fenêtre suivante de "ControlDesk" (figure IV.31)

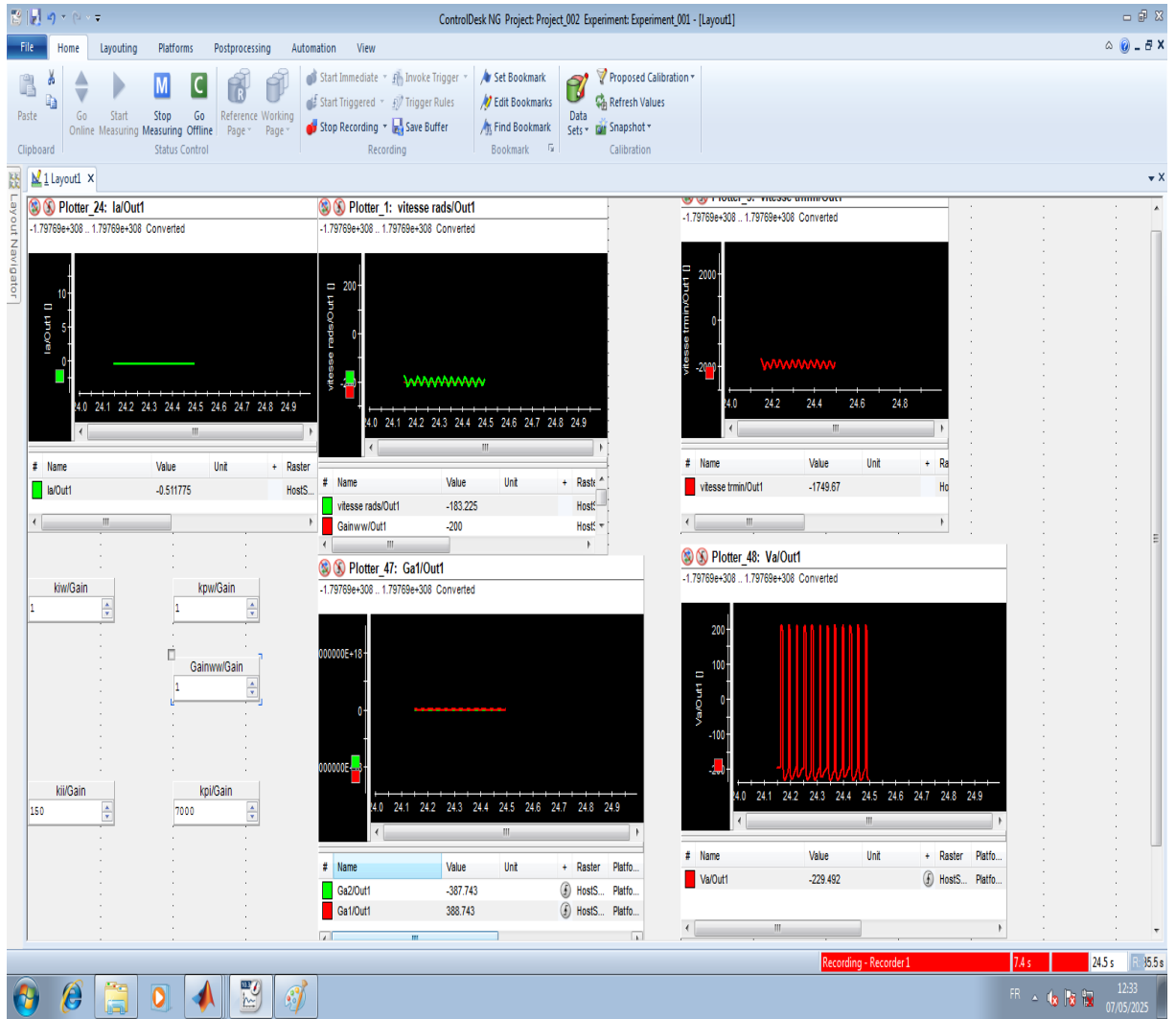


FIGURE IV.31 – Fenêtre de ControlDesk pour la commande

## IV.9.2 Résultats obtenus

– Résultat pour la valeur de référence fixe

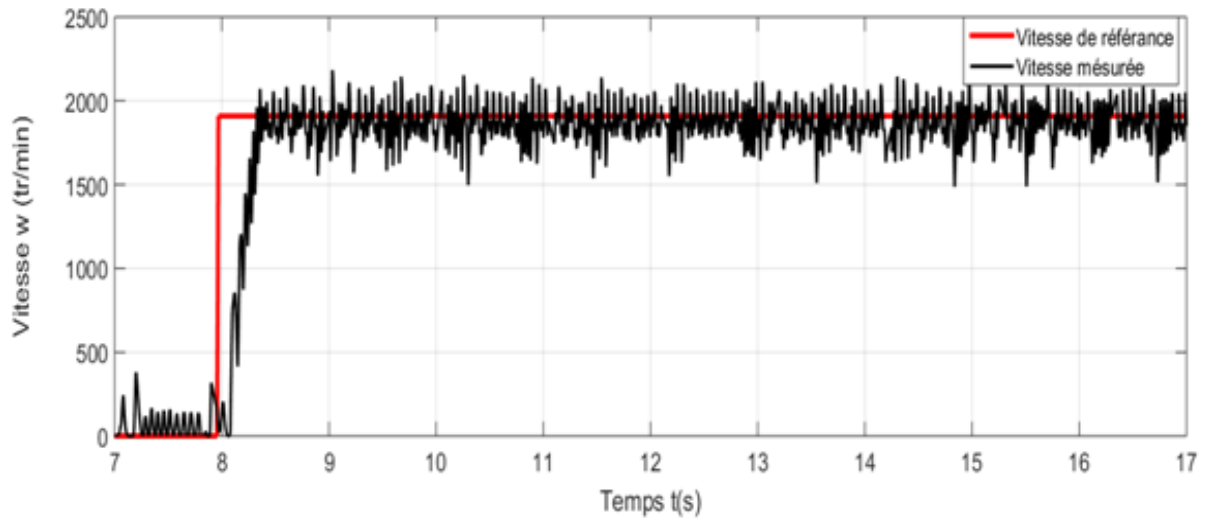


FIGURE IV.32 – Courbe de vitesse pour valeur de référence fix

– Résultats pour valeurs de références variable

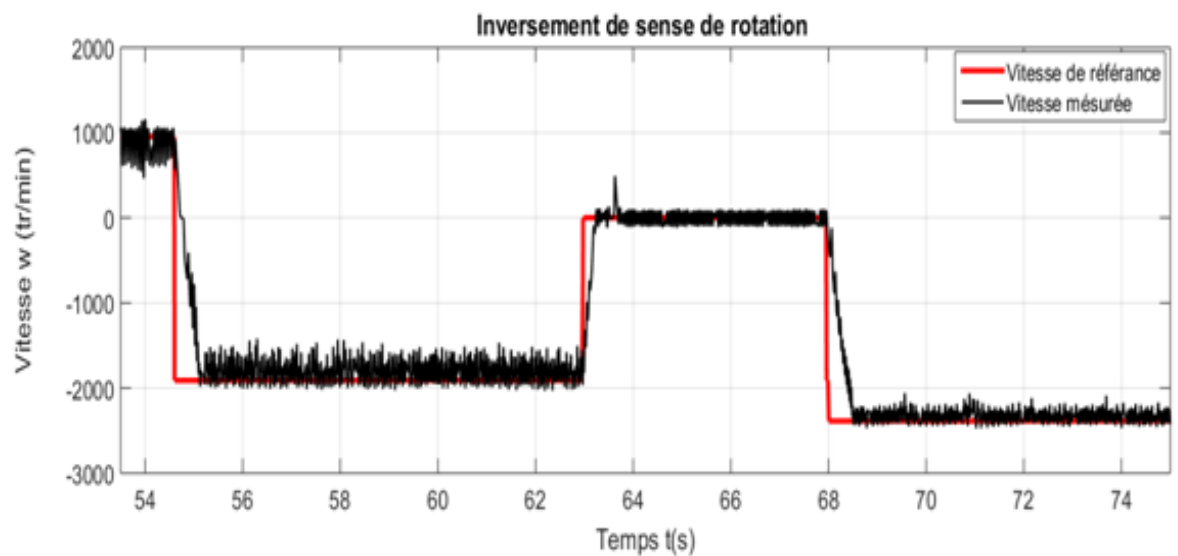


FIGURE IV.33 – Courbe de vitesse pour valeur de référence variable

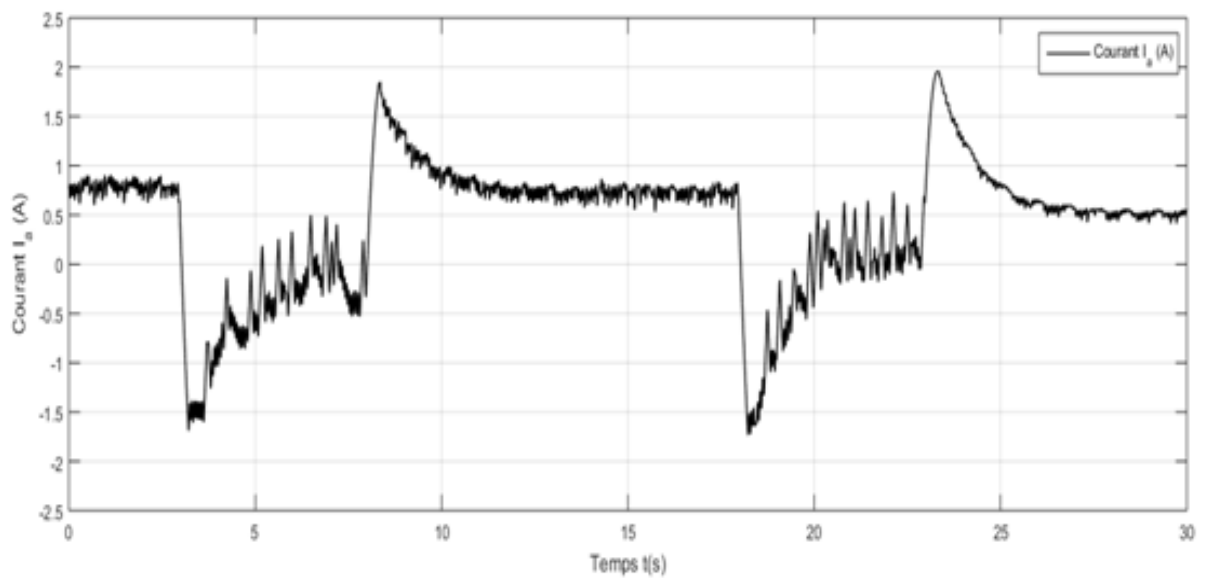


FIGURE IV.34 – Courbe de courant pour valeur de référence variable

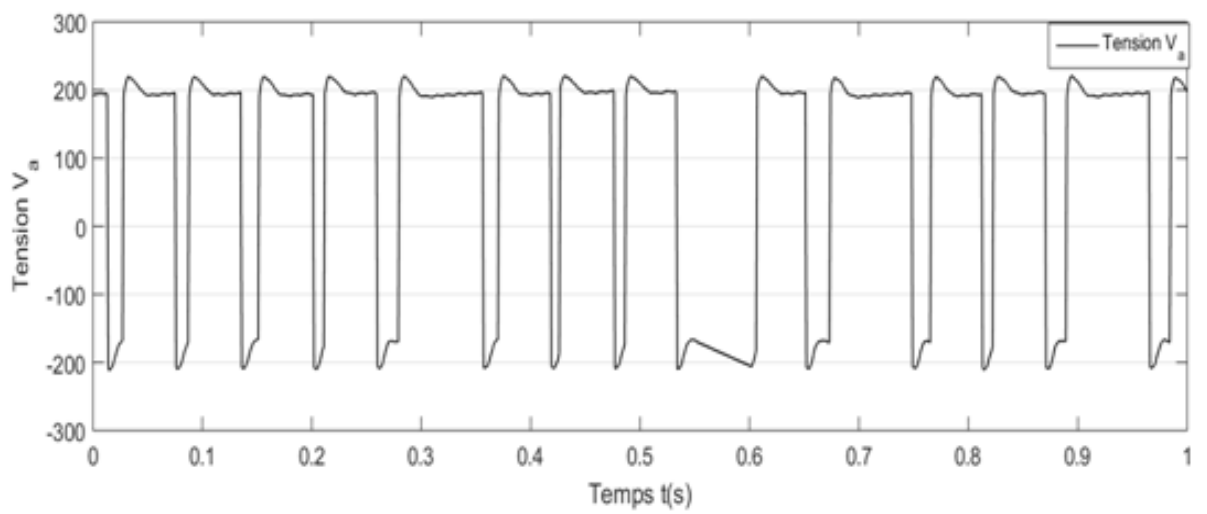


FIGURE IV.35 – Courbe de tension

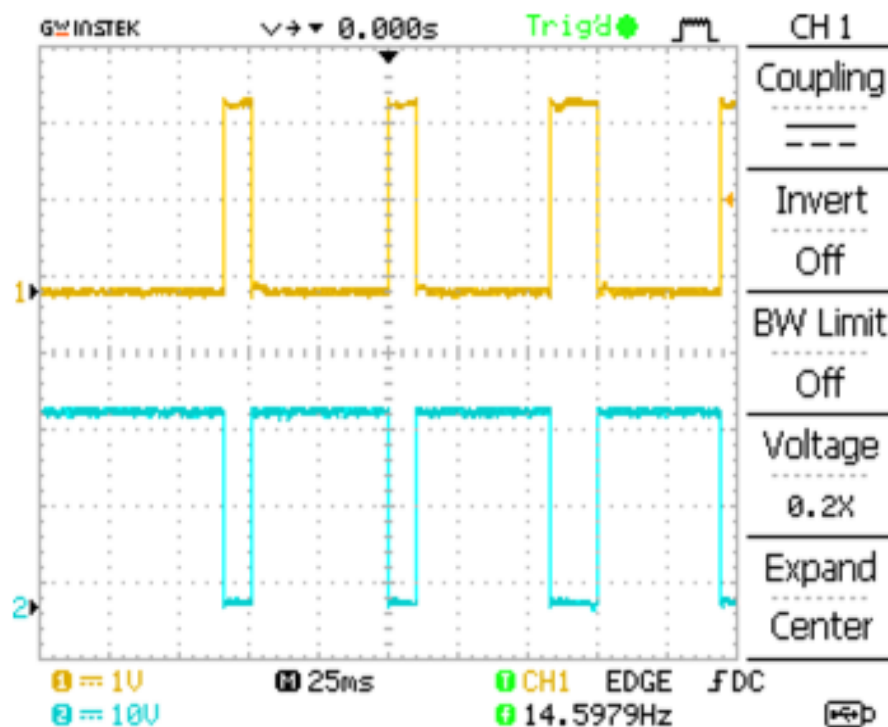


FIGURE IV.36 – Modulation de largeur d’impulsion

### IV.9.3 Interprétation des résultats

#### 1. Pour la valeur de référence fixe

Ce graphe (figure IV.32) représente l’évolution de la vitesse du moteur (en tr/min) en fonction du temps (en secondes), avec une mise en vitesse à consigne fixe (démarrage direct).

Courbe rouge : Vitesse de référence.

Courbe noire : Vitesse mesurée par le capteur.

On applique un échelon de 2000 tr/min dans la vitesse de référence et on remarque que la vitesse mesurée suit correctement la vitesse de référence dans les deux régimes avec un petit bruit de capteur donc le correcteur PI de vitesse fonctionne très bien.

#### 2. Resulte pour valeurs de références variable

##### Courbe de courant

La figure (IV.34) représente la courbe de courant  $i_a$  en fonction du temps.

On remarque que :

Le courant est bien symétrique autour de zéro, ce qui est logique pour des inversions de sens. Les pics de courant montrent que le moteur subit des variations de couple importantes, probablement liées aux changements de consigne.

Ce graphique atteste d’une performance dynamique efficace du système, le courant répondant favorablement avec des inversions de sens contrôlées. Ainsi, la boucle de

régulation du courant fonctionne parfaitement car le pic de courant (1.5 A) est réduit passe pas la valeur nominale de moteur, permettant une commande efficace de la boucle de vitesse.

### Courbe de vitesse

Ce graphe (figure IV.33) montre l'évolution de la vitesse de rotation d'un moteur (en tr/min) en fonction du temps (en secondes), dans le cadre d'un changement de sens de rotation.

Avec :

- Rouge (Vitesse de référence)
- Noir (Vitesse mesurée)

La vitesse de référence passe brutalement de +1000 tr/min à -2000 tr/min. La vitesse mesurée suit la consigne, avec une transition rapide (brusque inversion de sens de rotation). La vitesse mesurée réagit et suit correctement la référence malgré les changements rapides dans cette dernière. Donc le correcteur PI de vitesse fonctionne très bien.

### 3. Remarques techniques :

- Le système réagit bien aux inversions de vitesse, avec une bonne dynamique.
- La vitesse mesurée suit globalement la consigne, mais avec : un léger dépassement lors de certaines transitions.
- Cela indique un système de commande robuste, car le régulateur PI de vitesse fonctionne très bien en offrant une flexibilité dans les réponses du moteur lors des changements de consignes (inversion de sens), grâce à un hacheur quatre quadrants qui est réversible en courant et en tension par le signal « duty cycle » (MLI), ce qui implique que la tension sera négative donne une vitesse négative.

## IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différentes parties du montage réalisé au laboratoire LAT de Tlemcen. Ce montage est conçu autour d'une carte de commande Dspace 1104.

L'objectif de ce chapitre était d'implémenter expérimentalement les correcteurs PI classiques. Nous avons d'abord présenté la carte dSPACE 1104, son architecture et ses performances. Nous avons également détaillé la création d'un projet sous l'interface ControlDesk.

Dans une deuxième partie, nous avons présenté les différents outils de mesure et leur implémentation dans le MATLAB Simulink et ControlDesk.

Enfin, nous avons appliqué le régulateur PI au MCC et nous avons obtenu les résultats expérimentaux.

Les résultats obtenus expérimentalement sont conformes aux objectifs fixés :

- Le courant d'induit suit le courant de référence.
- La vitesse du moteur suit la vitesse de référence.

Ces résultats valident l'utilisation d'une commande MLI.

---

## Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, qu'il est réalisé au niveau du laboratoire de Commande des Machines, Faculté de Technologie, Université de Tlemcen, nous avons étudié et mis en œuvre une loi de commande de type proportionnel-intégral (PI) pour la régulation de la vitesse d'un moteur à courant continu, en utilisant la plateforme de prototypage rapide dSPACE DS1104. L'ensemble du processus, allant de la modélisation du système à l'implémentation temps réel, a permis de valider expérimentalement l'efficacité du correcteur PI dans un contexte de commande numérique.

En premier lieu, nous avons présenté brièvement la construction et la théorie de base de la machine à courant continu, sa modélisation puis, le choix du correcteur PI repose sur sa robustesse et sa simplicité d'implémentation, tout en offrant de bonnes performances pour la majorité des systèmes linéaires de commande. L'identification des paramètres du moteur, le dimensionnement du régulateur, ainsi que l'implémentation via MATLAB/Simulink ont constitué des étapes clés du projet. L'interface offerte par ControlDesk a par ailleurs facilité le suivi en temps réel des performances et l'ajustement des paramètres de régulation. Par la suite, nous avons représenté des résultats de simulation pour les deux correcteurs (courant, vitesse).

Dans un deuxième temps, les résultats expérimentaux ont démontré la capacité du correcteur PI à assurer une régulation efficace, avec un bon compromis entre rapidité, stabilité et précision. L'architecture dSPACE DS1104 s'est révélée être un outil pédagogique et technique puissant, permettant une transition fluide entre la simulation et l'expérimentation, tout en garantissant la fiabilité de l'implémentation temps réel.

Ainsi, ce projet a permis de confirmer l'intérêt des correcteurs PI dans la commande de moteurs électriques, tout en mettant en évidence la pertinence de la plateforme dSPACE pour le développement, le test et la validation de lois de commande. Il ouvre également des perspectives intéressantes vers l'intégration de stratégies de commande plus avancées, adaptées à des systèmes plus complexes ou soumis à des incertitudes importantes.

---

## Bibliographie

- [1] Wildi T, Sybille G. Électrotechnique, 4e édition (2005), Bruxelles, De Boeck université, 2009.
- [2] Bernot F, Machines à courant continu - Construction, Conversion de l'énergie électrique, mai 1999 .
- [3] M. Kostenko et L. Piotrovski, Machines Électriques Tome I Machines à Courant Continu, Transformateurs, Éditions Mir, 1979.
- [4] Stephen J.Chapman, Electric Machinery Fundamentals, Fifth Edition,2005
- [5] G. Sybille et T. Wildi,Électrotechnique, Edition de boeck, 2005.
- [6] Machines-c3a0-courant-continu.pdf.
- [7] A F. Sangare, Etude d'un laboratoire virtuel de simulation des machines à courant continu,2013.
- [8] M L. Hamida et F. Kadi, Identification et contrôle de la machine à courant continu par la Dspace 1103, Mémoire master 2015,Université Tizi-ouzou.
- [9] Hamza B, Sid Ahmed El Mehdi A, Houcine C, Mouloud D. A New Method for the Parametric Identification of DC Machines Using MATLAB Identification Toolbox and Experimental Measurements. Benhala B, Mansouri K, Raihani A, Qbadou M, éditeurs. E3S Web Conf. 2022 ;336 :00007.
- [10] Azzouz M, Akli H, Mohamed S. En Vue de l'Obtention Du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique Option : Machines Electriques.
- [11] Kerboua A. Électrotechnique I : Circuits Électriques et Magnétiques, Transformateurs et Machines à Courant Continu. 2018.
- [12] H. Fekid, Identification des paramètres d'une machine à courant continu, mémoire deingénieur 2007, UMMTO
- [13] A. Ayad, Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série, mémoire master 2014, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.
- [14] Yahia R, Conception et réalisation d'un Hacheur quatre quadrants pour la commande d'un DC moteur,mémoire master 2015 Université Ibn Khaldoun Tiaret.
- [15] H Naoui, Commande en vitesse d'un moteur à courant continu à excitation séparée par hacheur, mémoire master 2022, Université Mohamed Khider Biskra.
- [16] A.seddiki T. boursali, validation de différentes stratégies de commande automatique sur un moteur à courant continu, Université aboubakr belkaïd Tlemcen,2018-2019.

- 
- [17] H Souaidi, Variateur de vitesse d'un hacheur pour un moteur à CC, source d'énergie photovoltaïque, mémoire MASTER 2019, Université Badji Mokhtar Annaba.
- [18] Abdelkader MECHERNENE, Commande électrique, Implémentation d'une commande numérique en temps réel, 2024-2025
- [19] Azad Ghaffari, Polycopie de cours, dSPACE and Real-Time Interface in Simulink, Universty San Diego State, 2012.
- [20] Anjum N, Chowdhury MR, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering, 27 mai 2024.
- [21] Huselstein JJ and Martiré T. Ensemble pédagogique expérimental hacheur onduleur. Journal(J3eA) 2006
- [22] <https://www.kit-elec-shop.com/fr/equipements-pedagogiques/3893-onduleur-triphas-pedagogique-a-igbt-semiteach-08753450be.html>, [cité 26 mai 2025]
- [23] <https://www.distrelec.ch/fr/sonde-100mhz-7kv-gw-instek-gdp-100/p/17626075>, [cité 26 mai 2025]
- [24] <https://www.fluke.com/fr/produit/accessoires/pinces-de-courant/fluke-i30s>, [cité 26 mai 2025]
- [25] <https://www.baumer.com/fr/fr/p/30403>, [cité 27 mai 2025]
- [26] A. Maddi A. Guessoum D Berkani O Belkina, Etude de la méthode des moindres carrés récursive et application au signal de parole, 2005.

## Annexe A : Matériel utilisé pour faire l'identification

### Paramètres de moteur à excitation séparé

TABLE 1 – Paramètres moteur à courant continu

Nom	Valeur	Unite
Tension nominale	220	V
Courant nominal	2.5	A
Tension d'excitation	220	V
Courant d'excitation	0.1	A
Vitesse nominale	3000	tr/min

La figure 37 illustre notre moteur à courant continu utilisée dans notre projet fin étude Master.

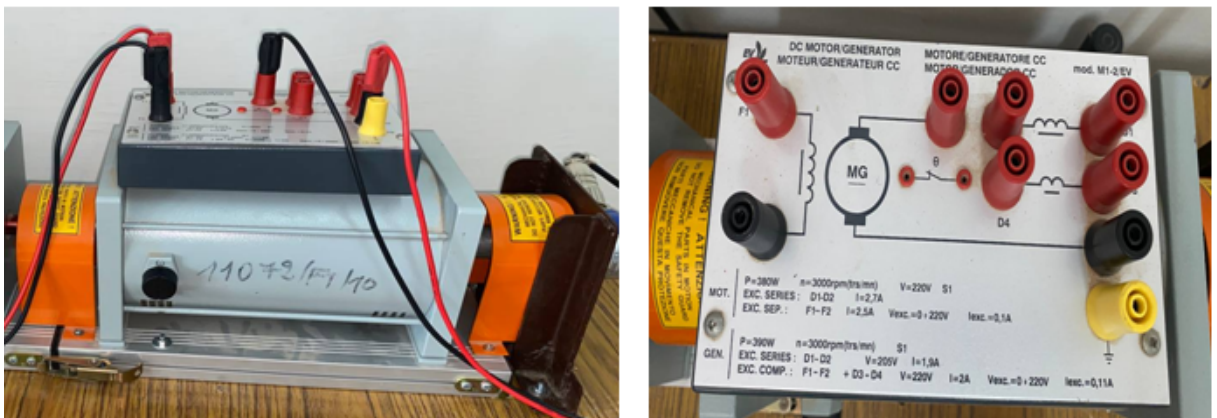


FIGURE 37 – Plaque signalétique de la machine à courant continu.

## Voltemètre et Ampèremètre utilisé pour l'identification

Les figures 38 et 38 illustres les appareillages de mesure utilisée dans notre projet.



FIGURE 38 – Voltemètre pour mesurer la tension



FIGURE 39 – Ampèremètre pour mesurer le courant

## Génératrice tachymètre

La figure 40 illustre la génératrice tachymètre pour mesurer la vitesse.



FIGURE 40 – Plaque signalétique de la génératrice tachymètre

---

## Annexe B : Conditions de la simulation

### Conditions de simulations

Les conditions de configuration des paramètres pour lancer la simulation est suivant :

TABLE 2 – Conditions de simulation

Type	Variable-step
Solver	ode45(Dormand-Prince)
Powergui	Continuous ideal switch
Relative tolerance	0.001

### Valeur des régulateurs PI

Les valeurs des paramètres de régulateur PI de courant dans le tableau 3.

TABLE 3 – Paramètres de régulateurs PI de courant

$K_p$	25.23
$K_i$	2981.98

Les valeurs des paramètres de régulateur PI de vitesse dans le tableau 4.

TABLE 4 – Paramètres de régulateurs PI de vitesse

$K_p$	0.13
$K_i$	1.04

## Bloc DC machine

Les paramètres que nous avons utilisés dans la simulation montre dans la figure (41) suivant :

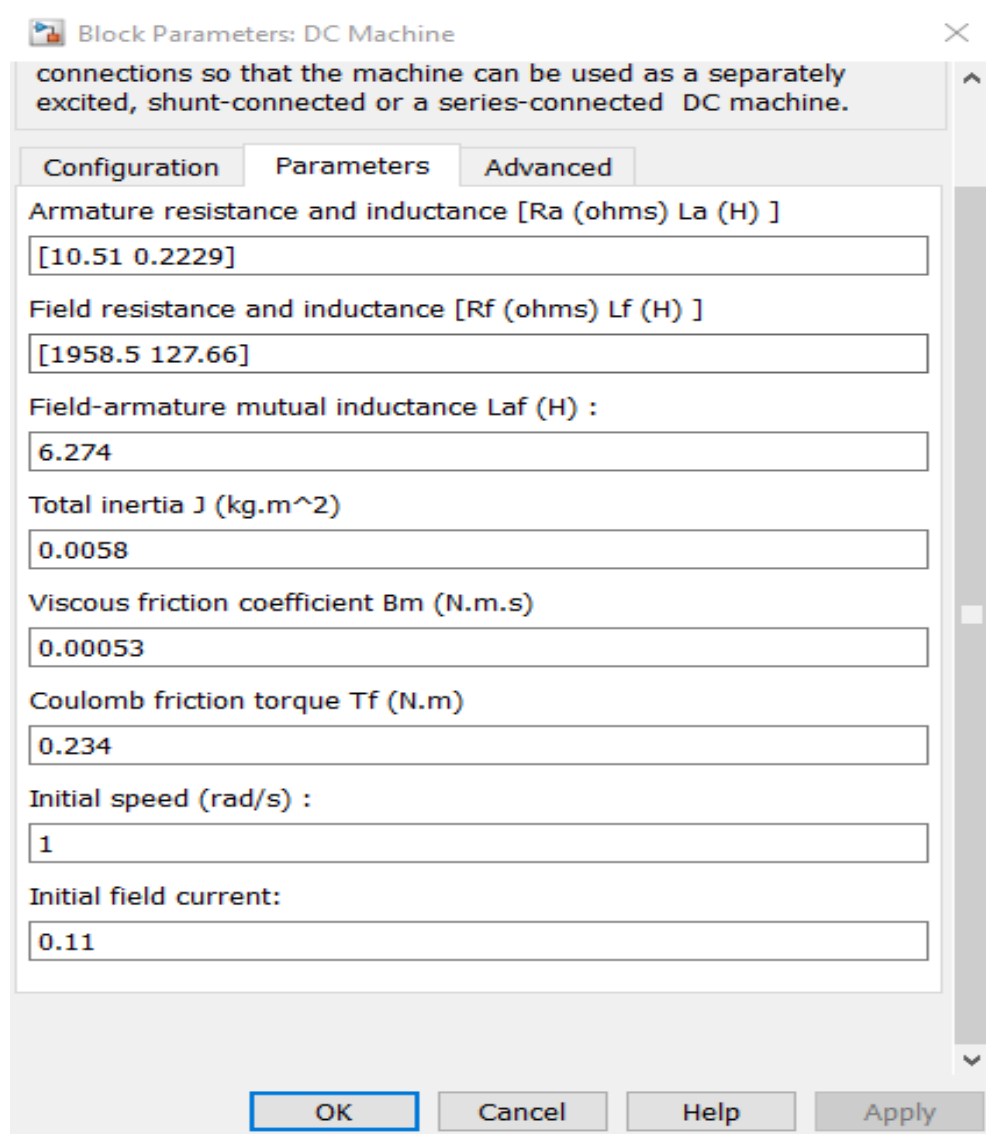


FIGURE 41 – Paramètres bloc DC machine

---

## Annexe C : Matériels utilisés pour l'implantation sur dSPACE DS1104

### Capteur de courant

La figure 42 illustre notre capteur de courant à effet de hall **i30s**.



FIGURE 42 – Capteur de courant *AC/DC* **i30s**

**Caractéristiques techniques :**

- La pince de courant i30s est basée sur la technologie à effet Hall pour la mesure des courants continu (DC) et alternatif (AC).
- La pince de courant peut être utilisée avec des oscilloscopes et d'autres instruments d'enregistrement adaptés pour une mesure de courant précise et non intrusive.
- Plage de courant : 30 mA à 30 A DC, 30 mA à 20 A AC (valeur RMS).
- Plage de fréquence : DC à 100 kHz (-0,5 dB).
- Cote de sécurité : CAT III 300 V

Caractéristiques électriques	
Plage de courant spécifiée	30 mA à 30 A DC, 30 mA à 20 A AC rms



Plage de courant utilisable	5 mA à 30 A DC, 30 mA à 20 A AC rms
Facteur de crête	1,4 In
Sensibilité en sortie	100 mV/A
Précision (à +25 °C)	DC ± 1 % du relevé ± 2 mA AC ± 0,5 dB du relevé ± 2 mA
Résolution	±1 mA
Impédance de charge	> 100 kΩ
Sensibilité de position du conducteur	± 1 % par rapport au relevé du cee
Plage de fréquences	DC jusqu'à 100 kHz (0.5 dB)
Décalage de phase inférieur à 1 kHz	< 2°
Coefficient de température	± 0,01 % du relevé / °C
Alimentation	Pile alcaline 9 V, MN1604/PP3, 30 heures, indicateur de charge insuffisante de la pile
Tension de service (voir section Sécurité)	300 V AC rms ou DC
Caractéristiques générales	
Taille maximum du conducteur	19 mm de diamètre
Connexion de sortie	Connecteur BNC de sécurité, foui avec un adaptateur de sécurité 4 mm
Zéro de sortie	Réglage manuel avec molette
Longueur du câble	2 m
Plage de température de fonctionnement	0 °C à +50 °C
Plage de température de stockage (sans piles)	-20 °C à +85 °C
Humidité en fonctionnement	15 % à 85 % (sans condensation)
Poids	250 g
Sécurité	CEI 61010-1, degré de pollution 2
	CEI 61010-2-032 : CAT III 300 V
	L'utilisation de la sonde sur des conducteurs nus est limitée à 300 V AC rms ou DC et à des fréquences inférieures à 1 kHz.
Compatibilité EMC	CEI 61326-1 : environnement électromagnétique portable

FIGURE 43 – Fiche technique de Capteur de courant AC/DC i30s [24]

## Capteur de tension

La figure 44 illustre notre capteur de tension (LEM).



FIGURE 44 – Capteur de tension GDP-100

SPECIFICATIONS			
	GDP-025	GDP-050	GDP-100
Probe Bandwidth	DC ~ 25MHz(attenuationx50 ,x200); DC ~ 15MHz(attenuationx20)	DC ~ 50MHz(attenuationx200 ,x500 ,x1000); DC ~ 25MHz(attenuationx100)	DC ~ 100MHz(attenuationx200 ,x500 ,x1000); DC ~ 50MHz(attenuationx100)
Attenuation	x20 ,x50 ,x200	x100 ,x200 ,x500 ,x1000	x100 ,x200 ,x500 ,x1000
Accuracy	±2%	±2%	±2%
Voltage Input Range (DC+AC peak to peak)	≤140Vp-p for x 20 , ≤350Vp-p for x 50 , ≤1400Vp-p for x 200	≤700Vp-p for x 100 ≤1400Vp-p for x 200 ≤3500Vp-p for x 500 ≤7000Vp-p for x 1000	≤700Vp-p for x 100 ≤1400Vp-p for x 200 ≤3500Vp-p for x 500 ≤7000Vp-p for x 1000
Permitted Max Input Voltage	Maximum differential voltage: Max voltage between input terminal and ground: 600Vrms	Maximum differential voltage: Max voltage between input terminal and ground: 6500Vrms	Maximum differential voltage: Max voltage between input terminal and ground: 6500Vrms
Input Impedance	Differential:4MΩ/1.2pF ; Between terminals and ground: 2MΩ/2.3pF	Differential:54MΩ/1.2pF ; Between terminals and ground:27MΩ/2.3pF	Differential: 54MΩ/1.2pF ; Between terminals and ground:27MΩ/2.3pF
Output	≤ ±7.0V	≤ ±7.0V	≤ ±7.0V
Output impedance	50 Ω	50 Ω	50 Ω
Rise Time	14ns(x50 ,x200 attenuation) ; 23.4ns(x20 attenuation)	7ns(x2000 ,x500,x1000 attenuation) ; 14ns(x100 attenuation)	3.5ns(x2000 ,x500,x1000 attenuation) ; 7ns(x100 attenuation)
Rejection Rate on Common Mode (CMRR)	60Hz>80dB , 100Hz>60dB, 1MHz>50dB	60Hz>80dB , 100Hz>60dB, 1MHz>50dB	60Hz>80dB , 100Hz>60dB, 1MHz>50dB
Power Supply	External 9VDC power supply	External 9VDC power supply	External 9VDC power supply
Consumption	Maximum 35mA(0.4Watt)	Maximum 35mA(0.4Watt)	Maximum 35mA(0.4Watt)

ORDERING INFORMATION	
GDP-025	25MHz High Voltage Differential Probe
GDP-050	50MHz High Voltage Differential Probe
GDP-100	100MHz High Voltage Differential Probe

FIGURE 45 – Fiche technique de capteur de tension *GDP* – 100 [23]

## Encodeur de vitesse

La figure 46 illustre notre capteur de vitesse (encodeur incrémental).

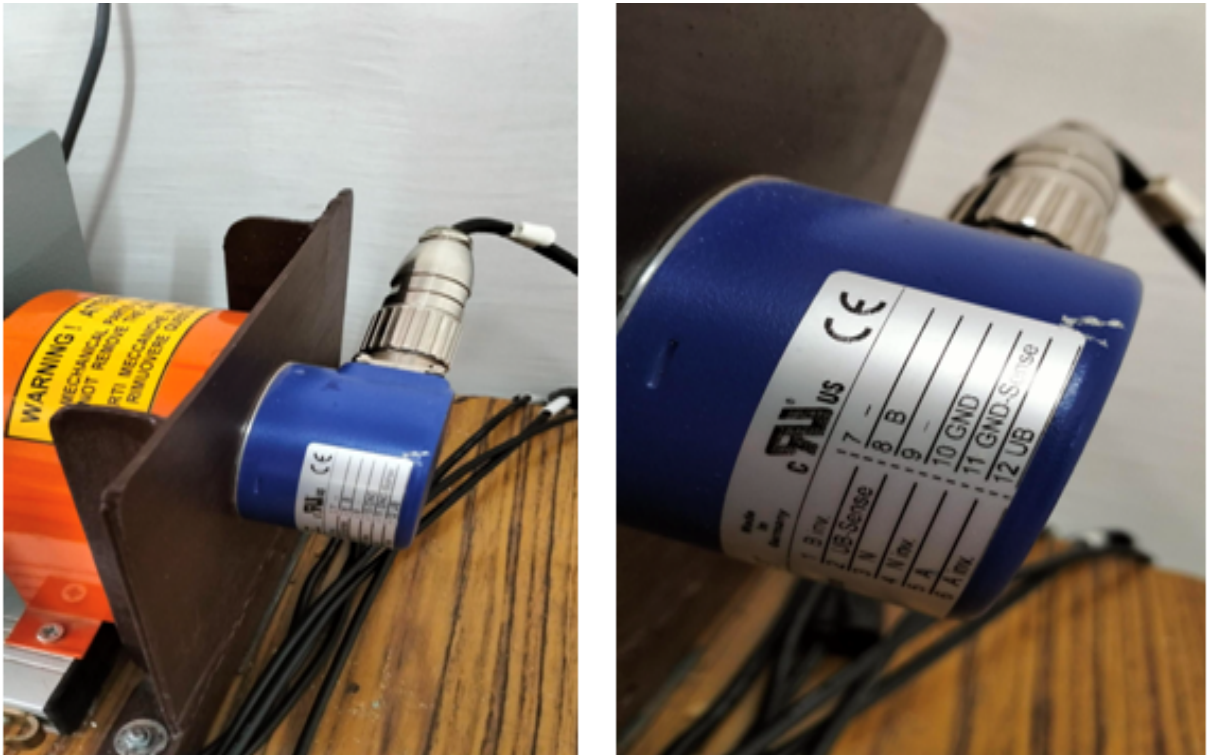


FIGURE 46 – Encodeur de vitesse Baumer-GI355

## GI355, GI356



GI355 avec bride standard

## Caractéristiques électriques

Alimentation	5 VDC $\pm$ 10 % 4,75...30 VDC 10...30 VDC
Protection contre l'inversion de polarité	Oui (4,75...30 VDC)
Courant de service à vide	$\leq$ 30 mA (24 VDC) $\leq$ 60 mA (5 VDC)
Impulsions par tour	5...5000
Signal de référence	Top zéro, largeur 90°
Principe de détection	Optique
Fréquence de sortie	$\leq$ 150 kHz
Signaux de sortie	A, 90° B, 0 + compléments
Etage de sortie	Emetteur de ligne/RS422 Push-pull, NPN et PNP
Immunité	DIN EN 61000-6-2
Emission	DIN EN 61000-6-4
Certificat	Certification UL/E63076

## Points forts

- Codeur axe sortant  $\varnothing$ 10 mm ou  $\varnothing$ 8 mm
- Max. 6000 impulsions par tour
- Détection optique
- Bride standard ou synchro
- Au standard Industriel
- Vitesse de rotation jusqu'à 10000 t/min

## Option

- Codeur GE355 en version INOX
- Codeur avec certification ATEX, voir modèle X 700
- Protection contre corrosion pour application offshore

## Caractéristiques mécaniques

Taille (bride)	$\varnothing$ 58 mm
Charge	$\leq$ 20 N axiale $\leq$ 40 N radiale
Protection DIN EN 60529	IP 54 (sans joint), IP 65 (avec joint)
Vitesse de rotation	$\leq$ 10000 t/min
Couple de démarrage	$\leq$ 0,015 Nm (+25 °C, IP 54) $\leq$ 0,03 Nm (+25 °C, IP 65)
Moment d'inertie rotor	14,5 gcm <sup>2</sup>
Matériaux	Boîtier: aluminium Bride: aluminium
Température d'utilisation	-25...+100 °C (5 VDC) -25...+85 °C (24 VDC) -40...+85 °C (Option)
Humidité relative	95 % sans condensation
Résistance	DIN EN 60068-2-6 Vibrations 10 g, 16-2000 Hz DIN EN 60068-2-27 Choc 200 g, 6 ms
Raccordement	Embase mâle M23, 12 points Câble 1 m
Poids	250 g
<b>GI355</b>	
Type d'axe	$\varnothing$ 10 mm axe
Bride	Bride standard
<b>GI356</b>	
Type d'axe	$\varnothing$ 6 mm axe
Bride	Bride synchro

FIGURE 47 – Fiche technique d'encodeur de vitesse Baumer-GI355 [25]

## Différents parties de onduleur de tension

La figure 48 illustre notre onduleur de tension à deux niveaux.

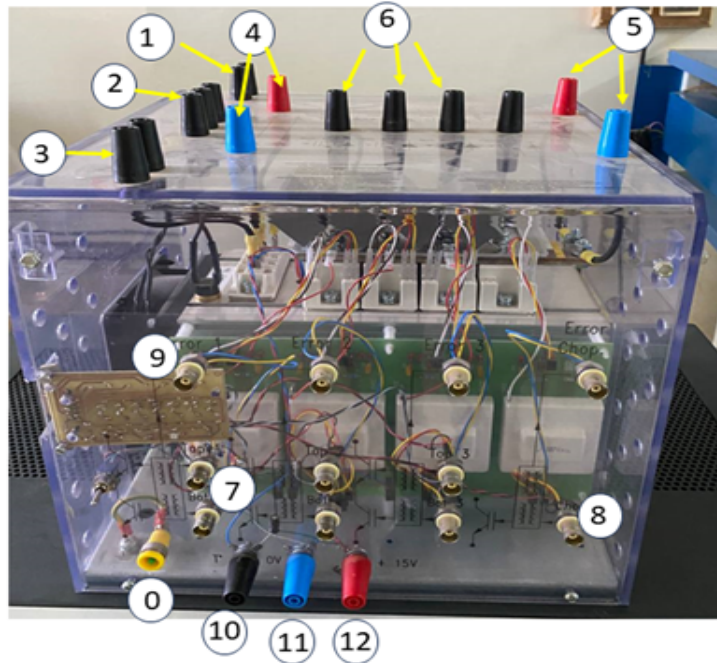


FIGURE 48 – Onduleur de tension

- 0. Prise de terre.
- 1. Alimentation de ventilateur 230V/50Hz
- 2. Disjoncteur thermique 15V.
- 3. Entrée de redresseur PD3.
- 4. Sorties de redresseur de C.C 600V
- 5. Entrée de l'onduleur à IGBT de C.C 600V
- 6. Sorties de l'onduleur à IGBT et sorties de résistance de frein 400VAC/600VCC.
- 7. Entrée de PWM de l'onduleur , logique C-MOS(0V=IGBT ouvert, 15V=IGBT fermé).
- 8. Entrée de PWM de résistance de frein, logique C-MOS(0V=IGBT ouvert, 15V=IGBT fermé).
- 9. Sortie d'erreur.
- 10. Alimentation de Drive 15V.
- 11. Alimentation de Drive 0V.
- 12. Sonde de température

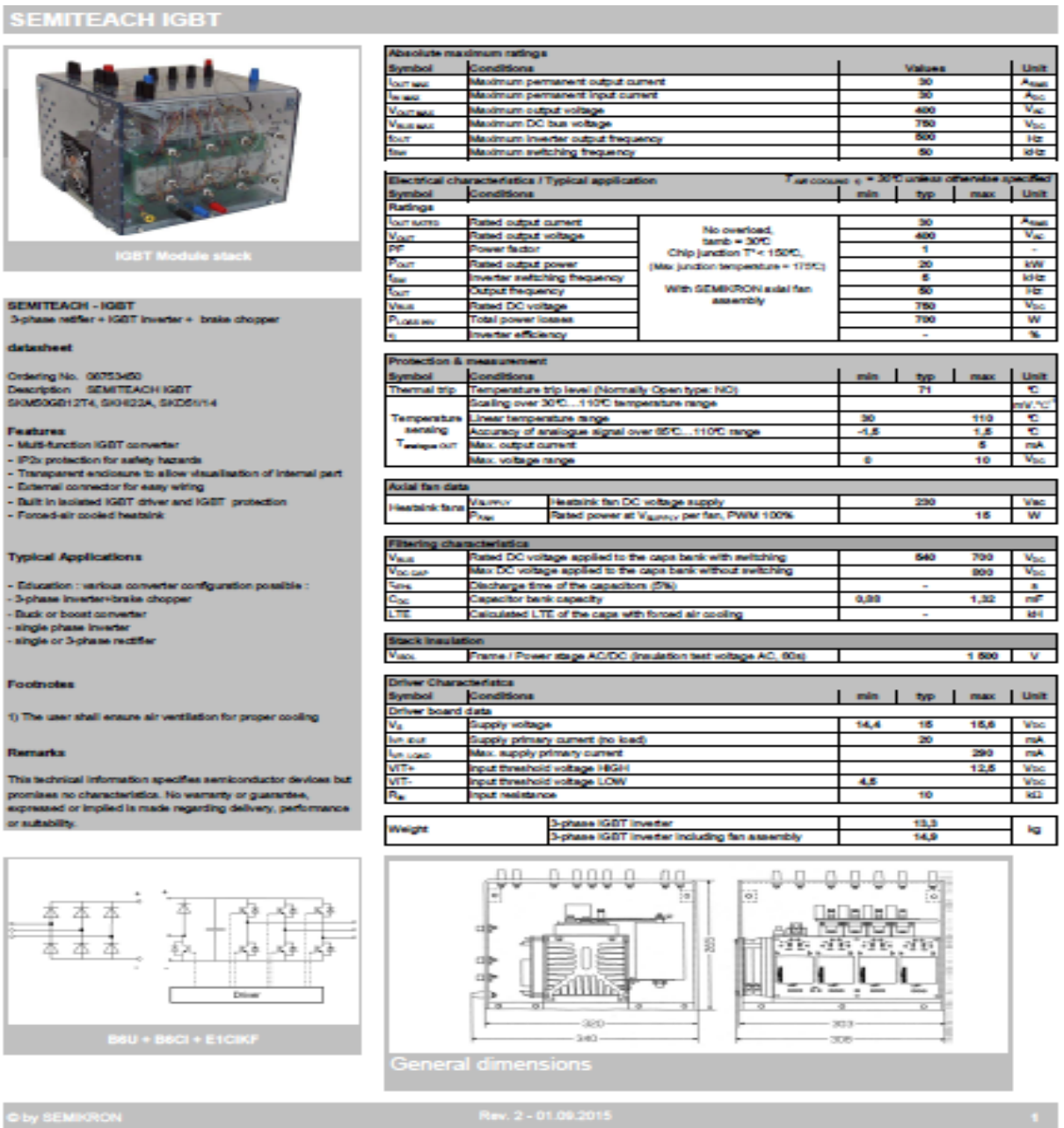


FIGURE 49 – Fiche technique d'onduleur de tension SEMIKRON [22]

## Valeurs des régulateurs PI

Les valeurs des paramètres de régulateur PI de courant dans le tableau 5, que nous avons utilisé dans la commande dSPACE DS1104.

TABLE 5 – Paramètres de régulateurs PI de courant dSPACE

$K_p$	12
$K_i$	1

Les valeurs des paramètres de régulateur PI de vitesse dans le tableau 6, que nous avons utilisé dans la commande dSPACE DS1104.

TABLE 6 – Paramètres de régulateurs PI de vitesse dSPACE

$K_p$	14450
$K_i$	2

# Résumé

Ce projet de fin d'études a pour objectif l'identification des paramètres d'un moteur à courant continu à l'aide de deux méthodes, le premier à base des essais classique et le deuxième robuste à base de moindre carré. Les résultats obtenus seront étudiés et comparés avec un démarrage direct d'un moteur à courant continu relevé à base de DS1104. Par la suite, la modélisation du moteur, de son hacheur et de sa commande à modulation de largeur d'impulsion ont été étudiées, puis la régulation en vitesse et en courant du moteur a été exposée à base régulateur de type PI. Enfin, Les lois de commande ont été validées d'abord en simulation utilisant du logiciel Matlab/Simulink, puis en temps réel sur banc d'essai expérimental, en utilisant la carte dSPACE 1104. Enfin, une conclusion résume les principaux résultats obtenus et des perspectives pour de futurs travaux sont proposées.

**Mots clés :** Moteur à courant continu, identification des paramètres, régulateur PI, convertisseur DC-DC, carte dSPACE DS1104

# Abstract

This final year project aims to identify the parameters of a DC motor using two methods: the first based on classical tests and the second, a robust least squares approach. The obtained results will be analyzed and compared with a direct start-up of a DC motor recorded using the DS1104. Subsequently, the modeling of the motor, its DC-DC converter, and its pulse-width modulation (PWM) control were studied, followed by the speed and current regulation of the motor using a PI controller. Finally, the control laws were validated first through simulation using Matlab/Simulink software, then in real-time on an experimental test bench using the dSPACE DS1104 card. In conclusion, the main results are summarized, and future research directions are proposed.

**Keywords:** DC motor, parameter identification, PI controller, DC-DC converter, dSPACE DS1104 card.

# ملخص

يهدف هذا المشروع إلى تحديد معاملات محرك التيار المستمر باستخدام طريقتين: الأولى تعتمد على الاختبارات الكلاسيكية، والثانية طريقة قوية تعتمد على المربعات الصغرى. سيتم دراسة النتائج المتحصل عليها ومقارنتها مع تشغيل مباشر لمحرك تيار مستمر مسجل باستخدام لوحة **DS1104** بعد ذلك، تمت دراسة نمذجة المحرك، ومحول التيار المستمر (DC-DC)، ونظام التحكم بتعديل عرض النبض (PWM)، ثم ضبط سرعة المحرك وتياره باستخدام منظم من النوع **PI** أخيراً، تم التحقق من قوانين التحكم أولاً عبر المحاكاة باستخدام برنامج **MATLAB/Simulink**، ثم في الزمن الحقيقي على منصة اختبار تجريبية باستخدام لوحة **dSPACE DS1104** وفي الختام، تم تلخيص النتائج الرئيسية واقتراح آفاق مستقبلية لأعمال قادمة.

**الكلمات المفتاحية:** محرك تيار مستمر، تحديد المعاملات، منظم PI، محول DC-DC، لوحة dSPACE DS1104