

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE**  
**LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N° : .....



FILIERE : ELECTROMECHANIQUE

OPTION : ELECTROMECHANIQUE

**Mémoire présenté pour l'obtention**

**Du diplôme de Master Académique**

**Par : SAGHIRI Mohamed**

HAFANI Thameur

**Intitulé**

**Réalisation d'un asservissement de vitesse d'un  
moteur à courant continu à l'aide d'un automate  
programmable industriel**

**Soutenu devant le jury composé de :**

BOUZIDI Riad	Université	Mohamed Boudiaf M'sila	Président
ZOUGGAR El Oualid	Université	Mohamed Boudiaf M'sila	Rapporteur
BENDAIKHA Abdmalik	Université	Mohamed Boudiaf M'sila	Co-rapporteur
GHELLAB Mohamed Zinelaabidine	Université	Mohamed Boudiaf M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2022/2023**

# *Remerciement*

*Je remercie, en premier lieu, ALLAH qui m'a donné ce bien là pour que je vive ce jour, ALLAH qui m'a donné la force et la patience pour terminer ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et ma gratitude à mon encadreur, le Dr. ZOUGAR El Oualid qui a proposé et dirigé ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail.*

*Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département génie électriques pour les facilités qu'ils m'ont accordé pour parfaire ce travail.*

*Ce travail de mémoire que j'ai effectué doit beaucoup à certaines personnes que je tiens à remercier sincèrement.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce projet :*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir  
et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes frères,*

*Pour ses soutiens moraux et leurs conseils précieux tout au long de mes études.*

*A mes chères ami(e)s,*

*Pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.*

*A toute ma famille,*

*A tous mes autres ami(e)s,*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.*

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>I. CHAPITRE I : Généralités sur la machine à courant continu .....</b>	<b>3</b>
<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Description de la machine à courant continu .....</b>	<b>4</b>
<b>I.3. Modes d'excitation .....</b>	<b>5</b>
I.3.1. Moteur à excitation série .....	5
I.3.2. Moteur à excitation shunt .....	5
I.3.3. Moteur à excitation composée .....	6
I.3.4. Moteur à excitation indépendante (séparée) .....	6
<b>I.4. Modélisations mathématiques d'une MCC .....</b>	<b>7</b>
<b>I.5. La commande PID en régulation de vitesse et de position.....</b>	<b>13</b>
I.5.1. Asservissement proportionnel (P) .....	15
I.5.2. Asservissement proportionnel intégral (PI) .....	17
I.5.3. Asservissement proportionnel intégral dérivé (PID).....	18
<b>I.6. Conclusion : .....</b>	<b>19</b>
<b>II. CHAPITRE II : Les convertisseurs statiques et API .....</b>	<b>20</b>
<b>II.1. Introduction :.....</b>	<b>21</b>
<b>II.2. Les convertisseurs statiques :.....</b>	<b>21</b>
<b>II.3. Classification des convertisseurs statiques : .....</b>	<b>21</b>
II.3.1. Les redresseurs : .....	21

## SOMMAIRE

II.3.2.	Les hacheurs :.....	21
II.3.3.	Les onduleurs : .....	21
II.3.4.	Les gradateurs :.....	22
II.3.5.	Les cyclo-convertisseurs :.....	22
<b>II.4.</b>	<b>Quelques applications des convertisseurs statiques : .....</b>	<b>22</b>
<b>II.5.</b>	<b>Les semi-conducteurs employés dans les convertisseurs statiques : .....</b>	<b>23</b>
II.5.1.	Les diodes :.....	23
II.5.2.	Les thyristors : .....	24
II.5.3.	GTO (Gate Turn Off Thyristor): .....	25
II.5.4.	Les transistors de puissance : .....	25
II.5.5.	Le transistor MOSFET :.....	26
II.5.6.	Le transistor IGBT :.....	27
<b>II.6.</b>	<b>Les redresseurs :.....</b>	<b>28</b>
II.6.1.	Les redresseurs commandés :.....	28
II.6.2.	Les redresseurs non commandés : .....	29
<b>II.7.</b>	<b>Les automates programmables industriels (API) : .....</b>	<b>30</b>
II.7.1.	Définition API : .....	30
II.7.2.	Les avantages et les inconvénients d'un API :.....	31
<b>II.8.</b>	<b>Langage de programmation pour API : .....</b>	<b>32</b>
II.8.1.	Le Ladder Diagram :.....	32
II.8.2.	Langage de programmation FBD : .....	33
II.8.3.	Langage littéral structuré ST (Structured Text) : .....	33

II.8.4.	Langage IL (Instruction List) : .....	33
II.8.5.	Langage SFC (Séquentiel Fonction Charte), ou GRAFCET .....	34
<b>II.9.</b>	<b>Conclusion : .....</b>	<b>35</b>
<b>III.</b>	<b>Chapitre III : Développement d'une solution programmable et la régulation PID .....</b>	<b>36</b>
<b>III.1.</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.</b>	<b>Definition Hardware-in-the-Loop: .....</b>	<b>37</b>
III.2.1.	Modélisation : .....	37
III.2.2.	Simulation : .....	37
III.2.3.	Intégration matérielle : .....	37
III.2.4.	Exécution en temps réel : .....	38
III.2.5.	Test et validation : .....	38
<b>III.3.</b>	<b>Pourquoi utiliser la simulation Hardware In the Loop ? .....</b>	<b>38</b>
<b>III.4.</b>	<b>Encodeur : .....</b>	<b>39</b>
III.4.1.	Qu'est-Ce Qu'un Encodeur Rotatif Incrémental ? .....	39
III.4.2.	Caractéristiques Électriques Du Codeur Incrémental .....	40
<b>III.5.</b>	<b>Définition logiciel Micro/Win .....</b>	<b>40</b>
<b>III.6.</b>	<b>Présentation de l'automate .....</b>	<b>41</b>
<b>III.7.</b>	<b>Réalisation pratique et résultats expérimentaux .....</b>	<b>42</b>
III.7.1.	Mesure de vitesse de rotation : .....	43
III.7.2.	Création du régulateur PID : .....	45
<b>III.8.</b>	<b>Conclusion .....</b>	<b>48</b>

**CONCLUSION GÉNÉRALE .....50**

**BIBLIOGRAPHIE .....51**

## LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Différentes parties de la machine à courant continu	4
Figure I.2: Machine à excitation série	5
Figure I.3: Machine shunt (excitation en dérivation).	5
Figure I.4: Machine compound (excitation composée)	6
Figure I.5: Machine à excitation indépendante	6
Figure I.6: Schéma électrique d'une machine à excitation séparée.	7
Figure I.7: Schéma bloc du Modèle de moteur électrique en vitesse	10
Figure I.8: Schéma bloc du moteur MCC en vitesse en MATLAB/SIMULINK	10
Figure I.9: Courbe de la vitesse de rotation.	11
Figure I.10: Schéma bloc du Modèle d'un MCC en position	11
Figure I.11: Schéma bloc du moteur MCC en position en MATLAB/SIMULINK.	12
Figure I.12: Courbe de la réponse de position.	12
Figure I.13: Schéma bloc du correcteur PID en régulation de vitesse.	13
Figure I.14: Schéma bloc du moteur MCC en vitesse en MATLAB/SIMULINK (boucle fermée)	14
Figure I.15: Schéma bloc du correcteur PID en régulation de position.	14
Figure I.16: Schéma bloc du moteur MCC en position en MATLAB/SIMULINK (boucle fermée)	15
Figure I.17: Régulation de la vitesse avec du correcteur P d'un MCC.	16
Figure I.18: Régulation de position avec du correcteur P d'un MCC.	16
Figure I.19: Régulation de la vitesse avec du correcteur PI d'un MCC.	17
Figure I.20: Régulation de position avec du correcteur PI d'un MCC.	18
Figure II.1: Les différents types de convertisseurs statiques	22
Figure II.2: Représentation symbolique d'une diode	23
Figure II.3: Caractéristique idéal d'une diode.	24
Figure II.4: Symboles d'un thyristor.	25
Figure II.5: Le symbole représentatif du GTO.	25
Figure II.6: Le transistor et son symbole.	26
Figure II.7: représentation symbolique et caractéristique d'un MOSFET.	27
Figure II.8: Représentation symbolique et caractéristique d'un IGBT.	27
Figure II.9: Redresseur simple alternance totalement commandé.	28
Figure II.10: Redresseur monophasé double alternance totalement commandée.	29
Figure II.11: redresseur monophasé simple-alternance non-commandé (1 diode).	29
Figure II.12: redresseur avec pont de Graëtz.	30
Figure II.13: Exemple de langage Ladder Diagram.	32
Figure II.14: Présentation du langage FBD.	33
Figure II.15: Représentation graphique du principe de fonctionnement générale d'un Grafset.	35
Figure III.1: Codeur rotatif	39
Figure III.2: S7-200 CPU 224 CN	41
Figure III.3: Exemple de numérotation d'E/S de la CPU 224.	42
Figure III.4: programme de mesure de la vitesse de rotation du MCC.	44

## LISTE DES FIGURES

<i>Figure III.5: bloc de régulateur PID</i>	45
<i>Figure III.6 : Comptage des nombres de tours, la mise à zéro de la sortie PWM et le bloc de la sortie PWM</i>	46
<i>Figure III.7 : Panneau de commande de mise au point PID.</i>	46
<i>Figure III.8 : évolution de la vitesse</i>	47
<i>Figure III.9: Vue principale de HMI</i>	47

## LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau I-1: Paramètres d'un moteur à courant continu</i> .....	9
<i>Tableau III-1: Entrées pour les compteurs rapides.</i> .....	43

## LISTE DES SYMBOLES

$I_a$  : Courant d'induit

$I_f$  : Courant d'excitation

$V_a$  : Tension d'alimentation du circuit induit

$V_f$  : Tension d'alimentation du circuit inducteur

$E$  : Force électromotrice (F.C.E.M)

$R_a$  : Résistance de l'induit

$R_f$  : Résistance de l'inducteur

$L_a$  : Inductance propre de l'induit

$L_f$  : Inductance propre de l'inducteur

$f$  : le frottement proportionnel à la vitesse de rotation

$J$  : Moment d'inertie du rotor

$\omega_r$  : Vitesse angulaire de l'induit

$\Phi$  : Flux de l'induit

$C_e$  : Couple électromagnétique de la machine

$C_r$  : Couple résistant

$K_e$  : La constante de la F.C.E.M

$P$  : la puissance électromagnétique

$M$  : Inductance mutuelle entre induit et inducteur

$D$  : Diode

$K_i$  : Coefficient du correcteur intégral

$K_p$  : Coefficient du correcteur proportionnel

## LISTE DES SYMBOLES

$G_N$  : Fonction de transfert électrique

$G_{wl}$  : Fonction de transfert mécanique

$G_{IV}$  : Fonction de transfert tension vitesse

MCC : Machine à Courant Continu

I.G.B.T: Insulated-Gate Bipolar Transistor

API : Automate Programmable Industriel

DC-DC : Convertisseur continu/continu

AC-AC : Convertisseur alternatif /alternatif.

DC-AC : Convertisseur continu/alternatif.

AC-DC : Convertisseur alternatif /continu.

**INTRODUCTION GÉNÉRALE**

## Introduction générale

Au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, les machines à courant continu ont été les premières machines électriques utilisées par les ingénieurs pour générer de la force électromotrice. Ces machines ont jouées un rôle prépondérant, notamment grâce à la possibilité de régler facilement la tension d'alimentation de l'induit, ce qui permettait un fonctionnement à vitesse variable. De nos jours, l'automatique est considérée comme une branche essentielle des sciences de l'ingénieur. Elle englobe la modélisation, l'analyse, la commande et la régulation des systèmes. La machine à courant continu trouve sa place dans de nombreuses applications des systèmes automatisés en raison de sa simplicité de fonctionnement, de son alimentation et de sa commande.

Dans l'industrie moderne, la régulation occupe une place cruciale. Elle permet d'éliminer le besoin d'une surveillance constante par des travailleurs pour des opérations routinières, en assurant un contrôle précis qui dépasse les capacités d'un opérateur humain.

Un convertisseur statique est utilisé pour relier un moteur à courant continu à une source du même type, ce qui permet la variation de la tension moyenne aux bornes de l'induit. Jusqu'à récemment, la commande des convertisseurs statiques industriels utilisait des circuits analogiques à faible ou moyen degré d'intégration. Mais avec le développement de l'électronique et de l'informatique, l'utilisateur dispose désormais de dispositifs très intégrés.

Dans ce contexte, le thème de ce projet de fin d'étude concerne principalement l'exploitation des PWM pour contrôler en temps réel la vitesse et la position d'un moteur à courant continu, en utilisant l'automate programmable industriel (API) pour générer les ondes Pulse Width Modulation (PWM).

Les différents travaux concernant l'implantation de notre commande sur un API font l'objet de trois chapitres.

Le premier chapitre se concentrera sur les généralités de la machine à courant continu, en présentant ses différents composants, son fonctionnement et ses propriétés et les différents types d'excitation, et nous parlerons de la modélisation mathématique d'un moteur à courant continu à excitation séparée et on va faire une simulation sur Matlab de la commande PID en régulation de vitesse et de position.

## **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Le deuxième chapitre traitera les convertisseurs statiques et les semiconducteurs, ainsi que de leur structures. Ensuite, nous allons examiner les montages les plus célèbres des redresseurs commandés et non commandés. Enfin, des généralités sur l'automate programmable industriel sera présentée.

Dans le troisième chapitre, nous parlerons sur la définition Hardware-in-the-Loop et son utilisation, puis, nous présenterons l'encodeur rotatif et ses caractéristiques. Finalement, la simulation en temps réel sera présentée sur le logiciel Micro/Win CPU s7-224. On présente ensuite les résultats de l'implémentation de la commande sur API pour une régulateur PID. Enfin, nous présenterons les résultats de simulation en utilisant la régulation PID.

Enfin, on va terminer notre mémoire par une conclusion générale.

**I. CHAPITRE I : Généralités sur la machine à courant continu**

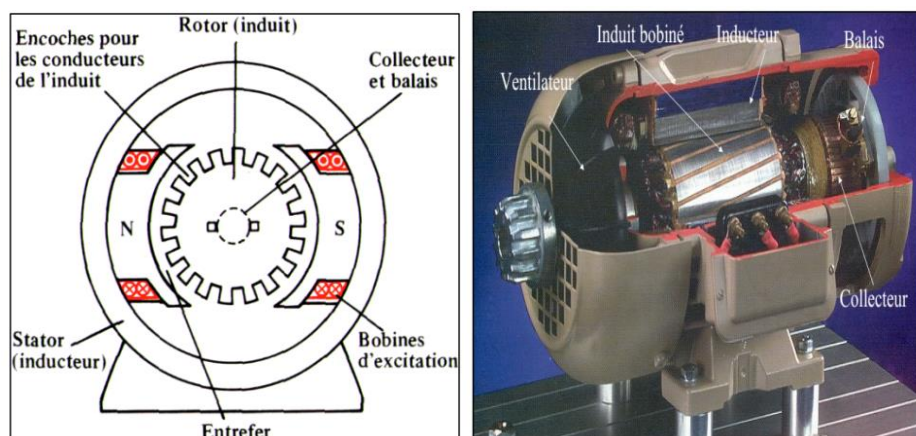
## I.1. Introduction

Ce chapitre se concentre sur la description des principes de fonctionnement de la machine à courant continu (C.C). Nous allons également présenter la modélisation de la machine à C.C à excitation séparée, qui est le sujet de notre étude. Enfin, nous analyserons les performances de la machine en termes de stabilité et de réponse dynamique en boucle ouverte et en boucle fermée à la fin de ce chapitre.

## I.2. Description de la machine à courant continu

La machine à courant continu est un dispositif électrique qui peut transformer l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Cette conversion d'énergie est possible grâce à l'utilisation d'un courant continu fourni par une source électrique. Le moteur à courant continu se compose de trois parties principales :

- ✓ Le stator, est la partie fixe responsable de la création du champ magnétique, l'inducteur, qui peut être constitué d'aimants permanents ou d'une bobine alimentée par un courant continu
- ✓ Le rotor, est la partie mobile de la machine et qui est constitué de conducteurs. Lorsque le rotor tourne, il génère une tension induite  $E$  aux bornes de l'ensemble des conducteurs.
- ✓ Le collecteur et les balais sont également des composants clés du moteur. Le collecteur est constitué d'un ensemble de lames de cuivre isolées latéralement les unes par rapport aux autres et disposées suivant un cylindre en bout de rotor. Les deux balais portés par le stator frottent sur les lames des collecteurs [1].



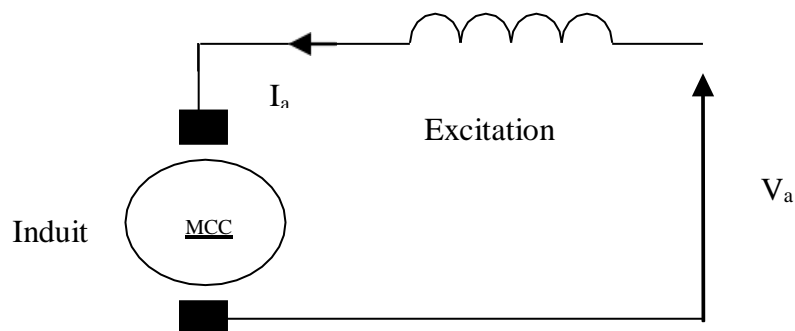
*Figure I.1: Différentes parties de la machine à courant continu*

### I.3. Modes d'excitation

On distingue quatre types de machines à courant continu :

#### I.3.1. Moteur à excitation série

Le moteur à excitation série est constitué de deux enroulement induit et inducteur montés en série parcourus par le même courant  $I_a$  et sous tension  $V_a$ .



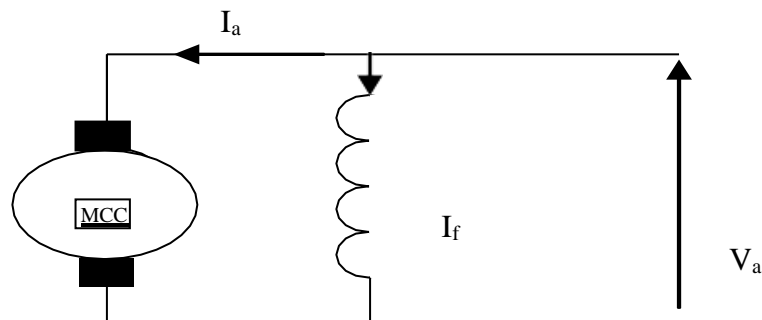
*Figure I.2: Machine à excitation série*

- **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.

#### I.3.2. 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.



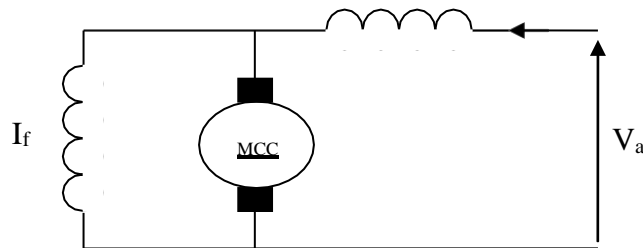
*Figure I.3: Machine shunt (excitation en dérivation).*

- **Caractéristiques** : Ce moteur a les caractéristiques suivantes :

- ❖ Un fort couple de démarrage et une instabilité de vitesse ;
- ❖ L'absence de l'emballement.

**I.3.3. Moteur à excitation composée**

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



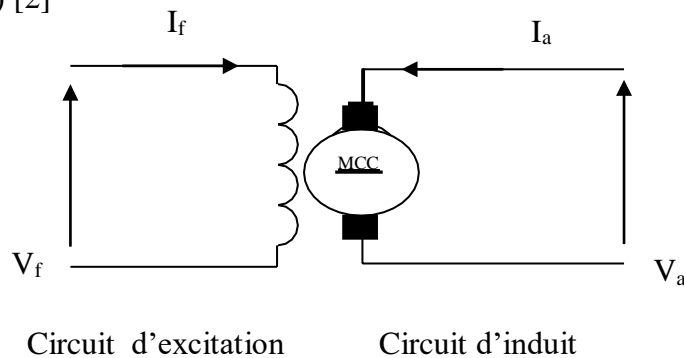
**Figure I.4: Machine compound (excitation composée)**

- **Caractéristiques :**

- ❖ Un couple de démarrage plus fort ;
- ❖ Une meilleure stabilité ;
- ❖ Il peut fonctionner à faible charge sans risque d'emballement.

**I.3.4. 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) [2]



**Figure I.5: Machine à excitation indépendante**

- **Caractéristiques :** Ce moteur possède les caractéristiques suivantes :

- ❖ Une plage de régulation de vitesse très grande ;
- ❖ Une linéarité tension/vitesse, courant/couple.

### I.4. Modélisations mathématiques d'une MCC

D'après la représentation graphique de la figure (1.6), les équations physiques qui gouvernent le fonctionnement d'un moteur électrique à courant continu à excitation indépendante (séparée) sont issues de ses propriétés électriques, mécaniques et magnétiques.

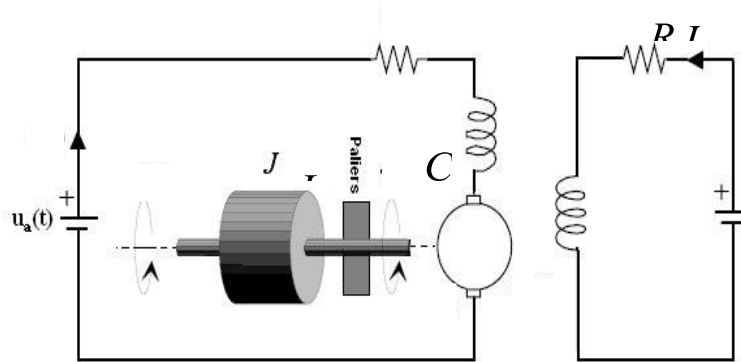


Figure I.6: Schéma électrique d'une machine à excitation séparée.

En utilisant la loi de Newton en conjonction avec les lois de Kirchhoff, il est possible de formuler les équations différentielles de premier ordre suivantes :

**Equation de l'inducteur (excitation) :**

$$L_f \frac{dI_f}{dt} = -R_f I_f + V_f \quad I.1$$

**Equation de l'induit :**

$$L_a \frac{dI_a}{dt} = -R_a I_a - E_a + V_a \quad I.2$$

Où

$$E_a = k_e \phi \omega \quad I.3$$

Avec  $\omega$  vitesse de rotation en radians/seconde. Le flux est une fonction linéaire du courant d'excitation [3]

$$k_c \phi = M I_f \quad I.4$$

**Equation de couple :**

On l'obtient à partir de la puissance électromagnétique :

$$P = C_e \cdot \omega = I_a E_a = I_a k_c \phi \omega \quad I.5$$

Ce qui donne

$$C_e = I_a k_c \phi = M I_f I_a \quad I.6$$

**Equation mécanique :**

$$J \frac{d\omega}{dt} = -f \cdot \omega + C_e - C_r \quad I.7$$

Où :

$C_r$  : est le couple résistant imposé par la charge.

$J$  : le moment d'inertie total (machine+charge entraînée).

$f$  : le frottement proportionnel à la vitesse de rotation.

Pour la simulation de la machine on utilisera les équations suivantes :

$$L_a \dot{I}_a = -R_a I_a - E_a + V_a \quad I.8$$

$$J \dot{\omega} = -f \omega + C_e - C_r \quad I.9$$

Avec:

$$E = k_e \omega \quad I.10$$

$$C_e = k_c I_a \quad I.11$$

$$k_c = M I_f \quad I.12$$

$$\Omega = \omega \quad I.13$$

En utilisant l'équation (I.9), la fonction de transfert mécanique est donnée par

$$G_{\omega I}(s) = \frac{\omega}{I} = \frac{k_c}{Jp+f} \tag{I.14}$$

En utilisant l'équation (I.8) la fonction de transfert électrique est donnée par

$$G_N(s) = \frac{I}{V} = \frac{1}{L_a p + R_a} \tag{I.15}$$

La fonction de transfert tension vitesse de la machine CC est donnée par

$$G_{IV}(s) = \frac{\omega}{V} = \frac{\omega I}{I V} = \frac{k_c}{(Jp+f)(L_a p + R_a) + k_c k_e} \tag{I.16}$$

Les valeurs numériques du MCC choisi (Maxon : Référence F2260/813) données par le constructeur (Tableau. I.1). [4]

Tension nominale	$U_{nom} = 24 V$
Tension maximale	$U_{max} = 32 V$
Courant permanent maximal	$I_{max} = 2.2 A$
Résistance aux bornes	$R = 1.91 \Omega$
Constante de couple	$K_c = 60.3 mNm.A^{-1}$
Constance de vitesse	$K_e = 60.3 mNm.A^{-1}$
Inductance	$L = 0.63 mH$
Moment d'inertie rapporté au rotor	$J = 10^{-4} kg.m^2$
Coefficient de frottement visqueux	$f = 2.5 \times 10^{-6}$

**Tableau I-1: Paramètres d'un moteur à courant continu**

Le schéma bloc de la machine à courant continu est donné par la figure I.7

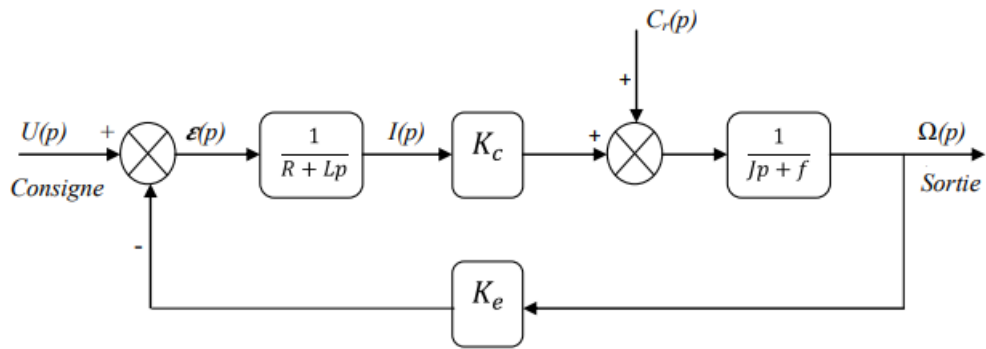


Figure I.7: Schéma bloc du Modèle de moteur électrique en vitesse

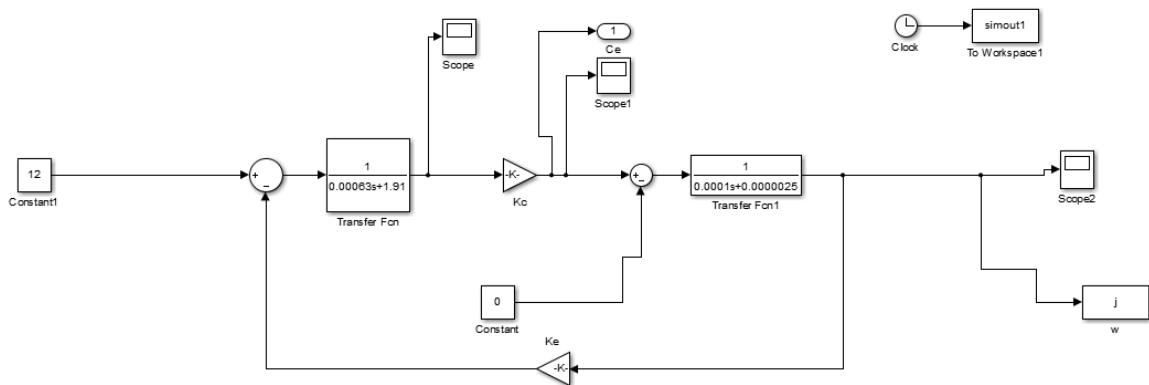


Figure I.8: Schéma bloc du moteur MCC en vitesse en MATLAB/SIMULINK

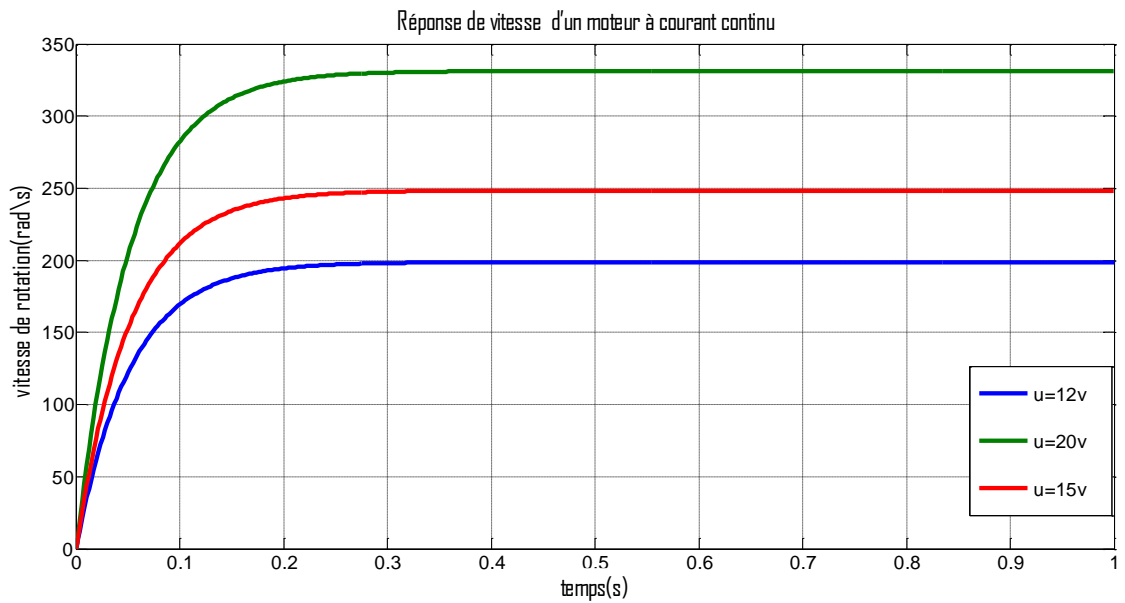


Figure I.9: Courbe de la vitesse de rotation.

En se basant sur l'équation (I.16), on peut conclure que le système modélisé est de second ordre. Toutefois, lorsque la résistance interne est bien supérieure à l'inductance interne (ce qui est souvent le cas), le système peut être considéré comme étant de premier ordre. La figure (I.9) illustre que le moteur varie de vitesse en fonction de la tension d'entrée appliquée.

Il en découle que la vitesse de rotation du moteur est en relation directe avec la tension d'entrée. La figure I.10 présente le modèle mathématique qui décrit la réponse en position du moteur électrique.

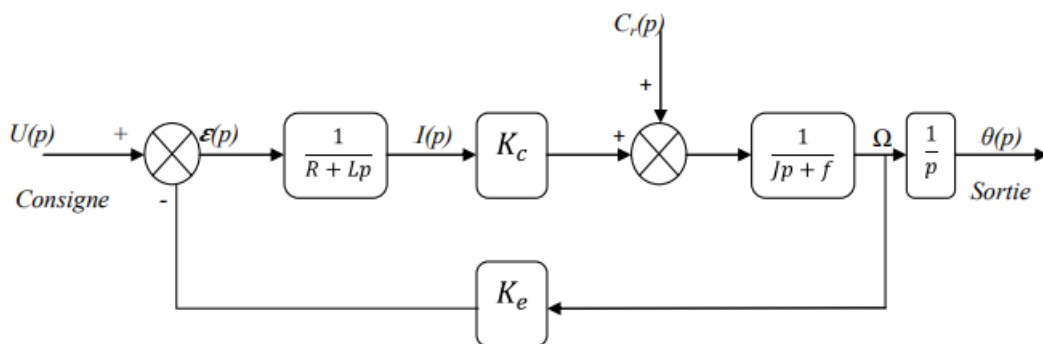


Figure I.10: Schéma bloc du Modèle d'un MCC en position

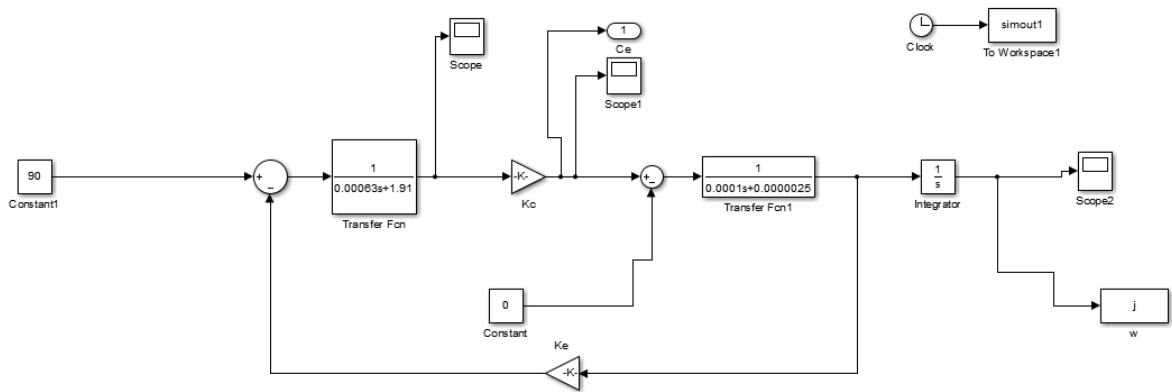


Figure I.11: Schéma bloc du moteur MCC en position en MATLAB/SIMULINK.

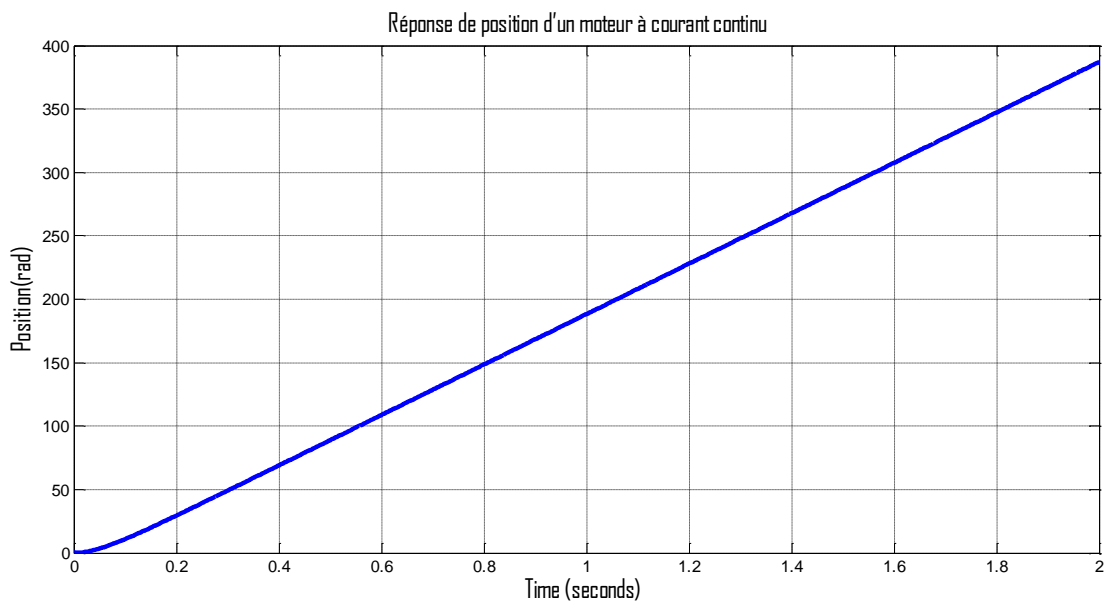


Figure I.12: Courbe de la réponse de position.

D'après la figure (I.12), que la réponse en position adopte une forme de rampe, ce qui indique une instabilité du système dans un asservissement en position. Ainsi, il est impératif de réguler le système pour stabiliser la réponse en position et améliorer les performances en matière de vitesse.

### I.5. La commande PID en régulation de vitesse et de position.

Le régulateur PID (proportionnel, intégral, dérivé) est le régulateur standard le plus couramment utilisé dans l'industrie. Ses trois paramètres permettent de régler les performances (amortissement, temps de réponse) d'une régulation d'un processus modélisé par un deuxième ordre. De nombreux systèmes physiques présentent un comportement similaire à celui d'un deuxième ordre dans une plage de temps donnée. Par conséquent, le régulateur PID convient bien à la plupart des processus industriels et est relativement robuste face aux variations des paramètres de processus, tant que les performances de la boucle fermée ne sont pas excessivement exigeantes par rapport à celles de la boucle ouverte (par exemple, une accélération très rapide de la réponse ou une augmentation importante de l'amortissement en boucle fermée) [5]

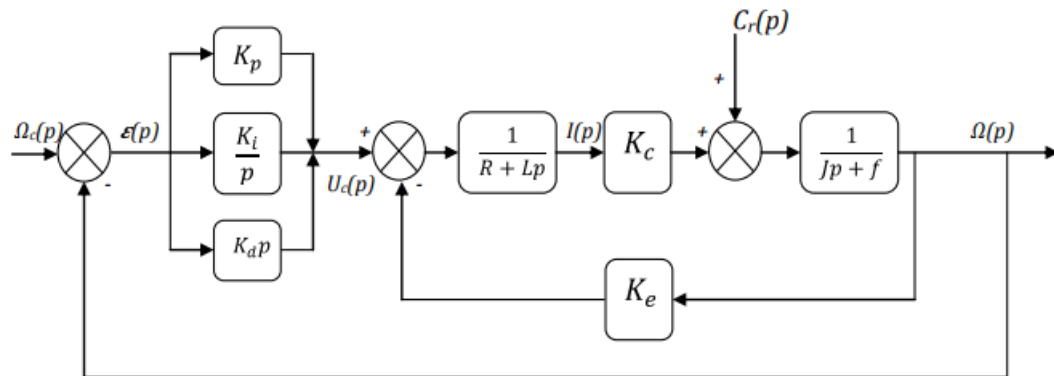


Figure I.13: Schéma bloc du correcteur PID en régulation de vitesse.



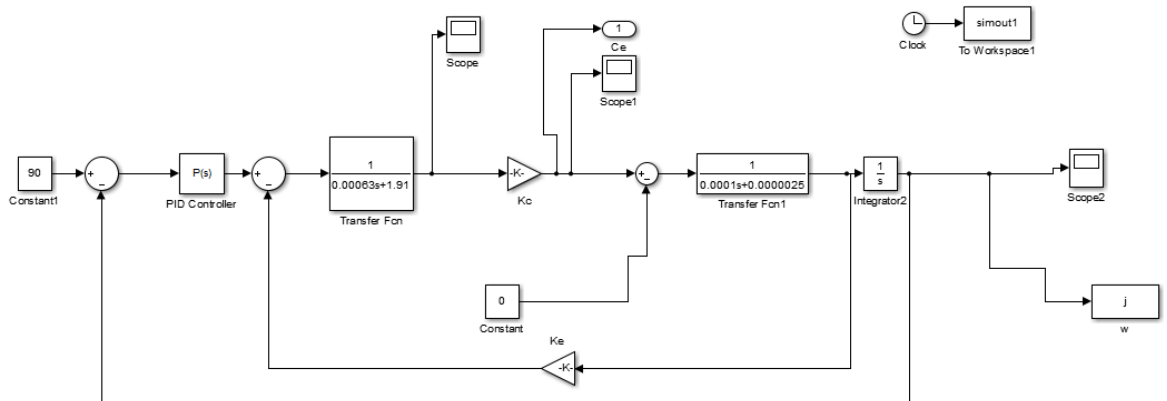


Figure I.16: Schéma bloc du moteur MCC en position en MATLAB/SIMULINK (boucle fermée)

Dans les modélisations qui suivent, posons comme références :  $\Omega_c = 200$  rad/s qui correspond à 12 volts d'alimentation pour la vitesse de rotation et  $\theta_c = 90^\circ$  pour la position angulaire

### I.5.1. Asservissement proportionnel (P)

Le principe de l'asservissement de type P est simple, il consiste à appliquer une correction proportionnelle à l'erreur pour corriger tout écart de la grandeur à régler :

$$\text{Consigne } (t) = K_p \cdot \varepsilon(t) \xrightarrow{\mathcal{L}} \text{Consigne } (p) = K_p \cdot \varepsilon(p)$$

Cette correction agit instantanément et amplifie virtuellement l'erreur pour que le système réagisse de manière plus vive, comme si l'erreur était plus importante qu'elle ne l'est réellement. Ce type d'asservissement permet de surmonter les inerties importantes du système et de réduire le temps de réponse en fournissant davantage de puissance au moteur. Cependant, lorsque le gain proportionnel  $K_p$  est augmenté, le système réagit plus rapidement mais perd en stabilité. Le dépassement augmente de plus en plus, et le système peut même diverger en cas de  $K_p$  excessivement élevé. En outre, une augmentation de  $K_p$  peut améliorer l'erreur statique, mais cela a pour effet de réduire la marge de stabilité. [6]

La figure suivante (Figure I.17) illustre la réponse en vitesse d'un système de régulation pour différentes valeurs du gain proportionnel ( $K_p$ ), en supposant que les gains intégral ( $K_i$ ) et dérivé ( $K_d$ ) sont nuls.

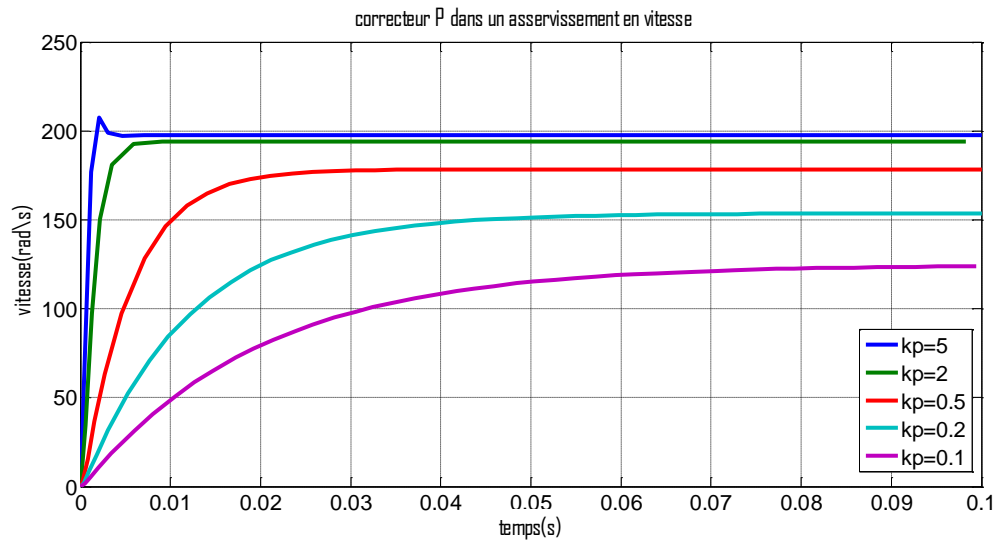


Figure I.17: Régulation de la vitesse avec du correcteur P d'un MCC.

La figure suivante (Figure I.18) montre le graphe d'une régulation en position pour différentes valeurs du gain  $K_p$ , avec  $K_i$  et  $K_d$  fixés à zéro.

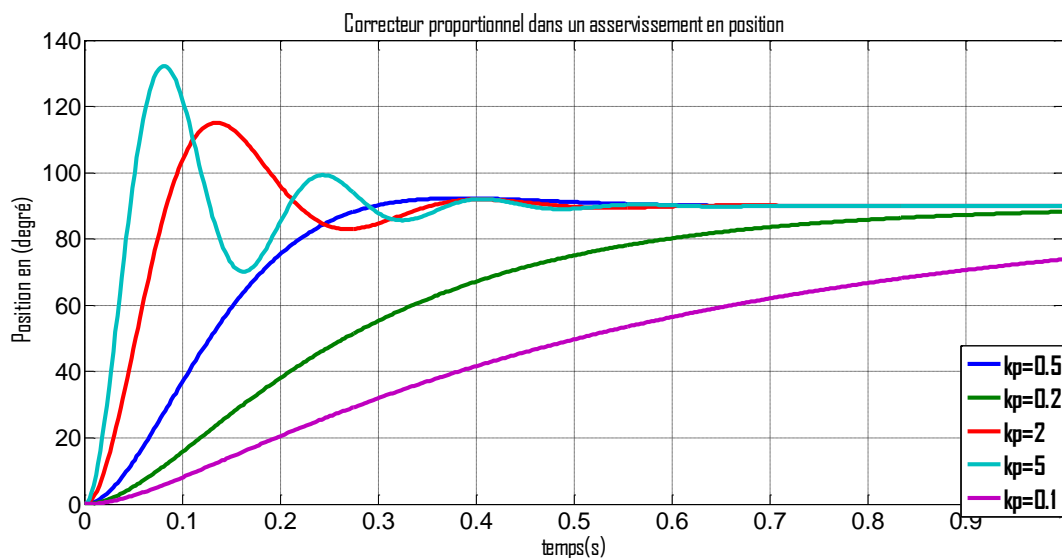


Figure I.18: Régulation de position avec du correcteur P d'un MCC.

**I.5.2. Asservissement proportionnel intégral (PI)**

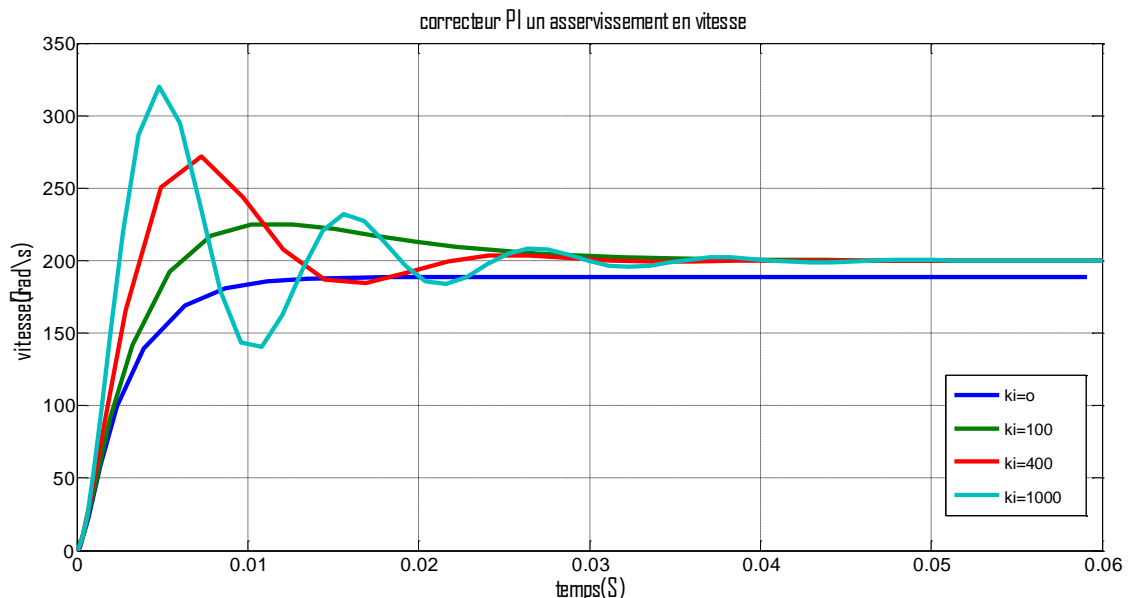
L'asservissement de type PI est un asservissement de type P auquel on a ajouté un terme intégral :

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \xrightarrow{\mathcal{L}} \text{Consigne}(p) = K_p \cdot \varepsilon(p) + K_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} = \varepsilon(p) \cdot \left[ K_p + K_i \cdot \frac{1}{p} \right]$$

Le terme intégral a pour rôle de compléter l'action proportionnelle en corrigeant l'erreur statique et en améliorant la précision en régime permanent. Son principe est d'intégrer l'erreur depuis le début de la régulation et de l'ajouter à la consigne : à mesure que l'on se rapproche de la valeur demandée, l'erreur diminue. Si l'action proportionnelle n'agit plus, l'intégrale demeure stable et maintient le moteur à la valeur demandée.

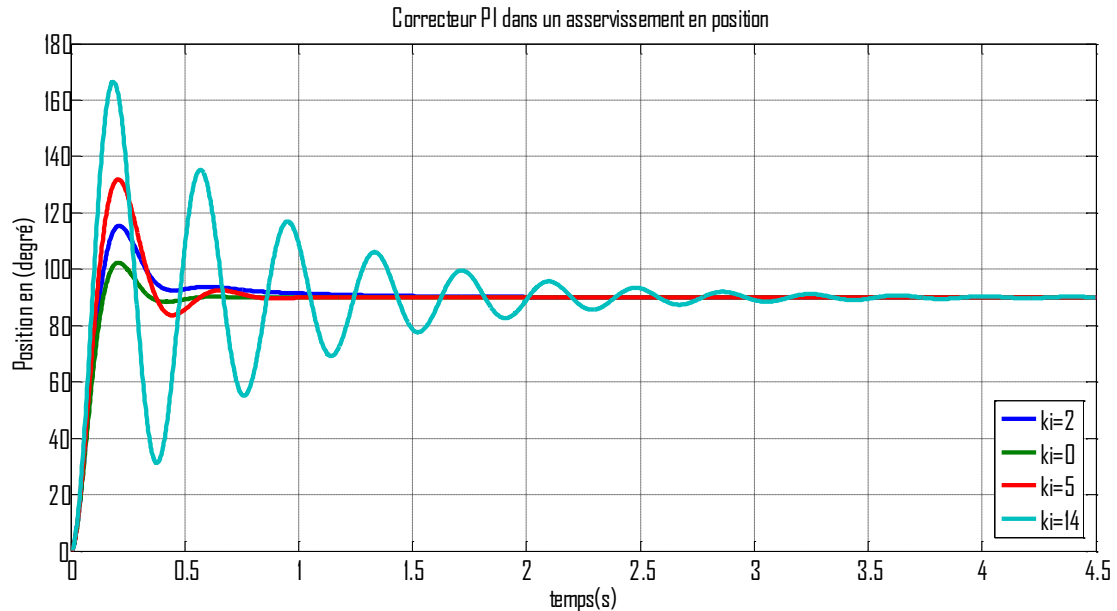
En agissant comme un filtre sur le signal intégré, l'intégrale permet de réduire l'impact des perturbations (bruit, parasites) et d'obtenir un système plus stable. Toutefois, un terme intégral trop important peut causer un dépassement de la consigne, une stabilisation plus lente ou même des oscillations divergentes. [6]

Dans la figure suivante, il sera présenté le graphe d'une régulation en vitesse (Figure I.19) pour les différentes valeurs du gain 'Ki', en fixant Kp=1 et Kd=0:



**Figure I.19: Régulation de la vitesse avec du correcteur PI d'un MCC.**

Dans la figure suivante, il sera présenté le graphe d'une régulation en position (Figure. I.20) pour les différentes valeurs du gain 'Ki', en fixant  $K_p=1$  et  $K_d=0$  :



*Figure I.20: Régulation de position avec du correcteur PI d'un MCC.*

### I.5.3. Asservissement proportionnel intégral dérivé (PID)

Les termes proportionnel et intégral peuvent causer un dépassement de la consigne et des oscillations, entraînant des inversions de polarité nuisibles pour le moteur. Pour éviter ces phénomènes indésirables, un troisième élément est introduit : le terme dérivé. Son effet dépend du signe et de la vitesse de variation de l'erreur, et s'oppose à l'effet du terme proportionnel. Lorsque l'erreur devient faible et que l'action du terme proportionnel diminue ainsi que l'intégrale, le terme dérivé devient prépondérant et ralentit le système, limitant le dépassement et réduisant le temps de stabilisation.

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \cdot \frac{d}{dt} \varepsilon(t)$$

$$\text{Consigne}(p) = K_p \cdot \varepsilon(p) + K_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} + K_d \cdot p \cdot \varepsilon(p) = \varepsilon(p) \cdot \left[ K_p + K_i \cdot \frac{1}{p} + K_d \cdot p \right]$$

L'asservissement PID est constitué d'un terme proportionnel, d'un terme intégral et d'un terme dérivé.[6]

**I.6. Conclusion :**

Pendant de nombreuses années, la machine à courant continu a été le principal actionneur utilisé dans les applications nécessitant une vitesse variable. Dans ce chapitre, notre objectif été de fournir un aperçu de l'état de l'art du moteur à courant continu, des différents modes d'excitation et de proposer une modélisation mathématique de cette machine. Ensuite, nous avons abordé la commande PID classique pour le moteur à courant continu, en utilisant la modélisation du moteur à courant continu sous forme de fonction de transfert. Enfin, nous avons simulé notre système sur Matlab/Simulink afin de réduire l'erreur statique, le dépassement, le temps de réponse et le temps de montée, dans le but d'obtenir une régulation précise et efficace du processus. Notre objectif été d'obtenir un système précis, rapide, et stable.

**II. CHAPITRE II : Les convertisseurs statiques et API**

## II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, Nous exposons un rappel théorique concernant les convertisseurs statiques. D'abord, définition sur les convertisseurs statiques et les semiconducteurs et description des composants de puissance les plus employés dans le redressement est présentée. Puis, nous allons passer en revue les montages les plus connus des redresseurs commandés et non commandés alimentant des charges de type inductives. Ensuite, on va parler sur l'API (Un automate programmable industriel) définition et son avantages. Enfin nous allons parlés de différents langages (ladder, grafcet ....).

## II.2. Les convertisseurs statiques :

Un système appelé convertisseur statique est conçu pour ajuster la source d'énergie électrique pour s'adapter à un récepteur spécifique. Le type de machine à contrôler ainsi que la nature de la source d'énergie (qu'elle soit monophasée ou triphasée) sont des facteurs qui doivent être pris en compte. [7]

## II.3. Classification des convertisseurs statiques :

### II.3.1. Les redresseurs :

Il s'agit de convertisseurs AC/DC qui transforment une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle. Si ces convertisseurs sont contrôlés, la valeur moyenne de la tension obtenue peut être ajustée. [8]

### II.3.2. Les hacheurs :

Ces convertisseurs DC/DC produisent une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe, tout en agissant comme un transformateur pour le courant continu

### II.3.3. Les onduleurs :

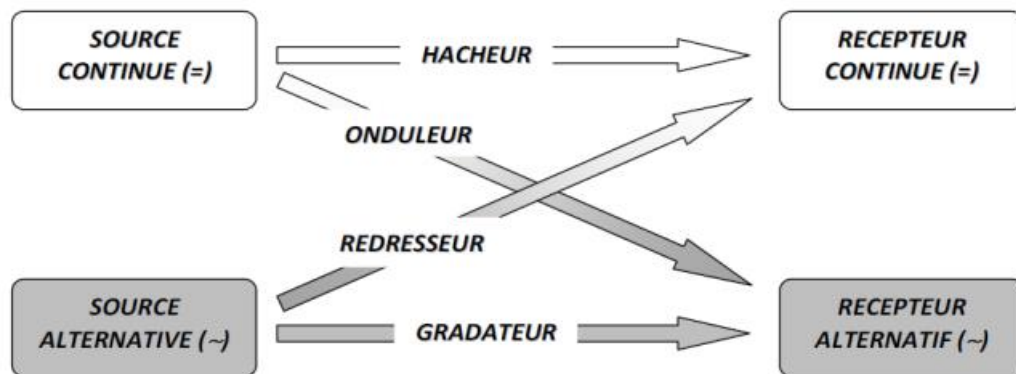
Ces convertisseurs DC/AC sont utilisés pour transformer une tension continue en une tension alternative, ce qui les qualifie d'onduleurs de tension. Si l'on souhaite convertir un courant continu en courant alternatif, on parle alors de mutateurs.

### II.3.4. Les gradateurs :

Les gradateurs sont des convertisseurs AC/AC qui génèrent des tensions et des courants alternatifs en utilisant une alimentation alternative, sans altérer la fréquence. Ils sont similaires à des transformateurs abaisseurs réglables, jouant le même rôle.

### II.3.5. Les cyclo-convertisseurs :

Les convertisseurs AC/AC de fréquence, également appelés convertisseurs de fréquence, sont capables de transformer une tension alternative d'une fréquence  $f_1$  en une tension alternative d'une fréquence  $f_2$ .



*Figure II.1: Les différents types de convertisseurs statiques*

## II.4. Quelques applications des convertisseurs statiques :

On peut citer quelques applications des convertisseurs statiques dans le domaine industriel :

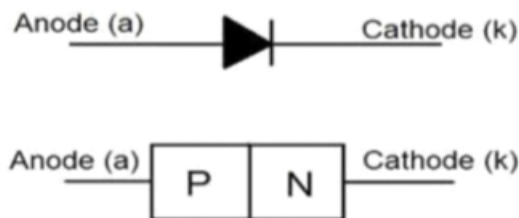
- ❖ Alimentation des moteurs à courant continu, chargeur des batteries. (Redresseur).
- ❖ Commande des moteurs à courant continu (vitesse variable) alimentation à découpage (Hacheur).
- ❖ Production de tensions alternatives, alimentation des appareils électriques autonomes, protection contre les surtensions et coupures de réseau (informatique), commande des machines à courant alternatif. (Onduleur).
- ❖ Production des vitesses variables en alternatif (Levage, machine-outil). (Gradateur)

## II.5. Les semi-conducteurs employés dans les convertisseurs statiques :

### II.5.1. Les diodes :

La diode est un dispositif redresseur non commandé qui se compose d'une jonction PN. Elle autorise la circulation du courant dans un seul sens et uniquement si la tension appliquée à ses bornes est positive. [10]

**Symbole :**



*Figure II.2: Représentation symbolique d'une diode*

La diode possède les caractéristiques principales suivantes :

#### ❖ À l'état passant

Une chute de tension composée d'une tension de seuil et d'une résistance interne,

Un courant maximum permanent admissible (ordre de grandeur, jusqu'à 5 000 A RMS pour les composants les plus puissants) ;

#### ❖ À l'état bloqué

Une tension maximale admissible qui peut dépasser 5 000 V crête, [10]

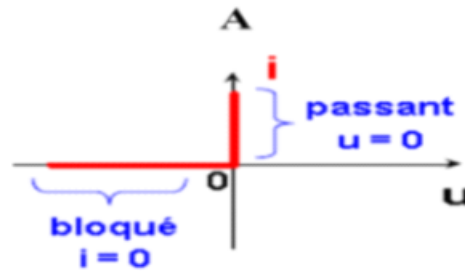


Figure II.3: Caractéristique idéal d'une diode.

### II.5.2. Les thyristors :

Le thyristor est un interrupteur statique, qui permet la circulation du courant dans une direction et dans les deux sens pour la tension, en étant constitué de quatre couches alternativement dopées N et P. Il est activé par commande à l'ouverture et se compose de trois jonctions  $J_a$ ,  $J_c$  et  $J_k$ . Le thyristor est un dispositif commandé en courant. [11]

Les symboles d'un thyristor sont donnés les suivants :

#### Symbole :

Le thyristor est un dispositif semi-conducteur formé de quatre couches de dopages alternés :

La couche de cathode de type N, elle est reliée par métallisation à l'électrode de cathode.

La couche de commande de type P, elle est reliée à l'électrode de gâchette G.

La couche de blocage de type N.

La couche d'anode de type P, elle est reliée par métallisation à l'électrode d'anode A. [12]

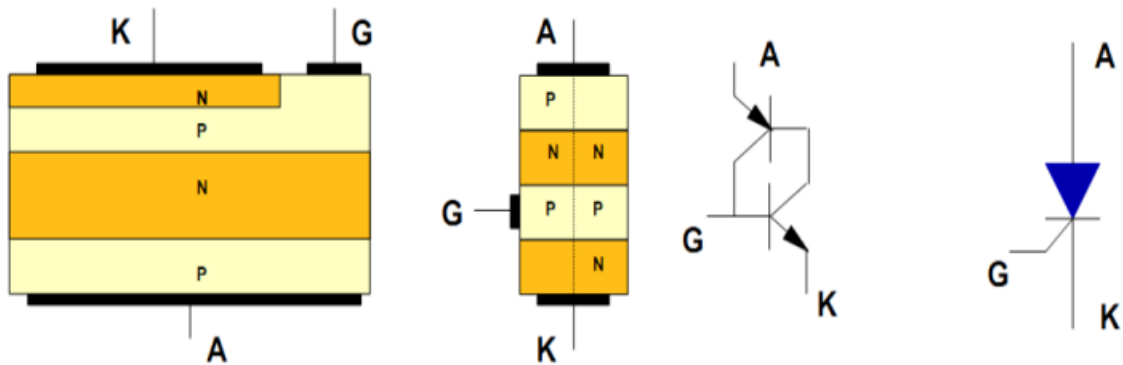


Figure II.4: Symboles d'un thyristor.

**II.5.3. GTO (Gate Turn Off Thyristor):**

Le thyristor GTO (Gate Turn-Off), souvent appelé simplement GTO, est un semi-conducteur qui peut être commandé pour être fermé ou ouvert à l'aide d'une gâchette. L'amorçage commandé du GTO (depuis OB jusqu'à OA) est similaire à celui du thyristor conventionnel. Cependant, une fois amorcé, il est important de maintenir un léger courant de gâchette pour garantir une répartition égale du courant dans le composant. Le blocage spontané par passage de la branche OA à la branche OD se produit de la même manière que pour le thyristor conventionnel, sauf qu'à partir du point O, le courant de gâchette doit être annulé pour éviter une augmentation importante du courant de fuite [13].

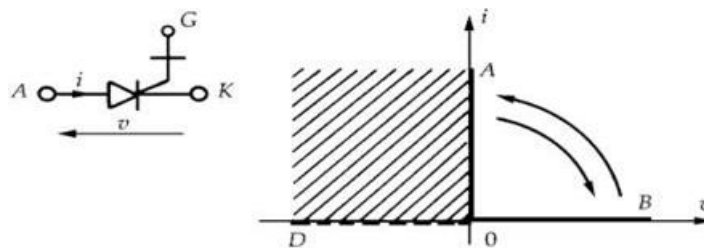
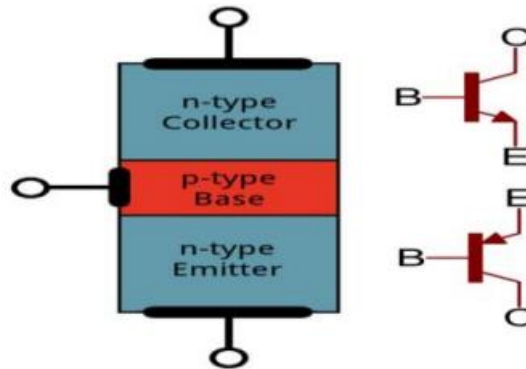


Figure II.5: Le symbole représentatif du GTO.

**II.5.4. Les transistors de puissance :**

Le transistor est un semi-conducteur qui peut être contrôlé tout au long de la phase de conduction, ainsi que lors de l'allumage et de l'extinction. Il ne permet le passage du courant que dans un seul sens (voir figure II.6).

Lors de l'allumage, la commutation est réalisée en injectant un courant dans la base. L'extinction est obtenue en supprimant le courant de base. Le transistor présente également un gain interne, c'est-à-dire que le courant de conduction est égal au courant de la base multiplié par le gain du transistor. [9]



*Figure II.6: Le transistor et son symbole.*

C : collecteur, E : Emetteur, B : base

### II.5.5. Le transistor MOSFET :

La technologie CMOS est couramment utilisée dans la conception de circuits intégrés de grande échelle, car elle permet une intégration élevée et offre un coût de production avantageux. Grâce à la réduction de la taille des transistors, la technologie CMOS est capable de fonctionner à des fréquences très élevées et avec une faible consommation d'énergie, nous examinons le fonctionnement du transistor MOS, à la fois en statique et en dynamique, en utilisant le modèle EKV. En outre, nous abordons les principes de normalisation des transistors, qui permettent de modéliser les transistors indépendamment de leur taille et de leur technologie. Enfin, nous décrivons les méthodes d'extraction des paramètres essentiels à la description et à la normalisation du transistor MOS. [14]

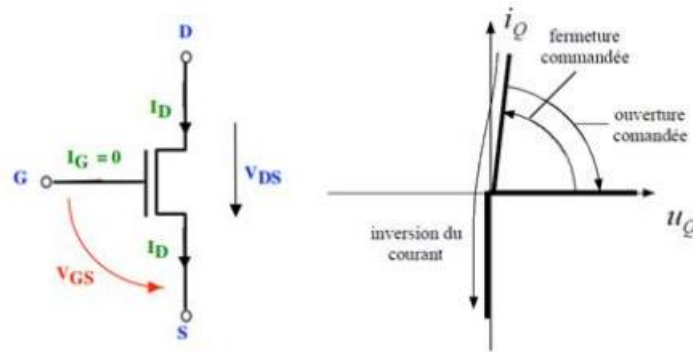


Figure II.7: représentation symbolique et caractéristique d'un MOSFET.

**II.5.6. Le transistor IGBT :**

Le transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) est un transistor bipolaire à commande par effet de champ. Dans le même composant il réunit les avantages :

- ❖ Du transistor bipolaire (chute de tension faible à l'état passant, tension directe blocable élevée).
- ❖ Du transistor MOS (commande en tension, vitesse de commutation levée).

En effet, coté commande, entre la grille G et l'émetteur E, il équivaut exactement à un MOS ; coté commandé, entre collecteur C et émetteur E, il équivaut sensiblement à un bipolaire à jonction [15].

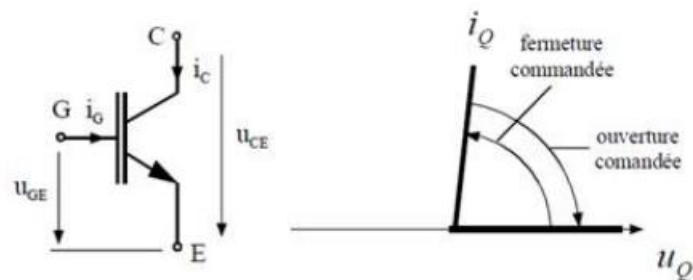


Figure II.8: Représentation symbolique et caractéristique d'un IGBT.

## II.6. Les redresseurs :

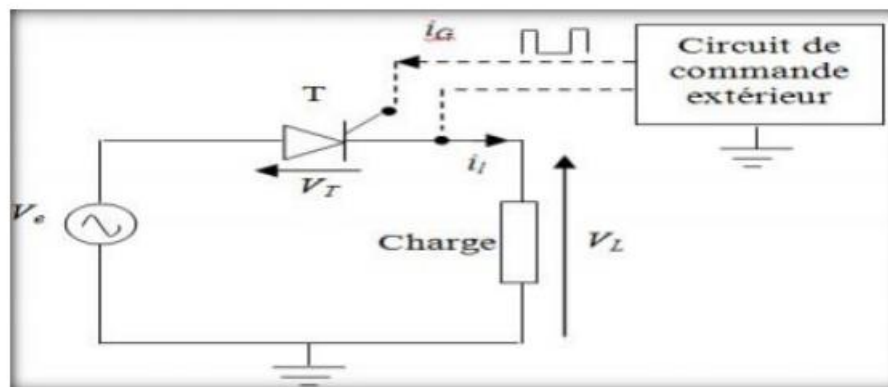
### II.6.1. Les redresseurs commandés :

Grâce au redresseur commandé, il est possible de transformer une source alternative en un courant unidirectionnel dont les valeurs moyennes et efficaces peuvent être ajustées. Cette technique est utilisée pour la régulation de la vitesse des moteurs à courant continu. [16]

#### Redresseur monophasé simple alternance totalement commandé :

Le contrôle de l'angle de retard (amorçage) permet d'ajuster à la fois l'amplitude et la polarité de la tension moyenne de charge. Ces convertisseurs sont couramment appelés convertisseurs bidirectionnels, car la puissance peut être transférée dans les deux sens, de l'alimentation à la charge et vice versa.

Le schéma de ce redresseur est représenté par la Figure II.9.



*Figure II.9: Redresseur simple alternance totalement commandé.*

#### Redresseur monophasé double alternance totalement commandée :

Ce circuit est utilisé pour fournir de l'énergie électrique aux machines à courant continu (DC). Il permet également de récupérer l'énergie électrique générée lorsque la machine fonctionne en mode génératrice, c'est-à-dire lorsque l'énergie est transférée de la machine vers le réseau électrique. Dans notre réalisation, nous nous concentrons sur ce type de redresseur.

Le schéma de ce redresseur est représenté par la Figure II. 10.

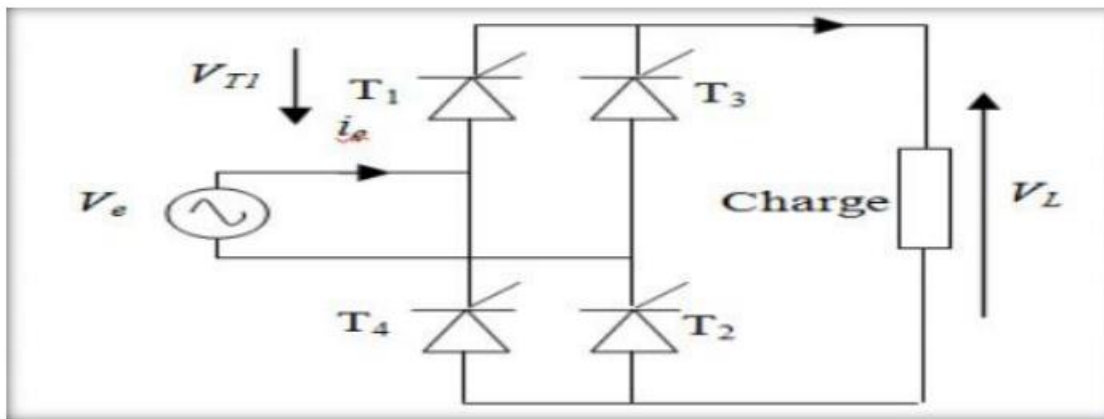


Figure II.10: Redresseur monophasé double alternance totalement commandée.

II.6.2. Les redresseurs non commandés :

Redresseur simple alternance monophasé :

Un redresseur simple alternance monophasé est un dispositif qui élimine les alternances négatives et conserve uniquement les alternances positives d'un signal d'entrée monophasé, en utilisant une diode connectée en série avec la charge. La fréquence de sortie du redresseur est égale à la fréquence d'entrée.[17]

Ce type de redresseur est réalisé en mettant simplement une diode en série avec la charge comme le montre le schéma suivant :

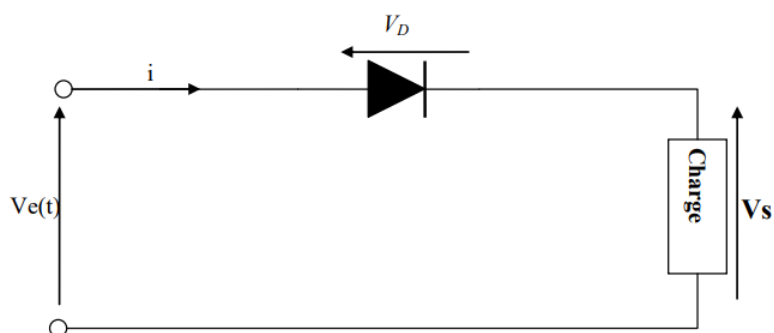
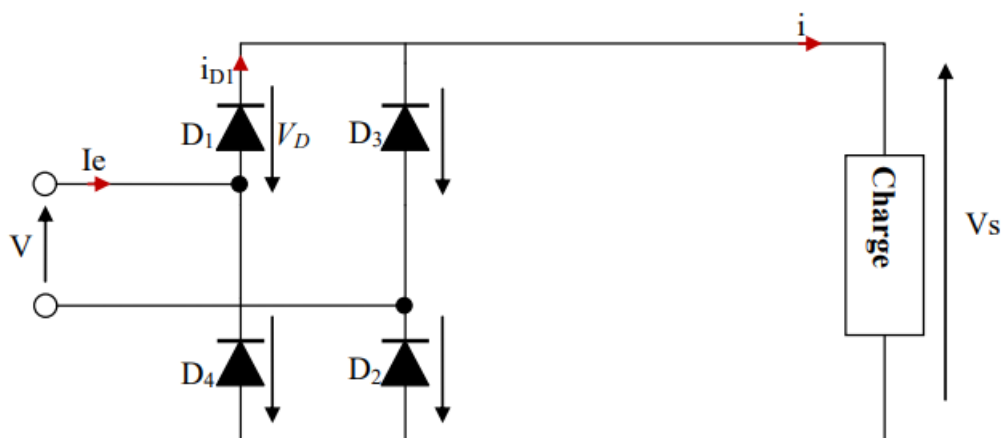


Figure II.11: redresseur monophasé simple-alternance non-commandé (1 diode).

**Redresseur double alternance monophasé :**

Le redresseur double alternance monophasé est un dispositif qui redresse les alternances négatives et conserve les alternances positives d'un signal d'entrée monophasé. Cela permet d'obtenir en sortie une fréquence deux fois plus élevée que celle de l'entrée. Ce type de redresseur est réalisé en utilisant un montage en pont de Graëtz avec des diodes (Figure II.12) Le pont de Graëtz est constitué de quatre (4) diodes.



*Figure II.12: redresseur avec pont de Graëtz.*

**II.7. Les automates programmables industriels (API) :****II.7.1. Définition API :**

Un Automate Programmable Industriel (API), également appelé Programmable Logic Controller (PLC) en anglais, est un dispositif électronique programmable conçu pour automatiser des processus tels que la commande de machines et de chaînes de production. Les personnes chargées de programmer ces automates programmables industriels sont communément appelées automaticiens.

Trois caractéristiques fondamentales distinguent totalement l'Automate Programmable Industriel (API) :

- ❖ Il peut être directement connecté aux capteurs et pré-actionneurs grâce à ses entrées /sorties industrielles.
- ❖ Il est conçu pour fonctionner dans des ambiances industrielles sévères (température, vibrations, microcoupures de la tension d'alimentation, parasites, etc...).
- ❖ Sa programmation à partir de langages spécialement développés pour le traitement de fonctions d'automatisme fait en sorte que sa mise en œuvre et son exploitation ne nécessitent aucune connaissance en informatique. [18]

### **II.7.2. Les avantages et les inconvénients d'un API :**

#### **Ses avantages sont :**

- ❖ Améliorer les conditions de travail en éliminant les travaux répétitifs.
- ❖ Améliorer la productivité en augmentant la production.
- ❖ Améliorant la qualité des produits ou en réduisant les coûts de production.
- ❖ Automates programmables sont programmés facilement et ont un langage de programmation facile à comprendre (logique programmé) alors la modification du programme facile par rapport à la logique câblée.
- ❖ Simplification du câblage.
- ❖ Puissance et rapidité.
- ❖ Facilité de maintenance (l'API par lui-même est relativement fiable et peut aider l'homme dans sa recherche de défauts).
- ❖ Augmenter la sécurité.
- ❖ Possibilités de communication avec l'extérieur (ordinateur, autre API) énorme possibilité d'exploitation.
- ❖ Plus économique.

#### **Ses inconvénients sont :**

- ❖ Plantage.
- ❖ Il y a trop de travail requis dans les fils de connexion.
- ❖ Besoin de formation [19].

## II.8. Langage de programmation pour API :

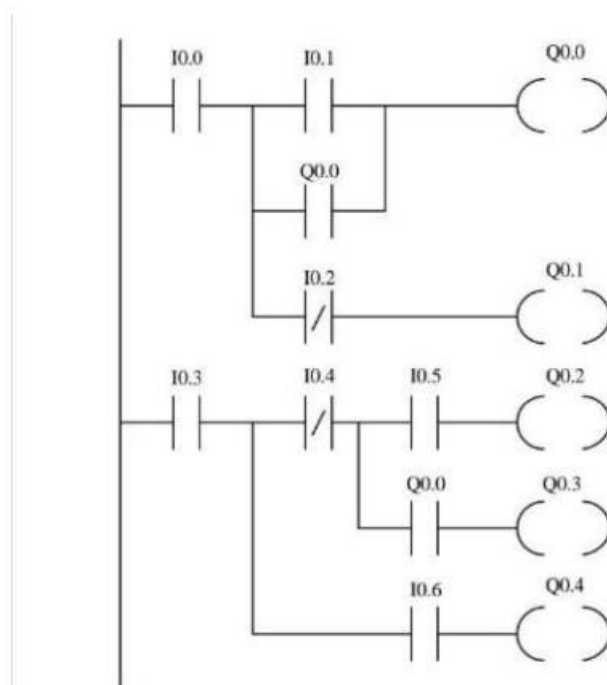
### II.8.1. Le Ladder Diagram :

Le langage Ladder Diagram (LD) se compose de réseaux successifs qui sont lus par l'automate programmable. Ces réseaux contiennent différents symboles tels que les entrées/sorties de l'automate, les opérateurs séquentiels tels que les temporisateurs, les compteurs, les opérations et les bits systèmes internes à l'automate. Ces bits permettent d'activer ou de désactiver certaines options de l'automate, comme l'initialisation des grafjets.

Dans un programme Ladder, les instructions sont lues de haut en bas et les valeurs sont évaluées de gauche à droite. En réalité, ces valeurs correspondent à la présence ou à l'absence d'un potentiel électrique à chaque nœud de connexion, similaire à un schéma électrique [19].

Il se compose de trois (03) éléments :

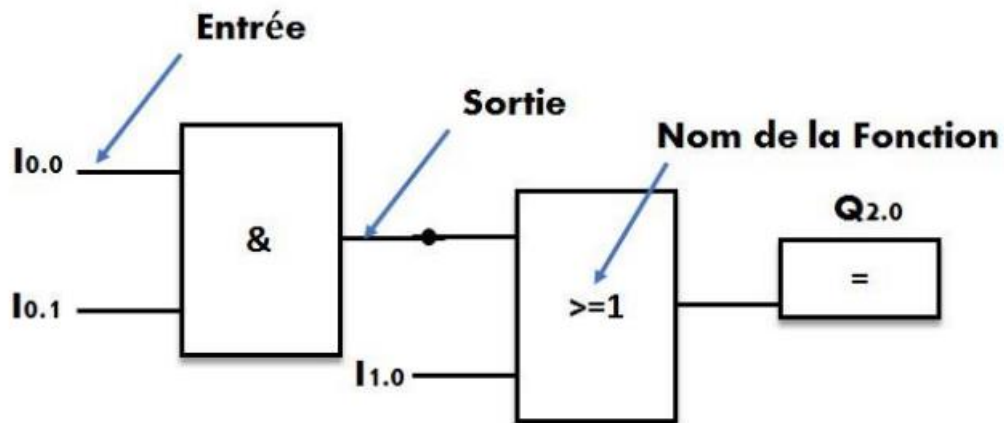
- Les entrées (ou contact), qui permettent de lire la valeur d'une variable booléenne.
- Les sorties (ou bobines) qui permettent d'écrire la valeur d'une variable booléenne.
- Les blocs fonctionnels qui permettent de réaliser des fonctions avancées.



*Figure II.13: Exemple de langage Ladder Diagram.*

### II.8.2. Langage de programmation FBD :

Le diagramme FBD (Function Block Diagram) représente une fonction qui relie des variables d'entrée à des variables de sortie. Cette fonction est constituée d'un réseau de blocs élémentaires, auxquels les variables d'entrée et de sortie sont reliées par des arcs de liaison. Il est également possible de connecter la sortie d'un bloc à l'entrée d'un autre bloc. [20]



*Figure II.14: Présentation du langage FBD.*

### II.8.3. Langage littéral structuré ST (Structured Text) :

Le SCF (Structured Control Language) est un langage structuré similaire au langage C. Il est adapté aux applications nécessitant des calculs complexes et au traitement des chaînes de caractères. Il permet de programmer des algorithmes de tous types, qu'ils soient simples ou complexes. Le SCF (Structured Control Language) est un langage structuré similaire au langage C. Il est adapté aux applications nécessitant des calculs complexes et au traitement des chaînes de caractères. Il permet de programmer des algorithmes de tous types, qu'ils soient simples ou complexes. [21]

### II.8.4. Langage IL (Instruction List) :

Ce langage est un langage de bas niveau sous forme de texte, adapté aux petites applications. Chaque instruction opère sur un résultat courant (ou registre IL) et est suivie d'un opérateur qui indique le type

d'opération à effectuer entre le résultat courant et l'opérande. Le résultat de l'opération est ensuite stocké dans le résultat courant.

Un programme en IL est une séquence d'instructions. Chaque instruction doit être sur une nouvelle ligne et doit inclure un opérateur, éventuellement suivi de modificateurs et, si nécessaire, un ou plusieurs opérandes séparés par des virgules (','). Une étiquette peut être placée avant l'instruction, suivie de deux points (':'). Les commentaires peuvent être ajoutés à la fin de la ligne. Les lignes vides peuvent être utilisées pour séparer les instructions, et les commentaires peuvent être ajoutés sur des lignes distinctes. [22]

### **II.8.5. Langage SFC (Séquentiel Fonction Charte), ou GRAFCET**

Le Grafcet, acronyme de « GRAPhe Fonctionnel de Commande Etapes/Transitions », est une méthode de représentation et d'analyse d'un système automatisé. Elle est particulièrement adaptée aux systèmes à évolution séquentielle, décomposables en étapes distinctes. Le Grafcet est largement utilisé dans l'industrie pour automatiser des processus de fabrication et de production.

Le Grafcet est un diagramme fonctionnel qui permet de décrire graphiquement les différents comportements de l'automatisme en suivant un cahier des charges. Il décrit les entrées et les sorties de chaque étape, ainsi que les conditions qui déclenchent les transitions entre ces étapes. Le Grafcet est simple à utiliser et rigoureux sur le plan formel. Il constitue un outil de communication essentiel pour la conception, l'utilisation et la maintenance de la machine automatisée.

Un des avantages du Grafcet est sa capacité à faciliter la transition du modèle à l'implémentation technologique dans un automate programmable industriel. Il passe ainsi du langage de spécification au langage d'implémentation utilisé pour la réalisation de l'automatisme. Cette méthode permet d'optimiser les performances de la machine en réduisant les temps de cycle et en améliorant la fiabilité du processus.

Le Grafcet peut également être utilisé pour tester la validité d'une conception avant sa mise en œuvre. Il simule le fonctionnement de l'automatisme et détecte d'éventuels problèmes de fonctionnement. En résumé, le Grafcet est un outil de modélisation et de communication clé dans l'automatisation industrielle, permettant d'améliorer l'efficacité des processus de production tout en réduisant les coûts et les temps d'arrêt. [23]

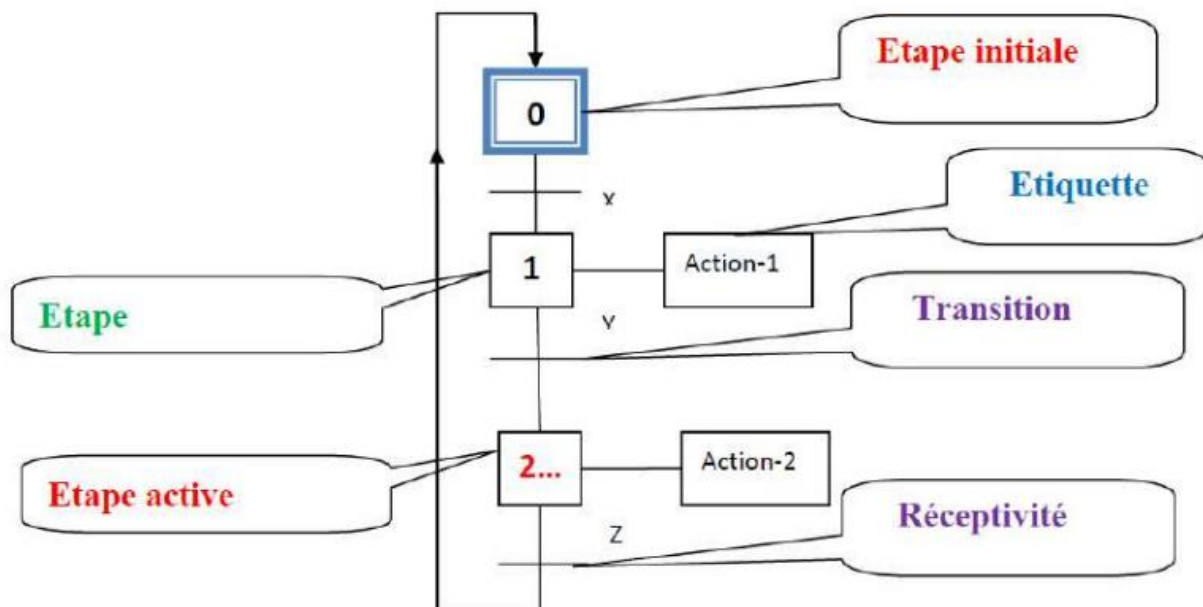


Figure II.15: Représentation graphique du principe de fonctionnement générale d'un Grafset.

**II.9. Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré à l'introduction de quelques notions et définitions relatives sur les convertisseurs statiques. Nous avons commencé par une présentation de l'élément de base utilisé dans le fonctionnement des convertisseurs statiques qui est semiconducteur. Aussi nous avons présenté les différents types de convertisseur et son classification (onduleur, hacheur, redresseur...), sa constitution physique élémentaire, son fonctionnement, sa commande, leurs principales applications. Enfin nous avons consacré notre étude aux PLC (programmable logic controller) et ses avantages et inconvénients et nous avons mentionné les différents types de langage de programmation (ladder, fbd, il...).

**III. Chapitre III : Développement d'une solution programmable et la régulation PID**

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une revue théorique sur Hardware-in-the-Loop et son utilisation et on va faire une définition sur l'encodeur, aussi sur logiciel Micro/Win et faire une simulation sur le logiciel qui concerne sur la vitesse qui est la partie pratique.

### III.2. Définition Hardware-in-the-Loop:

Hardware-In-the-Loop (HIL), ou en français « matériel dans la boucle », est une technique de test et de simulation largement utilisée dans le domaine de l'ingénierie, notamment dans le développement et la validation de systèmes complexes tels que les systèmes de contrôle, la robotique et les systèmes aérospatiaux. L'objectif du HIL est d'évaluer les performances et la fonctionnalité d'un système en intégrant des composants matériels réels avec un environnement simulé. Dans le contexte de MATLAB, le HIL implique la connexion d'un système physique ou de composants matériels (tels que des capteurs, des actionneurs ou des contrôleurs) à un ordinateur exécutant MATLAB et Simulink. Les composants matériels sont interfacés avec l'ordinateur via des cartes d'acquisition de données ou d'autres interfaces de communication. Le processus HIL comprend généralement les étapes suivantes :

#### III.2.1. Modélisation :

Créer un modèle mathématique du système à tester à l'aide de Simulink, qui inclut les algorithmes nécessaires, la logique de contrôle et les composants physiques.

#### III.2.2. Simulation :

Utiliser le modèle Simulink pour simuler le comportement du système. Cela permet de tester et d'affiner les algorithmes de contrôle et d'observer la réponse du système.

#### III.2.3. Intégration matérielle :

Connecter les composants matériels physiques (par exemple, les capteurs, les actionneurs) à l'ordinateur exécutant Matlab et Simulink. Cela se fait généralement via des cartes d'acquisition de données ou d'autres interfaces.

**III.2.4. Exécution en temps réel :**

Exécuter le modèle Simulink en temps réel, avec des entrées et des sorties circulant entre le matériel et l'environnement de simulation. L'environnement simulé réagit aux actions du matériel physique, et les réponses du matériel sont capturées par la simulation.

**III.2.5. Test et validation :**

Utiliser la configuration HIL pour tester et valider les performances du système. Cela implique de soumettre le matériel à différents scénarios, entrées et perturbations afin d'évaluer son comportement et de s'assurer qu'il répond aux spécifications souhaitées. Les avantages des tests HIL incluent la possibilité de tester des systèmes complexes dans un environnement contrôlé, des économies de coûts en réduisant le besoin de prototypes physiques et la capacité de simuler et d'évaluer des scénarios qui peuvent être difficiles ou dangereux à tester dans des conditions réelles. MATLAB offre un ensemble d'outils complet pour les tests et simulations HIL, permettant aux ingénieurs d'intégrer du matériel réel avec des simulations, d'effectuer des analyses détaillées et de valider les performances.

**III.3. Pourquoi utiliser la simulation Hardware In the Loop ?**

Cette question est une partie importante pour la compréhension de la technologie en temps réel. Pour reformuler cette question, on peut se demander : Pourquoi ne pas connecter un système embarqué en essai au "processus réel", qui est le système dynamique à contrôler, pour effectuer des tests ? Le principal objectif de la simulation HIL est de tester un dispositif matériel sur un simulateur avant de le mettre en œuvre sur le processus réel. La mesure de l'efficacité de développement et de test est typiquement une formule qui comprend les facteurs suivants :

- Coût ;
- Durée ;
- Sécurité.

Pour s'assurer que les différentes parties d'un système fonctionnent comme planifié, il est recommandé de tester ces différentes parties individuellement. La simulation HIL nous permet de faire ces essais, Un autre avantage de la simulation HIL est qu'elle permet de faire des tests sans endommager des équipements et surtout d'éviter de mettre en danger les vies humaines. Par exemple, les conditions

potentiellement dangereuses dans un moteur, tel que la surchauffe, peuvent être simulée pour tester si le calculateur peut détecter et signaler cela.

### III.4. Encodeur :

Dans les applications industrielles, il peut parfois être nécessaire de mesurer la position ou la vitesse d'un objet en rotation comme une roue ou un arbre/essieu. L'encodeur rotatif est un dispositif électromécanique qui peut être utilisé pour obtenir ces mesures.

Il existe deux types d'encodeurs rotatifs : codeurs rotatifs incrémentaux et codeurs rotatifs absolus. Dans ce contexte, nous examinerons le codeur Rotatif Incrémental, son principe de fonctionnement et leur application.

#### III.4.1. Qu'est-Ce Qu'un Encodeur Rotatif Incrémental ?

Les codeurs incrémentaux appartiennent à la famille des encodeurs rotatifs. Ils sont utilisés pour obtenir des informations telles que : position, angle, vitesse rotationnelle.



*Figure III.1: Codeur rotatif*

Les codeurs rotatifs incrémentaux se trouvent principalement dans les applications où la mesure de la vitesse/vitesse angulaire est requise. Cela se fait en comptant le nombre d'impulsions par unité de temps générées par le codeur.

Contrairement à son frère, le codeur rotatif absolu, les codeurs incrémentaux ne peuvent pas fournir des informations lorsque l'arbre ne tourne pas. Ils peuvent uniquement fournir des informations sur les mouvements de l'arbre.

Les impulsions générées par le codeur rotatif incrémental doivent être calculées et traitées ailleurs. Il peut s'agir d'un microcontrôleur ou d'un API. En utilisant le nombre d'impulsions, le contrôleur peut ensuite convertir les informations en informations telles que position, vitesse et distance.

### **III.4.2. Caractéristiques Électriques Du Codeur Incrémental**

**Tension d'alimentation** : peut varier de 5V à 24V

**Consommation de courant** : Pour les types de sortie tension et courant, la consommation de courant typique est inférieure à 60 mA. Les types de pilotes peuvent consommer jusqu'à 100 mA.

**Tension de sortie** : tension de niveau ÉLEVÉ :  $\geq 3.5$  V, tension de niveau BAS :  $\leq 0.5$  V.

**Temps de montée et de chute** : décrit le temps que prend le capteur pour changer la sortie de haut en bas (chute) ou de bas en haut (montée)

- Temps de montée typique pour le type de sortie de tension :  $\leq 500$  ns
- Temps de chute typique pour le type de sortie de tension :  $\leq 100$  ns

**Fréquence de réponse** : fréquence maximale à laquelle le capteur peut commuter ses sorties

### **III.5. Définition logiciel Micro/Win**

Le logiciel Micro/Win est un environnement de développement intégré (EDI) utilisé pour programmer des automates programmables industriels (API) de la marque Siemens, tels que les automates de la série S7-200. Il fournit une interface conviviale permettant aux utilisateurs de créer, de programmer et de simuler des programmes pour les API Siemens.

Micro/Win offre des fonctionnalités telles que la programmation en langage graphique (langage d'échelles) et la programmation en langage texte (langage de liste d'instructions). Il permet aux utilisateurs de configurer les entrées et sorties, de créer des programmes avec des fonctions logiques, de gérer des temporisateurs et des compteurs, et de mettre en place des communications avec d'autres dispositifs.

Le logiciel Micro/Win propose également des outils de simulation permettant aux utilisateurs de tester leurs programmes avant de les charger sur les API réels. Cela permet de vérifier le comportement du programme, de détecter et de résoudre les erreurs potentielles avant leur déploiement.

En résumé, Micro/Win est un logiciel de programmation utilisé pour développer des applications pour les automates programmables industriels Siemens de la série S7-200.

### III.6. Présentation de l'automate

C'est un système d'automatisation modulaire. Il est constitué d'une alimentation, d'un CPU, des modules d'entrées/sorties, module de communication et de modules spécifiques destinés à des fonctions particulières, comme montré par la figure ci-dessous.



*Figure III.2: S7-200 CPU 224 CN*

La figure II.9 présente un exemple de schéma de numérotation des entrées/sorties pour une CPU 224, qui comprend les éléments suivants :

- ✓ 14 entrées locales TOR et 10 sorties locales TOR.
- ✓ 5 modules d'extension avec les spécifications suivantes :
  - Module 0 : 4 entrées TOR / 4 sorties TOR.
  - Module 1 : 8 entrées TOR.

- Module 2 : 4 entrées analogiques / 1 sortie analogique.
- Module 3 : 8 sorties TOR.
- Module 4 : 4 entrées analogiques / 1 sortie analogique.

CPU 224 14E/10S		4E/4S	8E	4E analogique 1S analogique	8S	4 E analogique 1 S analogique			
10.0	Q0.0	Module 0		Module 2		Module 4			
10.1	Q0.1	12.0	Q2.0	13.0	AIW0	AQW0	Q3.0	AIW8	AQW4
10.2	Q0.2	12.1	Q2.1	13.1	AIW2	AQW2	Q3.1	AIW10	AQW6
10.3	Q0.3	12.2	Q2.2	13.2	AIW4		Q3.2	AIW12	
10.4	Q0.4	12.3	Q2.3	13.3	AIW6		Q3.3	AIW14	
10.5	Q0.5	12.4	Q2.4	13.4			Q3.4		
10.6	Q0.6	12.5	Q2.5	13.5			Q3.5		
10.7	Q0.7	12.6	Q2.6	13.6			Q3.6		
11.0	Q1.0	12.7	Q2.7	13.7			Q3.7		
11.1	Q1.1	E/S d'extension							
11.2	Q1.2	E/S d'extension							
11.3	Q1.3	E/S d'extension							
11.4	Q1.4	E/S d'extension							
11.5	Q1.5	E/S d'extension							
11.6	Q1.6	E/S d'extension							
11.7	Q1.7	E/S d'extension							
E/S locales									

Figure III.3: Exemple de numérotation d'E/S de la CPU 224.

### III.7. Réalisation pratique et résultats expérimentaux.

Pour notre système, on a utilisé le matériel qui comporte pour :

- **La partie opérative :**
  - Un moteur à courant continu ;
  - Une alimentation 24VDC ;
  - Un codeur incrémental de 360 impulsions par tour ;
  - Une carte de puissance à base de transistor ;
- **La partie commande :**
  - Un automate programmable Siemens S7-224 qui comporte des sorties de type PWM ;
- **La partie utilisateur :**
  - Une Interface Homme Machine (IMI) de la marque Harvest de type HTG765-UT.

**III.7.1. Mesure de vitesse de rotation :**

Pour mesurer la vitesse de rotation de notre moteur, nous avons suivi les étapes suivantes :

**- Définir le mode du compteur rapide :**

L'opération Définir mode pour compteur rapide sélectionne le mode de fonctionnement (MODE) d'un compteur rapide spécifique (HSCx). La sélection du mode définit les fonctions d'horloge, de sens, de démarrage et de remise à zéro du compteur rapide.

Dans notre cas, nous avons choisis un compteur HSC0 avec le mode 4.

Le tableau ci-dessous montre les entrées utilisées pour les fonctions d'horloge, de gestion du sens de comptage, de mise à zéro et de démarrage associé aux compteurs rapides.

Mode	Description	Entrées			
	HSC0	I0.0	I0.1	I0.2	
	HSC1	I0.6	I0.7	I1.0	I1.1
	HSC2	I1.2	I1.3	I1.4	I1.5
	HSC3	I0.1			
	HSC4	I0.3	I0.4	I0.5	
	HSC5	I0.4			
0	Compteur monophasé avec gestion interne du sens de comptage	Horloge			
1		Horloge		Mise à 0	
2		Horloge		Mise à 0	Démarrage
3	Compteur monophasé avec gestion externe du sens de comptage	Horloge	Sens de comptage		
4		Horloge	Sens de comptage	Mise à 0	
5		Horloge	Sens de comptage	Mise à 0	Démarrage
6	Compteur biphasé avec deux entrées d'horloge	Horloge, incrémentation	Horloge, décrémentation		
7		Horloge, incrémentation	Horloge, décrémentation	Mise à 0	
8		Horloge, incrémentation	Horloge, décrémentation	Mise à 0	Démarrage
9	Compteur en quadrature de phase A/B	Horloge phase A	Horloge phase B		
10		Horloge phase A	Horloge phase B	Mise à 0	
11		Horloge phase A	Horloge phase B	Mise à 0	Démarrage
12	Seuls HSC0 et HSC3 acceptent le mode 12. HSC0 compte le nombre d'impulsions sortant de Q0.0. HSC3 compte le nombre d'impulsions sortant de Q0.1.				

*Tableau III-1: Entrées pour les compteurs rapides.*

- Activer le compteur rapide

L'opération Activer compteur rapide (HSC) configure et commande le compteur rapide, selon l'état des mementos spéciaux pour compteurs rapides. Les compteurs rapides comptent des évènements rapides impossibles à gérer aux taux de cycle du S7-200. La fréquence de comptage maximale pour un compteur rapide dépend du modèle de CPU S7-200, pour notre CPU, la fréquence est de 4 à 30 kHz.

- Programmer la mesure de la vitesse

La figure (III.4) représente le programme de mesure de la vitesse de rotation de notre moteur avec l'utilisation d'un compteur rapide de type HSC.

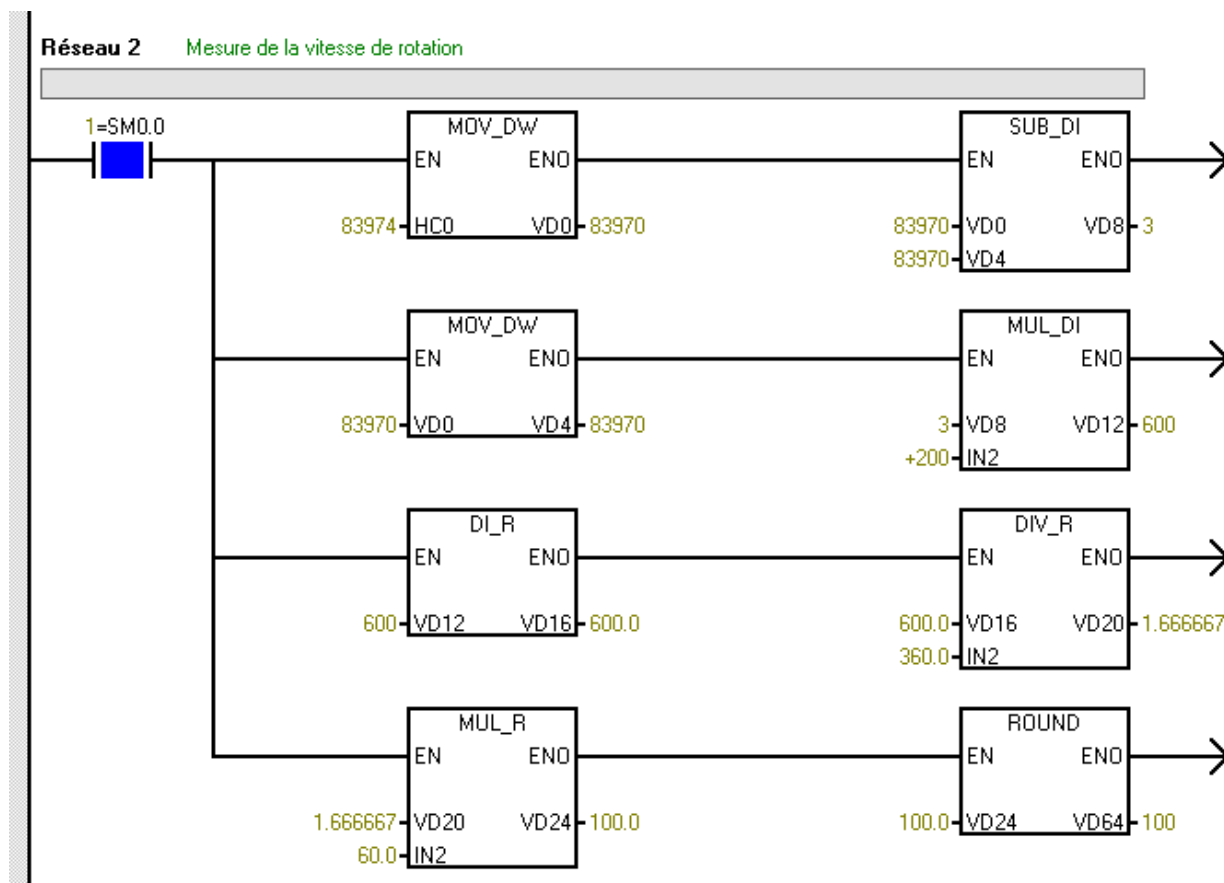


Figure III.4: programme de mesure de la vitesse de rotation du MCC.

III.7.2. Création du régulateur PID :

L'opération Calcul PID (PID) exécute un calcul de boucle PID sur la boucle LOOP référencée en se basant sur les entrées et les informations de configuration figurant dans la figure (III.5).

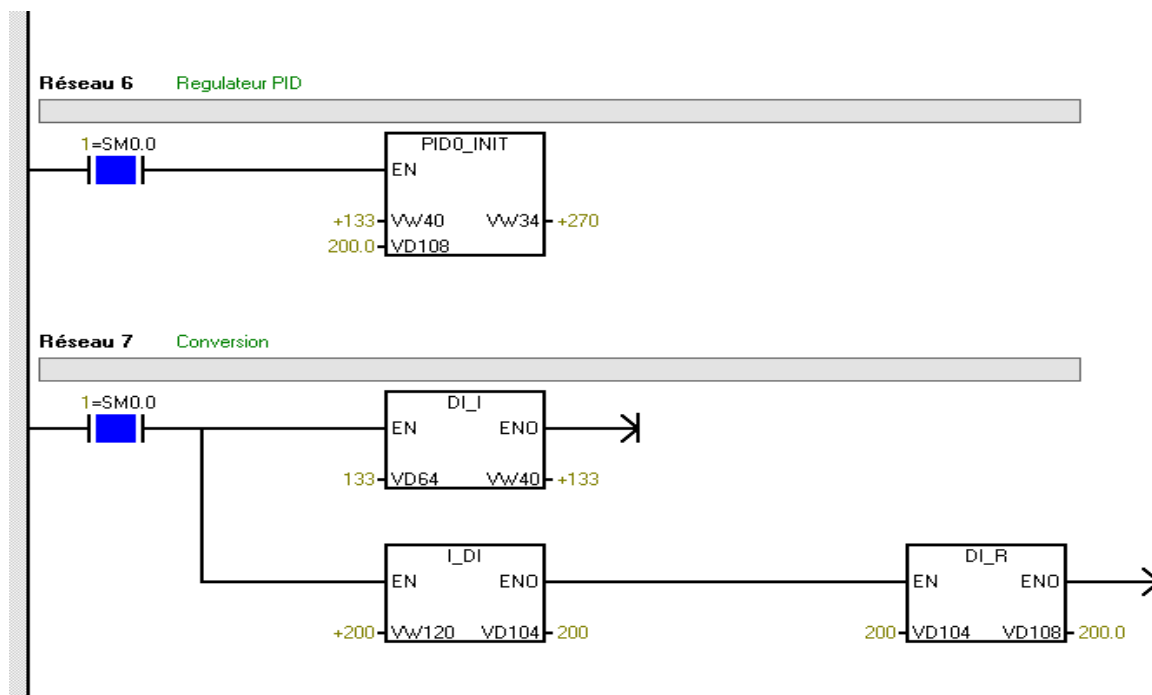


Figure III.5: bloc de régulateur PID

Sortie d'impulsions :

L'opération Sortie d'impulsions (PLS) permet de gérer les fonctions PTO (Sortie de trains d'impulsions) et PWM (Modulation de durée des impulsions) disponibles sur les sorties rapides (Q0.0 et Q0.1). Nous avons choisi une sortie PWM, en utilisant la sortie Q0.0.

La fonction PWM fournit une sortie continue avec rapport cyclique variable, nous avons géré la période avec la variable VW30 et la durée des impulsions avec une autre variable VW50.

Le réseau 5 dans la figure (III.6) montre le bloc de la sortie PWM avec une période de 1000ms et la durée d'impulsion de 10ms.

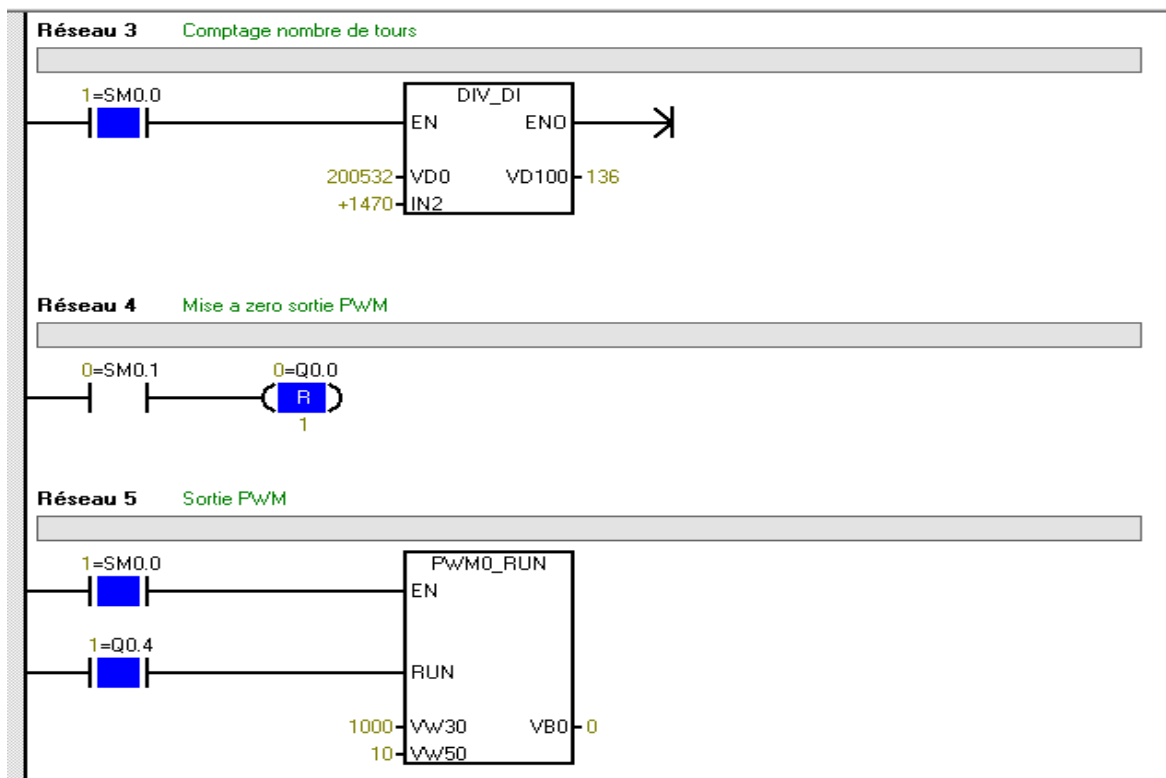


Figure III.6 : Comptage des nombres de tours, la mise à zéro de la sortie PWM et le bloc de la sortie PWM

Panneau de commande de mise au point PID

Sélectionnez une boucle ou une configuration PID à mettre au point dans la liste PID en cours. Cliquez sur le bouton Lancer mise au point pour lancer l'algorithme de mise au point. Cliquez sur le bouton Fermer pour quitter.

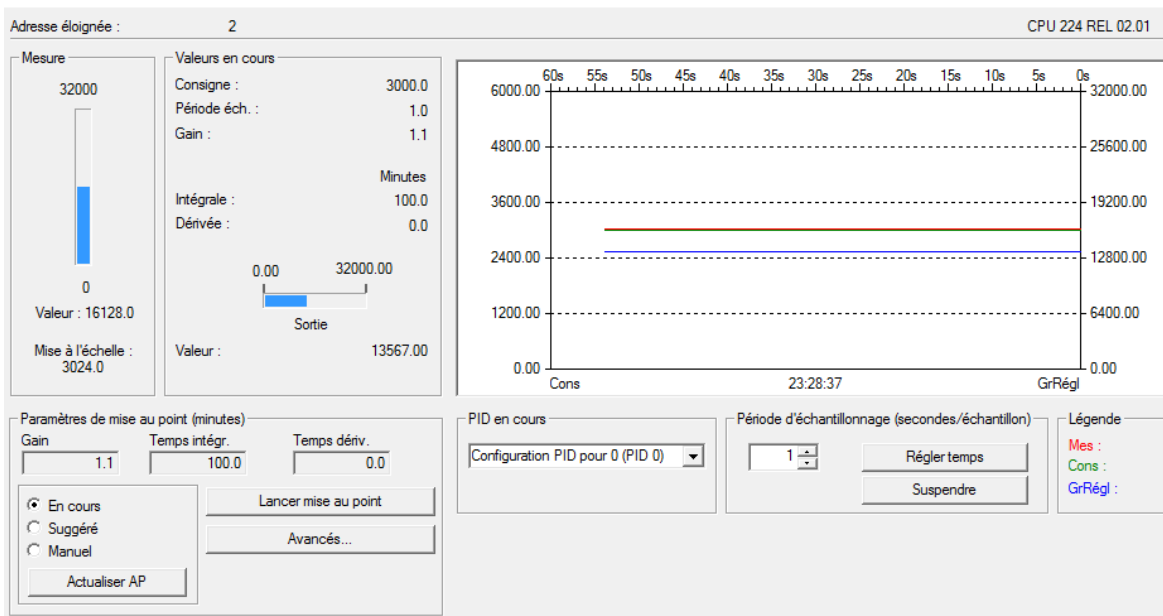


Figure III.7 : Panneau de commande de mise au point PID.

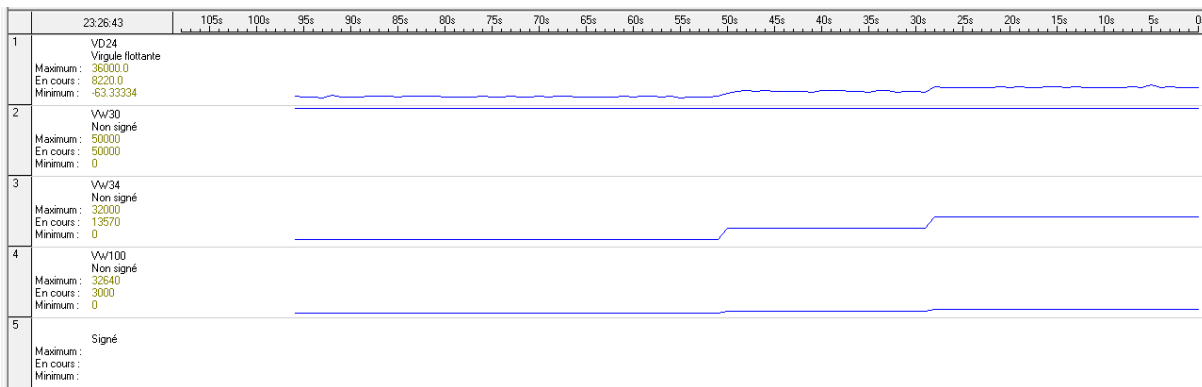


Figure III.8 : évolution de la vitesse

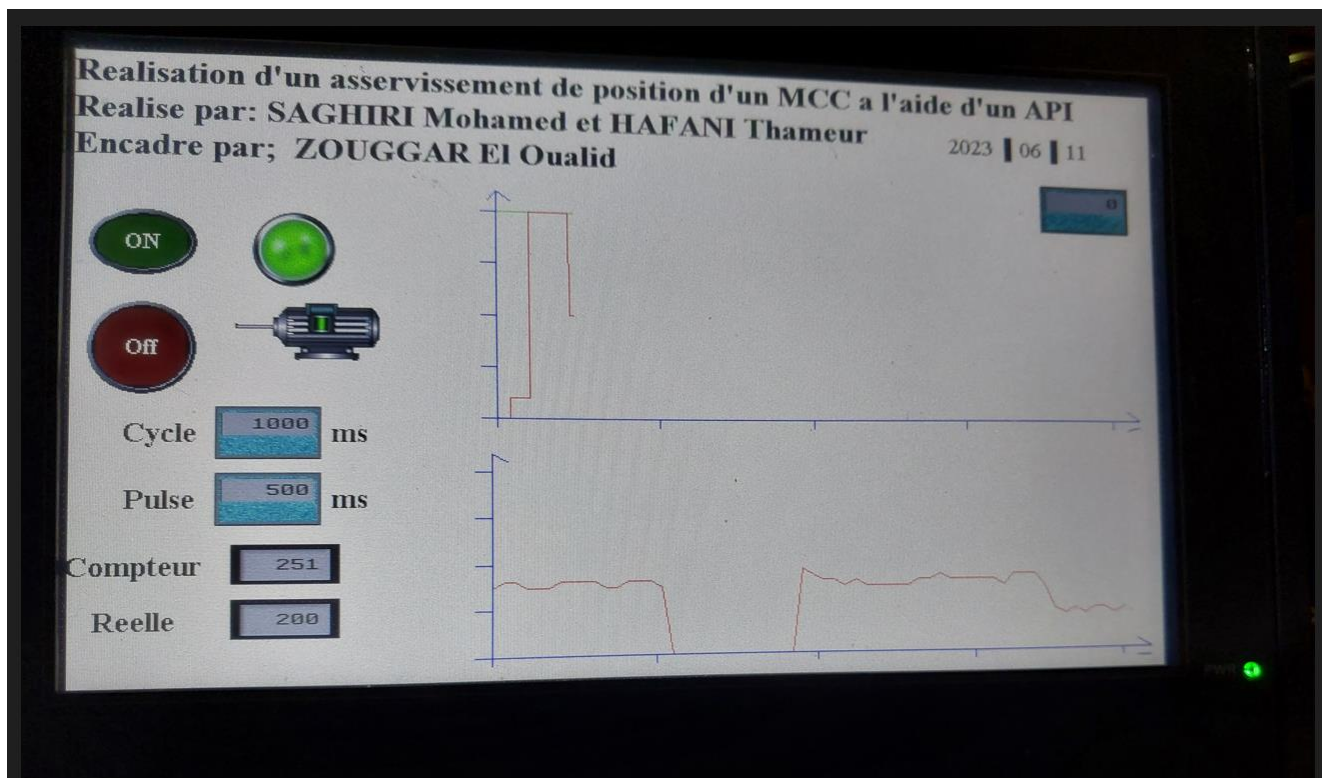


Figure III.9: Vue principale de HMI

**III.8. Conclusion**

Ce chapitre, nous présentons la définition de Hardware-in-the-Loop et pourquoi nous utilisons HIL et on conclut que cette technique permet de tester un dispositif matériel sur un simulateur avant de le mettre en œuvre. Puis, nous parlons sur l'encodeur ce qui faciliter de mesurer une vitesse. Nous avons faire une réalisation pratique et résultats expérimentaux utilisant l'automate s7 200 CPU 224 avec le logiciel Micro/Win, nous avons mesurer la vitesse de rotation avec l'utilisation d'un compteur rapide de type HSC0, et nous avons créé une régulation PID et configurer les paramètres et on conclut que les résultats de la simulation indiquent que le régulateur utilisé réagit de manière adéquate aux perturbations appliquées à la machine à courant continu.

**CONCLUSION GÉNÉRALE**

### CONCLUSION GÉNÉRALE

En raison de notre manque d'expérience en programmation et réalisation, nous avons utilisé un MCC commandé par l'automate S7 200 CPU 224 avec logiciel Micro/Win dans le cadre de ce projet pour la régulation de vitesse. Notre étude nous a permis de comprendre l'importance des API. Grâce aux avancées de l'industrie moderne, les opérateurs n'ont plus besoin de rechercher les paramètres de régulation d'un procédé industriel. Les chercheurs ont réussi à concrétiser la théorie mathématique en utilisant l'électronique et l'informatique de manière complémentaire. Cette convergence s'est étendue à plusieurs domaines industriels tels que la robotique, l'aviation et la régulation des processus industriels. Ainsi, la synthèse d'un régulateur ne se limite plus uniquement au réglage des actions P, I et D. Étant donné que ces méthodes doivent être utilisées en milieu industriel, elles doivent être simples et rapides à mettre en œuvre, tout en étant précises et efficaces. Une fois que nous avons modélisé le système moteur-convertisseur, nous avons identifié deux variables de contrôle importantes dans le modèle : le courant, qui joue un rôle crucial lors du démarrage, et la vitesse, qui est particulièrement sensible aux perturbations. Pour résoudre ces problèmes, nous avons utilisé des techniques de régulation. Au cours de notre étude, nous avons exploré la commande de vitesse d'un MCC en utilisant un automate S7 200 CPU 224 avec logiciel Micro/Win. Cette expérience nous a permis de nous familiariser avec un nouveau langage de programmation, de maîtriser la commande d'un MCC et d'approfondir nos connaissances sur ces composants. Les résultats de la simulation démontrent que le régulateur utilisé répond de manière satisfaisante aux perturbations appliquées à la machine à courant continu

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] F. Yacine, « Commande Prédictive Généralisée : Application Au Moteur A Excitation Séparée », Mémoire Master, Université Mohamed Boudiaf– M’sila, 2016.
- [2] K.Farid, H.Mohamed Lamine, « Identification et contrôle de la machine à courant continu par la Dspace 1103», Mémoire Master, Université Mouloud Mammeri– Tizi-Ouzou, 2015.
- [3] D.Abdel Hakim, H.Slimane, « Modélisation et commande de la machine à courant continu», Mémoire Master, Université Larbi Ben M’hidi – Oum-El-Bouaghi , 2021.
- [4] M.Sonia, « Commande adaptative indirecte d'un Moteur A Courant Continu», Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2012.
- [5] D.Nihed, T.Razika, « Synthèse d’un contrôleur PID pour la commande d’une MCC», Mémoire Master, Université Larbi Ben M’hidi – Oum-El-Bouaghi , 2011.
- [6] Z. Mahieddine, H. Aboubakar seddik,« Étude comparative entre deux régulateurs PID et FLC appliqués à la Machine à Courant Continu», Mémoire Master, , Université Larbi Ben M’hidi – Oum-El-Bouaghi , 2012.
- [7] Z.Azeddine, « ETUDE EXPERIMENTALE D’UN CONVERTISSEUR DC/DC CONTROLER PAR UNE COMMANDE ROBUSTE», Mémoire Magister, Université Batna, 2014.
- [8] B.Rabeh, C.Adda, « Réalisation d’un onduleur à deux niveaux triphasé commandé par MLI vectorielle», Mémoire Master, Université Ibn Khaldoun– Tiaret , 2020.
- [9] A.Nour El Wiam, N.Tayeb, B.Latifa, « Etude et simulation de la commande d'un moteur à courant continu à excitation série par un redresseur commandé», Mémoire Master, Echahid Hamma Lakhdar– -El-oued, 2019.
- [10] D.Moussa, S.Sara, « Etude et simulation d’une carte de commande à base d’un microcontrôleur PIC 16f877 pour ponts redresseurs MLI», Mémoire Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2020.
- [11] B.Ali, Z.Mohamed Ilyas, Z.Yahia, B.Ramzi, «Etude Et Simulation D'un Convertisseur AC / DC», Mémoire Master,Echahid Hamma Lakhdar– -El-oued, 2022.

## BIBLIOGRAPHIE

- [12] T.Amar, « REALISATION D'UN REDRESSEUR TRIPHASE COMMANDE PAR LA CARTE ARDUINO», Mémoire Master, Université Constantine I– Constantine, 2014.
- [13] C.Nabila, «Optimisation des Pertes de commutation d'un hacheur survolteur(BOOST) », Mémoire Master, Université Saad Dahlab – Blida, 2020.
- [14] François FADHUILE-CREPY « méthodologie de conception de circuits analogiques pour des applications radiofréquence à faible consommation de puissance » Thèse doctorat, Université de Bordeaux, France,2015.
- [15] N.Soufiane, N.Abelkrim, « Réalisation d'une carte de commande de gradateur triphasé», Mémoire Master, Echahid Hamma Lakhdar– -El-oued, 2016.
- [16] GOMRI sara, OUMHANI amal, «Conception et Réalisation des Convertisseurs AC/DC à Base du Microcontrôleur PIC16F877A», Mémoire Master, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2021.
- [17] HOUD NOUREDDINE ,OULD EL HACEN AHMED«ETUDE D'UN CONVERTISSEUR AC/DC A ABSORPTION SINUSOÏDALE DE COURANT COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE» ,Mémoire Master, 2009.
- [18] Mohamed Amine KOUSSA , Mohamed Ramzi BOUZA«Commande, Simulation et Supervision d'un prototype de station de pompage avec Automate Programmable Industriel SIEMENS S7-1200 » mémoire master, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger ,2021.
- [19] MAALEM ELHACHEMI , TAOUADJI IBRAHIM«Les langages de programmation de l'automate programmable industriel(application pilotage d'un ascenseur » Mémoire Master, UNIVERSITE d'ADRAR,2017.
- [20] G. Dhia eddine, C. Khaled, M. Elhachmi, « Contribution Des Automate Programmables Au Contrôle Des Systèmes Industriels », Mémoire Master, Echahid Hamma Lakhdar– El-oued, 2022.
- [21] K. Fouâd, D. Mohamed Zahreddine, « Réalisation et automatisation d'une machine de remplissage et bouchage des bouteilles à l'aide d'un API», Mémoire Master, Université Yahia Fares– Medea, 2022.

## **BIBLIOGRAPHIE**

[22] B. Saoussen, B. Sonia, « Commande et Supervision par Automate Programmable d'un Système Industriel », Mémoire Master, Université Larbi Tebessi– Tebessa, 2020.

[23] R.Yasser, C. abdelhak, «Commande d'un ascenseur à l'aide d'un automate programmable industriel», Mémoire Master, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2022.

## ملخص

الأتمتة عنصر ضروري في الصناعة. وفي أنظمة الأتمتة التي تهدف إلى التحكم في العمليات الفيزيائية.

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة التحكم في سرعة محرك التيار المستمر لقد طورنا برنامجا في برنامج Micro/Win ليتم تحميله في PLC للتحكم في المحرك الحالي وانتهينا من عملنا من خلال إدخال نظام إشراف لضمان الأمان / الألة واجهة والتأكد من التحكم في العملية ومراقبتها.

في نهاية هذا العمل، اكتسبنا خبرة جيدة جدًا. هذه المعرفة فيما يتعلق ببرنامج الأشراف Micro/Win ، وبرنامج PLC S7-224 والتحكم في السرعة.

أخيرا، نأمل أن يكون مشروعنا مرحلة تعليمية عملية ومفيدة لمن خلفنا لجميع أولئك الذين سيتعاملون مع نفس الموضوع.

**كلمات مفتاحية:** محرك التيار المستمر، التنظيم، النمذجة، السرعة

## Abstract

automation is a necessary element in industry. In meeting systems whose purpose is to control physical processes

The objective of this thesis is to study the speed regulation of a DC motor, we developed a program in Micro/Win software to be loaded into the PLC to control a current motor and we finished our work by introducing a supervision system to ensure the Man/Machine interface and ensure the control and monitoring of the process.

At the end of this work, we acquired a very good experience. This knowledge concerning the supervision software Micro/Win, the programming of S7-224 PLCs and the speed regulation

Finally, we hope that our project will be a practical and useful learning phase for our successors to all those who will deal with the same subject.

**Keys Words:** Direct Current Motor, regulation, modeling, speed.

## Résumé

L'automatique est un élément nécessaire dans l'industrie. En rencontre des systèmes dont le but est de contrôler

des procédés physiques

L'objectif de ce mémoire est étude de la régulation de vitesse d'un moteur à courant continu, on a développé un programme dans le logiciel Micro/Win qui sera chargé dans l'automate programmable en vue de commander un moteur a courant et on a terminé notre travail par l'introduction d'un système de supervision pour garantir l'interface Homme/Machine et assurer le contrôle et la surveillance du procédé.

Au terme de ce travail, on a acquis une très bonne expérience. Cette connaissance concernant le logiciel de supervision Micro/Win, la programmation des automates S7-224 et la régulation de vitesse

Enfin, nous espérons que notre projet sera une phase d'apprentissage pratique et utile pour nos successeurs à tous ceux qui traiteront du même sujet.

**Mots clés :** Moteur à Courant Continu, régulation, modélisation, vitesse

