

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**

**N° : MEI-11**



**FILIERE : ELECTROMÉCANIQUE**

**OPTION : MAINTENANCE DES**  
**EQUIPEMENT INDUSTRIELLES**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par: ZAROUAK Amira**

**THEME**

**Etude et réalisation d'une commande de vitesse**  
**d'une machine à courant continu à l'aide d'un**  
**ARDUINO UNO**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr. ABDOU Abdelhak	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Président
Dr. BELKHIRI Salah	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Rapporteur
Dr. ZOUGGAR El Oualid	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Co-Rapporteur
Dr. BENDAIKHA Abdelmalik	Université Mohamed Boudiaf de M'Sila	Examineur

**Année universitaire : 2022 / 2023**

# Remerciement

عن أبي هريرة رضي الله عنه عن النبي صلى الله عليه وسلم قال: «مَنْ لَمْ يَشْكُرِ النَّاسَ لَمْ يَشْكُرِ اللَّهَ»

*J'exprime mes sincères remerciements et ma gratitude à mes chers professeurs qui m'ont accompagné tout au long de ma carrière académique.*

*Surtout pour celui qui était avec moi tout le temps mon agenda mes chers professeurs*

*Dr. BELKHIRI SALAH*

*Et Dr. ZOUGGAR EL OUALID*

*Qui ont le grand crédit dans ce travail, je les remercie pour tout ce qu'ils m'ont donné en supervisant cette recherche, que Dieu les sauve*

*Vous avez tous les deux tous mes remerciements et ma gratitude*

*J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude à la commission en charge de cette discussion.*

# Dédicaces

قال عز من قائل: {يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ وَرَحْمَاتٍ} (المجادلة: 11)

اللهم كما أنعمت فزه وكما زوت فبارك وكما باركت فتمم وكما أتممت

فشئت

*Remerciez Dieu qui nous a aidés à accomplir ce travail*

*Je dédie le fruit de mon succès à celui qui m'a porté et élevé, à ma chère mère, qui est restée éveillée toute la nuit pour dormir en sécurité*

*À celui qui ne m'a épargné rien dont j'avais besoin, à celui dont les doigts étaient fatigués pour me donner le moment de bonheur cher dad Mouhamed.*

*À ceux qui ont été mon refuge et mon refuge et à ceux qui m'ont soutenu et me soutiennent encore dans la vie et mon refuge et à ceux qui m'ont soutenu et me soutiennent encore dans la vie, mes frères Nessrine, Ossama, Nour, à toute ma famille et à mes proches, à mes amis qui ont partagé mon parcours universitaire, à tous ceux qui ont un impact sur ma vie et à tous ceux que j'aime.*

## ملخص

أدى توفر محركات التيار المستمر العديد من المزايا ، بما في ذلك السرعة الممتازة والتحكم في عزم الدوران ، وقابلية الانعكاس ، والاستجابة السريعة لتغيرات الحمل ، ونطاق سرعة واسع. كما أنها تستخدم بشكل متكرر في التطبيقات التي تتطلب بداية سلسلة وتحكمًا دقيقًا في السرعة ، مثل الروبوتات والمركبات الكهربائية وأنظمة تحديد المواقع وأدوات الآلات وما إلى ذلك. الهدف الرئيسي من رسالتنا النهائية هو المساهمة في تقديم دراسة لإدراك ومحاكاة التحكم في السرعة ، باستخدام برنامج SIMULINK تحت MATLAB وسيتم تنفيذ برمجة Arduino UNO بواسطة برنامج IDE 2.1.0 ، عن طريق وضع مخطط الأسلاك لكامل.

## Résumé

Les moteurs à courant continu offrent de nombreux avantages, notamment un excellent contrôle de vitesse et de couple, une réversibilité, une réponse rapide aux variations de charge et une large gamme de vitesses. Ils sont également fréquemment utilisés dans les applications nécessitant un démarrage lisse et un contrôle de vitesse précis, tels que la robotique, les véhicules électriques, les systèmes de positionnement, les machines-outils, etc. L'objectif principal de notre mémoire de fin d'études consiste à contribuer pour présenter une étude de réalisation et de simulation d'une commande de vitesse de ces derniers, en utilisant les logiciels SIMULINK sous MATLAB et programmation de l'Arduino UNO se fera par le logiciel IDE 2.1.0, en mettant un schéma de câblage pour l'ensemble.

**Mots clés** : Machine à courant continu. MATLAB/SIMULINK, Régulateur PID, Arduino UNO.

## Abstract

DC motors offer many advantages, including excellent speed and torque control, reversibility, fast response to load variations, and a wide speed range. They are also frequently used in applications requiring smooth starting and precise speed control, such as robotics, electric vehicles, positioning systems, machine tools, etc. The main objective of our final dissertation is to contribute to present a study of the realization and simulation of a speed control of these, using SIMULINK software under MATLAB and programming of the Arduino UNO will be done by the IDE 2.1.0 software, by putting a wiring diagram for the whole...

**Keywords**: DC machine. MATLAB/ SIMULINK, PID Regulator, Arduino UNO.

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>11</b>
<b>I CHAPITRE I : Généralités sur les moteurs à courant continu .....</b>	<b>14</b>
<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>15</b>
<b>I.2 Définition du moteur à courant continu .....</b>	<b>15</b>
<b>I.3 Constitution d'un moteur à courant continu .....</b>	<b>15</b>
I.3.1 Le stator du moteur MCC (Inducteur) : .....	16
I.3.2 Le rotor du moteur à courant continu (l'induit) : .....	18
I.3.3 Le Collecteur d'un moteur à courant continu : .....	18
I.3.4 Les Balais : .....	18
<b>I.4 Le principe de Fonctionnement du moteur à courant continue :.....</b>	<b>19</b>
<b>I.5 Les Différents types d'excitation des moteurs à courant continu :.....</b>	<b>20</b>
I.5.1 Moteur à excitation séparée (indépendante) :.....	20
I.5.2 Moteur a excitation shunt :.....	22
I.5.3 Moteur à excitation série :.....	23
I.5.4 Moteur à excitation composée (compound) :.....	25
<b>I.6 Les avantages et les inconvénients des moteurs à courant continu : .....</b>	<b>26</b>
I.6.1 Les avantages : .....	26
I.6.2 Les inconvénients :.....	27
<b>I.7 Choix du moteur à courant continu :.....</b>	<b>27</b>
<b>I.8 Conclusion :.....</b>	<b>28</b>
<b>II CHAPITRE II : Modélisation et commande des moteurs à courant continu .....</b>	<b>29</b>
<b>II.1 Introduction : .....</b>	<b>30</b>

<b>II.2 Les principales équations utilisées dans la modélisation d'un moteur à courant continu avec excitation séparée :</b> .....	<b>30</b>
II.2.1 Équation électrique :.....	30
II.2.2 La force contre-électromotrice :.....	31
II.2.3 Équation du courant dans le rotor : .....	32
II.2.4 Équation mécanique :.....	33
II.2.5 Équation de couple mécanique :.....	33
II.2.6 La puissance mécanique :.....	33
II.2.7 Équation de vitesse :.....	33
II.2.8 Équation de couple :.....	33
II.2.9 L'équation de conservation de l'énergie pour le moteur :.....	34
<b>II.3 La modélisation de la machine à courant continu :</b> .....	<b>34</b>
II.3.1 Equations des tensions : .....	36
II.3.2 Equations des F.EM : .....	36
II.3.3 Equations des flux : .....	36
II.3.4 Expression du couple électromagnétique :.....	38
II.3.5 Equation du mouvement : .....	39
<b>II.4 Définition de régulateur PID :</b> .....	<b>41</b>
II.4.1 Les chaines de régulations : .....	42
<b>II.5 La carte Arduino UNO :</b> .....	<b>44</b>
II.5.1 Les composants de la carte Arduino UNO sont :.....	44
<b>II.6 Définition de driver L298N :</b> .....	<b>45</b>
<b>II.7 MATLAB/ SIMULINK :</b> .....	<b>46</b>
II.7.1 MATLAB :.....	46
II.7.2 SIMULINK : .....	47
<b>II.8 Conclusion :</b> .....	<b>47</b>

<b>III Chapitre III : Simulation et réalisation pratique de la commande d'un MCC par l'Arduino .....</b>	<b>37</b>
<b>III.1 Introduction : .....</b>	<b>38</b>
<b>III.2 Définition de Hardware-in-the-Loop (HIL):.....</b>	<b>38</b>
III.2.1 Les étapes suivantes sont généralement incluses dans le processus :.....	38
III.2.2 Le but d'utiliser de Hardware-in-the-Loop (HIL) : .....	39
III.2.3 Les avantages et les inconvénients du Hardware-in-the-Loop (HIL) :.....	39
<b>III.3 Partie simulation :.....</b>	<b>40</b>
III.3.1 Schéma bloc de MCC à excitation séparée (Independent) : .....	40
III.3.2 Résultats de Simulation sans la commande : .....	41
III.3.3 Résultats de Simulation avec la commande PID : .....	43
<b>III.4 Partie pratique : .....</b>	<b>44</b>
III.4.1 Les matériels utilisés dans ce travail : .....	45
III.4.2 Schéma de câblage :.....	45
<b>III.5 Conclusion .....</b>	<b>47</b>
<b>CONCLUSION GENERALE :.....</b>	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>50</b>

Figure I.1: Constitution de la machine à courant continu.	16
Figure I.2: Parties principales de la machine à courant continu [3].	16
Figure I.3: Le stator (l'inducteur) complet d'une machine à courant continu [3]	17
Figure I.4: La Construction du stator [1].	17
Figure I.5: Les pôles du stator.	17
Figure I.6: Le rotor (l'induit) d'un moteur à courant continu [7].	18
Figure I.7: Le Collecteur d'une machine à courant continu [3].	18
Figure I.8: Les balais [7].	19
Figure I.9: Le Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu.	20
Figure I.10 : Schéma d'un moteur à excitation séparée [3].	20
Figure I.11: Schéma électrique d'un moteur shunt [3].	22
Figure I.12: Schéma électrique d'un moteur série [3].	23
Figure I.13: Schéma électrique d'un moteur composé [3].	25
Figure II.1: Schéma électrique d'une machine à excitation séparée [16].	30
Figure II.2: Modèle de MCC en régime dynamique [15].	31
Figure II.3: Modèle de MCC en régime établi [15].	31
Figure II.4: Modèle simplifié de la MCC sur les axes d et q [12].	35
Figure II.5: Schéma équivalent d'un Moteur à excitation séparée [14].	35
Figure II.6: Schéma de blocks de MCC [15].	40
Figure II.7: Le Régulateur PID.	42
Figure II.8: Le système en boucle ouverte [18].	43
Figure II.9: Le système en boucle fermée [18].	44
Figure II.10: La description de la Carte Arduino "UNO".	45
Figure II.11: Module Driver L298N.	46
Figure III.1: Le schéma bloc de moteur à courant continu à excitation séparée sur Simulink.	41



## LISTE DES FIGURES

Figure III.2: Le courant du MCC à excitation séparée.	41
Figure III.3: La vitesse de rotation du MCC à excitation séparée.	42
Figure III.4: Courants d'excitation et le courant d'induit	42
Figure III.5: Courant d'excitation	43
Figure III.6: Le schéma bloc de moteur à courant continu avec sa commande	43
Figure III.7: vitesse de rotation du MCC avec sa consigne.	43
Figure III.8: Couples électromagnétiques du moteur	44
Figure III.9: Courant d'induit	44
Figure III.10: Photo réel de montage de travail.	46
Figure III.11: Schéma bloc de la commande HIL.	46
Figure III.12: vitesse de rotation avec sa consigne.	47

## **LISTE DES TABLEAUX**

**Aucune entrée de table d'illustration n'a été trouvée.**

## LISTE DES SYMBOLES

AC	Courant alternative
DC	Courant Continue
Bs	Champ inducteur
$\Phi$	Flux magnétique
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
F	Force de Laplace
I	Index
L	Distance
B	Majeur
M	Moteur
U	Tension
I	Courant
$P$	Constant de Laplace
$K_p$	Gain proportionnel
$K_i$	Gain intégral
E	La force électromotrice
R	Résistance
Lf	Inductance
Cr	Couple résistance
W	La vitesse
$\Omega$	La vitesse angulaire
K	Constant
$I_e$	Le courant traversant le circuit d'inducteur
$U_e$	La tension qui alimente l'inducteur
$C_e$	Couple électromagnétique
$\Phi_e$	Flux inducteur
$L_e$	Inductance
$R_e$	Résistance
$R_a$	La résistance de l'induit
$L_a$	L'inductance de l'induit
$U_a$	La tension aux bornes de l'induit
$I_a$	Le courant traversant le circuit d'induit
J	Inertie
F	Frottement
MCC	Moteur à courant continu
FT	Fonction de transfert
PID	Proportionnel, intégral, dérivé
$K_p$	Gain proportionnel
$K_i$	Gain intégral
$K_d$	Gain dérivé

**INTRODUCTION GÉNÉRALE**

### Introduction générale

Le scientifique britannique William Sturgeon a inventé le premier moteur CC (courant continu) pratique en 1832. Depuis lors, les moteurs CC font partie d'innombrables équipements et machines. Les moteurs à courant continu d'aujourd'hui vont des modèles volumineux utilisés dans les équipements industriels aux petits appareils qui peuvent tenir dans la paume de la main. Il est peu coûteux et idéal pour une utilisation dans les projets de robotique, de quadricoptère et d'Internet des objets. Un moteur à courant direct (moteur DC) est un type de moteur électrique qui convertit l'énergie électronique en mouvement mécanique. Il est largement utilisé dans un large éventail d'applications, de la maison simple à l'industrie complexe. Un moteur à courant continu fonctionne sur le principe fondamental de l'interaction entre un champ magnétique et un courant électrique [1-4]. Le moteur est composé d'un stator, qui génère un champ magnétique continu, et un rotor, qui se déplace. Lorsqu'un courant électrique passe à travers le rotor du moteur, des forces électromagnétiques agissent sur les rouleaux du rotor, provoquant la rotation du rotor. Pour inverser la direction de rotation du moteur, il suffit d'inverser la direction du courant électrique. Les moteurs à courant continu offrent de nombreux avantages, notamment un excellent contrôle de vitesse et de couple, une réversibilité, une réponse rapide aux variations de charge et une large gamme de vitesses. Ils sont également fréquemment utilisés dans les applications nécessitant un démarrage lisse et un contrôle de vitesse précis, tels que la robotique, les véhicules électriques, les systèmes de positionnement, les machines-outils, etc. Les moteurs actuels, d'autre part, ont certaines restrictions, telles que l'usure des ampoules et des collecteurs. C'est dans ce cadre s'inscrit la problématique de notre travail, par une réalisation et simulation d'une commande de vitesse de ces derniers à l'aide d'un Arduino UNO.

Ce mémoire comportera trois chapitres structurés comme suit:

- Le premier chapitre sera consacré à une introduction générale sur les moteurs à courant continu, nous couvrirons dans cette partie la construction, le principe de fonctionnement et les différents types d'excitation pour ces moteurs avec les avantages et les inconvénients de chaque type.
- Le deuxième chapitre décrira les différentes équations mathématiques régissant le comportement de cette machine et d'introduire une commande numérique PID pour contrôler la vitesse de cette dernière en utilisant une plate-forme électronique open source qui est L'Arduino.

## INTRODUCTION GENERALE

- Le dernier chapitre sera consacré aux deux types de résultats théoriquement (simulation) par le logiciel Simulink sous MATLAB et pratiquement par le logiciel Arduino IDE 2.1.0. Pour ce faire, nous définirons premièrement la technique de Hardware-in-the-Loop (HIL) afin de l'utiliser. Ensuite, nous choisirons les différents matériels utilisés dans cette réalisation.

La programmation de l'Arduino UNO se fera par le logiciel IDE 2.1.0, en mettant un schéma de câblage pour l'ensemble.

Finalement, nous clôturons notre étude par une conclusion générale résumant le contenu de cette approche à travers ce mémoire et on terminera enfin, par les perspectives de continuation de ce travail.

**I**      **CHAPITRE I : *Généralités sur les moteurs  
à courant continu***

## I.1 Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est de fournir le contexte général pour les moteurs qui nous intéressent dans ce travail, il s'agit d'un moteur à courant continu (MCC) qui est un convertisseur électromécanique qui permet une conversion bidirectionnelle de l'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique, à partir duquel l'électricité est convertie en énergie mécanique [1], [2], [3], [4]. La structure du moteur est identique à celle des générateurs, ce qui signifie que la même unité peut fonctionner à la fois comme un moteur et un générateur (Réversible).

Ce chapitre couvrira donc les moteurs à courant continu en général, leur configuration et leurs principes de fonctionnement.

## I.2 Définition du moteur à courant continu

Les moteurs à courant continu (MCC) sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie. Ils permettent la conversion d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique, à partir duquel l'électricité est convertie en énergie mécanique [1], [2], [3], [4], [5-12]. La structure des générateurs est identique à celle du moteur, ce qui signifie qu'ils peuvent convertir l'énergie mécanique reçue en énergie électrique et lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînée. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en générateur.

## I.3 Constitution d'un moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est constitué de deux parties principales :

- Une partie fixe appelée inducteur ou stator, destinée à créer le flux magnétique « B ». Cet inducteur peut être constitué d'aimants permanents ou d'une bobine alimentée par un courant continu.
- Une partie mobile appelée induit ou rotor est alimenté en courant continu. Cet induit est constitué de conducteurs et lorsque le rotor tourne, il crée aux bornes de l'ensemble des conducteurs une tension induite E.
- Les parties fixes et mobiles sont séparées l'une de l'autre par un entrefer.

Une présentation globale de la machine à courant continu avec ses différentes pièces constitutives, est montrée sur les figures ci-dessous.



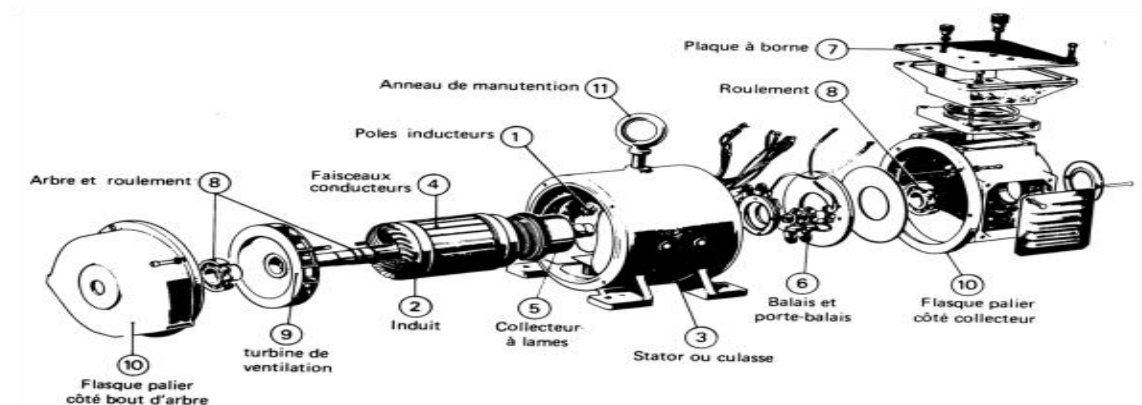


Figure I.1: Constitution de la machine à courant continu.

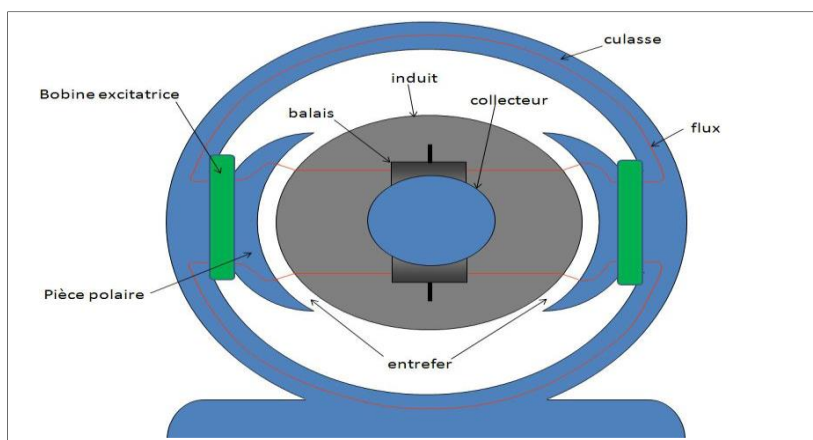


Figure I.2: Parties principales de la machine à courant continu [3].

### I.3.1 Le stator du moteur MCC (Inducteur) :

Le stator est le composant fixe de la machine, composé du carter du moteur et du circuit magnétique lui-même. La carcasse annulaire qui sert de support aux pôles inducteurs et éventuellement aux pôles auxiliaires de commutation est fréquemment utilisée pour des raisons liées au réglage et à la commutation [5]. Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique généré par une source de champ magnétique : un aimant permanent ou un électroaimant dont les bobinages sont traversés par le courant continu d'excitation (l'induit). Les bobines sont fixées dans une culasse, qui est généralement en fonte, et les pièces polaires sont construites en tôle d'acier doux. Ce sont des excitatrices à courant continu [3]. Le champ magnétique créé par le circuit magnétique du stator est appelé « champ inductif ». En établissant un flux magnétique ( $\Phi$ ) dans l'entrefer, l'inducteur magnétise le moteur. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et du rotor. Le flux magnétique est le plus élevé aux pôles magnétiques [2], comme le montrent les figures (1.3) et (1.4).



Figure I.3: Le stator (l'inducteur) complet d'une machine à courant continu [3]

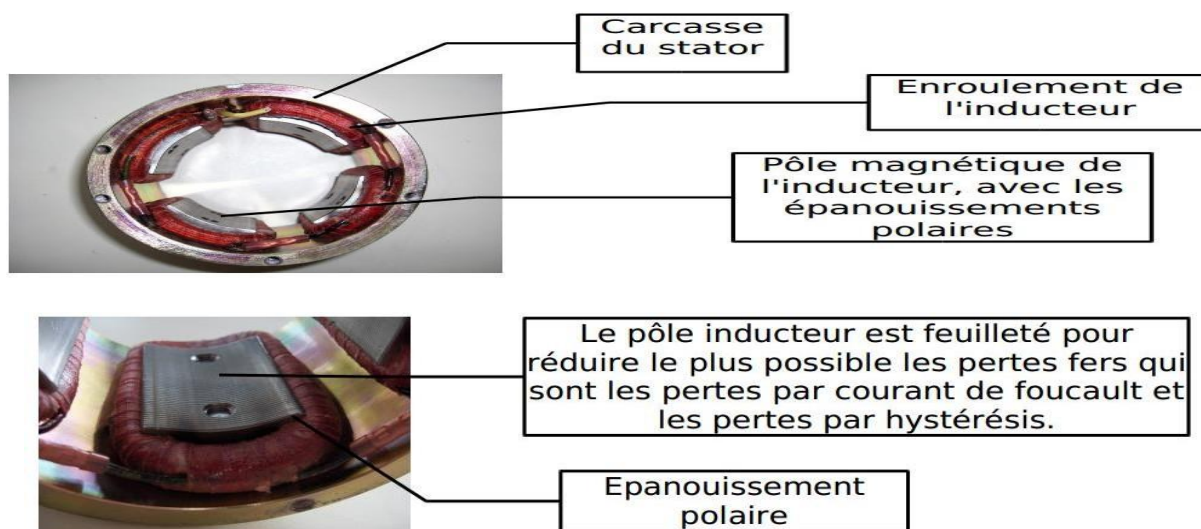


Figure I.4: La Construction du stator [1].

Revenons à la photo d'ensemble pour la commenter d'un point de vue magnétique figure (1.5) :

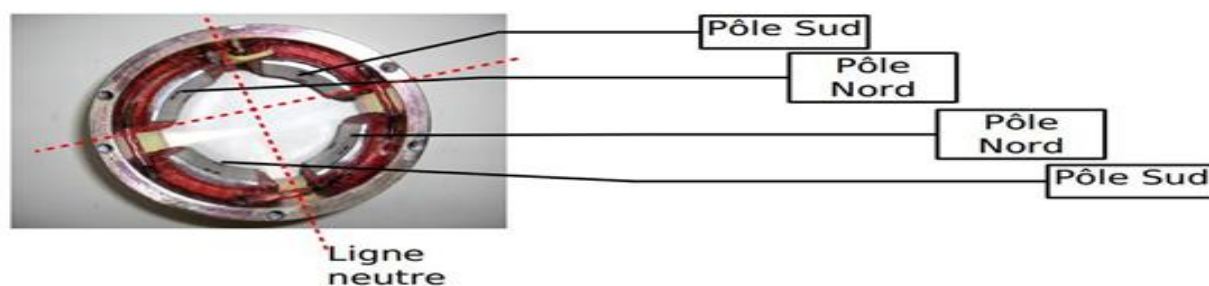


Figure I.5: Les pôles du stator.

Ce moteur comprend deux ensembles de pôles inducteurs (Nord - Sud) pour répartir plus uniformément le flux magnétique dans toute la machine. Les lignes de champ magnétique s'étendent du nord au sud à partir du pôle Nord. Pour une direction du courant d'inductance, la disposition des pôles est spécifiée. Le pôle Sud devient un pôle Nord lorsque le courant s'inverse, et inversement. C'est

un moyen d'inverser la rotation du moteur, mais il est rarement utilisé. Les forces électromotrices produites dans les conducteurs sont nulles lorsque la spire, ou section, de l'induit (dans le paragraphe suivant) est sur la "ligne neutre", et la bobine est court-circuitée par les balais [1].

### I.3.2 Le rotor du moteur à courant continu (l'induit) :

C'est la partie tournante d'une machine à courant continu, constituée d'un noyau magnétique constitué d'un empilement de tôles magnétiques isolées, les tôles de l'induit sont entaillées par emboutissage pour loger les conducteurs des bobines d'enroulement de l'induit. Chaque tour, ou plus fréquemment, chaque segment de l'enroulement d'induit, est soulagé par une lame de collecteur. Les balais sont utilisés pour fournir de l'électricité à l'armature. Les parties fixe et mobile sont séparées par un entrefer, et cette partie est constituée d'une ou plusieurs bobines tournant dans des champs magnétiques ; c'est le siège d'une Force Électromotrice 'F-E-M', induit alterné [5] (figure (1.6)).



*Figure I.6: Le rotor (l'induit) d'un moteur à courant continu [7].*

### I.3.3 Le Collecteur d'un moteur à courant continu :

Il est également mobile, avec la fonction de convertir le courant alternatif induit en courant unidirectionnel (continu). Il est constitué de lames de cuivre de section trapézoïdale séparées par des feuilles de mica. Il est attaché à l'arbre mais en est séparé ; chacun a une ailette de connexion à l'enroulement d'induit [3] (figure (1.7)).



*Figure I.7: Le Collecteur d'une machine à courant continu [3].*

### I.3.4 Les Balais :

Les balais établissent une connexion électrique (contact glissant) entre les pièces fixes et tournantes. La mise en parallèle des balais est donc indispensable pour les machines de forte puissance [7], (comme on le voit sur la figure (1.8)).



*Figure I.8: Les balais [7].*

## I.4 Le principe de Fonctionnement du moteur à courant continue :

Comme mentionné précédemment, nous avons vu que le moteur à courant continu se compose de :

- L'inducteur ou du stator,
- L'induit ou du rotor,
- Collecteur et des balais.

Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent (comme la figure ci-dessous), il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud. Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique.

De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteur. D'après la loi de Laplace ( $F = I * L \wedge B$ ),  $F$  : force de Laplace,  $I$  : index et  $B$  : Majeur "Tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force",

Les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces  $F$  égales mais de sens opposé en créant un couple moteur : l'induit se met à tourner

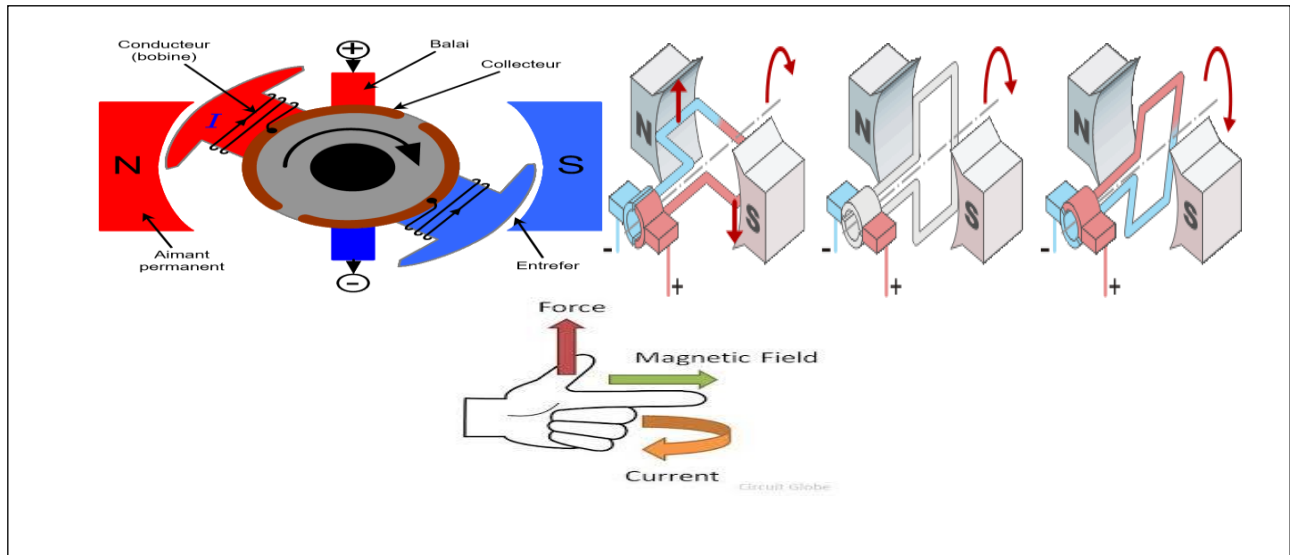


Figure I.9: Le Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu.

### I.5 Les Différents types d'excitation des moteurs à courant continu :

Ces types de moteurs ont des caractéristiques différentes en termes de vitesse, de couple et d'efficacité, et sont utilisés dans une variété d'applications industrielles, commerciales et résidentielles.

#### I.5.1 Moteur à excitation séparée (indépendante) :

Le moteur à excitation indépendant est composé de deux enveloppes induites et inductrices qui sont alimentées à partir de deux sources différentes. Une source continue de tension ( $V_f$ ) et de courant ( $I_f$ ) excite un inducteur avec résistance ( $R_f$ ) ( $I_f$ ). Une force électromagnétique excite une résistance d'induction et une force électromotrice ( $R_f$ ,  $I_f$ ,  $E$ ). Le graphique montre les sources de tension ( $V_a$ ) et de courant ( $I_f$ ). (1.9).

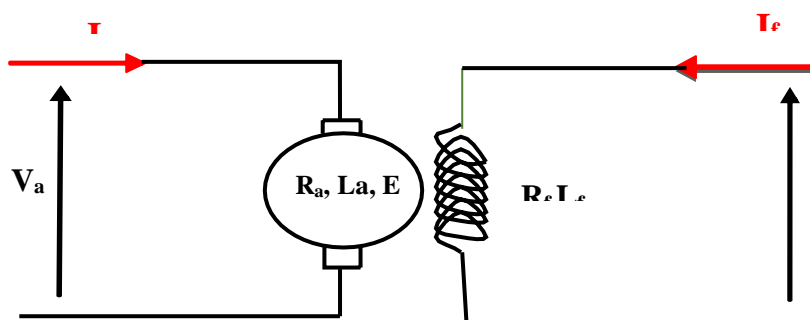


Figure I.10 : Schéma d'un moteur à excitation séparée [3].

L'équation qui décrit le comportement d'un moteur à excitation séparée est similaire à celle d'un moteur à courant continu classique, à savoir :

$$V_a = E + I_a R_a + E_b \quad [\text{Volt}] \quad (I.1)$$

Avec :

$V_a$  : Tension d'alimentation du circuit induit [Volt].

$I_a$  : Courant d'induit [ampère].

$R_a$  : Résistance du circuit d'induit [Ohm].

$L_a$  : Inductance du circuit d'induit [Henry].

$V_f$  : Tension du circuit d'excitation [Volt].

$I_f$  : Courant d'excitation [Ampère].

$R_f$  : Résistance du circuit d'excitation [Ohm].

$L_f$  : Inductance du circuit d'excitation [Henry].

$E$  : Force électromotrice [Volt].

$E_b$  est la force contre-électromotrice (ou tension de contre-réaction) générée dans l'excitation du moteur donnée par l'équation suivante :

$$E_b = K_f * I_f \quad [\text{Volt}] \quad (I.2)$$

Où :

$K_f$  : la constante de force contre-électromotrice du moteur

$I_f$  : le courant dans l'excitation

En utilisant ces équations, il est possible de calculer les caractéristiques de fonctionnement d'un moteur à excitation séparée, telles que la vitesse de rotation, le couple et l'efficacité.

Les caractéristiques d'un moteur à excitation séparée (indépendante) sont les suivantes :

- 1- Contrôle de vitesse précis : Comme mentionné précédemment, l'un des principaux avantages d'un moteur à excitation séparée est qu'il permet un contrôle de vitesse précis en raison de la capacité à contrôler indépendamment le champ magnétique.
- 2- Fort couple de démarrage : Les moteurs à excitation séparée peuvent fournir un couple de démarrage élevé grâce à la possibilité de fournir un courant d'excitation élevé pour générer un champ magnétique puissant.
- 3- Adaptabilité à différentes tensions d'alimentation : Les moteurs à excitation séparée peuvent être conçus pour fonctionner avec différentes tensions d'alimentation pour s'adapter à diverses applications.

- 4- Faible bruit : Les moteurs à excitation séparée produisent généralement moins de bruit que les autres types de moteurs à courant continu en raison de la régulation précise de la vitesse.
- 5- Facilité d'entretien : Les moteurs à excitation séparée sont généralement plus faciles à entretenir que les autres types de moteurs à courant continu en raison de la séparation de l'excitation et du circuit du rotor, qui permet une maintenance plus facile et plus rapide.
- 6- Coût élevé : Les moteurs à excitation séparée peuvent être plus coûteux que les autres types de moteurs à courant continu en raison de la complexité de leur conception et de leur construction. Cependant, le contrôle précis de la vitesse et du couple qu'ils offrent peut justifier leur coût plus élevé dans certaines applications critiques.

### I.5.2 Moteur a excitation shunt :

Lorsque l'inducteur est au bord de l'induction, le moteur d'excitation (parallèle). Le circuit inducteur est alimenté par une source de tension constante ( $V_a$ ) et un courant ( $I_n$ ). Un courant passe à travers un soi ( $I_f$ ) et une résistance ( $R_f$ ) ( $I_f$ ). Un courant ( $I_a$ ) passe par l'induction avec une résistance, une induction et une force électromotrice  $R$  ( $R_a$ ,  $L_a$ ,  $E$ ) (comme la figure ci-dessous).

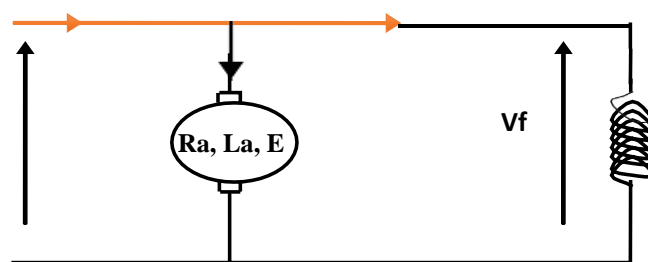


Figure I.11: Schéma électrique d'un moteur shunt [3].

- L'équation du moteur à excitation shunt est la suivante :

$$E = V_a - I_a R_a - I_f R_f \quad [\text{Volt}] \quad (I.3)$$

Avec :

$V_a$  : Tension d'alimentation du circuit induit [Volt].

$I_a$  : Courant d'induit [ampère].

$R_a$  : Résistance du circuit d'induit [Ohm].

$L_a$  : Inductance du circuit d'induit [Henry].

$V_f$  : Tension du circuit d'excitation [Volt].

$I_f$  : Courant d'excitation [Ampère].

$R_f$  : Résistance du circuit d'excitation [Ohm].

$L_f$  : Inductance du circuit d'excitation [Henry].

$E$  : la force électromotrice (FEM) du moteur [Volt].

Le couple développé par le moteur est proportionnel au courant d'armature, et la vitesse de rotation est inversement proportionnelle à la F.E.M. Ainsi, en augmentant la tension d'excitation, on peut augmenter la vitesse de rotation du moteur.

Les principales caractéristiques des moteurs à excitation shunt :

- 1- Vitesse constante : Les moteurs à excitation shunt ont une vitesse de rotation relativement constante, même lorsque la charge varie.
- 2- Couple élevé : Ces moteurs sont capables de fournir un couple élevé à des vitesses de rotation relativement faibles.
- 3- Contrôle facile : La vitesse de ces moteurs peut être facilement contrôlée en ajustant la tension d'excitation.
- 4- Faible courant de démarrage : Les moteurs à excitation shunt ont un faible courant de démarrage, ce qui les rend adaptés aux applications où des charges lourdes doivent être démarrées.
- 5- Faible maintenance : Ces moteurs ont une construction simple et sont faciles à entretenir.

### 1.5.3 Moteur à excitation série :

Ce moteur est composé de deux rouleaux induits et d'un inducteur qui sont reliés en séquence. (Même courant). Il est propulsé par une source de tension et de courant qui charge l'induction, la résistance, l'inductance et la force contre le moteur électrique, ainsi qu'un résistor et un inducteur [3].

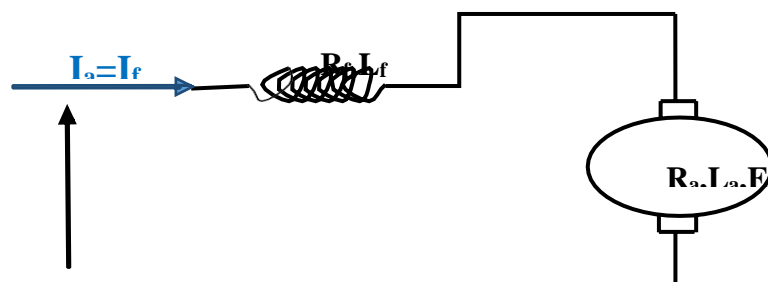


Figure I.12: Schéma électrique d'un moteur série [3].



Avec :

$V_a$  : Tension d'alimentation du circuit d'induit (Volt).

$I_a$  : Courant d'induit (Ampère).

$R_a$  : Résistance du circuit d'induit (Ohm).

$L_a$  : Inductance du circuit d'induit (Henry).

$V_f$  : Tension du circuit d'excitation (Volt).

$I_f$  : Courant d'excitation (Ampère).

$R_f$  : Résistance du circuit d'excitation (Ohm).

$L_f$  : Inductance du circuit d'excitation (Henry).

$E$  : Force électromotrice (Volt).

- L'équation du moteur à excitation série est donnée par :

$$V = E + I_a * R_a + I_a * L_a * d/dt + I_a * K_e \quad [Volt] \quad (I.4)$$

Où :

$V$  : est la tension d'alimentation du moteur (Volt).

$E$  : est la tension contre-électromotrice (CEM) du moteur (Volt).

$I_a$  : est le courant d'armature du moteur (Ampère).

$R_a$  : est la résistance de l'induit du moteur (Ohm).

$L_a$  : est l'inductance de l'induit du moteur (Henry).

$K_e$  : est la constante électromécanique du moteur.

Les moteurs à excitation série sont un type de moteur électrique qui ont les caractéristiques suivantes :

- 1- La caractéristique principale d'un moteur à excitation série est que le champ magnétique est produit par le même courant qui alimente l'induit, ce qui signifie que le flux magnétique dans la machine est proportionnel au courant dans le circuit.
- 2- Les moteurs à excitation série sont des moteurs à courant continu, ce qui signifie que l'alimentation électrique doit être fournie sous forme de courant continu.
- 3- Ces moteurs sont connus pour avoir un couple élevé à basse vitesse, ce qui les rend particulièrement adaptés pour les applications nécessitant une forte force de démarrage, comme les grues, les treuils, les machines-outils, etc.
- 4- Ils ont une vitesse qui varie en fonction de la charge, c'est-à-dire que leur vitesse diminue à mesure que la charge augmente.

- 5- Ces moteurs sont souvent utilisés dans des applications qui nécessitent une vitesse de rotation variable et un couple constant, comme dans les trains électriques, les tramways, les moteurs de propulsion marine, etc.
- 6- Ils sont également connus pour leur grande stabilité à la variation de charge, ce qui signifie qu'ils peuvent fonctionner à des charges variables sans subir de dommages importants.
- 7- Ils sont souvent moins coûteux que d'autres types de moteurs, car ils sont relativement simples à construire et à entretenir. Cependant, ils sont également moins efficaces que d'autres types de moteurs et peuvent nécessiter une régulation de la vitesse pour éviter les surcharges.

#### I.5.4 Moteur à excitation composée (compound) :

Il a deux enveloppes inductives, l'une en série avec l'induction et l'autre en parallèle [3].

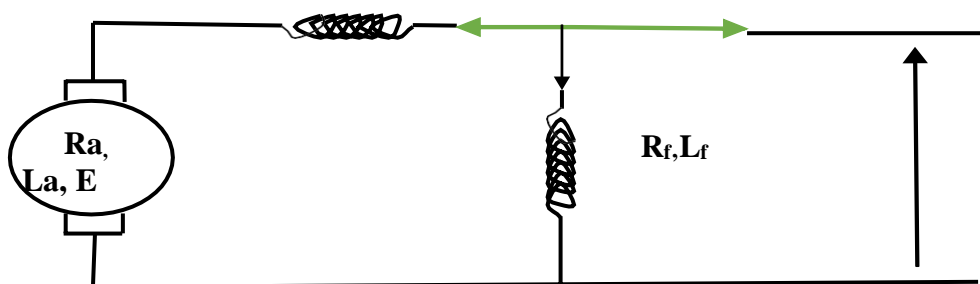


Figure I.13: Schéma électrique d'un moteur composé [3].

Avec :

$V_a$  : Tension d'alimentation du circuit induit [Volt].

$I_a$  : Courant d'induit [Ampère].

$R_a$  : Résistance du circuit d'induit [Ohm].

$L_a$  : Inductance du circuit d'induit [Henry].

$V_f$  : Tension du circuit d'excitation [Volt].

$I_f$  : Courant d'excitation [Ampère].

$R_f$  : Résistance du circuit d'excitation [Ohm].

$L_f$  : Inductance du circuit d'excitation [Henry].

$E$  : Force électromotrice [Volt].

- L'équation du moteur à excitation composée (compound) est donnée

$$V = E_{sh} + E_s + I_a * R_a + I_a * L_s * d/dt + (I_a * K_{sh}) + (I_a * K_s) \text{ [Volt]} \quad I.5)$$

Où :

$V$  : est la tension d'alimentation du moteur [Volt].

$E_{sh}$  : est la tension contre-électromotrice (CEM) du moteur en excitation shunt [Volt].

$E_s$  : est la tension contre-électromotrice (CEM) du moteur en excitation série [Volt].

$I_a$  : est le courant d'armature du moteur [Ampère].

$R_a$  : est la résistance de l'induit du moteur [Ohm].

$L_s$  : est l'inductance de l'induit du moteur en excitation série [Henry].

$K_{sh}$  : est la constante électromécanique du moteur en excitation shunt ;

$K_s$  : est la constante électromécanique du moteur en excitation série.

Le moteur à excitation composée est un type de moteur électrique qui combine les avantages de l'excitation série et de l'excitation shunt. Voici quelques caractéristiques clés de ce type de moteur :

- 1- Couple élevé au démarrage : Comme pour les moteurs à excitation série, le moteur à excitation composée a un couple élevé au démarrage en raison de la configuration en série de l'enroulement de l'induit.
- 2- Vitesse stable en charge : Comme pour les moteurs à excitation shunt, le moteur à excitation composée a une vitesse relativement stable en charge en raison de la configuration en parallèle de l'enroulement shunt de l'induit.
- 3- Réglage de la vitesse : Le moteur à excitation composée permet un réglage de la vitesse en ajustant le courant dans l'enroulement shunt.
- 4- Courant d'armature élevé : Le moteur à excitation composée a tendance à avoir un courant d'armature plus élevé que les moteurs à excitation shunt ou les moteurs à excitation série en raison de la combinaison des deux enroulements.
- 5- Compromis entre les performances : Le moteur à excitation composée est un compromis entre les performances des moteurs à excitation série et des moteurs à excitation shunt, offrant un équilibre entre le couple élevé au démarrage et la vitesse stable en charge.

En raison de ses caractéristiques, le moteur à excitation composée est souvent utilisé dans les applications nécessitant un couple élevé au démarrage et une vitesse stable en charge, tels que les ascenseurs, les machines-outils et les ventilateurs industriels.

## **I.6 Les avantages et les inconvénients des moteurs à courant continu :**

### **I.6.1 Les avantages :**

L'avantage principal des moteurs à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation : les variateurs de vitesse, voire leur raccordement direct à la source d'énergie : batteries d'accumulateur, piles, etc.

- ✓ Ils ne nécessitent pas d'électronique pour les piloter ;
- ✓ Ils peuvent être branchés directement sur une alimentation, des batteries, un variateur de vitesse, ou une carte de positionnement associée à un signal de copie ;
- ✓ Possibilité d'entraîner de très fortes inerties ;
- ✓ Forte constante de temps mécanique ;
- ✓ Forte capacité à entraîner des surcharges élevées imprévisibles ralentissant le moteur. Son courant étant proportionnel au couple, le moteur courant continu peut franchir des pointes de couple, et ainsi éviter les phénomènes de décrochage.

### **I.6.2 Les inconvénients :**

La commutation du moteur à balais nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de pièces mécaniques (porte balais) permettant de réaliser la liaison par frottement entre les charbons et le collecteur. Il en découle que :

- ✓ Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important,
- ✓ Il est nécessaire de trouver la qualité de balais la mieux adaptée aux fonctionnements du moteur ;
- ✓ L'usure des balais, la dégradation de l'état de surface des collecteurs, la pollution à la poussière de charbon sont des paramètres influents de manière négative sur le bon fonctionnement des moteurs courant continu.

### **I.7 Choix du moteur à courant continu :**

Le choix d'un moteur à courant continu dépend de plusieurs critères, tels que :

- 1- **Puissance requise** : La puissance requise pour la charge entraînée doit être prise en compte pour choisir la taille du moteur à courant continu.
- 2- **Tension d'alimentation** : La tension d'alimentation disponible doit être prise en compte pour choisir un moteur à courant continu avec la bonne tension nominale.
- 3- **Vitesse** : La vitesse de rotation requise pour la charge doit être prise en compte pour choisir le bon moteur à courant continu avec la bonne vitesse nominale.

- 4- **Couple** : Le couple requis pour la charge doit être pris en compte pour choisir un moteur à courant continu avec le couple nominal approprié.
- 5- **Durée de vie** : La durée de vie prévue du moteur doit être prise en compte pour choisir un moteur à courant continu avec une durée de vie appropriée.
- 6- **Environnement** : L'environnement dans lequel le moteur sera utilisé doit être pris en compte pour choisir un moteur à courant continu avec les caractéristiques appropriées, telles que la protection contre l'humidité et la poussière.
- 7- **Prix** : Le prix du moteur à courant continu doit également être pris en compte pour choisir un moteur qui convient au budget.

## I.8 Conclusion :

Comme on l'a vu dans ce chapitre la construction des moteurs est identique à celle des génératrices, de sorte qu'une machine à courant continu peut servir distinctement, comme moteur ou comme génératrice.

L'utilisation des moteurs à courant continu est plutôt limitée, car la distribution se fait souvent à courant alternatif.

Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'utiliser des moteurs à courant continu alimentés par des convertisseurs qui transforment le courant alternatif en courant continu.

La prédominance de ces moteurs demeure dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse. La mise en place des modèles mathématiques régissant le comportement de ces moteurs ainsi que différents modes de commande en termes de vitesse feront l'objet du chapitre suivant.

## CHAPITRE II : MODELISATION ET COMMANDE DES MOTEURS A COURANT CONTINU

### II.1 Introduction :

La modélisation est la première étape de l'étude du comportement de chaque système. Le moteur à courant continu sera reconnu métriquement dans ce cas. Commencant par la dérivation des équations électriques qui traduisent les phénomènes physiques de MCC et de son fonctionnement. La fonction de transfert est ensuite obtenue à l'aide du logiciel MATLAB [13]. Un moteur à courant continu à excitation séparée est un type de moteur électrique où le stator (partie fixe) et le rotor (partie mobile) sont tous deux alimentés en courant continu, mais avec des circuits électriques distincts. Le rotor est excité par une source de courant séparée, tandis que le stator est alimenté par une autre source de courant séparée.

Pour modéliser un tel moteur, on peut utiliser une équation de base qui relie la tension d'alimentation, la vitesse de rotation, le courant et le couple développé par le moteur. Cette équation est connue sous le nom de loi de Faraday. Le chapitre se terminera par une conclusion.

### II.2 Les principales équations utilisées dans la modélisation d'un moteur à courant continu avec excitation séparée :

Un moteur à courant continu avec excitation séparée est un type de moteur électrique dans lequel l'inductance de champ (ou inductance d'excitation) est séparée du circuit d'armature. Les principales équations utilisées pour modéliser ce type de moteur sont :

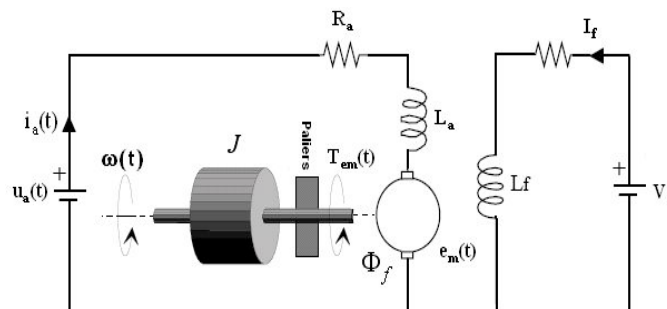


Figure 0.1: Schéma électrique d'une machine à excitation séparée [16].

#### III.2.1 Équation électrique :

Lorsque l'induit est alimenté sous une tension continue ou redressée  $V_a$ , il se produit une force contre-électromotrice  $E_b$ .

L'équation électrique d'un moteur à courant continu à excitation séparée est la suivante :

La tension aux bornes de l'induit "On considère le régime comme dynamique s'il n'est pas établi" est donnée par :

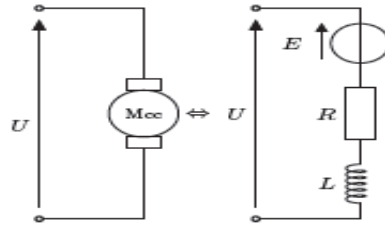


Figure 0.2: Modèle de MCC en régime dynamique [15].

➤ L'équation électrique en régime dynamique :

$$V_a = R_a I_a + L \frac{dI_a}{dt} + E_b \text{ [Volts]} \quad (\text{II-1})$$

Le courant de l'induit étant constant, en régime permanent d'où (Loi d'Ohm) "On considère le régime comme établi s'il n'y a pas de variation de vitesse ou de tension" est :

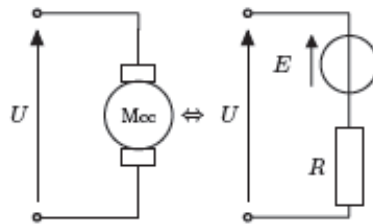


Figure 0.3: Modèle de MCC en régime établi [15].

➤ L'équation électrique en régime établi :

$$V_a = R_a I_a + E_b \quad \text{[Volts]} \quad (\text{II-2})$$

Avec:

$R_a$ : Résistance de l'induit [Ohm].

$I_a$ : courant d'induit [Ampère].

$V_a$ : la tension appliquée [Volts].

$E_b$ : la force électromotrice générée par le moteur [volts].

## II.2.2 La force contre-électromotrice :

La force contre-électromotrice ( $E_b$ ) est la tension produite par le rotor (l'induit) lors de sa rotation dans le flux magnétique produit par la partie fixe (l'inducteur), elle dépend des éléments de construction de la machine, elle est liée à la vitesse et au flux du moteur "à l'excitation du moteur (Loi de Faraday)", donnée par :

$$E_b = K_m \phi \Omega \text{ [volts]} \tag{II-3}$$

Avec :

$\Omega$  : est la vitesse de rotation en tours par minute.

$K_m$  : Constante connue sous le nom de constante du moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit)  $K = \frac{2\tau}{6\tau}$  (a = nombre de paires de voies d'enroulements).

$\Omega$  : est la vitesse de rotation en tours par minute.

$K_m$  : Constante connue sous le nom de constante du moteur (dépendant du nombre de conducteurs de l'induit).

$\Phi$  : Le Flux magnétique produit par l'enroulement de champ "d'induit "[weber].

E : La force électromotrice [Volts].

$\Phi$  : Le Flux magnétique produit par l'enroulement de champ "d'induit "[weber].

E : La force électromotrice [Volts].

On peut également exprimer la FCEM en fonction du courant d'excitation  $I_e$  et du courant de charge  $I_a$  :

$$E_b = k (\Phi N - I_e R_f) - I_a R_a \text{ [volts]} \tag{II-4}$$

Avec :

$E_b$  est : la FCEM en [volts].

$k$  : est une constante de proportionnalité dépendant des caractéristiques de la machine.

$\Phi$  : est le flux magnétique dans le circuit magnétique de la machine en [webers].

$N$  : est la vitesse de rotation en tours par minute [tr/min].

$R_f$  : est la résistance interne de la machine [Ohm].

$R_a$  : est la résistance de l'induit [Ohm].

$I_a$  : est le courant de charge [Ampère].



Cette équation montre que la FCEM dépend non seulement du flux magnétique et de la vitesse de rotation, mais aussi des résistances internes de la machine et des courants d'excitation et de charge.

### II.2.3 Équation du courant dans le rotor :

Le courant dans le rotor peut être déterminé à partir de l'équation de la tension dans le rotor et de la résistance interne du rotor :

$$I_a = (E - V_b) / R_a [\text{Ampère}] \quad (\text{II-5})$$

Où :

$I_a$  : courant dans le rotor "d'induit" [Ampère].

$E$  : tension induite dans le rotor [Volts].

$V_b$  : tension de la source d'excitation [Volts].

$R_a$  : résistance interne du rotor "l'induit" [Ohm].

### II.2.4 Équation mécanique :

Les équations mécaniques d'un moteur à courant continu avec excitation séparée :

Le couple de moteur (électromagnétique) est lié au courant d'induit et au flux est :

$$C_{em} = k_m I_a \phi \quad [\text{N.m}] \quad (\text{II-6})$$

Avec :

$C_{em}$  : Couple électromagnétique de la machine [N.m].

### II.2.5 Équation de couple mécanique :

Le couple mécanique ( $C_m$ ) produit par le moteur est donné par :

$$C_m = K_t I_a [\text{N.m}] \quad (\text{II-7})$$

Où :

$K_t$  : est la constante de couple du moteur en [Nm/A].

### II.2.6 La puissance mécanique :

$$P = T \times \omega \quad [\text{Watt}] \quad (\text{II-8})$$

Avec :

$P$  = puissance mécanique [Watt].

$T$  = couple de moteur [N.m].

$\omega$  = Vitesse de rotation angulaire (rad.s<sup>-1</sup>).

### II.2.7 Équation de vitesse :

L'équation de vitesse d'un moteur à courant continu avec excitation séparée est :

$$N = (V - R_a I_a) / k \Phi \text{ [rad/s]} \quad (\text{II-9})$$

### II.2.8 Équation de couple :

L'équation de couple d'un moteur à courant continu à excitation séparée est :

$$I_a = (C_{em} - k \Phi N) / R_a \text{ [Ampère]} \quad (\text{II-10})$$

### II.2.9 L'équation de conservation de l'énergie pour le moteur :

L'équation de conservation de l'énergie pour le moteur est donnée par :

$$E = V + R_a I_a + k \Phi N + C_{em} \quad \text{[Volts]} \quad (\text{II-11})$$

Où :

$E$  : est la FEM [Volts].

$V$  : est la tension d'alimentation [Volts].

$I_a$  : est le courant d'armature [Ampère].

$R_a$  : est la résistance d'armature [Ohm].

$\phi$  : est le flux magnétique produit par l'inductance de champ [weber].

$N$  : est la vitesse de rotation [tr/min].

$C_{em}$  : est le couple électromagnétique [N.m].

En utilisant les équations ci-dessus, nous pouvons modéliser le comportement d'un moteur à courant continu avec une excitation séparée. Ce modèle peut être utilisé pour simuler et analyser les performances du moteur dans différentes conditions de fonctionnement, telles que les changements de tension, de charge et de vitesse. Le modèle peut également être utilisé pour concevoir et optimiser le moteur pour des applications spécifiques.

## II.3 La modélisation de la machine à courant continu :

Le modèle du moteur à courant continu peut être exprimé dans le système d'axe (d, q), et les enroulements considérés du modèle sont [14] :

- ❖ Après l'axe d sur le stator, deux séries d'enroulement d'inducteur et le shunt sont désignés par les Indices s et f [14].
- ❖ Le long de l'axe q, les indices reflètent un roulement d'induction, un rouleau auxiliaire et un roulé de compensation (commutation) au rotor (ad, aq, aux et c...etc.) [14].
- ❖ Le rouleau d'induction est relié en série aux pôles auxiliaires et de commutation par rapport à l'axe q. Cela crée un signe opposé FEM, qui annule l'impact de la réaction magnétique générée et le F.E.M. qui déclenche les étincelles [14].

Selon le modèle de la Figure (2.4), les relations de tension et de flux pour le fonctionnement en mode moteur sont les suivantes [12] :

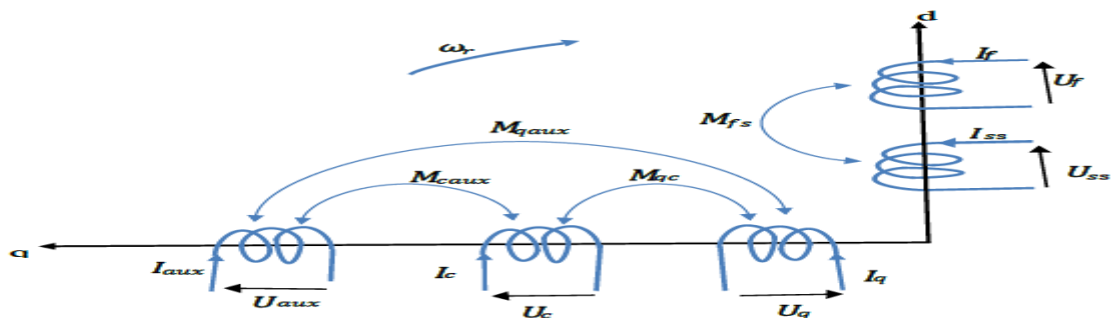


Figure 0.4: Modèle simplifié de la MCC sur les axes d et q [12].

Mise en équation de MCC :

Selon la configuration de la figure (II.4), les équations de tensions et les flux pour le fonctionnement a MCC sort de la forme ce de :

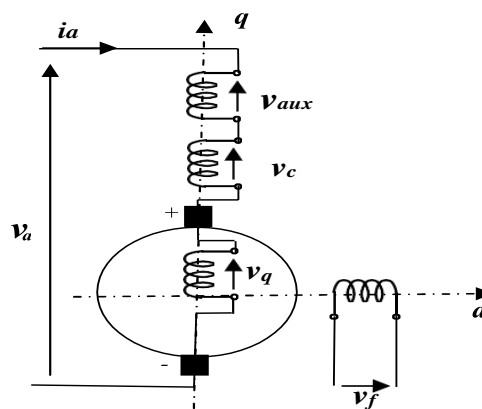


Figure 0.5: Schéma équivalent d'un Moteur à excitation séparée [14].

II.3.1 Equations des tensions :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_f - R_f I_f + e_f = 0 \rightarrow U_f = R_f I_f - e_f \quad \text{Partie inducteur} \\ U_{ss} - R_s I_{ss} + e_s = 0 \rightarrow U_{ss} = R_s I_{ss} - e_s \\ U_q - R_q I_q + e_q = 0 \rightarrow U_q = R_q I_q - e_q \quad \text{Partie induit propre} \\ U_c + R_c I_c - e_c = 0 \rightarrow U_c = -R_c I_c + e_c \quad \text{Partie enroulement compensatic} \\ U_{aux} + R_{aux} I_{aux} - e_{aux} = 0 \rightarrow U_{aux} = -R_{aux} I_{aux} + e_{aux} \quad \text{Partie enroulement auxiliaire} \end{array} \right. \quad (II-12)$$

Avec :

$\varphi_d$ : La force contre-électromotrice en [volts].

II.3.2 Equations des F.EM :

$$\left\{ \begin{array}{l} e_f = -\frac{d\varphi_f}{dt} \\ e_s = -\frac{d\varphi_s}{dt} \\ e_q = e_{q \text{ trans}} + e_{q \text{ rot}} = -\frac{d\varphi_q}{dt} - \frac{d\varphi_x}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = -\frac{d\varphi_q}{dt} - \varphi_d \\ e_c = -\frac{d\varphi_c}{dt} \\ e_{aux} = -\frac{d\varphi_{aux}}{dt} \end{array} \right. \quad (II-13)$$

II.3.3 Equations des flux :

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi_d = M_{fd} I_f + M_{sd} I_{ss} \\ \varphi_f = L_f I_f + M_{fs} I_{ss} \\ \varphi_s = L_s I_{ss} + M_{sf} I_f \\ \varphi_q = L_q I_q + M_{qc} I_c + M_{qaux} I_{aux} \\ \varphi_c = L_c I_c + M_{cq} I_q + M_{caux} I_{aux} \\ \varphi_{aux} = L_{aux} I_{aux} + M_{auxq} I_q + M_{auxc} I_c \end{array} \right. \quad (II-14)$$

En remplace les équations (II-13) dans les équations (II-12) on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} U_f = R_f I_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \\ U_{ss} = R_s I_{ss} + \frac{d\varphi_s}{dt} \\ U_q = R_q I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \varphi_d \\ U_c = -R_c I_c - \frac{d\varphi_c}{dt} \\ U_{aux} = -R_{aux} I_{aux} - \frac{d\varphi_{aux}}{dt} \end{array} \right. \quad (II-15)$$

D'après la loi des mailles on a :

$$U_a - U_q - U_c - U_{aux} = 0 \rightarrow U_a = U_q + U_c + U_{aux} \quad (\text{II-16})$$

Alors :

$$U_a = R_q I_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \varphi_d \omega_r - R_c I_c - \frac{d\varphi_c}{dt} - R_{aux} I_{aux} - \frac{d\varphi_{aux}}{dt}$$

(II-17)

$$\rightarrow U_a = R_q I_q - R_c I_c - R_{aux} I_{aux} + \frac{d\varphi_q - \varphi_c - \varphi_{aux}}{dt} + \varphi_d \quad (\text{II-18})$$

18)

Et on aussi :

$$I_q = I_{ss} = -I_c = -I_{aux} \quad (\text{II-19})$$

Alors :

$$U_a = (R_q + R_c + R_{aux}) I_q + \frac{d\varphi_q - \varphi_c - \varphi_{aux}}{dt} + \varphi_d \quad (\text{II-20})$$

20)

Et :

$$\varphi_q - \varphi_c - \varphi_{aux} = [(R_q + R_c + R_{aux}) - 2(M_{qc} + M_{qaux} - M_{caux})] I_q \quad (\text{II-21})$$

21)

Donc :

$$U_a = (R_q + R_c + R_{aux}) I_q + [(R_q + R_c + R_{aux}) - 2(M_{qc} + M_{qaux} - M_{caux})] I_q + (M_{fd} I_f + M_{sd} I_s) \omega_r \quad (\text{II-22})$$

$$\rightarrow U_a = R_a I_q + L_a \frac{dI_q}{dt} + (M_{fd} I_f + M_{sd} I_s) \omega_r \quad (\text{II-23})$$

23)

Avec :

$$Ra = (Rq + Rc + Raux) \text{ et } La = [(Rq + Rc + Raux) - 2(Mqc + Mqaux - Mcaux)]$$

(II-24)

Alors, les équations mathématiques généralisées qui représente la machine à CC sont données

Comme suite :

$$\begin{cases} U_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} + M_{fs} \frac{dI_{ss}}{dt} \\ U_{ss} = R_s I_{ss} + L_s \frac{dI_{ss}}{dt} + M_{sf} \frac{dI_f}{dt} \\ U_a = Ra I_q + La \frac{dI_q}{dt} + (M_{fd} I_f + M_{sd} I_s) \end{cases} \quad (II-25)$$

On mettre le système sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} U_f \\ U_{ss} \\ U_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ M_{fd}\omega_r & M_{sd}\omega_r & Ra \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_f \\ I_{ss} \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & M_{fs} & 0 \\ M_{sf} & L_s & 0 \\ 0 & 0 & La \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_f \\ I_{ss} \\ I_q \end{bmatrix} \quad (II-26)$$

Le modèle d'état du moteur à courant continu est. Donné comme suite :

$$[U] = [R] [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (II-27)$$

Avec :

$$[R] = [R1] + \omega_r [R2] \quad (II-28)$$

En Remplacent (II-28) dans (II-27) on obtiendra :

$$[U] = ([R1] + [R2]) [I] + [L] \frac{d[I]}{dt} \quad (II-29)$$

Pour simuler ce moteur à courant continu à excitation séparée sous MATLAB Simulink on élimine l'équation électrique  $U_{ss}$  de la forme matricielle généralisée qui représente la machine à CC, ensuite on le mettre sous forme d'équation d'état comme suit :

$$[I] = ([U] - [R1] [I] - \omega_r [R2] [I]) [L]^{-1} \quad (II-30)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} [I] = \begin{bmatrix} I_f \\ I_a \end{bmatrix} \text{ et } [U] = \begin{bmatrix} U_f \\ U_a \end{bmatrix} \\ [R_1] = \begin{bmatrix} R_f & 0 \\ 0 & R_a \end{bmatrix} \text{ et } [R_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ M_{fd} & 0 \end{bmatrix} \\ [L] = \begin{bmatrix} L_f & 0 \\ 0 & L_a \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (\text{II-31})$$

**II.3.4 Expression du couple électromagnétique :**

La puissance électrique instantanée de la MCC est donnée par la relation suivante :

$$p(t) = U_q I_q + U_f I_f + U_{ss} I_{ss} + U_c I_c + U_{aux} I_{aux} \quad (\text{II-32})$$

Ou encore :

$$p(t) = U_q I_q + U_f I_f + U_{ss} I_{ss} \quad (\text{II-33})$$

L'énergie absorbée par la MCC pendant un intervalle de temps dt :

$$dw = p(t) dt \quad (\text{II-34})$$

$$dw = (R_q I_q^2 + R_s I_{ss}^2 + R_f I_f^2) dt + (d\varphi_q I_q + d\varphi_f I_f + d\varphi_c I_c) + \omega_m \varphi_d I_q dt \quad (\text{II-35})$$

dW peut être décomposée en :

$$dW = dW_j + dW_{mag} + dW_{mec} \quad (\text{II-36})$$

Avec :

$$dW_j = (R_q I_q^2 + R_s I_{ss}^2 + R_f I_f^2) dt : \text{c'est L'énergie dissipée par effet joule.}$$

$dW_{mag} = (d\varphi_q I_q + d\varphi_f I_f + d\varphi_c I_c)$  : c'est La variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans le champ de couplage.

$$dW_{mec} = \omega_m \varphi_d I_q dt \quad \text{C'est l'énergie transformée en énergie mécanique.}$$

Le couple électromécanique est donné par :

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta} \quad (\text{II-37})$$

$$C_{em} = \varphi_d I_q \quad (\text{II-38})$$

En utilisant l'équation, on aura :

$$C_{em} = (M_{fa} i_f + M_{sa} i_s) i_a \tag{II-39}$$

**II.3.5 Equation du mouvement :**

Si on isole le rotor, le principe fondamental de la dynamique en rotation autour de l'arbre du moteur donne

La loi fondamentale de la dynamique appliquée à la MCC permet d'écrire :

$$J \frac{d\Omega(t)}{dt} = C_{em}(t) \tag{En l'absence de frottement} \tag{II-40}$$

$$C_{em}(t) - f\Omega(t) = J \frac{d\Omega}{dt} \tag{Avec frottement fluides f} \tag{II-41}$$

$$C_{em}(t) - C_r(t) - f\Omega(t) = J \frac{d\Omega}{dt} \tag{Avec frottement fluides et couple résistant} \tag{II-42}$$

Où :

J est le moment d'inertie du rotor

$$Et : \theta = \int \Omega dt \tag{II-43}$$

$$Avec : \theta = \int \Omega dt \tag{II-44}$$

Généralement on prend :

$$\Phi = 1 \text{ weber} \longrightarrow E = K. \Omega \tag{II-45}$$

$$\longrightarrow C_e = K. I \tag{II-46}$$

Par application de la transformation de Laplace les équations précédentes, on trouve :

$$V_a = R_a I_a + L \frac{dI_a}{dt} + E_b \longrightarrow V_a(p) = E_b(p) + (R_a + pL) I_a(p) \tag{II-47}$$

$$E_b = K_m \Phi \Omega \longrightarrow E(p) = K_m. \Omega(p) \tag{II-48}$$

$$C_{em} = k_m I_a \Phi \longrightarrow C_{em}(p) = k_m. I_a(p) \tag{II-49}$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = (C_{em} - f\Omega - C_r) \longrightarrow C_{em}(p) - C_r(p) = Jp. \Omega(p) + f\Omega(p) \tag{II-50}$$

A partir de l'équation mécanique, nous obtenons :



$$\Omega(p) = \frac{C_{em}(p) - C_r}{Jp + f}$$

$$= \frac{C_{em}(p) - C_r}{f \left(\frac{J}{f}p + 1\right)} = \frac{C_{em}(p) - C_r}{\frac{f}{(\tau_m p + 1)}} \tag{II-51}$$

Avec :  $\tau_m$  Constante de temps mécanique de la partie tournante.

A partir de l'équation de tension d'induit, nous obtenons :

$$I_a(p) = \frac{V_a(p) - E_b(p)}{(Ra + pL)} = \frac{V_a(p) - E_b(p)}{Ra \left(1 + p \frac{L}{Ra}\right)} \tag{II-52}$$

La fonction de transfert de la partie électrique est écrite comme suit :

$$G(P) = \frac{I_a(p)}{V_a(p) - E_b(p)} = \frac{\frac{1}{Ra}}{1 + p \frac{L}{Ra}} \tag{II-53}$$

$$I_a(p) = \frac{\frac{V_a(p) - E_b(p)}{Ra}}{1 + p \tau_e} \tag{II-54}$$

Ces équations nous amènent au schéma bloc suivant :

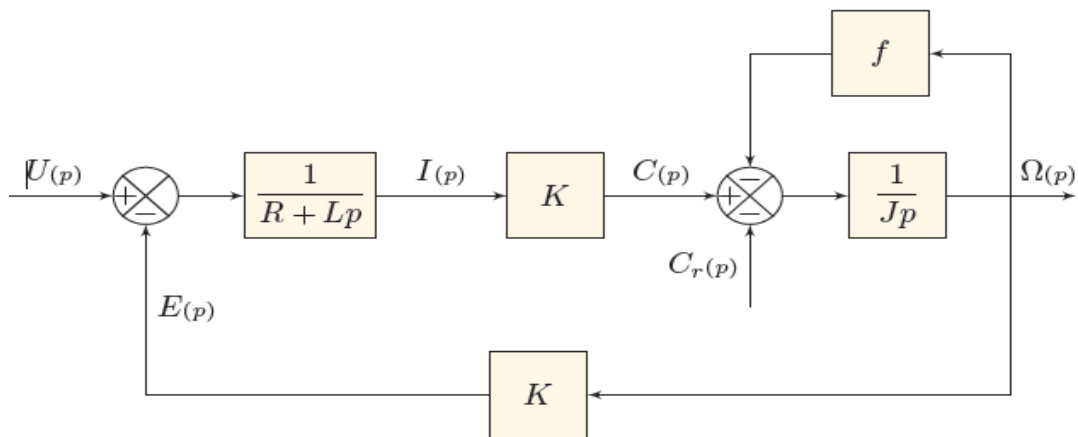


Figure 0.6: Schéma de blocks de MCC [15].

Après le calcul, la fonction de transfert d'un moteur à courant continu (sans couple résistant) est :

$$HM(p) = \frac{k}{(Jp + f)(R + Lp) + k^2} = \frac{\frac{k}{fR+k^2}}{\frac{JL}{fR+k^2} p^2 + \frac{fR+fL}{fR+k^2} p + 1} \quad (II-55)$$

La forme canonique peut être exprimé comme produit de 2 premiers ordre :

$$HM(p) = \frac{K0}{\tau \tau_e p^2 + (\tau + \alpha \tau_e)p + 1} \quad (II-56)$$

Avec :

$$\tau = \frac{RJ}{K^2 + Rf}, \tau_e = \frac{L}{R}, K0 = \frac{K}{K^2 + Rf} \text{ et } \alpha = \frac{Rf}{K^2 + Rf}$$

- $\tau$  est appelé constante de temps électromécanique (d'autant plus grande que l'inertie J est grande).
- $\tau_e$  est appelé constante de temps électrique (issue des composants électroniques, notamment l'inductance).

En général, la partie électromécanique réagit moins vite que la partie électrique et on montre que :

>>>>

Après quelques simplifications sur les ordres de grandeurs (non présentées), le moteur peut être considéré comme produit de deux fonctions du premier ordre :

- Une fonction liée à la mécanique (de constante de temps  $\tau$ ).
- Une fonction liée à l'électronique (de constante de temps  $\tau_e$ ).

$$HM(p) \approx \frac{K0}{(1+\tau P)(1+\tau_e P)} \quad (II-57)$$

## II.4 Définition de régulateur PID :

Un régulateur PID est un dispositif de contrôle qui régule la sortie d'un système en fonction de la différence entre une valeur enregistrée et mesurée. PID est une abréviation de "proportionnel-intégral-dérivé", qui sont les trois termes qui composent la fonction de transfert du régulateur.

Le terme est proportionnel à la différence actuelle entre la réserve et les valeurs mesurées.

Le terme intégral est proportionnel à l'intégral de l'erreur, en abaissant l'erreur statique et en ajustant la commande en fonction des erreurs précédentes.

Le terme dérivé est proportionnel à l'erreur dérivée, en réduisant les oscillations et en ajustant la commande en réponse à des changements rapides de l'erreur.

L'objectif de la régulation est de maintenir une valeur souhaitée (GRANDEUR DE REFERENCE), une grandeur physique (Règle de la grandeur), telle que la température, l'humidité relative, la pression, etc. (dans notre cas, la vitesse de rotation du moteur CC), tout en étant soumis à des perturbations. Mesurer sa valeur et la comparer à la valeur souhaitée donne une différence d'ajustement sur la base de cette différence, le régulateur est formé. (ORGANE DE REGLAGE) [12].

Il est largement utilisé dans les processus industriels pour gérer la vitesse, la température, la pression et d'autres facteurs. Il peut être mis en œuvre à travers l'utilisation de logiciels ou de matériel électrique. Les coefficients du régulateur PID doivent être ajustés pour fournir une réponse optimale du système, ce qui peut être réalisé en utilisant des approches empiriques ou des techniques plus complexes telles que l'optimisation.

Le régulateur PID est l'une des formes de régulateurs les plus utilisées dans les applications de contrôle industriel. Il est facile à installer, fiable et adaptable à un large éventail de systèmes. Néanmoins, des ajustements précis de coefficients peuvent être nécessaires pour une performance maximale, et il peut ne pas être idéal pour les systèmes avec des caractéristiques non linéaires ou compliquées.

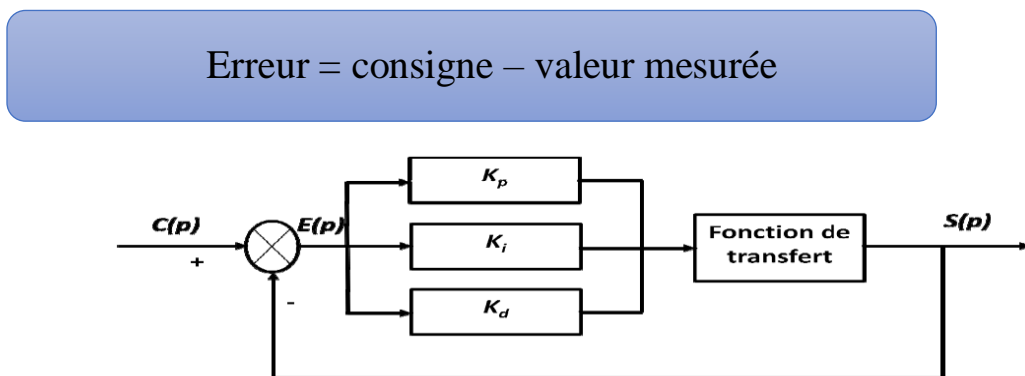


Figure 0.7: Le Régulateur PID.

La fonction de transfert d'un régulateur PID est :

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \tag{II-58}$$

Où  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  sont respectivement les gains de proportionnalité, d'intégration et de dérivation, on constate que la variable manipulée est la somme pondérée de l'erreur (P), de l'intégration de l'erreur (I) et de la dérivée de l'erreur (D).

La combinaison de ces trois opérations donne lieu à un régulateur PID, qui remplit efficacement les fonctions suivantes [12] :

Il génère un signal de commande basé sur le développement du signal de sortie généré par rapport à l'ordre (consigne) [12].

En utilisant le mot (terme) intégrateur, il réduit l'erreur statique [12].

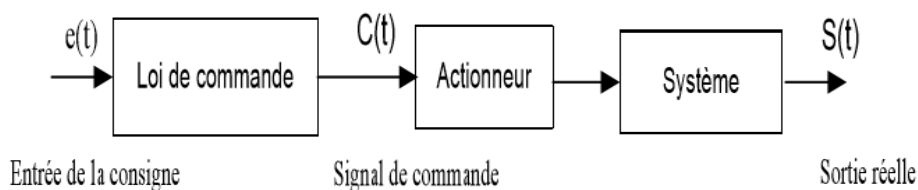
Il prédit les fluctuations de la production en utilisant le terme dérivé [12].

**II.4.1 Les chaines de régulations :**

**II.4.1.1 Régulation en boucle ouverte :**

Lorsque les signaux d'entrée  $e(t)$  ne sont pas affectés par les signaux de sortie  $s(t)$ , la régulation est dite d'être ouverte. (t). L'action n'a pas d'effet sur la magnitude mesurée dans cet exemple (La capacité de maîtriser) La mise en œuvre de telles restrictions nécessite la compréhension des lois régissant le fonctionnement du processus, c'est-à-dire la relation entre la valeur mesurée et la magnitude régulée. La construction d'une commande de boucle ouverte est vue dans la figure (2.8)

Le principal inconvénient est que l'objectif est rarement atteint complètement à l'intérieur de ses limites [17] [18].



*Figure 0.8: Le système en boucle ouverte [18].*

➤ Les avantages et les inconvénients :

Les avantages incluent :

- La capacité de prévoir les événements et de réagir rapidement.
- Comme il n'y a pas de contrôle ultime, la seule réponse est d'éliminer les dangers du pompage.

➤ Les inconvénients sont les suivants :

- L'exigence de comprendre la législation qui régit le fonctionnement du processus.
- L'incapacité de réguler et de corriger les erreurs, les déviations et les accidents qui peuvent se produire dans la boucle.

#### II.4.1.2 Régulation en boucle fermée :

Une boucle fermée est un système avec une chaîne de rétroaction entre la sortie  $s(t)$  et l'entrée  $e(t)$ . Dans un circuit ouvert, il peut stabiliser un système instable. La figure ci-dessous représente le bloc de schéma d'un système de boucle fermée.

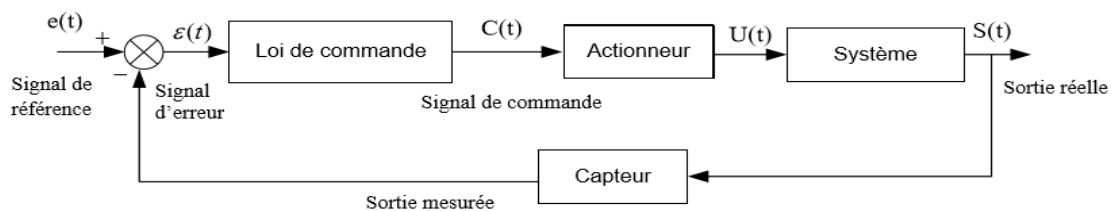


Figure 0.9: Le système en boucle fermée [18].

#### ➤ Les avantages et les inconvénients :

- Les avantages :
  - La boucle fermée compense une partie considérable des variables perturbantes par la contre-réaction (feedback).
  - Une compréhension précise des règles et du comportement des nombreux composants de la boucle n'est pas requise.
- Les inconvénients :
  - Ce type de réglementation nécessite la précision des données mesurées ainsi que l'ordre.
  - Les phénomènes de pompage peuvent être causés par la sélection incorrecte de composants spécifiques.
  - La non-anticipation du contrôle de boucle fermée, ce qui peut parfois être irritant.

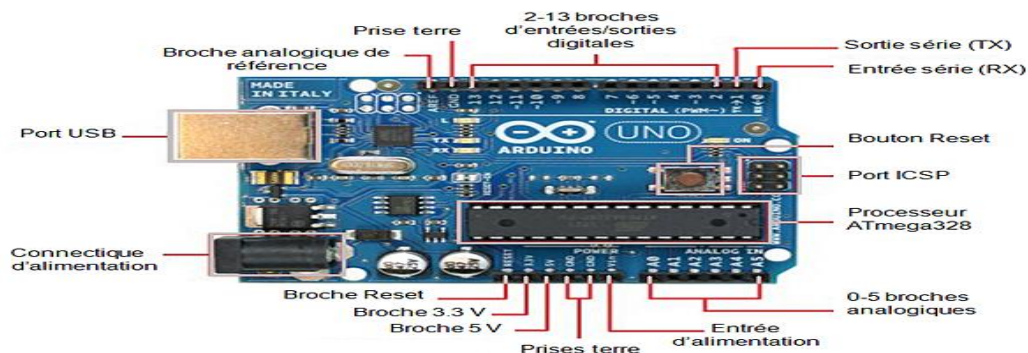
### II.5 La carte Arduino UNO :

L'Arduino est une plate-forme électronique open source basée sur du matériel et des logiciels faciles à utiliser. Les cartes Arduino sont capables de lire des entrées - une lumière sur un capteur, un doigt sur un bouton ou un message et de les transformer en une sortie - en activant un moteur, en

allumant une LED, en publiant quelque chose en ligne. Vous pouvez dire à votre carte quoi faire en envoyant un ensemble d'instructions au microcontrôleur sur la carte. Pour ce faire, vous utilisez le langage de programmation Arduino (basé sur le câblage) et le logiciel Arduino (IDE), basé sur le traitement.

### II.5.1 Les composants de la carte Arduino UNO sont :

- Microcontrôleur – ATmega 2560 ;
- Tension de fonctionnement 5V ;
- Tension d'alimentation (recommandée) 7 : 12V ;
- Tension d'alimentation (limites) – 6-20V
- Broches E/S numériques – 14 (dont 6 disposent d'une sortie PWM) ;
- Broches d'entrées analogiques – 6 (utilisables en broches E/S numériques) ;
- Intensité maxi disponible par broche E/S (5V) – 40 mA ;
- Intensité maxi disponible pour la sortie 3.3V – 50 mA ;
- Intensité maxi disponible pour la sortie 5V – 500 mA max ;
- Mémoire Programme Flash – 32 KB (ATmega328) ;
- Mémoire SRAM (mémoire volatile) – 2 KB (ATmega 2560) ;
- Mémoire EEPROM (mémoire non volatile) – 1 KB (ATmega 2560) ;
- Vitessed'horloge – 16 MHz



*Figure 0.10: La description de la Carte Arduino "UNO".*

### II.6 Définition de driver L298N :

Le L298N est un circuit intégré (CI) populaire utilisé comme pilote de moteur courant pour contrôler les moteurs courants. (DC). Il est couramment utilisé dans les projets électroniques et robotiques pour alimenter et contrôler les moteurs. Le L298N est capable de fournir de la haute tension et du courant aux moteurs, ce qui le rend adapté aux applications nécessitant une puissance importante.

Le L298N fonctionne en utilisant le principe de commutation H-bridge (pont en H). Il peut contrôler la direction de rotation d'un moteur en inversant la polarité de la tension appliquée aux bornes du moteur. Cela permet au moteur de tourner dans les deux sens (avant et arrière). Le L298N dispose de plusieurs pins d'entrée pour contrôler le fonctionnement du moteur. Les signaux logiques donnés à ces pins régissent la direction et la vitesse de rotation du moteur. Il est contrôlé par des signaux logiques générés par un microcontrôleur, un Arduino ou tout autre appareil électrique.

En résumé, le L298N est un moteur populaire qui régule la vitesse et la direction de rotation des moteurs à courant continu, ce qui en fait un choix pratique pour un large éventail de projets électriques et robotiques.

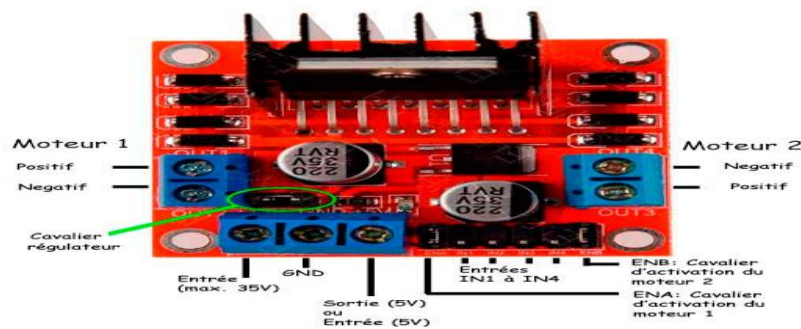


Figure 0.11: Module Driver L298N.

## II.7 MATLAB/ SIMULINK :

### II.7.1 MATLAB :

Le MATLAB est une plate-forme de programmation conçue spécifiquement pour les ingénieurs et les scientifiques afin d'analyser et de concevoir des systèmes et des produits qui transforment notre monde. Le cœur de MATLAB est le langage MATLAB, un langage matriciel permettant l'expression la plus naturelle des mathématiques computationnelles.

Il est considéré comme un langage de programmation de haut niveau. Il s'agit également d'un environnement interactif sur lequel s'appuient le développement d'algorithmes et l'analyse de données. Il fait également partie intégrante de la création d'applications et de modèles et fournit à l'utilisateur un ensemble de des outils et des fonctions mathématiques qui aident à trouver des solutions très rapides basées sur des feuilles de calcul ou même des langages de programmation traditionnels ; Parmi les plus importants d'entre eux figurent Java (JAVA, C++, C), et son utilisation est en augmentation parmi les programmeurs de systèmes de contrôle, de biologie informatique et d'autres domaines. Le MATLAB

possède un ensemble de caractéristiques qui le distinguent des autres langages de programmation, dont les plus importants sont :

- Facilité d'utilisation, car il permet à ses utilisateurs d'accéder aux solutions de manière mathématique familière.
- Fournir des outils et des moyens qui constituent des solutions aux problèmes rencontrés par les applications et leur développement.
- Un outil pédagogique efficace et standard pour plusieurs domaines, y compris les principes de l'ingénierie, des mathématiques, des sciences et autres.
- Un véritable modèle de réalisation de développement et de progrès dans le logiciel.
- Le meilleur choix pour une utilisation dans l'écriture de programmes nécessitant une gamme modérée de commandes et d'édition pour résoudre des problèmes.
- La performance globale du langage est raccourcie pour manipuler et modifier les nombres.

### **II.7.2 SIMULINK :**

Simulink est un environnement de simulation multi-domaine et de diagramme de bloc basé sur le modèle. Il permet la conception intégrée au niveau du système, la simulation, la création automatique de code et les tests et vérifications continues. Simulink est un outil de modélisation et de simulation de système dynamique qui comprend un éditeur graphique, des bibliothèques de blocs personnalisables et des résolveurs. Il est MATLAB®-intégré, vous permettant d'ajouter des méthodes Matlab aux modèles et d'exporter les résultats de la simulation à Matlab pour une analyse ultérieure.

### **II.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons en première partie parlé de la notion d'une machine à courant continu à excitation séparée, sa modélisation ainsi que la régulation et l'asservissement en se concentrant sur le régulateur PID et ses différentes caractéristiques. Dans la deuxième partie nous avons abordé une brève description sur une carte Arduino UNO considérée comme une plate-forme électronique open source basée sur du matériel et des logiciels faciles à utiliser pour la commande de cette machine.

Le chapitre suivant, sera réservé pour élaborer une étude comparative entre ces deux techniques de commandes à savoir, les résultats obtenus à l'aide du logiciel Simulink sous Matlab et ceux trouvés à travers la carte Arduino UNO, dont l'objectif principal est de voir la variation de la vitesse lors de fonctionnement du moteur.



**Chapitre III : Simulation et réalisation pratique de la  
commande d'un MCC par l'Arduino**

### III.1 Introduction :

L'architecture "Hardware in the Loop" (HIL) est une technique puissante pour tester et valider des systèmes embarqués complexes qui mélangent la simulation du monde réel et virtuelle. Les ingénieurs peuvent utiliser cette approche pour évaluer les performances d'un système matériel en l'incorporant dans un environnement de simulation réaliste. Dans ce chapitre, nous examinerons le concept de HIL, ainsi que son but, ses avantages et ses inconvénients, avant de passer à la phase pratique, où nous allons théoriquement simuler la machine à courant continu dans MATLAB et l'appliquer dans la pratique en programmant l'Arduino en utilisant le logiciel (Arduino IDE 2.1.0).

### III.2 Définition de Hardware-in-the-Loop (HIL):

Le test HIL (Hardware-in-the-Loop) est un type de test utilisé dans l'ingénierie et le développement, en particulier dans la conception et l'évaluation de systèmes complexes. Les tests Hardware-in-the-Loop vous permettent d'évaluer la conception de votre contrôleur sans nécessiter la configuration matérielle du système. Pendant les tests HIL, les composants matériels physiques du système en cours de développement sont couplés à un environnement en temps réel simulé pour augmenter la pratique et réduire les coûts, au cours des tests HIL, les composants matériels physiques du système en cours de développement sont couplés à un environnement simulé en temps réel. Le comportement et les réponses d'autres composants ou systèmes qui interagissent avec le matériel testé sont simulés dans cet environnement. En temps réel, l'environnement de simulation et les dispositifs physiques échangent des données et des signaux, ce qui entraîne un système de boucle fermée dans lequel le dispositif interagit avec les entrées simulées et la simulation répond aux sorties du dispositif. Les ingénieurs peuvent tester et vérifier efficacement leurs conceptions matérielles en utilisant MATLAB pour les tests HIL dans un environnement contrôlé et reproductible. Il leur permet d'évaluer les performances du matériel, de confirmer son intégration dans le système global et de prendre des décisions de conception éclairées en fonction des résultats de la simulation. HIL est une méthode de test et de simulation dans laquelle les composants matériels réels sont couplés à un environnement de simulation Matlab/Simulink pour le test, la vérification et la validation. Matlab dispose d'outils et de capacités pour interagir avec et contrôler des périphériques matériels externes tels que des capteurs, des actionneurs et des systèmes embarqués via des modèles de Simulink. A travers cette intégration, les ingénieurs peuvent tester et évaluer les performances de leur matériel dans un système de boucle fermée qui mélange des composants du monde réel avec des modélisations simulées.

## **CHAPITRE III Simulation et réalisation pratique de commande d'un MCC par l'Arduino**

### **III.2.1 Les étapes suivantes sont généralement incluses dans le processus :**

- Simulink Simulation Modèle de conception et de développement : Les ingénieurs produisent un modèle de simulation du système sous le comportement du développement. Les algorithmes de contrôle, le traitement du signal et tous les autres composants essentiels sont tous inclus dans ce modèle.
- Connectez le matériel physique à la simulation : les capteurs et les actionneurs sont reliés à l'ordinateur exécutant Matlab. Cela est possible avec les bonnes interfaces matérielles, telles que les cartes d'acquisition de données ou les protocoles de communication.
- Configurer l'environnement de simulation : Matlab comprend des outils et des fonctions pour configurer l'environnement et connecter le modèle de simulation aux composants matériels. Cela comprend la fourniture des scénarios de test appropriés, la définition des connexions entrée-sortie, la sélection du timing et de la synchronisation, et la détermination des connexions entrée/sortie.
- Exécutez la simulation HIL : La simulation est réalisée et le modèle de simulation interagit avec le matériel physique en temps réel. Le matériel répond aux entrées fournies par la simulation, et le modèle de simulation traite les signaux de sortie du matériel.
- Étudier et valider les résultats : les ingénieurs peuvent étudier les données produites lors de la simulation HIL pour évaluer les performances, la stabilité et la fonctionnalité du matériel testé. Ils peuvent examiner le comportement du système, valider les algorithmes de contrôle et découvrir des défauts ou des améliorations possibles.

### **III.2.2 Le but d'utiliser de Hardware-in-the-Loop (HIL):**

Le but principal du test HIL est de créer un environnement réaliste et contrôlé pour tester et évaluer les performances, la fonctionnalité et la compatibilité du matériel. Les ingénieurs peuvent tester complètement le matériel sous de nombreux paramètres et scénarios en imitant le comportement d'autres composants ou systèmes sans la nécessité d'un système physique entier. Cette méthode permet la découverte précoce et la résolution des difficultés possibles, ce qui réduit le temps et les coûts de développement. Dans le développement de systèmes complexes tels que l'électronique automobile, les systèmes d'aéronefs, l'automatisation industrielle et des systèmes de distribution de puissance, le test HIL est souvent employé. Il permet aux ingénieurs d'évaluer les performances, la fiabilité et la sécurité des composants matériels ainsi que leur intégration dans des systèmes plus grands, améliorant ainsi la conception et le fonctionnement global du système.

## CHAPITRE III Simulation et réalisation pratique de commande d'un MCC par l'Arduino

### III.2.3 Les avantages et les inconvénients du Hardware-in-the-Loop (HIL) :

- **Les avantages du Hardware-in-the-Loop (HIL) :**

- Validation en pratique : HIL permet de tester des systèmes électroniques et électriques dans des situations réelles en utilisant du matériel physique. Cela permet la reproduction des interactions avec d'autres composants et systèmes, permettant une validation plus réaliste et précise.
- Des économies de coûts : HIL permet la détection et la correction d'erreurs conceptuelles plus tôt dans le processus de développement, réduisant ainsi les frais associés aux changements tardifs. En outre, il permet le remplacement de bancs de test coûteux ou de tests sur place, ce qui entraîne des économies de coûts significatives.
- Accélération du développement : HIL permet un développement plus rapide du système en permettant des tests automatisés et rapides. Il offre une plus grande flexibilité pour exécuter divers scénarios et tests, ce qui permet de réduire les temps de développement.
- Sécurité : en utilisant des composants du monde réel, HIL vous permet de tester des systèmes dans des scénarios dangereux ou impossibles à reproduire. Cela garantit que les systèmes fonctionnent correctement et en toute sécurité avant leur déploiement effectif.

- **Les inconvénients de Hardware-in-the-Loop (HIL) :**

- Coût initial élevé : la mise en place d'un système HIL peut nécessiter des investissements importants en matière de matériel, de logiciel et de développement. Cela peut rendre le processus moins accessible aux petites entreprises ou aux projets à faible budget.
- Complexité technique : La mise en œuvre de HIL peut être techniquement difficile, nécessitant des connaissances en modélisation, simulation et configuration matérielle. Il peut être nécessaire pour les équipes de développement de passer par une courbe d'apprentissage.
- Limitations de modélisation : Les modèles utilisés dans un système HIL doivent être précis et représentatifs du système réel. La création de modèles précis peut être difficile car elle nécessite une compréhension approfondie du système et de ses comportements.
- Limitations en temps réel : les systèmes HIL nécessitent des capacités de traitement en temps réel pour exécuter des simulations et des calculs en synchronisation avec le matériel physique. Des limites de performance peuvent survenir si les exigences en temps réel ne sont pas remplies, ce qui peut avoir un impact sur la précision des résultats.

Il est crucial de se rappeler que les avantages et les inconvénients de HIL peuvent varier en fonction du domaine d'application spécifique et des exigences du projet. Il est recommandé de considérer



III.3.2 Résultats de Simulation sans la commande :

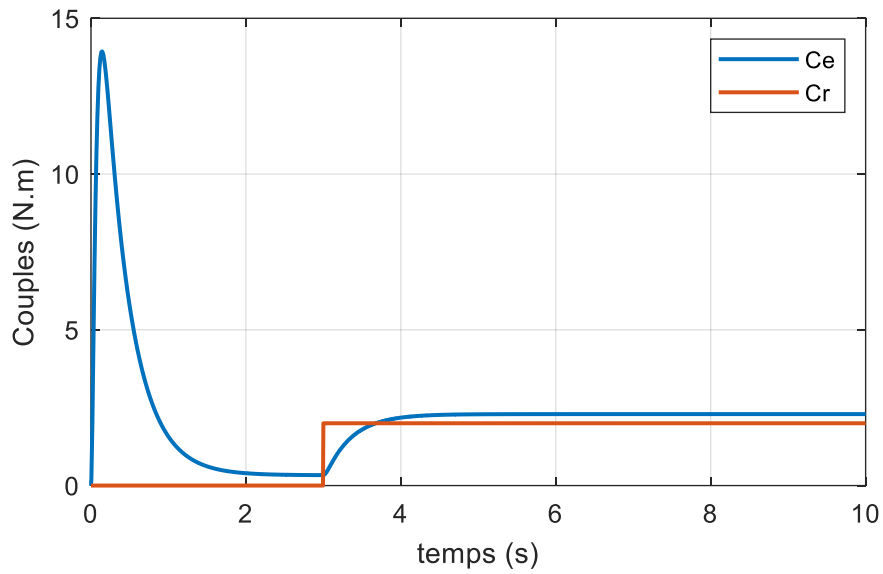


Figure 0.2: Le courant du MCC à excitation séparée.

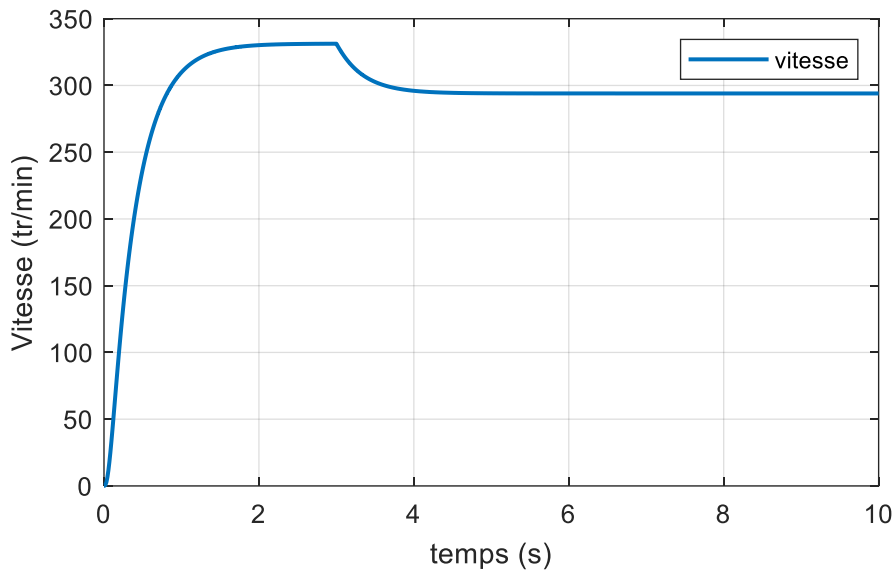


Figure 0.3: La vitesse de rotation du MCC à excitation séparée.

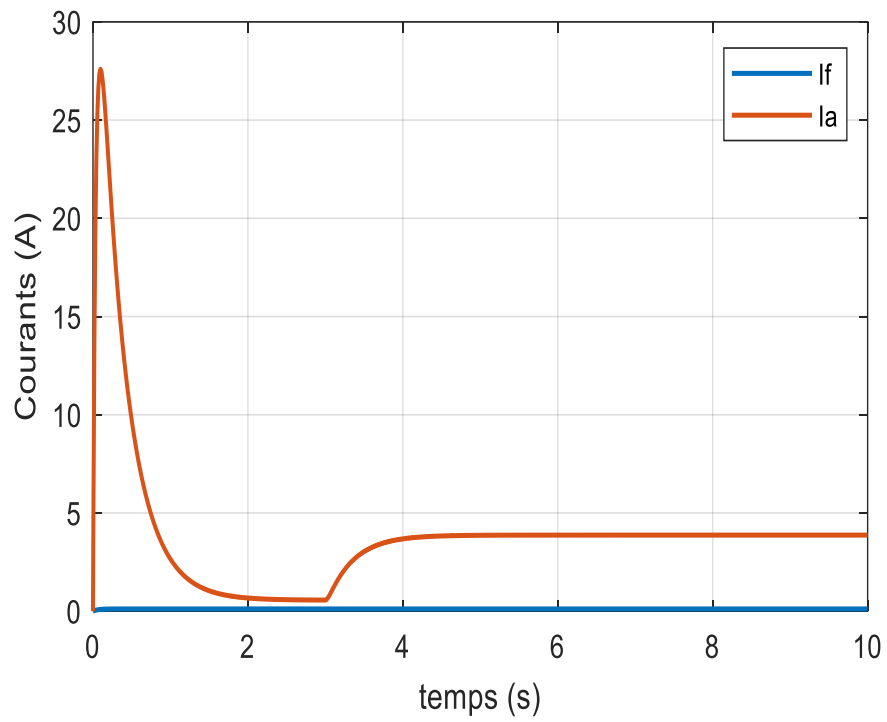


Figure 0.4: Courants d'excitation et le courant d'induit

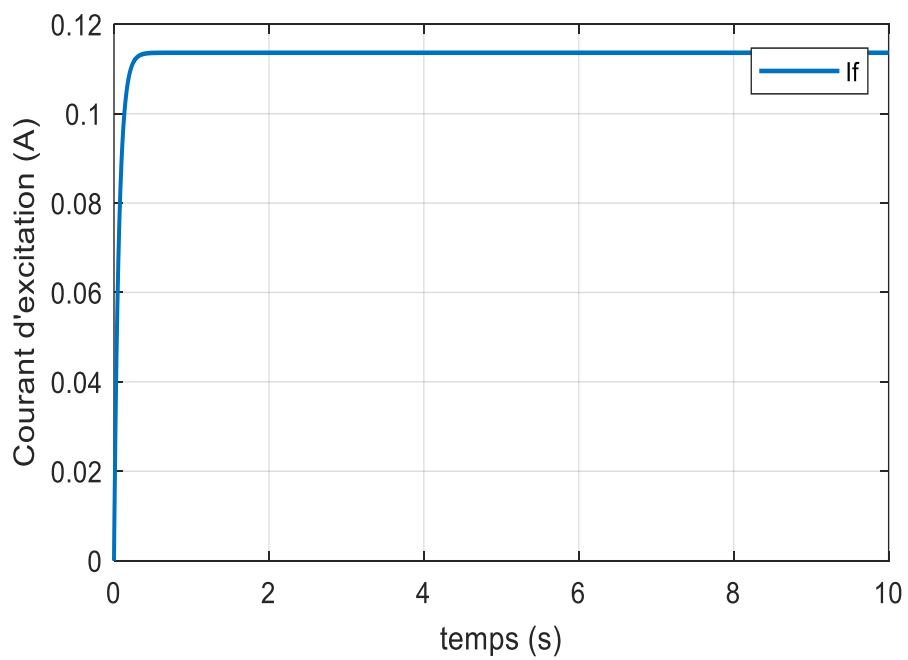


Figure 0.5: Courant d'excitation

# CHAPITRE III Simulation et réalisation pratique de commande d'un MCC par l'Arduino

## III.3.3 Résultats de Simulation avec la commande PID :

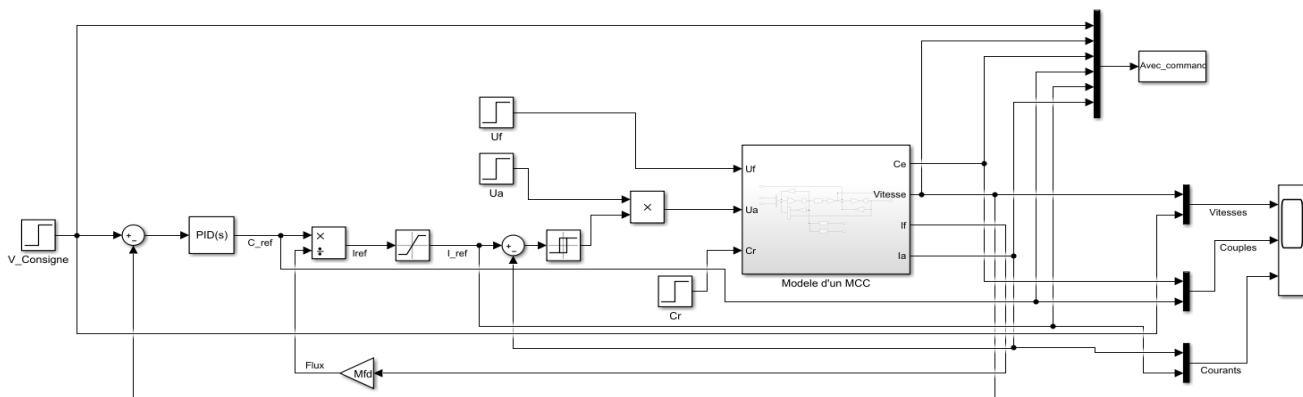


Figure 0.6: Le schéma bloc de moteur à courant continu avec sa commande

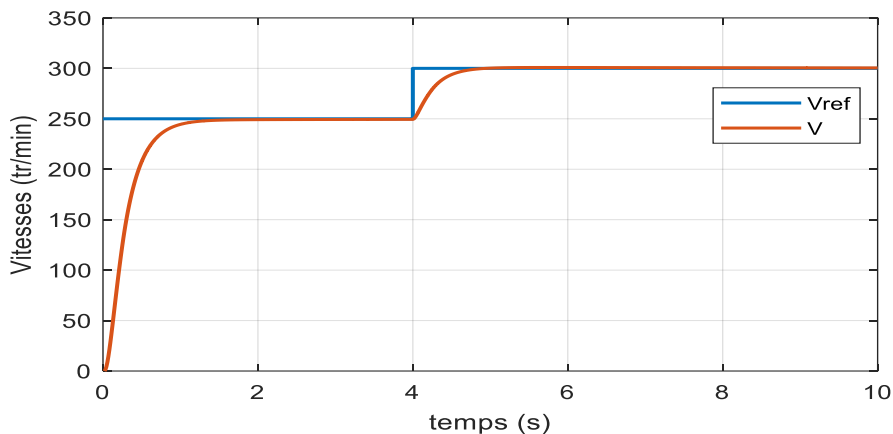


Figure 0.7: vitesse de rotation du MCC avec sa consigne.

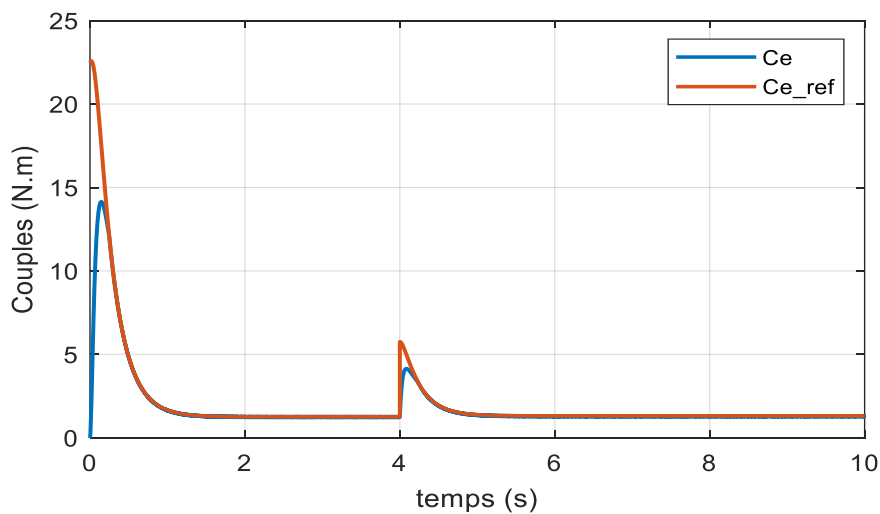
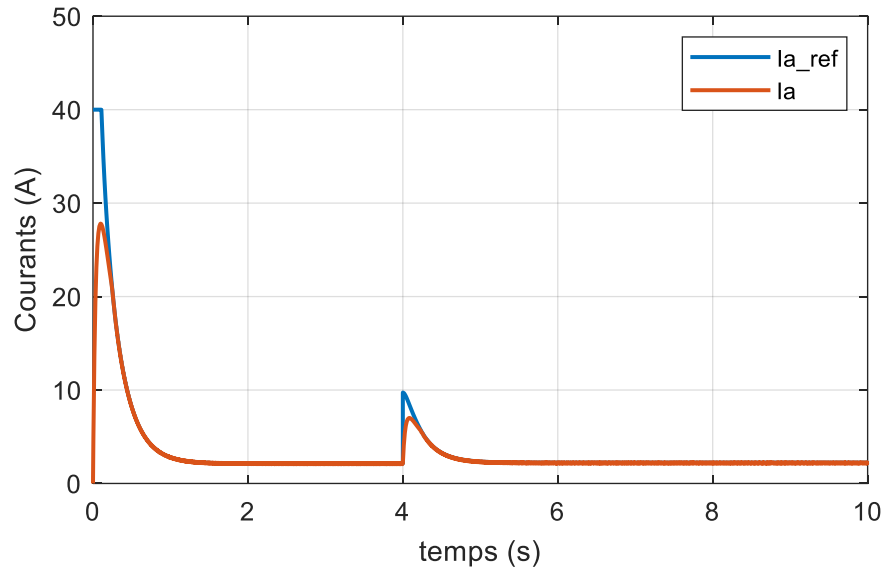


Figure 0.8: Couples électromagnétiques du moteur



## CHAPITRE III Simulation et réalisation pratique de commande d'un MCC par l'Arduino



*Figure 0.9: Courant d'induit*

D'après les résultats de simulation, on constate que les grandeurs du moteur sont ajustées à leurs valeurs optimales c.-à-d. il n'y a pas des fluctuations entre les valeurs de références et les valeurs désirées. On constate également que les résultats de simulation vérifient la robustesse et l'efficacité de la commande, Cependant, l'utilisation des régulateurs PI permet d'éliminer correctement les erreurs statiques.

### III.4 Partie pratique :

#### III.4.1 Les matériels utilisés dans ce travail :

Pour réaliser le système de commande de vitesse de MCC nous devons :

- Un moteur à courant continu ;
- Source de tension continue.
- Une carte Arduino UNO ;
- Une carte driver L298N ;
- Fils de connexion ;
- Logiciel Arduino IDE 2.1.0.

#### III.4.2 Schéma de câblage :

Le module L298N est alimenté par une source de tension externe. Chaque demi-pont nécessite 3 broches de sortie d'un microcontrôleur.

### CHAPITRE III Simulation et réalisation pratique de commande d'un MCC par l'Arduino

GND masse du circuit intégré relié à la masse du microcontrôleur et à la masse de l'alimentation

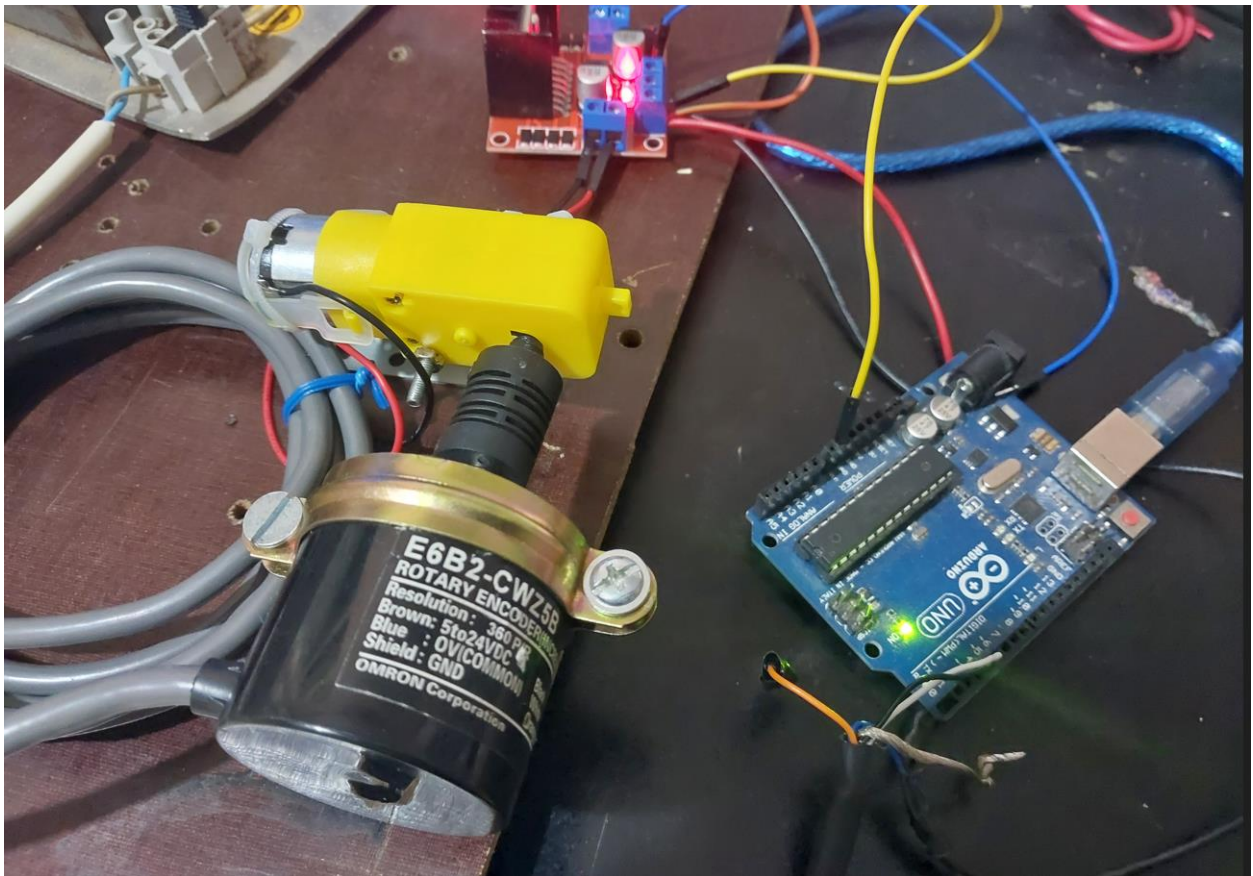
- Input1 la vitesse du moteur M reliée à la broche 3.

-Input2 direction avant du moteur M reliée à la broche 4.

-Input3direction arrière du moteur M reliée à la broche 5.

➤ En utilise le logiciel Arduino IDE 2.1.0 pour programmation le montage :

- Le programme de ce montage est :



*Figure 0.10: Photo réel de montage de travail.*

### CHAPITRE III Simulation et réalisation pratique de commande d'un MCC par l'Arduino

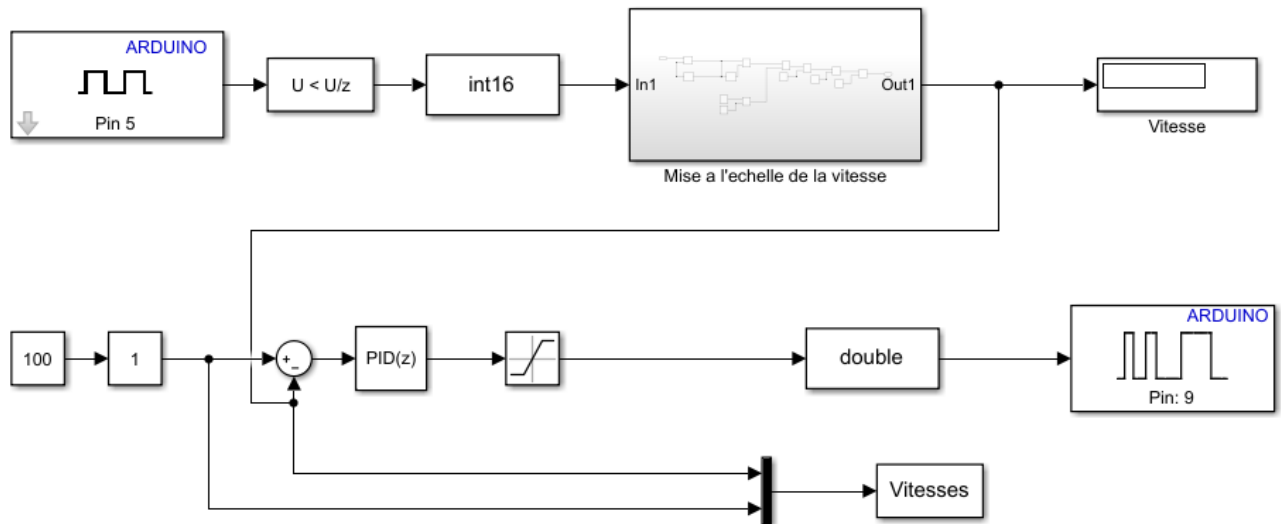


Figure 0.11: Schéma bloc de la commande HIL.

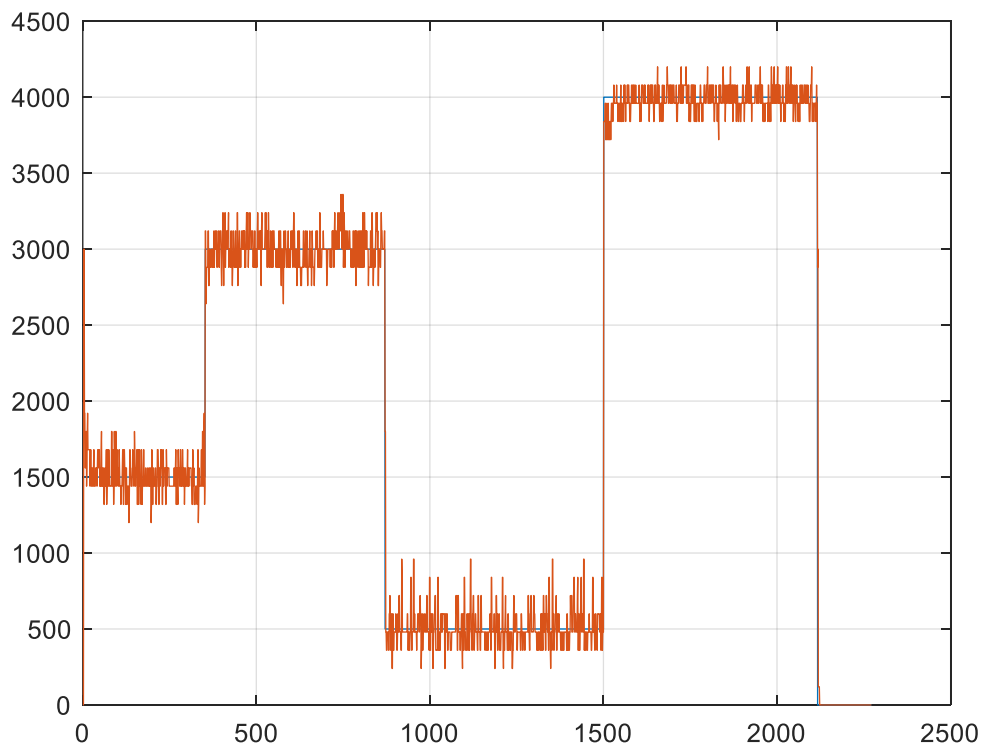


Figure 0.12: vitesse de rotation avec sa consigne.

La simulation de la commande du moteur a été réalisée sous le logiciel Matlab/Simulink puis transféré vers la carte Arduino qui commande un moteur en temps réel comme montre la figure (III.10). La vitesse est mesurée par un encodeur de 360 P/R. Afin de valider la commande proposée en temps

## **CHAPITRE III Simulation et réalisation pratique de commande d'un MCC par l'Arduino**

réel, nous avons appliqué des échelons pour la vitesse et on remarque que la vitesse réelle suit parfaitement sa consigne.

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la définition de la simulation HIL puis cité les étapes à suivre pour construire cette dernière, ensuite, nous avons simulé le modèle de notre moteur sans et avec la commande PI et nous avons présenté les résultats de simulation pour les deux cas.

Dans la suite de ce chapitre, une réalisation pratique a été faite avec l'utilisation de la simulation HIL c'est-à-dire la commande PID est implantée dans Simulink puis charger dans la carte Arduino qui commande en temps réel le moteur à courant continu.

**CONCLUSION GENERALE :**

## CONCLUSION GENERALE

Pour contrôler une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système (tel que la vitesse, le courant, la position, ...), en utilisant une technique de régulation afin d'imposer le comportement et de maintenir ces grandeurs à des consignes prédéfinies.

Dans cette étude, on a simulé le modèle d'un moteur à courant continue sous Matlab/Simulink puis, nous l'avons commandé par un régulateur PI. Après simulation, on constate que les grandeurs du moteur sont ajustées à leurs valeurs optimales c.-à-d. il n'y a pas des fluctuations entre les valeurs de références et les valeurs désirées. Ensuite, nous avons fait un banc d'essays en utilisant la méthode HIL pour avoir des bons résultats concernant la commande de la vitesse de rotation de notre moteur.

Cette expérience nous a permis de nous familiariser avec un nouveau langage de programmation, c'est-à-dire l'Arduino et la commande HIL, de maîtriser la commande d'un MCC et d'approfondir nos connaissances sur ces composants. Les résultats de la simulation montrent que le régulateur utilisé répond de manière satisfaisante aux perturbations appliquées à la machine à courant continu.

En dernier, et durant ce travail qui nous a été très fructueux, on a mis en œuvre les connaissances acquises durant notre formation que ce soit sur le plan théorique ou pratique.

## **BIBLIOGRAPHIE**

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Douis Boubaker et Gadi Nadjib** "Commande de vitesse de moteur à courant continu par réseau de neurone artificiel avec une carte arduino " Mémoire de fin d'études Master en Commande électrique, L'Université Echahid Hamma Lakhdar -d'El Oued ,2018/2019.
- [2] **Bensaoula Mohamed Amine** "Conception du Contrôleur PID pour le Moteur à Courant Continu (MCC) à Excitation indépendante, Simulation sous Matlab/Simulink "Mémoire de fin d'études Master en électromécanique, L'Université Badji Mokhtar- Annaba, 2019.
- [3] **Mr. Hamitouche Akli et Mr. Salmani Mohamed et Mr. Zamoum Mansour**" Identification par Algorithmes Génétiques Des Pertes dans un Moteur à Courant Continu à Excitation Séparée " Mémoire de fin d'études Master en Machines Electriques, L'Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, 2012-2013.
- [4] **Zoghmar Mahieddine, Habchi Aboubakar seddik,** "Étude comparative entre deux régulateurs PID et FLC appliqués à la Machine à Courant Continu ", Mémoire de fin d'étude Master en Université De Oum El Bouaghi, 2011-2012.
- [5] **Remadi Fouad et Siouane Abdelaziz** "Modélisation et commande de la machine à Courant continu "Mémoire de fin d'étude Master en Informatique industriel, Université Larbi Ben M'hidi oum el Bouaghi, 2011/2012.
- [6] T. Wildi, G. Sybille, "Electrotechnique", de Boeck, 4ème Edition, 2005.
- [7] **M<sup>elle</sup> Dif Nihed et M<sup>elle</sup> Triki Razika** "Synthèse d'un contrôleur PID pour la commande d'un MCC ", Mémoire de Fin d'études Master en Informatique Industrielle, Université Larbi Ben M'hidi –Oum El Bouaghi, 2010-2011
- [8] " étude d'un moteur à courant continu et simulation "projet de fin d'étude en électrotechnique, L'université de Abdelhamid -Ibn -Badis \_Mostaganem, 2016-2017.
- [9] **LAHOUAR Khalid et SILINI Abdel basset** " Etude Comparative de la Commande PID classique et la Commande d'ordre fractionnaire : Application à un Moteur à Courant Continu ", Mémoire de fin d'études Master en électromécanique de l'université de Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [10] **Gobbi Bader** "Etude comparative des enroulements des machines à courant continu ", Mémoire de fin d'études Master en Electrotechnique Machines Electriques, L'Université Mohamed Khider de Biskra, lundi 8 juillet 2019.



- [11] **Draïdi Abdallah** " La machine à courant continu ", cour +TD, Institut des Science et Technique Appliquées, d'Université Frères Mentouri Constantine 1, 30/09/2018.
- [12] **Merabet Lakhdar et Ayache Mohamed amine** " Commande PID d'un Moteur à Courant Continu à base de microcontrôleur ", Mémoire de fin d'étude Master en électromécanique, Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira, 2019-2020.
- [13] **Boughazala Hamad Haitham et Bali Ali** " Commande en Vitesse par Placement de Pôles d'un Moteur à CC (base d'Atmega) ", Mémoire de fin d'études Master en Commande Electrique de l'université d'Echahid Hamma Lakhdar d' El-Oued en Mai 2018.
- [14] **Dr. BOUNADJA Elhadj** "MODELISATION DES MACHINES ELECTRIQUES (Cours et Exercices) ; "en Machines électriques selon le programme officiel, université de Hassiba benbouali-chlef, 2018/2019.
- [15] Lycée Gustave Eiffel de Dijon (Classe préparatoire P.T.S.I),"Modélisation du Moteur à Courant Continu", en Électrotechnique, 20 janvier 2017.
- [16] **Derbal Abdel Hakim et Hidoussi Slimane**"Modélisation et commande de la machine à courant continu ",Mémoire de fin d'études Master en Réseau électrique, de l'Université Larbi Ben M'hidi, Oum-El-Bouaghi, 14 Juillet 2021.
- [17] **BENZAID Baya, DERF Sabrina** "Régulation de la température et supervision à distance ",Mémoire de fin d'études Master en Electronique des systèmes embarqués, Université de JIJEL, 2019-2020.
- [18] **M<sup>elle</sup> KERCHOUCHE Lamia et M<sup>elle</sup> NAIT ALI Sarah**" Régulation analogique P, PI et PID de la vitesse d'un moteur à courant continu d'un banc didactique 33-033",Mémoire de fin d'études Master en électronique Industrielle d'université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2018-2019.

### **Les sites:**

<https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/moteur-a-courant-continu/>

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4.>