

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION

AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES

--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية

-تلمسان-

## Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Energie et environnement

Présenté par :

M<sup>elle</sup> Dich Bochra et M<sup>elle</sup> CHERIGUI Nesrine

### THEME

## Etude d'une commande d'un moteur à courant continu

Soutenu publiquement, le 09 / 09 /2020, devant le jury composé de :

M. CHEMIDI A	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
M <sup>me</sup> BOURI S	MCA	UNIV- Tlemcen	Directeur de mémoire
M. MEGNAFI H	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M <sup>me</sup> BOUSMAHA I	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents,

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre patience et vos innombrables sacrifices.

Je souhaite que ce travail soit pour vous une petite compensation et reconnaissance envers ce que vous avez fait d'incroyable pour moi.

Que dieu, tout puissant, vous préserve et vous procure santé et longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler.

A mes très chers frères, mes tantes, mes oncles, mes cousins, mes cousines et à mes très chères amies.

A mon binôme Nesrine Cherigui avec qui j'ai passé de meilleurs moments qui restent de bons souvenirs pour toujours.

Aucune dédicace ne saurait exprimer assez profondément ce que je ressens envers vous. Je vous dirais tout simplement, un grand merci, je vous aime.

*Bachra Dichi*

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents,

Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre patience et vos innombrables sacrifices.

Je souhaite que ce travail soit pour vous une petite compensation et reconnaissance envers ce qui vous avez fait d'incroyable pour moi.

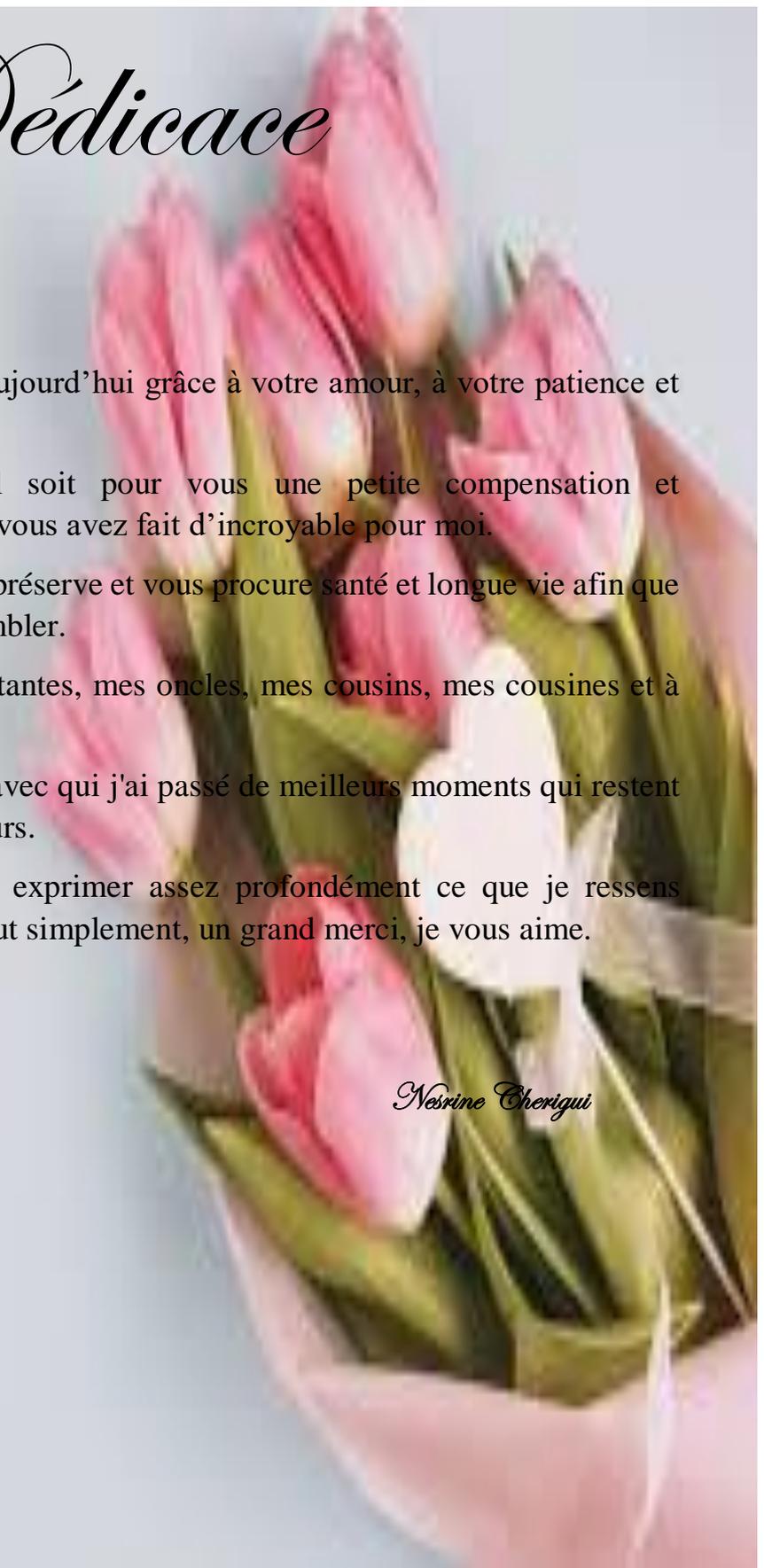
Que dieu, tout puissant, vous préserve et vous procure santé et longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler.

A mes très chers frères, mes tantes, mes oncles, mes cousins, mes cousines et à mes très chères amies.

A mon binôme Bochra Dich avec qui j'ai passé de meilleurs moments qui restent de bons souvenirs pour toujours.

Aucune dédicace ne saurait exprimer assez profondément ce que je ressens envers vous. Je vous dirais tout simplement, un grand merci, je vous aime.

*Nesrine Cherigui*



## **Remerciements**

Tout d'abord, on remercie le bon dieu le tout puissant, de nous avoir donné la force, la patience et la volonté de réaliser ce travail dans de meilleures circonstances.

Le présent travail a été préparé sous la direction de Madame BOURI SIHEM Maitre de conférences à l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, qui nous a fait l'honneur de diriger ce travail. Nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance, nos vifs remerciements pour ses aides, ses conseils précieux, ses sacrifices ainsi que pour la confiance qu'elle nous a prodigué durant la réalisation de ce travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury de soutenance, nous les remercions chaleureusement pour leur présence et pour avoir accepté d'examiner le présent mémoire.

Nous remercions aussi tous les enseignants et les responsables du Département du deuxième cycle et spécialement ceux de la spécialité « Electrotechnique et Energies renouvelable » de l'ESSA de TLEMEN pour leurs aides et leurs encouragements. Sans oublier nos camarades de l'école, nous tenons à les remercier vivement.

Enfin, Nous voudrions associer à nos remerciements toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

## Résumé

L'avantage major 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 ainsi que leur raccordement direct à une source d'énergie (batteries d'accumulateur, piles, etc.) Malgré leur principal problème qui se pose au niveau de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif.

Dans ce travail, on présente la technique de la variation de vitesse et de sens de rotation d'un moteur à courant continu et la simulation de notre model sur logiciel de simulation ISIS proteus.

**Mots clés :** Moteur à courant continu, convertisseurs statiques, réglage de vitesse, arduino, étude de commande, technique MLI. Variation de sens de rotation.

## Abstract

The main advantage of DC motors lies in their easy adaptation to ways to adjust or vary their speed, torque and direction of rotation as well as their direct connection to a power source (accumulator, batteries, etc.) Despite their major problem at the connection between the brushes, or "coal" and the rotary collector.

In this work, we present the technique of the speed variation and rotation sense of DC motors and the simulation of our model on ISIS proteus simulation software.

**Keywords:** DC motor, static converters, speed control, Arduino, command study, PWM technique, rotation sense control.

## تلخيص

تتميز الميزة الرئيسية لمحركات التيار المباشر في تكيفها البسيط مع وسائل تعديل أو تغيير سرعتها، عزم أو اتجاه الدوران بالإضافة الى اتصالها المباشر بمصدر الطاقة كالبطاريات على الرغم من مشكلتها الرئيسية المتمثلة في الاتصال بين الفرشاة والمجمع.

في هذا العمل نقدم تقنية التحكم في سرعة واتجاه دوران محرك التيار المستمر مع محاكاة نموذجنا على برنامج المحاكاة ISIS proteus.

كلمات مفتاحية:

التحكم بالسرعة، اردوينو، التحكم باتجاه الدوران، محرك التيار المستمر، MLI

# Liste des figures

## Chapitre (I) : Notions générales sur le moteur à courant continu

Fig. I.1 : La conversion d'énergie dans un moteur à courant continu.

Fig. I.2 : Schéma du moteur à courant continu.

Fig. I.3 : Stator (à droite) et rotor (à gauche) du moteur à courant continu.

Fig. I.4 : Le stator du moteur à courant continu.

Fig. I.5 : Rotor du moteur à courant continu à faible puissance (à gauche) et forte puissance (à droite).

Fig. I.6 : Enroulement imbriqué.

Fig. I.7 : Enroulement ondulé.

Fig. I.8 : Système balai-collecteur d'un moteur courant continu à faible puissance.

Fig. I.9 : Schéma électrique du moteur à courant continu.

Fig. I.10 : Les couples du moteur à courant continu.

Fig. I.11 : Champs magnétiques créés dans un moteur à courant continu.

Fig. I.12: Loi de Laplace.

Fig. I.13 : Les quadrants de fonctionnement.

Fig. I.14 : Moteur à excitation séparée.

Fig. I.15 : Arbre des puissance.

Fig. I.16 : Moteur à excitation shunt.

Fig. I.17 : arbre des puissance.

Fig. I.18 : Caractéristique à vide.

Fig. I.19 :Caractéristiques en charge.

Fig. I.20: Caractéristiques en charge ( $I_e < I_{e2} < I_{e3}$ ).

Fig. I. 21: Caractéristiques mécaniques ( $I_e < I_{e2} < I_{e3}$ ).

Fig. I.22: Moteur à excitation série.

Fig. I.23 : Arbre de puissances.

Fig. I.24 : Caractéristique en charge du moteur.

Fig. I.25 : Cacactéristique mécanique.

Fig. I.26: Moteur à excitation composé.

Fig. I.27 : Arbre des puissance.

Fig. I.28 : Caractéristique à flux additif.

Fig. I.29 : Réglage de la vitesse par variation de la résistance d'induit.

## **Chapitre (II) : Présentation de l'hacheur**

**Fig. II.1: Hacheur non réversible à liaison directe.**

**Fig. II.2 : Schéma de fonctionnement de l'hacheur série.**

**Fig. II.3 : Montage d'un hacheur parallèle.**

**Fig. II.4: Schéma de fonctionnement d'un hacheur abaisseur-élévateur.**

**Fig. II.5: Schéma de fonctionnement de l'hacheur série réversible en courant.**

**Fig. II.6: Schéma de fonctionnement d'un hacheur réversible en tension.**

**Fig. II.7: Schéma de principe d'un hacheur réversible en tension et en courant.**

**Fig. II.8: Schéma de fonctionnement en quatre quadrants.**

**Fig. II.9: Schéma de passage de courant de moteur dans le premier quadrant.**

**Fig. II.10: Schéma de passage du courant de moteur dans le deuxième quadrant.**

**Fig. II.11 : Schéma de passage du courant de moteur dans le troisième quadrant.**

**Fig. II.12: Schéma de passage de courant de moteur dans le quatrième quadrant.**

**Fig. II.13 : Réalisation du signal MLI.**

**Fig. II.14 : Les allures de stratégie séquentielle.**

**Fig. II.15 : Les allures de fonctionnement des interrupteurs pour la stratégie bipolaire.**

**Fig. II.16: Les allures de fonctionnement des interrupteurs pour la commande unipolaire.**

**Fig. II.17 : Les allures de tension aux bornes de la charge et du courant qui le traverse.**

## **Chapitre (III) : Simulation de la commande du moteur à courant continu**

**Fig. III.1 : Description de la carte arduino Uno.**

**Fig. III.2 : Caractéristiques techniques de la carte Arduino Uno.**

**Fig. III.3 : Le branchement de la carte Arduino Uno.**

**Fig. III.4 : Carte dccduino.**

**Fig. III.5 : Interface de logiciel Arduino.**

**Fig. III.6: Icone fichier.**

**Fig. III.7 : La barre d'outils.**

**Fig. III.8 : Code de base de programme arduino.**

**Fig. III.9 : Les étapes de traitement de programme.**

**Fig. III.10: Schéma de commande en 02 sens de marche d'un moteur à CC.**

**Fig. III.11 : Organigramme pour de commande en 02 sens de marche d'un moteur à CC.**

**Fig. III.12 : Variation de vitesse d'un moteur à CC.**

**Fig. III.13: Organigramme du programme de variation de la vitesse.**

**Fig. III.14 : Schéma simplifié de l'afficheur LCD 16x2.**

**Fig. III.15: Tableau des tensions d'exploitations, caractéristiques électriques et mécaniques.**

**Fig. III.16 : Caractéristiques globales de l'afficheur LCD.**

**Fig. III.17 : Tableau descriptif de brochage.**

**Fig. III.18: Schéma simplifiée de L293D.**

**Fig. III.19 : Les pins de L293D.**

**Fig. III.20 : tableau des commandes.**

**Fig. III.21 : Brochage de L293D avec deux moteurs sous ISIS.**

**Fig. III.22: Schéma du circuit de simulation de contrôle de vitesse (Icis-Proteus).**

**Fig. III.23 : Signal MLI.**

**Fig. III.24 : Organigramme du programme de variation de la vitesse.**

## Liste des abréviations

MCC : Moteur à courant continu.

CC : Courant continu.

DC : Direct current.

RMI : Réaction magnétique d'induit.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

## Nomenclature

### Chapitre (I) : Notions générales sur le moteur à courant continu

$F$  : Force subis par le conducteur (en N).

$B$  : Induction de champ magnétique (en T).

$I$  : Intensité de courant qui parcourt le conducteur (en A).

$L$  : La longueur de conducteur (en m).

$\alpha$  : Angle entre le sens de l'induction magnétique et le sens de courant dans le conducteur.

$U$  : Tension d'alimentation d'induit (en V) ;

$E$  : Force électromotrice (en V) ;

$R$  : Résistance de bobinage d'induit (en Ohm) ;

$J$  : Moment d'inertie du moteur à courant continu (en Kg.m<sup>2</sup>)

$C_m$  : Le couple mécanique (utile) du moteur (en Nm).

$C_r$  : Le couple résistant du la charge (en Nm).

$f$  : Coefficient de frottement crée par la rotation du moteur.

$K$  : Grandeur constante propre au moteur .

$P$  : Nombre de pair de pôles de la machine.

$N$  : Nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.

$a$  : Nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.

$\Phi$  : Flux sous un pôle de la machine (en Wb).

$\Omega$  : Vitesse angulaire de l'axe du moteur ( en rd/s).

$R_a$  : Résistance de l'induit (en Ohm).

$R_{ad}$  : Rhéostat branché aux bornes de l'induit (en Ohm).

$U_n$  : Tension d'alimentation (en V).

$k$  : Grandeur constante propre au moteur.

$I_a$  : Courant de l'induit (en A).

$C$  : Couple utile du moteur (en Nm).

### Chapitre (II) : Présentation de l'hacheur

$i_s$  : Le courant qui traverse la charge.

$i_1$  : Le courant de la source.

$V$  : La tension aux bornes de la charge.

$E$  : La tension de la source continue.

$\alpha$  : Le rapport cyclique de l'hacheur.

$V_d$  : La tension aux bornes de la diode D.

$U$  : La tension de la source (en V).

$K$  : Le coefficient du moteur.

$\alpha$  : Le rapport cyclique de l'hacheur.

$i$  : Le courant qui traverse le moteur.

$\Omega$  : La vitesse mécanique de rotation du moteur.

$C_R$  : Le Couple résistant appliqué au moteur.

$C_E$  : Le couple mécanique du moteur.

## Table de matière

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu .....	3
<b>Introduction</b> .....	4
<b>I.1. Définition du moteur à courant continu</b> .....	4
<b>I.2. Constitution</b> .....	4
<b>I.2.1. Stator</b> .....	5
<b>I.2.2. Rotor</b> .....	5
<b>I.3. Modélisation du moteur à courant continu</b> .....	7
<b>I.4. Principe de fonctionnement du moteur à courant continu</b> .....	9
<b>I.5. Les quatre quadrants de fonctionnement et la notion de la réversibilité</b> .....	10
<b>I.6. Différents types du moteur à courant continu</b> .....	11
<b>I.6.1. Moteur à excitation séparée</b> .....	11
Caractéristiques.....	11
<b>I.6.2. Moteur à excitation shunt</b> .....	12
Caractéristiques.....	12
<b>I.6.2.2. Caractéristiques des moteurs shunt et séparé</b> .....	13
<b>I.6.3. Moteur à excitation série</b> .....	15
Caractéristiques.....	15
<b>I.6.4. Moteur à excitation composée</b> .....	16
Caractéristiques.....	16
<b>I.7. Différents modes de réglage de la vitesse d'un moteur à courant</b> .....	18
<b>I.7.1. Réglage rhéostatique</b> .....	18
<b>I.7.2. Réglage par la tension d'induit</b> .....	18
<b>I.7.3. Réglage par le flux (Défluxage)</b> .....	19
<b>I.7.4. Réglage par régulateur</b> .....	19
<b>I.7.5. Réglage par convertisseur DC/DC</b> .....	19
<b>I.8. Les avantages et les inconvénients</b> .....	19
<b>I.8.1. Les avantages</b> .....	19
<b>I.8.2. Les inconvénients</b> .....	20
<b>I.9. Domaines d'utilisation des moteurs à courant continu</b> .....	20
<b>Conclusion</b> .....	20
Chapitre II : Présentation de l'hacheur .....	21
<b>Introduction</b> .....	22
<b>II.1. Définition de L'hacheur</b> .....	22
<b>II.2. Types d'hacheurs</b> .....	22

II.2.1. Hacheur à liaison directe (non-réversible) .....	22
II.2.2. Hacheur à liaison indirecte (réversible) .....	25
II.3. Les techniques de commande de l'hacheur .....	29
II.3.1. Principe de la « MLI » .....	30
II.3.2. Stratégie d'obtention d'une onde « MLI » .....	30
II.3.2.1. Modulation d'échantillonnage naturel .....	30
II.3.3. Commande séquentielle, unipolaire, bipolaire d'un hacheur 4 quadrants .....	30
II.3.3.1. Commande séquentielle .....	30
II.3.3.2. Commande continue bipolaire .....	31
II.3.3.3. Commande continue unipolaire .....	31
II.3.3.4. Puissance transmise en commande bipolaire .....	32
II.3.3.5. Les types de commande .....	33
II.4. Les montages d'électronique de puissance .....	33
II.4.1. Circuit de commande .....	33
II.4.2. Circuit de puissance .....	33
II.4.3. Circuit d'amplification .....	33
II.4.4. Circuit de protection .....	33
Conclusion .....	34
Chapitre III : Simulation de la commande du moteur à courant continu .....	35
Introduction .....	36
III.1. Plaque Arduino .....	36
III.1.1. Définition de la carte Arduino Uno .....	36
III.1.2. Caractéristiques de la carte arduino Uno .....	37
III.1.3. Utilisation de la carte arduino Uno .....	38
III.1.4 Brochage de la carte Arduino .....	38
III.1.5. Les capacités d'entrée/sortie .....	39
III.1.6. Les clones .....	39
III.1.7. Les avantages .....	39
III.1.8. Les inconvénients .....	40
III.1.9. Présentation de logiciel Arduino .....	40
Fonctionnement d'un programme arduino .....	42
III.2. Application de la commande du moteur à courant continu .....	43
III.2.1. Commande du moteur en deux sens de marche .....	43
III.2.1.1. Partie hardware .....	43
III.2.1.2. Partie software .....	43
III.2.2. Variation de vitesse du moteur à courant continu .....	44

<b>III.2.2.1. Partie hardware</b> .....	44
<b>III.2.3. Contrôle de vitesse du moteur à courant continu</b> .....	45
<b>III.2.3.1. Afficheur LCD (Liquide Crystal Display)</b> .....	45
<b>Caractéristiques de l’afficheur LCD</b> .....	46
<b>Fonctionnement d’un afficheur LCD</b> .....	47
<b>Brochage de l’afficheur LCD</b> .....	47
<b>III.2.3. Description de L293D</b> .....	48
<b>Caractéristiques techniques du L293D</b> .....	49
<b>Branchement du L293D</b> .....	49
<b>Fonctionnement de L293D</b> .....	50
<b>Utilisation du L293D avec Arduino et deux moteurs CC</b> .....	51
<b>III.2.4. Partie hardware de l’application</b> .....	51
<b>III.2.5. Partie software de l’application</b> .....	53
Conclusion Générale .....	54
Bibliographie .....	56
Annexes.....	57

# Introduction Générale

### Introduction Générale

L'industrie et les transports ont de plus en plus besoin de système à vitesse continument variable douée de souplesse et de précision.

On remarque que les solutions mécaniques et hydrauliques sont encore utilisées. mais les solutions électroniques sont aujourd'hui et de loin les plus appréciées leur succès vient des caractéristiques avantageux que leur confère l'électronique, tant sur le plan de la conversion d'énergie que sur celui de l'asservissement du système.

Pour régler la vitesse des équipements industrielles, on a longtemps eu recours à divers dispositifs mécaniques. Maintenant, on fait surtout appel à des variateurs de vitesse électroniques.

Alors, Les moteurs à courant continu, qui sont par nature des machines à vitesse variable sont très utilisés.

Les moteurs à courant continu sont des appareils qui transforment l'énergie électrique qu'ils reçoivent en énergie mécanique, l'usage de ces moteurs est plutôt restreint car la distribution se fait en 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 supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse.

Ses caractéristiques naturellement intéressantes, sa flexibilité et son haut rendement ont encouragé la large diffusion du moteur à courant continu dans de nombreux types d'applications d'entraînement industriels.

Le grand inconvénient de ce moteur est la présence du collecteur (l'érosion de charbon). Pour bailler cet inconvénient, et grâce à l'apparition de nouveaux matériaux, plus précisément, d'aimant performant à base de terres rares. On remarque actuellement, l'utilisation de nouvelles machines à courant continu sans collecteur dont la puissance ne cesse de croître.

On s'intéresse dans notre étude à la régulation de la vitesse du moteur à courant continu en utilisant arduino qui a été conçu pour être accessible à tous par sa simplicité, mais il peut également être d'usage professionnel, tant les possibilités d'application sont nombreuses. Ces cartes polyvalentes sont donc parfaites pour, ceux qui ne demandent qu'apprendre et progresser.

Le développement de la microélectronique et de la micro-informatique met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur des circuits à très haut degré d'intégration dont les possibilités matérielles sont encore accusées par leur facilité de programmation, tel que l'arduino. Comme en électrotechnique, on s'intéresse toujours en premier lieu à la machine à courant continu car il est possible d'obtenir de manière relativement simple sa modélisation, il s'ensuit que la machine à courant continu est une référence.

L'objectif de ce travail est une étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continue.

## Introduction Générale

Notre travail est composé de 3 chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur le moteur à courant continu, préciser sa construction, sa modélisation, son principe de fonctionnement et ses quatre quadrants de fonctionnement, ensuite ses différents types, après on va passer aux modes de réglage de la vitesse du moteur à courant continu et on conclura par ses avantages, inconvénients et ses domaines d'utilisation.

Dans le deuxième chapitre, nous définirons le convertisseur DC/DC l'hacheur, citer ses différents types, ses divers types de commandes et on clôtura notre chapitre par les multiples montages de l'électronique de puissance.

Dans le troisième chapitre, on va simuler la variation de la vitesse ainsi que le sens de rotation d'un moteur à courant continu en le contrôlant par l'hacheur de type quatre quadrant, ce dernier est commandé par signal MLI provenant de l'arduino et qu'est visualiser par un oscilloscope. Mais franchement on n'a pas pu attendre notre but qu'a été la réalisation de cette commande à cause des circonstances actuelles (COVID\_19).

# Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

## Introduction

Le développement de la technologie conduit à la nécessité d'utiliser les machines adaptées à la variation de la vitesse. Parmi les machines les plus utilisées, on trouve celle à courant continu plus précisément le moteur à courant continu.

Dans ce chapitre, on va définir le moteur à courant continu, préciser sa construction, sa modélisation, son principe de fonctionnement et ses quatre quadrants de fonctionnement, ensuite ses différents types, après on va passer aux modes de réglage de la vitesse du moteur à courant continu et on conclura par ses avantages, inconvénients et ses domaines d'utilisation.

## I.1. Définition du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu est un convertisseur électromécanique d'énergie. Il permet de transformer une énergie électrique continue en une énergie mécanique pour entrainer une charge en mouvement.

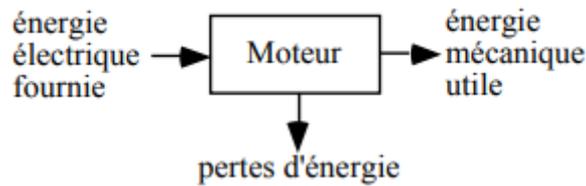


Fig. I.1 : La conversion d'énergie dans un moteur à courant continu.

## I.2. Constitution

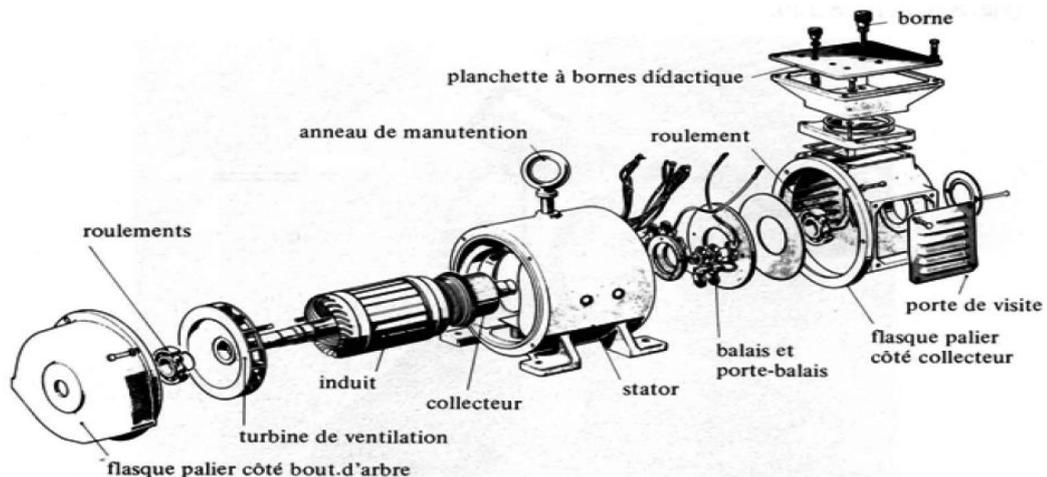


Fig. I.2 : Schéma du moteur à courant continu.

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

- **Partie fixe** : stator (inducteur).
- **Partie mobile** : rotor (induit).



Fig. I.3 : Stator (à droite) et rotor (à gauche) du moteur à courant continu.

### I.2.1. Stator

Le stator produit le champ magnétique (champ d'excitation) à partir de l'enroulement alimenté par un courant continu ou par des aimants permanents collés à l'intérieur du stator. Le flux est orienté du pôle nord au pôle sud.

Les bobines excitatrices multipolaire sont connectées de façon que les pôles adjacents ayant des polarités magnétiques contraires.

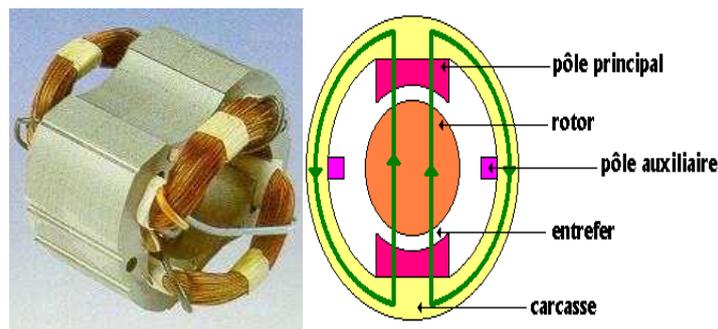


Fig. I.4 : Le stator du moteur à courant continu.

### I.2.2. Rotor

Il est formé d'un empilage de tôles magnétiques et il est soumis à un couple et entraîné en rotation dans le champ inducteur.

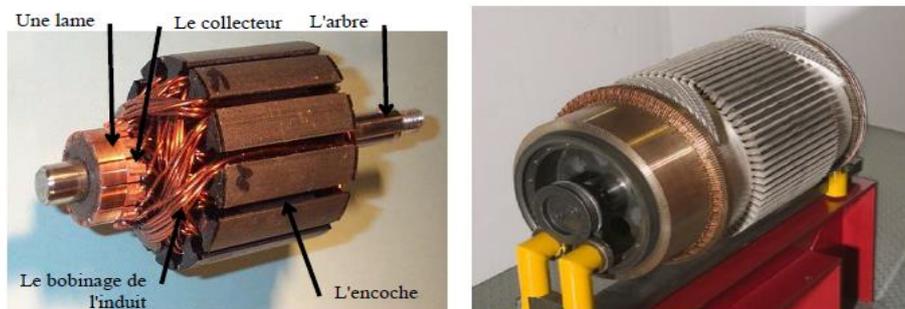


Fig. I.5 : Rotor du moteur à courant continu à faible puissance (à gauche) et forte puissance (à droite).

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

L'induit est un corps cylindrique tournant dans l'espace situé entre les pôles et comprend :

- Une armature dentée de l'induit ;
- Un enroulement placé sur cette armature (de type ondulé ou bien imbriqué) ;
- Un collecteur.

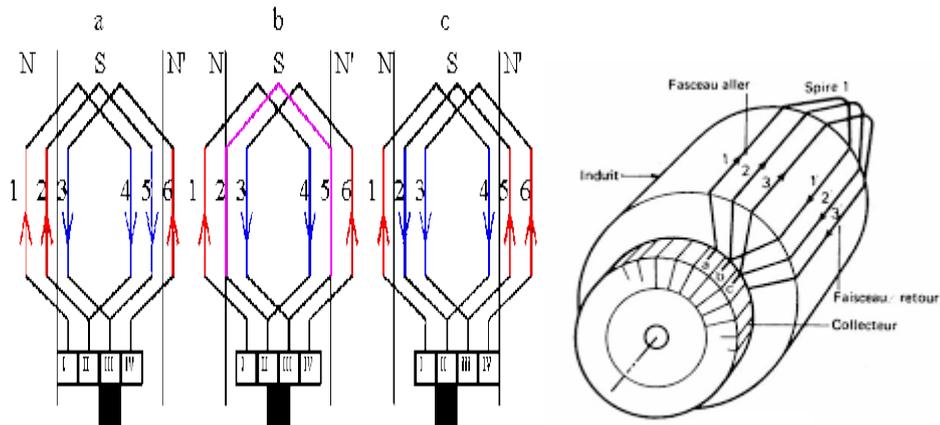


Fig. I.6 : Enroulement imbriqué.

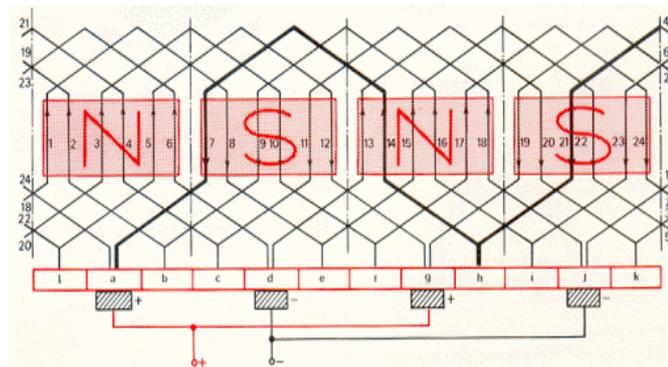


Fig. I.7 : Enroulement ondulé.

Le collecteur est en générale en lames de forme trapézoïdales isolées l'une de l'autre et de la masse par des cales et des manchons en micanite. Il a deux rôles [9] :

- Adaptation de la fréquence des courants rotoriques à la vitesse de rotation de la machine (redresseur mécanique) ;
- Inversion du courant dans un conducteur du rotor en même temps que l'inversion de la f.e.m. correspondant.

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

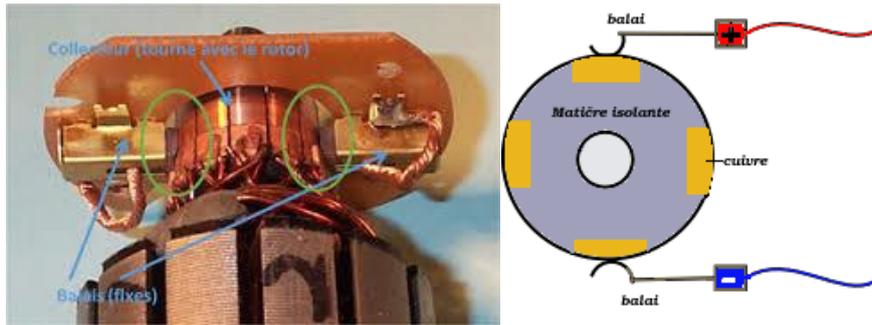


Fig. I.8 : Système balai-collecteur d'un moteur courant continu à faible puissance.

On utilise le dispositif balai pour évacuer le courant du collecteur tournant et pour amener le courant au collecteur.

### I.3. Modélisation du moteur à courant continu

Le modèle électrique du moteur est représenté par la f.e.m. «  $E$  », la résistance interne  $R$  et l'inductance d'induit  $L$ .

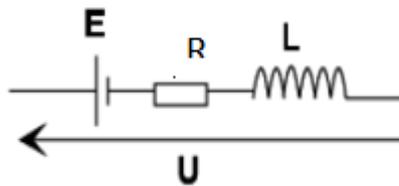


Fig. I.9 : Schéma électrique du moteur à courant continu.

D'après la loi d'Ohm, en négligeant l'inductance d'induit  $L$ , on a :

$$U = E + RI \quad (\text{I.1})$$

$U$ : Tension d'alimentation d'induit (en V) ;

$E$ : Force électromotrice (en V) ;

$R$ : Résistance de bobinage d'induit (en Ohm) ;

$I$ : Courant d'induit (en A).

Cette expression est aussi appelée « la caractéristique électrique du moteur à courant continu ».

La f.e.m «  $E$  » entre les balais est la résultante des f.e.m induites dans tous les conducteurs actifs (logé dans les encoches de l'induit) lors de leur déplacement dans le champ d'induction «  $B$  » obéit par la loi :

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (\text{I.2})$$

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

Où :

$$K = \frac{P}{2\pi a} \cdot N \quad (I.3)$$

Avec :

$K$  : Grandeur constante propre au moteur .

$P$  : Nombre de pair de pôles de la machine.

$N$  : Nombre de conducteurs actifs de la périphérie de l'induit.

$a$  : Nombre de paires de voies de l'enroulement entre les deux balais.

$\Phi$  : Flux sous un pôle de la machine (en Wb).

$\Omega$  : Vitesse angulaire de l'axe du moteur (en rd/s).

La caractéristique mécanique du moteur a courant continu est la suivant :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega = C_m - C_r \quad (I.4)$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie du moteur à courant continu (en Kg.m<sup>2</sup>)

$C_m$  : Le couple mécanique (utile) du moteur (en Nm).

$C_r$  : Le couple résistant du la charge (en Nm).

$f$  : Coefficient de frottement crée par la rotation du moteur.

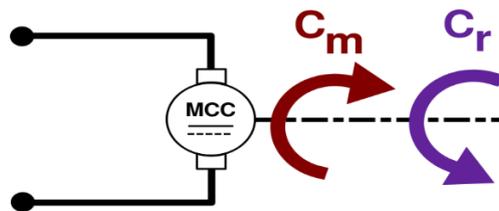


Fig. I.10 : Les couples du moteur à courant continu.

La puissance électromagnétique échangé lorsqu'il est en rotation s'exprime par le produit de couple électromagnétique  $C_{em}$  et la vitesse angulaire  $\Omega$ , d'après la loi de conservation d'énergie :

$$P_{em} = E \cdot I = C_{em} \cdot \Omega \quad (I.5)$$

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

Il en résulte que le couple électromagnétique  $C_{em}$  s'exprime par :

$$C_{em} = \frac{E.I}{\Omega} = \frac{K.\Phi.\Omega.I}{\Omega} = K.\Phi.I \quad (I.6)$$

### I.4. Principe de fonctionnement du moteur à courant continu

Le moteur à courant continu fonctionne selon la loi de Laplace : « *Tout conducteur de longueur  $L$  parcouru par un courant  $I$  et placé dans un champ magnétique  $B$  est soumis à une force  $F$*  ».

Le principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu repose sur la création d'un couple électromagnétique sur un rotor porteur de conducteurs parcourus par un courant continu, et qui se déplacent dans un champ magnétique.

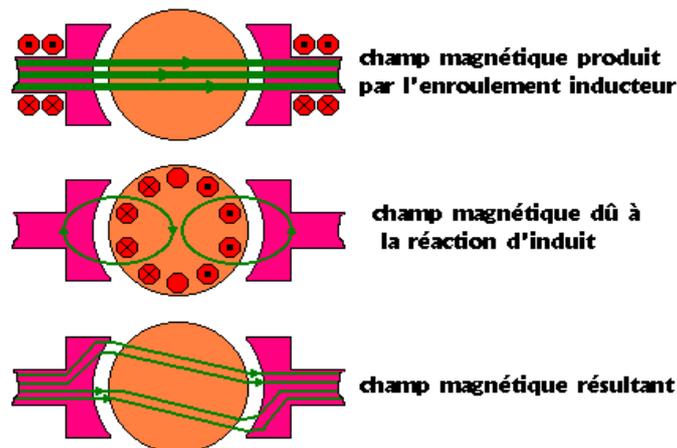


Fig. I.11 : Champs magnétiques créés dans un moteur à courant continu.

L'induit (qui est placé dans le champ magnétique créé par le stator) porte des conducteurs parcourus par un courant continu. Les spires sont le siège de forces dites de Laplace qui créent un couple entraînant la rotation du rotor. De cette rotation résulte une variation du flux traversant la spire, variation qui engendre une force électromotrice tel qu'on détermine sa direction par la règle de la main droite aux bornes de la spire.

Le collecteur permet l'alimentation des conducteurs en inversant leur sens deux fois par tour.

On a:

$$dF = Idl \wedge B \quad (I.7)$$

Alors:

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin\alpha \quad (I.8)$$

Avec :

$F$  : Force subis par le conducteur (en N).

$B$  : Induction de champ magnétique (en T).

$I$  : Intensité de courant qui parcourt le conducteur (en A).

$L$  : La longueur de conducteur (en m).

$\alpha$  : Angle entre le sens de l'induction magnétique et le sens de courant dans le conducteur.

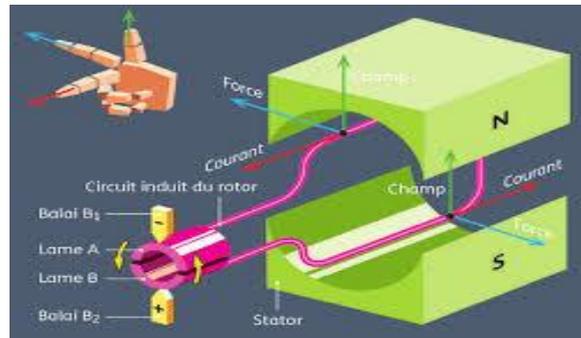


Fig. I.12: Loi de Laplace.

### I.5. Les quatre quadrants de fonctionnement et la notion de la réversibilité

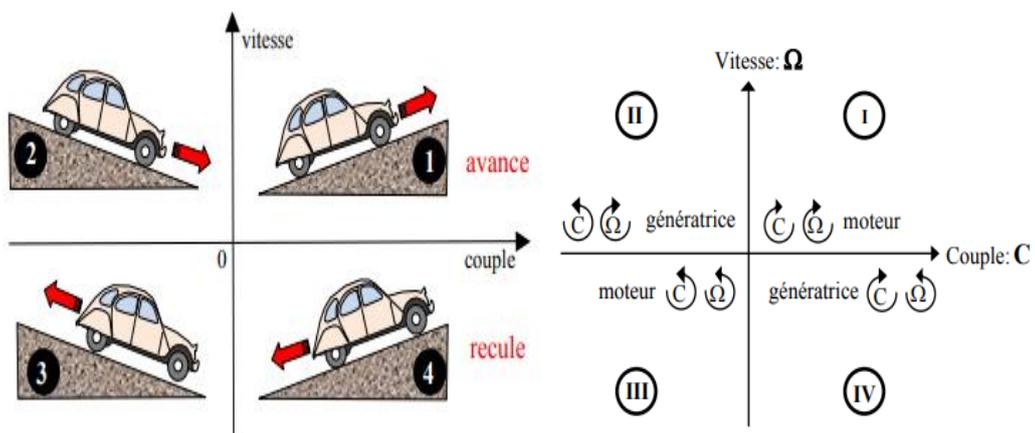


Fig. I.13 : Les quadrants de fonctionnement.

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

L'association d'un variateur dit à quatre quadrants et d'un moteur courant continu couvre quatre séquences de fonctionnement.

- Deux séquences pour lesquelles le moteur entraîne sa charge dans un sens ou dans un autre (quadrant I et III).
- Deux séquences pour lesquelles la charge est freinée par restitution d'énergie au réseau d'alimentation (quadrant II et IV).

On emploie le terme de réversibilité pour qualifier l'aptitude des éléments à accepter une tension ou un courant positif ou négatif.

L'induit de la machine à courant continu est un dipôle inductif (un élément courant) si on le fait fonctionner dans les quatre quadrants du plan couple /vitesse, il est réversible en tension et en courant.

On a en convention récepteur :

$$U = E + R.I \quad (\text{I.9})$$

En puissance absorbée  $P_M$  :

$$P_M = U.I = E.I + RI^2 \quad (\text{I.10})$$

### I.6. Différents types du moteur à courant continu

#### I.6.1. Moteur à excitation séparée

Les enroulements de l'induit et de l'inducteur sont alimentés sous des tensions continues différentes. Dans le cas d'un moteur raccordé à un variateur de vitesse, c'est ce mode d'alimentation qui est utilisé. Par ailleurs, l'inversion du sens de rotation s'obtient par l'inversion des polarités d'alimentation de l'induit ou de l'inducteur [2].

#### Caractéristiques

$$U = E + RI \quad (\text{I.11})$$

$$U_e = r.I_e \quad (\text{I.12})$$

$$E = K.\Phi(I).\Omega \quad (\text{I.13})$$

$$C_{em} = \frac{K}{2\pi}.\Phi(I).I \quad (\text{I.14})$$

- Vitesse réglable par tension et indépendante de la charge ;
- En association avec un convertisseur statique (hacheur) fournissant une tension réglable, le domaine de variation de vitesse est assez large ;
- Il fournit un couple important à faible vitesse (machines-outils, levage). En petite puissance, il est souvent utilisé en asservissement avec une régulation de vitesse ;
- L'induit est en convention récepteur ;
- Plage de variation de vitesse très grande (> 1000 en boucle d'asservissement) ;

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

- Couple de démarrage important, idéal pour l'entraînement de charges à forte inertie ;
- Rapport volume/puissance très supérieur à toutes les autres technologies ;
- Rendement élevé ;
- Linéarité tension/vitesse, couple/courant ;
- Prix élevé ;
- Maintenance coûteuse (remplacement des balais en graphite, usure du collecteur) ;
- Il faut deux alimentations : Une pour l'inducteur et autre pour l'induit ;
- Grande souplesse de commande ;
- Large gamme de vitesse ;
- Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous le fonctionnement moteur d'asservissement (machines-outils : moteur de broche machines spéciale, d'axes...).

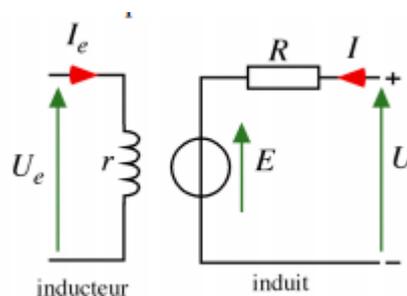


Fig. I.14 : Moteur à excitation séparée.

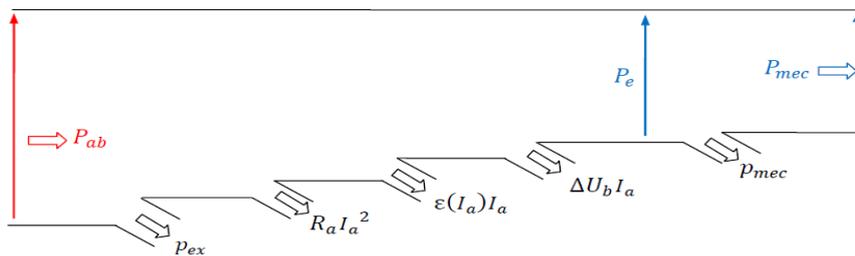


Fig. I.15 : Arbre des puissance.

### I.6.2. Moteur à excitation shunt

Les enroulements de l'induit et de l'inducteur sont raccordés en parallèle et soumis à la même tension d'alimentation. L'inversion du sens de rotation fait appel au même principe que le premier [2].

#### Caractéristiques

$$U = E + RI \quad (\text{I.15})$$

$$\Phi = \text{constant} \cdot I \quad (\text{hors saturation}) \quad (\text{I.16})$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega = K' \cdot \Omega \cdot I \quad (\text{I.17})$$

$$C_{em} = \frac{K}{2\pi} \cdot \Phi \cdot I \quad (\text{I.18})$$

- Fort couple de démarrage ;

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

- Il convient très bien dans le domaine des fortes puissances (1 à 10 MW) pour obtenir un fonctionnement satisfaisant en faible vitesse (traction, laminoirs) ;
- En petite puissance il est employé comme démarreur des moteurs à explosion ;
- L'inducteur connecté en série avec l'induit, le flux d'excitation  $\Phi$  est donc implicitement asservi au couple fourni ;
- Le bobinage inducteur comporte, dans ce cas, peu de spires, mais il est réalisé avec du fil de gros diamètre (robustesse) ;
- Le moteur série est un autorégulateur de puissance ;
- Possède un fort couple de démarrage mais risque l'emballement à vide ;
- Le couple du moteur série ne dépend pas de la tension d'alimentation ;
- Le couple résistant croît rapidement avec la vitesse ;
- La vitesse décroît quand la charge augmente ;
- Supporte bien les surcharges ;
- Utilisé pour les engins de levage (grues, palans, ponts roulants) ventilateurs, pompes, centrifuges, traction.

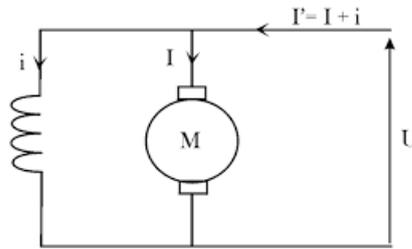


Fig. I.16 : Moteur à excitation shunt.

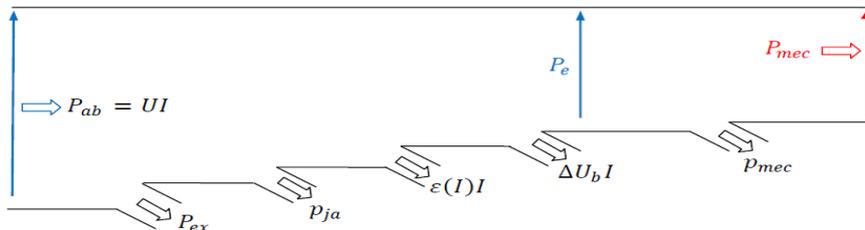


Fig. I.17 : arbre des puissances.

### I.6.2.2. Caractéristiques des moteurs shunt et séparé

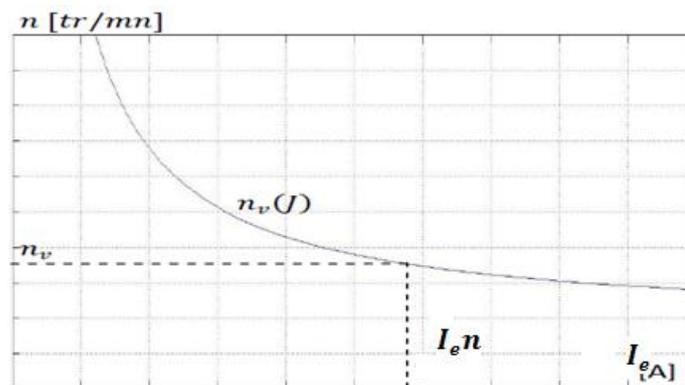


Fig. I.18 : Caractéristique à vide.

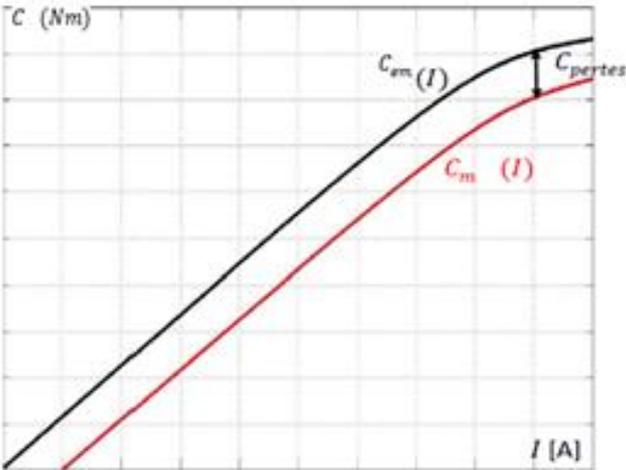


Fig. I.19 :Caractéristiques en charge.

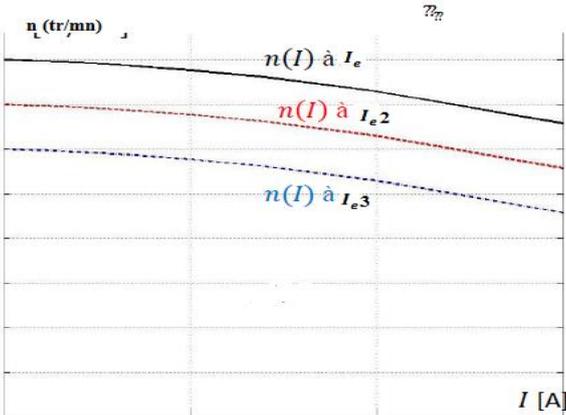


Fig. I.20: Caractéristiques en charge ( $I_e < I_{e2} < I_{e3}$ ).

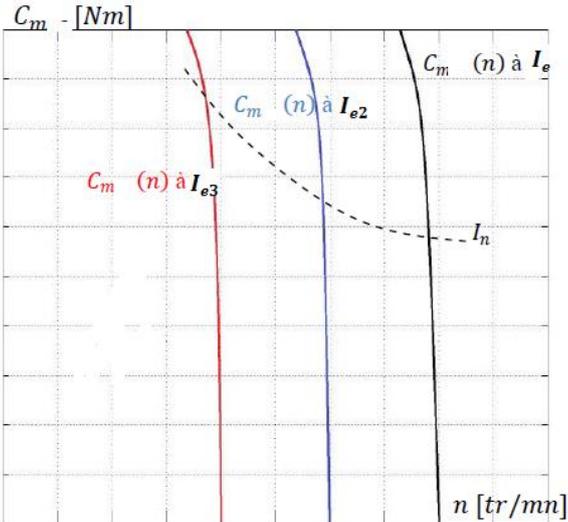


Fig. I. 21: Caractéristiques mécaniques ( $I_e < I_{e2} < I_{e3}$ ).

### I.6.3. Moteur à excitation série

Ce moteur se caractérise par le raccordement série des enroulements de l'induit et l'inducteur. L'inversion de sens de rotation sinbtenue indifféramment par l'inversion des polarités d'alimentation de l'induit au de l'inducteu [2].

#### Caractéristiques

$$U = E + (R + r)I \quad (\text{I.19})$$

$$E = K \cdot \Phi(I) \cdot \Omega \quad (\text{I.20})$$

$$C_{em} = \frac{K}{2\pi} \cdot \Phi(I) \cdot I \quad (\text{I.21})$$

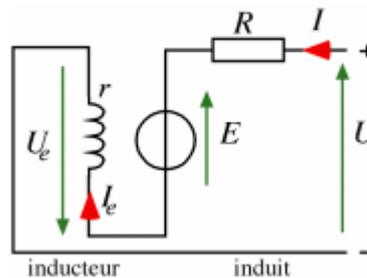


Fig. I.22: Moteur à excitation série.

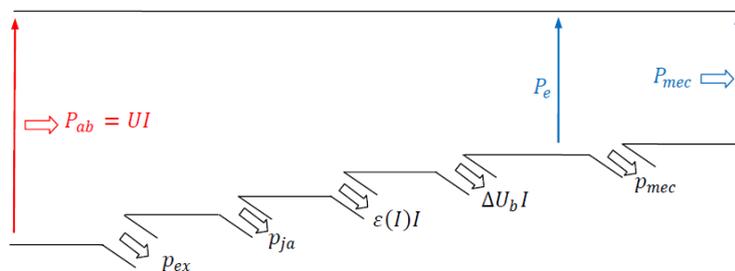


Fig. I.23 : Arbre de puissances.

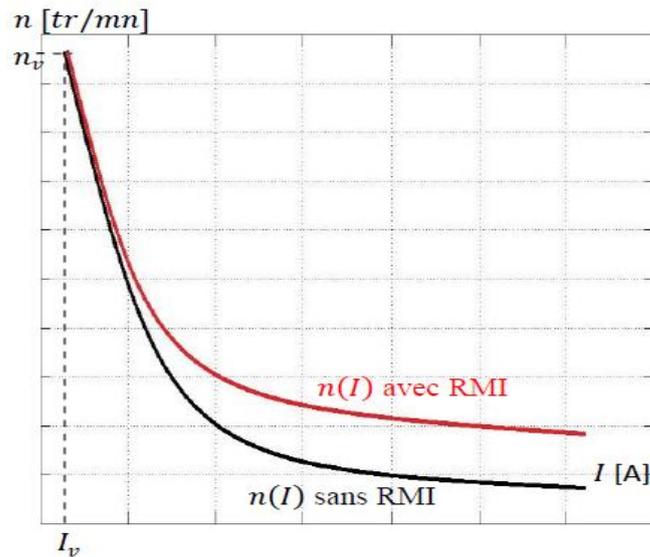


Fig. I.24 : Caractéristique en charge du moteur.

**Remarque**

« RMI » signifie la réaction magnétique d'induit.

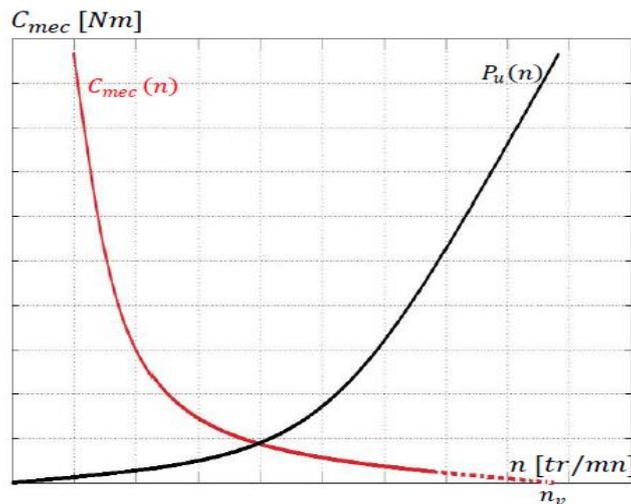


Fig. I.25 : Caractéristique mécanique.

**I.6.4. Moteur à excitation composée**

Ce moteur se distingue par le fait qu'il comporte deux circuits inducteur ainsi que le raccordement des circuits inducteurs va combiner la structure du moteur à excitation shunt et celle à excitation série afin de conserver les avantages de ses deux technologies moteurs [2].

**Caractéristiques**

$$U = E + RI + rI_e \quad (I.22)$$

$$E = K \cdot \Phi(I, I_e) \Omega \quad (I.23)$$

$$C_{em} = \frac{K}{2\pi} \cdot \Phi(I, I_e) \cdot I \quad (I.24)$$

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

- L'inducteur est divisé en deux parties, l'une connectée en série et l'autre en parallèle ;
- Entraînements de grande inertie ;
- Couple très variable avec la vitesse ;
- Utilisé pour petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompes, machines de laminoirs, volants d'inertie.

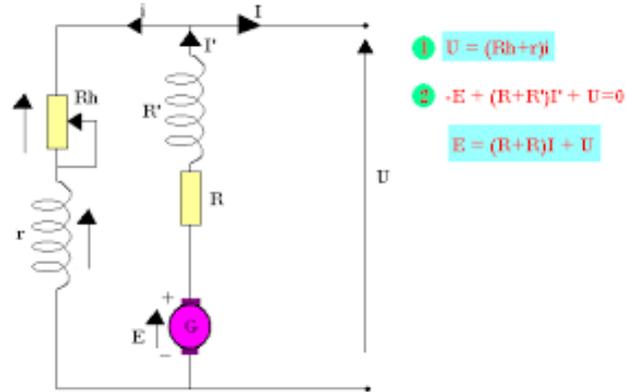


Fig. I.26: Moteur à excitation composé.

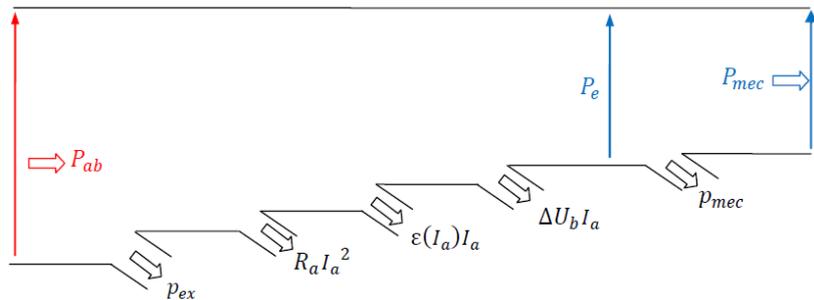


Fig. I.27 : Arbre des puissances.

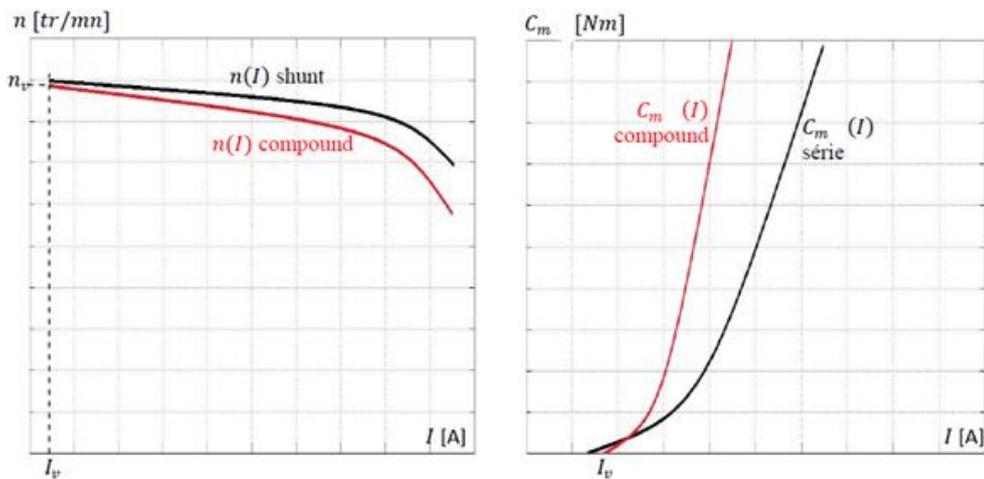


Fig. I.28 : Caractéristique à flux additif.

## I.7. Différents modes de réglage de la vitesse d'un moteur à courant

Vu des relations existantes entre la vitesse, le flux et la force électromotrice, il est possible de faire varier la vitesse  $n$  du moteur par :

### I.7.1. Réglage rhéostatique

On peut réduire la vitesse en augmentant la résistance d'induit avec un rhéostat branché en série avec l'induit. L'expression de la vitesse est :

$$n = \frac{U - (R_a + R_{ad}) \cdot I}{K} \quad (I.25)$$

Pour  $n = 0$  :

$$C = \frac{K \cdot U}{R_a + R_{ad}} \quad (I.26)$$

Avec :

$R_a$  : Résistance de l'induit (en Ohm).

$R_{ad}$  : Rhéostat branché aux bornes de l'induit (en Ohm).

$U$  : Tension d'alimentation (en V).

$K$  : Grandeur constante propre au moteur.

$I$  : Courant de l'induit (en A).

$C$  : Couple utile du moteur (en Nm).

Ainsi on obtient un faisceau de droites comme la montre la figure suivante :

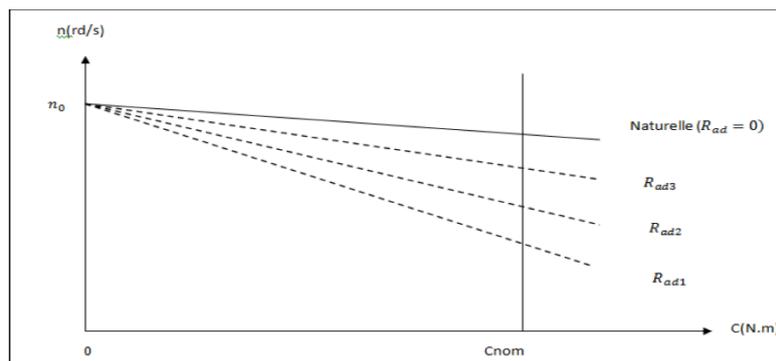


Fig. I.29 : Réglage de la vitesse par variation de la résistance d'induit.

### I.7.2. Réglage par la tension d'induit

Augmenter la force électromotrice  $E$  en augmentant la tension aux bornes de l'induit tout en maintenant le flux de l'inducteur constant. On a un fonctionnement dit à « couple constant ». Ce type de fonctionnement est intéressant au niveau de la conduite d'ascenseur.

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

On a :

$$n = \frac{U}{K} \quad (I.27)$$

Avec :

U: Tension d'alimentation (en V).

k : Grandeur constante propre au moteur.

### I.7.3. Réglage par le flux (Défluxage)

Diminuer le flux de l'inducteur (flux d'excitation) par une réduction du courant d'excitation en maintenant la tension d'alimentation de l'induit constante. Ce type de fonctionnement impose une réduction du couple lorsque la vitesse augmente.

$$n = \frac{U}{k \cdot \phi} \quad (I.28)$$

Le réglage de la tension permet seulement de diminuer la vitesse nominale, le réglage du flux permet de l'augmenter. Comme on ne peut pas appliquer sans risque une tension supérieure à la tension nominale ni employer un flux supérieur au flux nominal, le choix de la méthode de réglage dépend de la charge entraînée par le moteur.

Le développement des composantes de l'électronique de puissance et les techniques de commandes nous permettent aujourd'hui de régler la vitesse des moteurs sans manipuler ses caractéristiques internes (flux, tension ou résistance). En utilisant un organe de commande :

### I.7.4. Réglage par régulateur

Par l'utilisation d'un régulateur PID, commande LQR ou bien logique floue..., on détermine la commande convenable au but d'assurer un comportement bien défini aux variables à commander (la vitesse du moteur dans notre cas) en calculant la commande à appliquer au procédé à partir de l'état de processus et la consigne.

### I.7.5. Réglage par convertisseur DC/DC

En utilisant un hacheur (On va discuter cette partie dans le chapitre suivant).

## I.8. Les avantages et les inconvénients

### I.8.1. Les avantages

- Alimentation aisée pour les systèmes transportant leur réserve d'énergie (pile ; accumulateur et batterie).
- La possibilité de fournir un couple constant sur une gamme de vitesse étendue comprise entre l'arrêt du moteur et sa vitesse nominale.
- Le critère économique : Pour des applications nécessitant des moteurs de puissance forte (>150Kw) associé à un variateur de vitesse, choisir un moteur à courant continu peut apporter une économie de 50 % par rapport à celle de moteur alternatif.

## Chapitre I : Notions générales sur le moteur à courant continu

### I.8.2. Les inconvénients

- Le problème principal vient de la liaison balais collecteur :  
La MCC comporte obligatoirement un collecteur (machine à entrefer radial) ou système de contact glissant (machine à entrefer axial), alors les possibilités d'utilisation en surintensité sont limitées. Pour les vitesses élevées, on a des frottements élevés ; alors les balais doivent être fortes et remplacées régulièrement, ce qui coûte chère.
- L'induit est obligatoirement en rotor, où les pertes sont plus importantes, alors il y a un écoulement de chaleur provenant de rotor et contrôle la température de celle-ci. Ceci impose une limitation en puissance de la machine.

### I.9. Domaines d'utilisation des moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans [2] :

- L'industrie : Laminoirs, enroulements (aciéries, papeteries), machine de refendage (découpe de tôles pour raccourcir la largeur d'une bobine), machine à tréfilage (réduction de la section d'un fil par traction mécanique).
- Le transport : Moteurs de traction ferroviaires, remontées mécaniques.
- La manutention : Levage (portiques dans la construction navale ou aéronautique, grues), ascenseurs.

Les moteurs à courant continu sont utilisés aussi dans les domaines de faibles puissances comme des jouets (voitures radiocommandées, modèles réduites de trains électriques), alimentés sous des tensions continues faibles (<12V), Les moteurs à courant continus sont capables de développer des vitesses élevées (moteur de constructeur MFA Como Drills de référence 540/1 peut tourner à vide à une vitesse de 15800tr/min sous tension 12 V), ces moteurs développent un couple d'entraînement qui leur permet de mouvoir des charges d'une masse respectable.

Pour des puissances comprises entre quelques centaines de watts et quelques kilowatts, les moteurs à courant continus équipent les dispositifs de manutention de faibles charges (chariots élévateurs) et les nouveaux moyens de déplacements individuels (vélos avec assistance électrique, voitures électriques).

Au quotidien, dans le contexte domestique (moteur universel dans les perceuses, scies circulaires, visseuses...) et les appareils de ménagers (aspirateurs, robots de cuisine...).

### Conclusion

Les moteurs à courant continu ont été pendant longtemps les seules machines aptes à la variation de vitesse, mais la technologie moderne des systèmes entrainements exige un contrôle précis et continu des grandeurs caractérisant du moteur tout en garantissant la stabilité, la rapidité et la précision.

Dans le chapitre suivant, on va traiter le processus de la conversion continu-continu pour régler la vitesse d'un moteur à courant continu.

# Chapitre II : Présentation de l'hacheur

### Introduction

Les progrès de l'électronique de puissance ont permis de réduire le coût et la taille des variateurs de vitesse ces quatre dernières décennies. Ils ont concerné à la fois les interrupteurs semi-conducteurs utilisés, la topologie, les méthodes utilisées en contrôle, commande et en simulation, ainsi que le matériel et les logiciels employés pour la commande.

Dans ce chapitre, on va définir l'hacheur, citer ses différents types, on va aussi parler sur les multiples commandes utiliser pour commander un hacheur en se concentrant sur la commande MLI qu'on a utilisé dans notre travail et on clôtura notre chapitre par des divers montages d'électronique de puissance et une conclusion.

### II.1. Définition de L'hacheur

L'hacheur est un convertisseur statique qui permet de régler la puissance transférée entre une source continue avec une tension fixe et une charge continue avec une tension réglable. Il est principalement utilisé pour :

- La variation de la vitesse de la machine à courant continu, il permet donc de faire varier continuellement la vitesse de 0 jusqu'à la vitesse nominale et même inverser le sens de rotation du moteur.
- Le freinage par récupération.
- Alimentation d'appareil électronique.

### II.2. Types d'hacheurs

#### II.2.1. Hacheur à liaison directe (non-réversible)

Un convertisseur à liaison directe est un convertisseur qui ne comporte aucun élément susceptible d'accumuler, de produire ou de dissiper de l'énergie électrique. La puissance électrique instantanée est la même sur son entrée et sa sortie (conservation de la puissance instantanée).

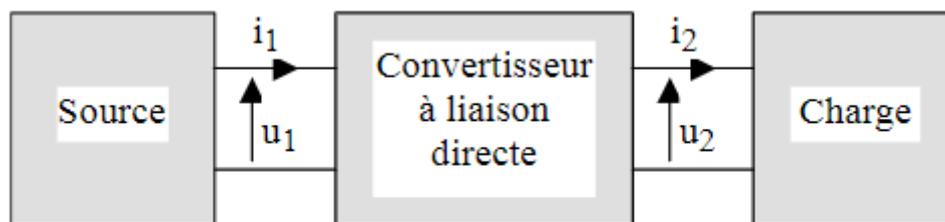


Fig. II.1: Hacheur non réversible à liaison directe.

#### 1) Hacheur série (dévolteur)

D'après son nom, la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée, il comporte un interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture (transistor, IGBT ou

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

MOSFET...) et une diode. Il est considéré comme une liaison directe entre une source de courant continue et un récepteur.

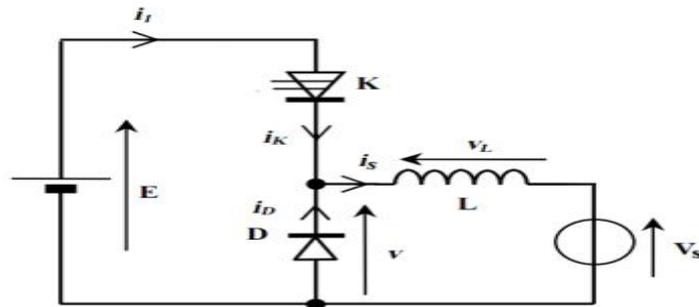


Fig. II.2 : Schéma de fonctionnement de l'hacheur série.

### Principe de fonctionnement

Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$ , l'interrupteur K est passant. D'après la loi des mailles :

$$V_d = -E$$

Ce qui provoque le blocage de la diode D et alors :

$$V = E$$

Donc, le réseau fournit l'énergie au moteur avec :

$$i_s = i_1$$

Pour  $\alpha T \leq t \leq T$ , l'interrupteur K est bloqué. Donc :

$$i_s = 0$$

La présence de l'inductance assure la continuité du courant (et lissage du courant) alors que la diode est passante donc :

$$i_d = i_1$$

$$V_d = 0$$

La liaison entre le réseau et le moteur est interrompue. Ce fonctionnement est appelé « phase de roue libre ».

Avec :

$i_s$  : Le courant qui traverse la charge (en A).

$i_1$  : Le courant de la source (en A).

$V$  : La tension aux bornes de la charge (en V).

$E$  : La tension de la source continue (en V).

$\alpha$  : Le rapport cyclique de l'hacheur.

$V_d$  : La tension aux bornes de la diode D (en V).

Tel que :

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

$$\alpha = \frac{\text{la duré de l'état passante de K}}{\text{période de fonctionnement de K}} \quad (\text{II.1})$$

La valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge est :

$$V_{moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V(t) dt = \alpha \cdot E \quad (\text{II.2})$$

### 2) Hacheur parallèle (survolteur)

C'est le contraire de l'hacheur série, ce qui veut dire que la tension moyenne de sortie est supérieure à celle de l'entrée. C'est un hacheur à stockage inductif et le rôle de l'inductance est le lissage du courant de la source.

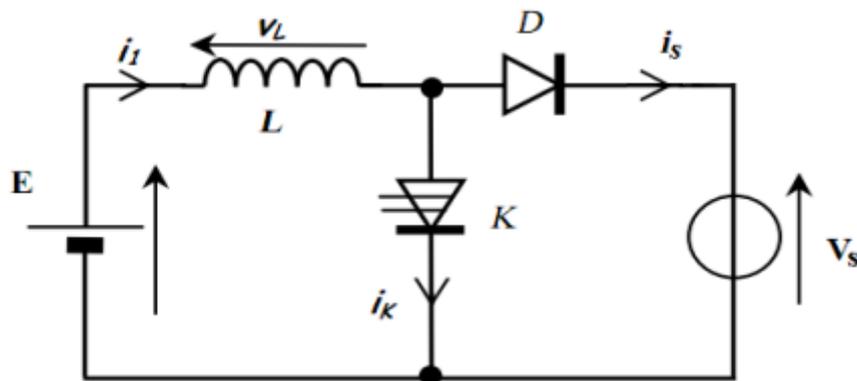


Fig. II.3 : Montage d'un hacheur parallèle.

#### Principe de fonctionnement

Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$ , l'interrupteur K est passant, alors :

$$V = 0$$

Donc :

$$V_d = -E$$

Cela veut dire que la diode est bloquée, donc :

$$i_s = 0$$

$$i_K = i_1$$

Il s'agit de la phase de roue libre, au cours de laquelle l'inductance L accumule l'énergie fournie par la phase de freinage du moteur.

Entre  $\alpha T \leq t \leq T$ , K est bloquée, donc la diode est passante :

$$v = U$$

$$i_s = i$$

$$i_K = 0$$

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

Avec :

$v$  : La tension aux bornes de l'interrupteur K (en V).

$i_K$  : Le courant qui traverse l'interrupteur K (en A).

La tension moyenne de la charge est donnée par la relation suivante :

$$V_{moy} = U. (1 - \alpha) \quad (II.3)$$

### 3) Hacheur parallèle-série

Il permet de fournir une tension de sortie plus faible ou plus forte que celle de l'entrée, tout dépend du rapport cyclique des interrupteurs. C'est à la fois un montage inverseur de tension et une liaison indirecte entre deux sources de courant continue par l'intermédiaire d'une bobine.

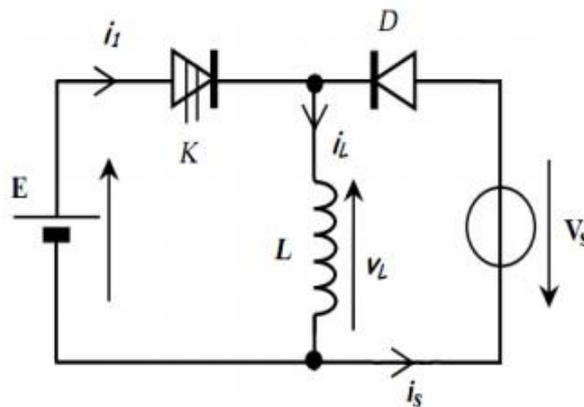


Fig. II.4: Schéma de fonctionnement d'un hacheur abaisseur-élevateur.

### II.2.2. Hacheur à liaison indirecte (réversible)

Contrairement à celui non réversible, dont l'énergie est transmise de la source vers la charge seulement, dans ce système la transformation inverse existe et on distingue différents types d'hacheur réversible :

#### 1) Hacheur série réversible en courant

Dans ce système, on a la possibilité d'avoir un changement de signe de courant mais la tension reste constante.

Pour ce modèle on n'a pas de problème de discontinuité de courant car suivant son signe, les composants (transistor et diode montés en parallèle) assurent sa circulation.

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

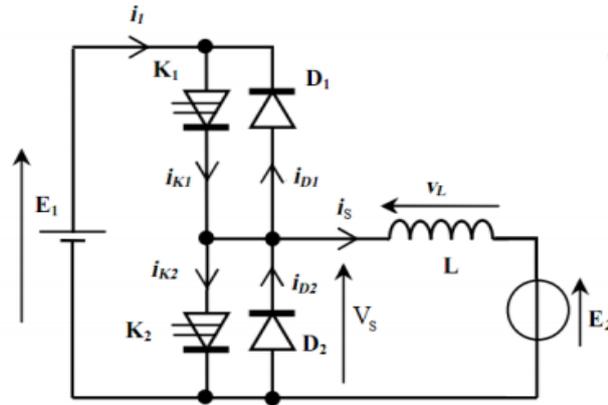


Fig. II.5: Schéma de fonctionnement de l'hacheur série réversible en courant.

En mode normal, l'interrupteur  $K_1$  est commandé périodiquement avec un rapport cyclique  $\alpha_1$  et  $K_2$  n'est pas commandé et  $D_2$  (court-circuitée si  $K_1 = 1$  et bloquée si  $D_1 = 1$ ) ne participe pas au fonctionnement du montage. La tension moyenne aux bornes du moteur est

$$V_{moy} = \alpha_1 \cdot E_1 \quad (\text{II.4})$$

En mode de freinage,  $K_2$  qui est commandé périodiquement avec le rapport cyclique  $\alpha_2$ ;  $K_1$  et  $D_1$  ne participent pas au fonctionnement du montage. La tension moyenne aux bornes du moteur est :

$$V_{moy} = (1 - \alpha_2) \cdot U \quad (\text{II.5})$$

### 2) Hacheur réversible en tension

Il permet de transmettre une tension moyenne de signe positif ou négatif à la charge (selon le rapport cyclique) mais le courant reste de signe positif et de valeur constante car les interrupteurs ne sont pas réversibles.

Il est utilisé pour la commande de la vitesse du moteur à courant continu dans le fonctionnement génératrice (freinage avec récupération). C'est le cas des ascenseurs.

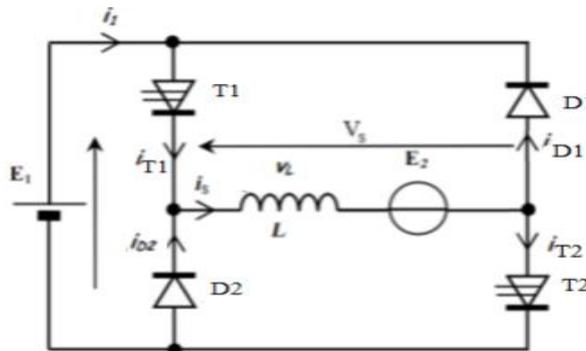


Fig. II.6: Schéma de fonctionnement d'un hacheur réversible en tension.

Pour le fonctionnement on a les phases suivantes :

- Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$  :  $T_1$  et  $T_2$  fermés et  $D_1$  et  $D_2$  bloqués.

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

- Pour  $\alpha T \leq t \leq T_1$  et  $T_2$  sont ouverts et  $D_1$  et  $D_2$  doivent être fermées pour évacuer l'énergie emmagasinée dans la bobine.

### 3) Hacheur à quatre quadrants (réversible en tension et en courant)

C'est tout simplement l'hacheur réversible en tension en remplaçant les interrupteurs par des interrupteurs réversible en courant. Donc, la tension et le courant peuvent avoir des valeurs négatives et positives. La source et la charge peuvent avoir leur rôle inversé suivant la valeur de ces grandeurs.

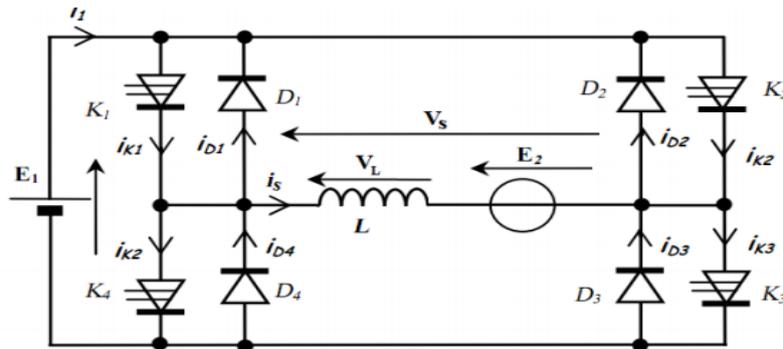


Fig. II.7: Schéma de principe d'un hacheur réversible en tension et en courant.

### Fonctionnement en quatre quadrants

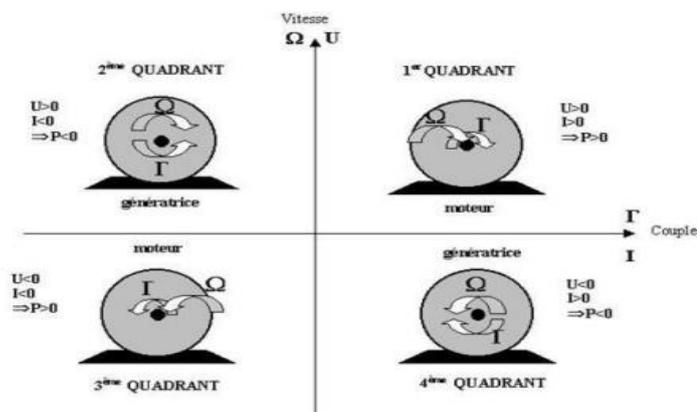


Fig. II.8: Schéma de fonctionnement en quatre quadrants.

$T_1$  et  $T_4$  sont fermés et  $T_2$  et  $T_3$  sont ouverts ( $D_3$  et  $D_2$  sont fermées) :

$$V = E_1.$$

Cela veut dire que le moteur tourne dans un sens et on distingue deux cas d'après le signe du courant de la source  $I_s$  :

Si  $I_s > 0$ , le courant passe à travers  $T_1$  et  $T_4$ , le moteur fonctionne dans le premier quadrant.

Si  $I_s < 0$ , le courant passe à travers  $D_1$  et  $D_4$ , le moteur fonctionne dans le deuxième quadrant.

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

$T_1$  et  $T_4$  sont ouverts et  $T_2$  et  $T_3$  sont fermés ( $D_1$  et  $D_4$  sont fermées) :

$$V = E_1$$

Cela veut dire que le moteur tourne dans l'autre sens et la même chose pour le premier cas :

Si  $I_s > 0$ , le courant passe à travers  $T_2$  et  $T_3$ , le moteur fonctionne dans le troisième quadrant.

Si  $I_s < 0$ , le courant passe à travers  $D_3$  et  $D_2$ , le moteur fonctionne dans le quatrième quadrant.

Les diodes sont appelées les diodes de récupération qui permettent la circulation du courant dans le cas où le sens du courant est opposé à celui de l'interrupteur. C'est la phase de récupération ou ce qu'on appelle « freinage par récupération ».

### Schéma des différents quadrants

#### ➤ Quadrant $\varphi_1$

C'est la phase d'accélération où le courant et la tension sont de même sens.

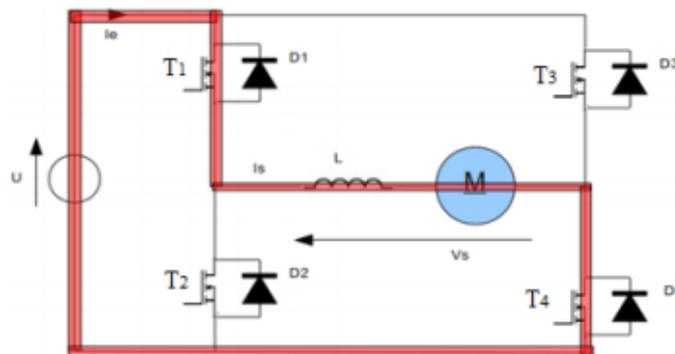


Fig. II.9: Schéma de passage de courant de moteur dans le premier quadrant.

#### ➤ Quadrant $\varphi_2$

C'est la phase de freinage où le courant et la tension sont de signes opposés.

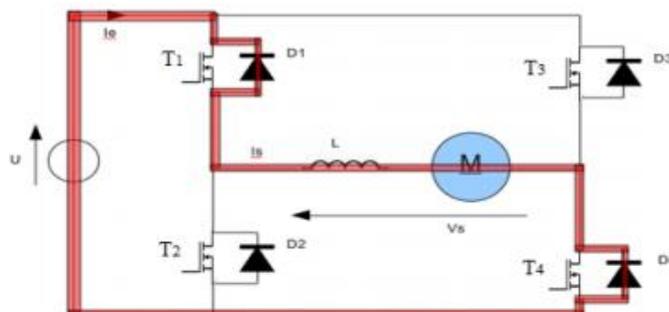


Fig. II.10: Schéma de passage du courant de moteur dans le deuxième quadrant.

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

### ➤ Quadrant $\varphi_3$

C'est la phase d'accélération mais pour la marche arrière du moteur où la tension et le courant sont négatifs.

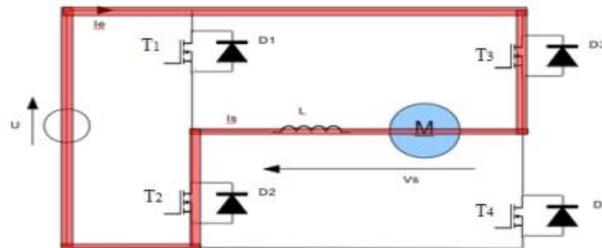


Fig. II.11 : Schéma de passage du courant de moteur dans le troisième quadrant.

### ➤ Quadrant $\varphi_4$

C'est la phase de freinage ou fonctionnement générateur où la tension est négative et le courant est positif.

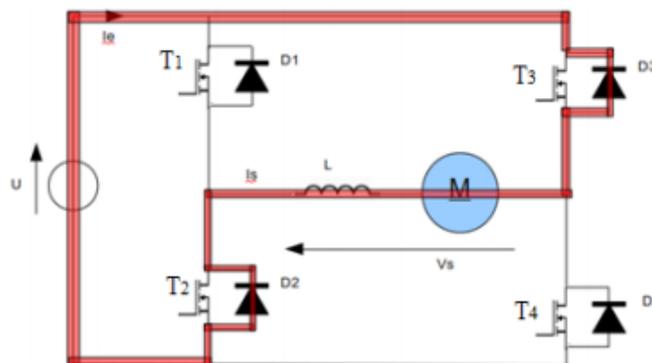


Fig. II.12: Schéma de passage de courant de moteur dans le quatrième quadrant.

La tension moyenne aux bornes de la charge est donnée par la relation suivante :

$$V_{moy} = U \cdot (2\alpha - 1) \quad (\text{II.6})$$

En faisant intervenir les équations électromécaniques du moteur en régime permanent on obtient :

$$\Omega = (2\alpha - 1) \cdot \frac{U}{K} - \frac{R}{K^2} \cdot C \quad (\text{II.7})$$

### II.3. Les techniques de commande de l'hacheur

La qualité de la tension de sortie dépend de la technique de commande utilisée pour la commande des interrupteurs du circuit de puissance. Le choix de cette technique dépend

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

essentiellement du type d'application auquel l'appareil est désigné. Les commandes les plus rencontrées sont :

- Commande par des signaux carrés.
- Commande par onde en marche d'escalier.
- Commande par découpage.
- Commande par modulation de largeur d'impulsion « MLI ».

### II.3.1. Principe de la « MLI »

Le Principe de base de la Modulation de Largeur d'Impulsion « MLI » est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire, ainsi la tension de sortie est formée par une succession de créneaux d'amplitude et se réalise par la comparaison d'un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence et un signal de référence appelé modulatrice.

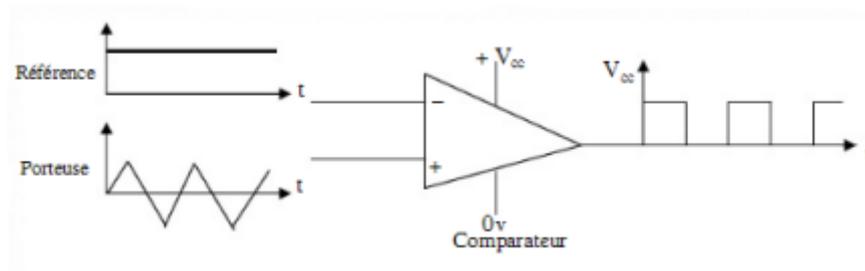


Fig. II.13 : Réalisation du signal MLI.

### II.3.2. Stratégie d'obtention d'une onde « MLI »

#### II.3.2.1. Modulation d'échantillonnage naturel

C'est la comparaison entre deux signaux la modulatrice et la porteuse. L'intersection entre les deux signaux donne le temps de commutation. On distingue deux modes de modulation :

##### 1) La modulation à un seul front

Dans ce cas le signal appelé porteuse est un signal de la forme dent de scie qu'on compare toujours avec une référence continue.

##### 2) La modulation à deux fronts

Elle consiste à comparer un signal de référence sinusoïdal ou continu avec un signal triangulaire.

### II.3.3. Commande séquentielle, unipolaire, bipolaire d'un hacheur 4 quadrants

#### II.3.3.1. Commande séquentielle

Pour obtenir  $V > 0$ , on peut choisir soit de maintenir  $K_1$  passant et de commuter  $K_3$  de façon cyclique ou de maintenir  $K_3$  passant et de commuter  $K_1$  de façon cyclique.

Pour obtenir  $V < 0$ , on peut choisir de maintenir  $K_4$  passant et de commuter  $K_2$  de façon cyclique ou de maintenir  $K_2$  passant et de commuter  $K_4$  de façon cyclique.

## Chapitre II : Présentation de l'hacheur

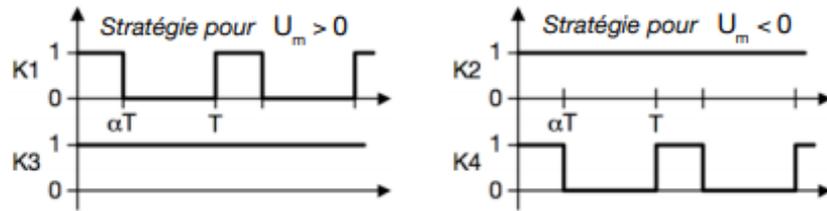


Fig. II.14 : Les allures de stratégie séquentielle.

La tension moyenne aux bornes du moteur est égale à :

$V = \alpha U$  : Pour les transistors  $\{K_1, K_3\}$  ;

$U_m = -\alpha U$  : Pour les transistors  $\{K_2, K_4\}$ .

### II.3.3.2. Commande continue bipolaire

Il consiste à commander alternativement les couples  $\{K_1, K_3\}$  et  $\{K_2, K_4\}$  d'hacheur quatre quadrants :

- Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$  : commande des transistors  $\{K_1, K_3\}$  ;
- Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$  : commande des transistors  $\{K_2, K_4\}$ .

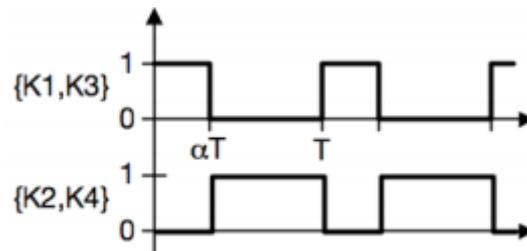


Fig. II.15 : Les allures de fonctionnement des interrupteurs pour la stratégie bipolaire.

### II.3.3.3. Commande continue unipolaire

Dérivée de la commande bipolaire, la commande unipolaire commande les bras  $\{K_1, K_2\}$  et  $\{K_3, K_4\}$  alternativement, mais avec un décalage d'une demi-période :

- Pour  $0 \leq t \leq \alpha T$  : Commande complémentaire du bras  $\{K_1, K_2\}$  ;
- Pour  $\alpha T + \frac{T}{2} \leq t \leq T + \frac{T}{2}$  : Commande complémentaire du bras  $\{K_2, K_4\}$ .

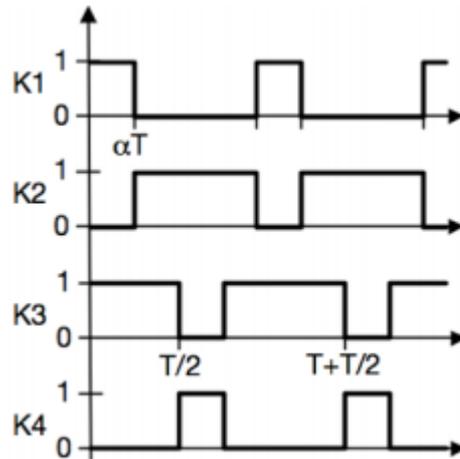


Fig. II.16: Les allures de fonctionnement des interrupteurs pour la commande unipolaire.

### II.3.3.4. Puissance transmise en commande bipolaire

Dans le cas d'un hacheur quatre quadrants dont la stratégie de pilotage est la commande bipolaire, les interrupteurs  $\{K_1, K_3\}$  commutent de façon complémentaire avec les interrupteurs  $\{K_2, K_4\}$ . La tension aux bornes de la charge est alors :

$$V_{moy} = \alpha U - (1 - \alpha)U \quad (\text{II.8})$$

La puissance moyenne transférée à la charge est déterminée par :

$$\begin{aligned} P_{moy} &= \frac{1}{T} \int_0^T U(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{T} \left[ \int_0^{\alpha T} U \cdot i(t) dt + \int_{\alpha T}^T U \cdot i(t) dt \right] \\ &= \frac{E}{T} [\alpha \cdot T \cdot I_{moy} - (T - \alpha T) \cdot I_{moy}] \end{aligned}$$

$$P_{moy} = (2\alpha - 1) \cdot E \cdot I_{moy} \quad (\text{II.9})$$

D'après la relation (II.9), on peut dire qu'en fonction du rapport cyclique, la puissance peut être positive ou négative qui traduit l'inversion du transfert d'énergie (le sens de rotation).

### II.3.3.5. Les types de commande

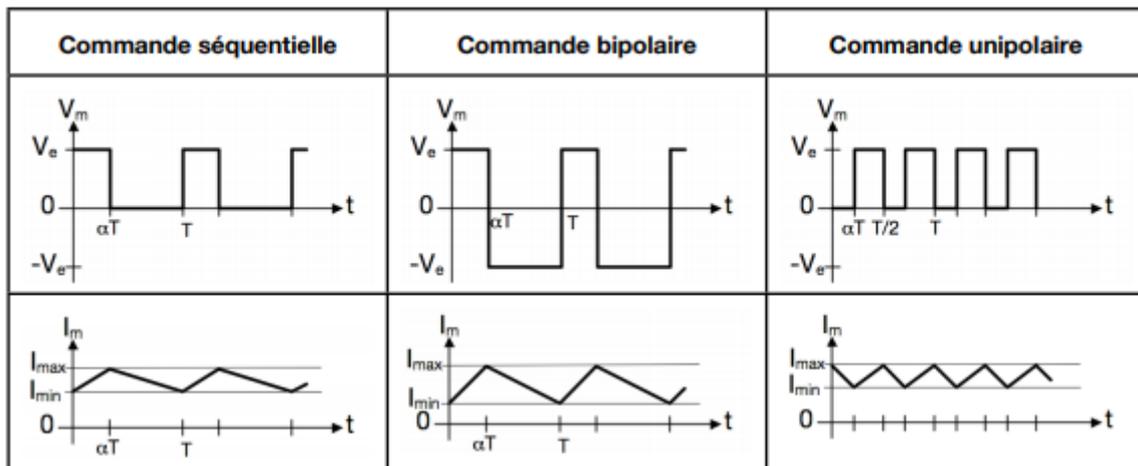


Fig. II.17 : Les allures de tension aux bornes de la charge et du courant qui le traverse.

## II.4. Les montages d'électronique de puissance

### II.4.1. Circuit de commande

Il comporte l'appareillage nécessaire à la commande des circuits de puissance. On trouve :

- La source d'alimentation de faible puissance.
- Un appareil d'isolement (sectionneur).
- Une protection du circuit.
- Un appareil de commande ou de contrôle (bouton poussoir, détecteur de grandeur physique).
- Organes de commande (bobine du contacteur).

### II.4.2. Circuit de puissance

Il comporte l'appareillage nécessaire au fonctionnement des récepteurs de puissance. Suivant un automatisme bien défini. On trouve :

- Une source de puissance (généralement réseau triphasé).
- Un appareil d'isolement (sectionneur).
- Un appareil de protection (fusible, relais thermique).
- Les contacts de puissance.
- Des récepteurs de puissance (moteurs).

### II.4.3. Circuit d'amplification

Ce bloc est utilisé pour le but d'amplifier le signal généré par le bloc de commande transmise vers la base ou la gâchette des interrupteurs électroniques.

### II.4.4. Circuit de protection

Assure l'isolation galvanique (optocoupleur-transformateur d'impulsion) entre la partie puissance et la partie commande (faible puissance).

### **Conclusion**

A l'inverse des convertisseurs de type alternatif – continu dont la source d'alimentation peut être issue d'un transformateur triphasé 20KV/400V, les convertisseurs de type continu-continu sont alimentés par une source autonome et transportable (batterie) ou par une tension redressée indirectement issue du secteur. Malgré cette différence, ces convertisseurs vont répondre à la même fonction : faire varier la tension d'alimentation de l'induit d'un moteur à courant continu (varier la vitesse).

Dans ce chapitre, on a présenté le convertisseur continu/continu (l'hacheur) qui va nous permettre de commander le moteur à courant continu, dans le chapitre suivant on va simuler sur logiciel ISIS proteus la commande MLI d'un arduino pour régler le moteur à courant continu par l'hacheur quatre quadrants.

# Chapitre III : Simulation de la commande du moteur à courant continu

### Introduction

Dans ce chapitre, on va entamer la simulation de notre système qui consiste à contrôler la vitesse d'un moteur à courant continu. Pour cela, l'application est faite en suivant plusieurs étapes progressives ; en premier lieu, on introduit la commande du moteur en deux sens de marche, puis la variation de sa vitesse et à la fin on réalise le contrôle de vitesse où on a choisi un LCD 16x2 pour l'affichage de la mesure de la vitesse.

Dans toutes les étapes qui suivent, deux phases sont réalisées dans le développement des applications :

1. Développement de la partie Software c.à.d. la programmation en langage C dans l'environnement de développement intégré Arduino-IDE qui utilise la syntaxe C/C++ basé sur « WIRING » pour vérifier, compiler et transférer le fichier objet (. hex) généré depuis l'étape de compilation. On note aussi qu'il est possible de développer le software en utilisant les bibliothèques Arduino spécifiques avec Matlab ou Simulink.
2. Développement de la partie Hardware sur une plateforme de simulation, où le logiciel ISIS-Proteus est choisi pour cette étape.

### III.1. Plaque Arduino

C'est un circuit imprimé comportant tous les circuits électroniques permettant de faire plusieurs fonctions (fonctionnement d'un microcontrôleur) en plus d'un port USB pour communiquer avec un ordinateur.

C'est un écosystème libre comprenant des cartes (Arduino Uno, Arduino Leonardo, Arduino Méga, Arduino Nano...), des logiciels (l'IDE Arduino) et des bibliothèques.

Une carte Arduino est une petite carte électronique<sup>1</sup> (5,33 x 6,85 cm) équipée d'un microcontrôleur qui permet, à partir d'événements détectés par des capteurs, de programmer et commander des actionneurs, la carte Arduino est donc une interface programmable.

L'intérêt majeur de ces cartes est la programmation des systèmes électroniques, ce qui simplifie les schémas des systèmes électroniques et donne l'opportunité de les tester en diminuant le coût de réalisation.

#### III.1.1. Définition de la carte Arduino Uno

L'Arduino Uno est un microcontrôleur programmable qui permet, comme son nom l'indique, de contrôler des éléments mécaniques : systèmes, lumières, moteurs, etc. Cette carte électronique permet donc à son utilisateur de programmer facilement des choses et de créer des

---

<sup>1</sup>Une **carte électronique** est un support plan, flexible ou rigide, généralement composé d'époxy ou de fibre de verre. Elle possède des pistes électriques disposées sur une, deux ou plusieurs couches (en surface et/ou en interne) qui permettent la mise en relation électrique des composants électroniques. Chaque piste relie tel composant à tel autre, de façon à créer un système électronique qui fonctionne et qui réalise les opérations demandées. Évidemment, tous les composants d'une carte électronique ne sont pas forcément reliés entre eux. Le câblage des composants suit un plan spécifique à chaque carte électronique, qui se nomme le **schéma électronique**. Enfin, avant de passer à la réalisation d'une carte électronique, il est nécessaire de transformer le schéma électronique en un **schéma de câblage**, appelé **typon**.

## Chapitre III : Simulation de la commande du moteur à courant continu

mécanismes automatisés, sans avoir de connaissances particulières en programmation. Il est un outil pensé et destiné aux inventeurs, artistes ou amateurs qui souhaitent créer leur propre système automatique en le codant de toute pièce.

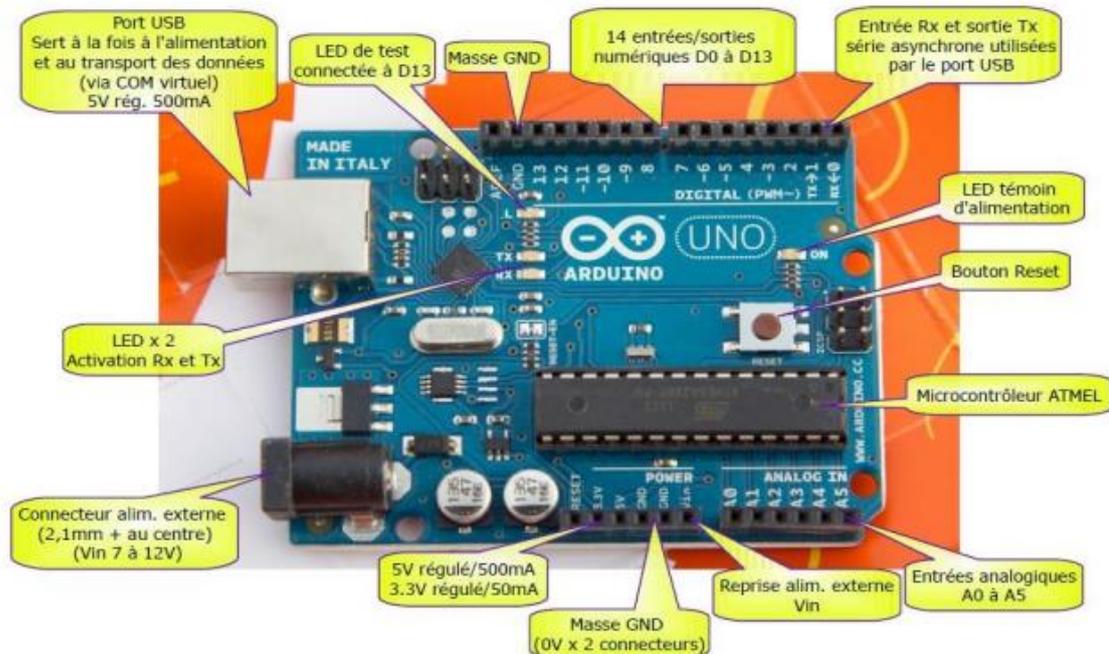


Fig. III.1 : Description de la carte arduino Uno.

### III.1.2. Caractéristiques de la carte arduino Uno

Microcontrôleur	ATmega328
Fréquences Horloge	16 Mhz
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 représenté par le symbole tilde )
Broches d'entrées analogiques	6 (utilisables en broches E/S numériques)
Intensité maxi disponible par broche E/S (5V)	40 mA ( Attention 200mA max total entrée/sortie cumulées)
Intensité maxi disponible pour la sortie 3,3V	50 mA
Intensité maxi disponible pour la sortie 5V	500 mA max Sur port USB
Mémoire Programme Flash	32 KB (ATmega328) dont 0.5 KB sont utilisés par le bootloader (chargeur d'amorçage)
Mémoire SRAM (mémoire volatile)	2 KB (ATmega328)
Mémoire EEPROM (mémoire non volatile)	1 KB (ATmega328)
Interface	USB (permet d'alimenté la carte et de transféré les programmes vers la carte)
Alimentation externe	Jack
Dimensions	6,86 cm x 5,3 cm

Fig. III.2 : Caractéristiques techniques de la carte Arduino Uno.

### III.1.3. Utilisation de la carte arduino Uno

- Arrosage automatique pour vos plantes.
- Piloter des lumières.
- La programmation de vos volets électriques.
- Bras de robot, régulation de température, instruments de musique, systèmes d'alarmes.

### III.1.4 Brochage de la carte Arduino

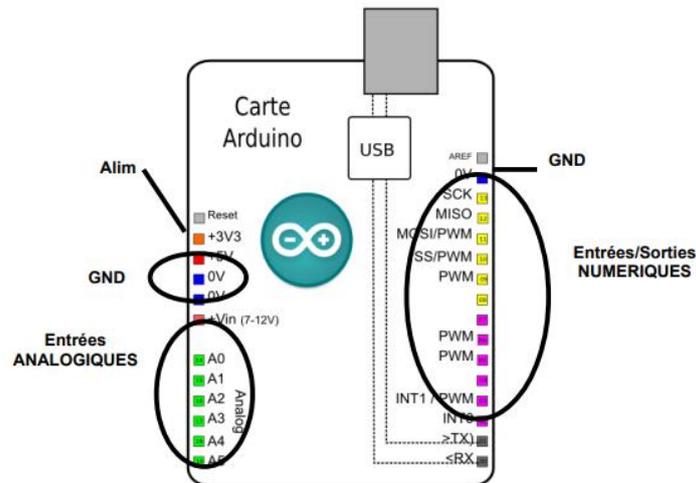


Fig. III.3 : Le branchement de la carte Arduino Uno.

Les broches d'alimentation à utiliser sont les suivantes :

- **5V** : La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte.
- **GND** : Broche de masse ou 0 V.

Broches numériques en entrée ou sortie, chacune des 14 broches numériques de la carte UNO (numérotées des 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, il suffit de les déclarer en début de programme. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir au maximum un courant de 40 mA d'intensité, de plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :

- ✓ **Broche 13** : Dans la carte est incluse une LED connectée à la broche 13. Lorsque la broche est au niveau HAUT, la LED est allumée, lorsque la broche est au niveau BAS, la LED est éteinte.
- ✓ **Broches PWM** : Elles pilotent les moteurs à courant continu en vitesse. On peut aussi les utiliser pour piloter une diode en luminosité.
- ✓ **Broches analogiques en entrée** : la carte Uno dispose de 6 entrées analogiques (numérotées de A0 à A5), chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (c'est à dire sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023).

### III.1.5. Les capacités d'entrée/sortie

Une carte Arduino communique avec son environnement par l'intermédiaire de ses broches d'entrées/sorties. Sur ces broches, des capteurs (dispositifs permettant de transformer une information de l'environnement en signal électrique) et des actionneurs (dispositifs permettant de transformer un signal électrique en action mécanique ou lumineuse). Par conséquent, le nombre de broches disponible est un critère de choix important car il détermine le nombre de capteurs et d'actionneurs que l'on va pouvoir connecter.

### III.1.6. Les clones

L'Arduino est une plateforme open-source ce qui signifie que les schémas de la carte sont disponibles gratuitement et que tout à chacun est libre de fabriquer des cartes à partir de ces schémas.

Diverses cartes non officielles ont vu le jour. Mais les clones n'ont pas le droit de porter le nom Arduino qui lui est protégé. On pourra trouver les noms : freeduino, dccduino... On peut les ranger dans 4 catégories :

- Les cartes non directement compatibles mais qui le deviennent par ajout de logiciel supplémentaire sur l'ordinateur hôte ;
- Les cartes compatibles qui à partir du schéma de la carte officielle ajoute des fonctions additionnelles comme des ponts en H pour le pilotage des moteurs avec pour objectif de faciliter leur utilisation dans, par exemple, la robotique ;
- Les copies qui reprennent à l'identique un schéma officiel en remplaçant éventuellement certains composants par des équivalents ;
- Les contrefaçons qui reprennent également le schéma officiel mais aussi illégalement la marque officielle qui est protégée.

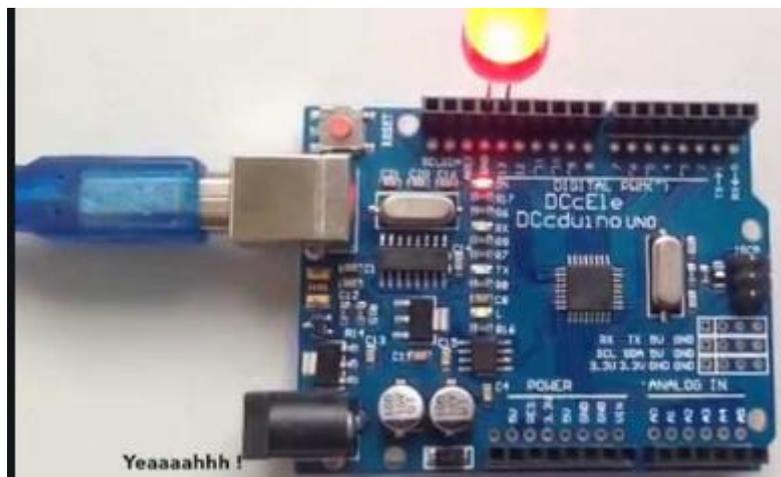


Fig. III.4 : Carte dccduino.

### III.1.7. Les avantages

- **Facilité d'utilisation** qui fait qu'il est accessible à tous.
- Il existe sur le marché une multitude de **modules préprogrammés**, servant à différentes actions.
- L'utilité est que ce système vous dispense d'apprendre trop en profondeur le langage de la programmation (C, C++) et vous permet d'effectuer pleins d'actions.

### III.1.8. Les inconvénients

- ✓ L'Arduino Uno dispose de la configuration minimale prévue pour les débutants et convient donc à de petits projets.
- ✓ Nécessite de quelques objets pour commencer à programmer et à faire des montages : breadboard, composants électroniques et fils de connexion ...

### III.1.9. Présentation de logiciel Arduino

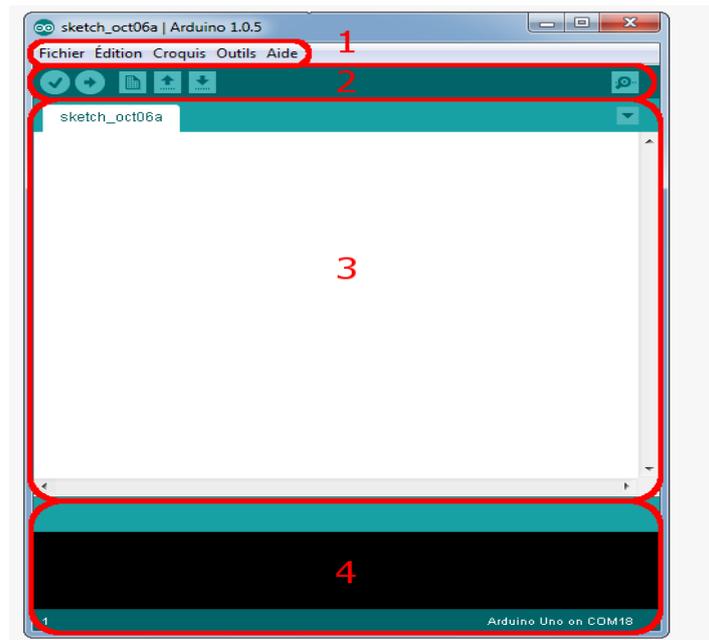


Fig. III.5 : Interface de logiciel Arduino.

#### Correspondance

- Le cadre numéro 1 : ce sont les options de configuration du logiciel.
- Le cadre numéro 2 : il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer nos cartes.
- Le cadre numéro 3 : ce bloc va contenir le programme que nous allons créer.
- Le cadre numéro 4 : celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme. C'est le **Débogueur**.

## Chapitre III : Simulation de la commande du moteur à courant continu

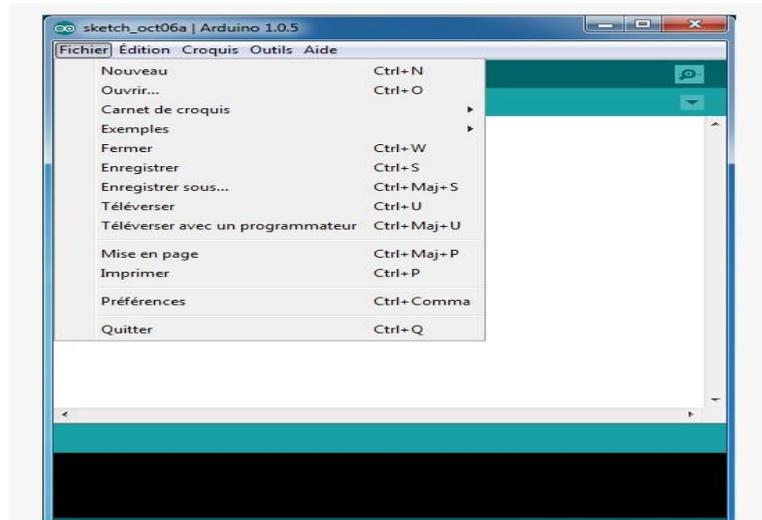


Fig. III.6: Icône fichier.

- Carnet de croquis : Ce menu regroupe les fichiers que vous avez pu faire jusqu'à maintenant (et s'ils sont enregistrés dans le dossier par défaut du logiciel).
- Téléverser : Permet d'envoyer le programme sur la carte Arduino.
- Téléverser avec un programmeur : Idem que ci-dessus, mais avec l'utilisation d'un programmeur.
- Préférences : Pour régler quelques paramètres du logiciel.

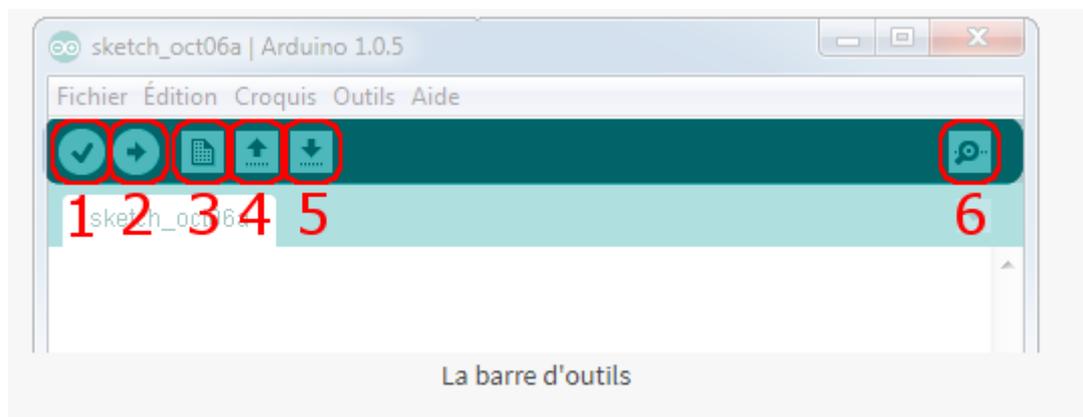


Fig. III.7 : La barre d'outils.

- Bouton 1 : Ce bouton permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans votre programme.
- Bouton 2 : Charge (téléverse) le programme dans la carte Arduino.
- Bouton 3 : Crée un nouveau fichier.
- Bouton 4 : Ouvre un fichier.
- Bouton 5 : Enregistre le fichier.
- Bouton 6 : Ouvre le moniteur série.

### Fonctionnement d'un programme arduino

Pour avoir une nouvelle fenêtre, on clique sur l'icône nouveau, c'est le code de base. Quel que soit le programme, on remplit notre programme dans les boucles. Les accolades sont des sortes de capsules. Le bloc d'instruction est tout ce qui est entre ces accolades. On a dans le programme deux sortes d'accolades : celles qui suivent l'instruction setup () et celles qui suivent l'instruction loop ().

```
Void setup () {  
    }  
Void loop () {  
    }
```

Fig. III.8 : Code de base de programme arduino.

- ❖ Setup () : lecture et activation des instructions (activation ou lecture des composants ou capteurs...) qu'une seule fois.
- ❖ Loop () : lecture et activation des instructions (activation ou lecture des composants ou capteurs...) et qui sera relue et activé à l'infini.

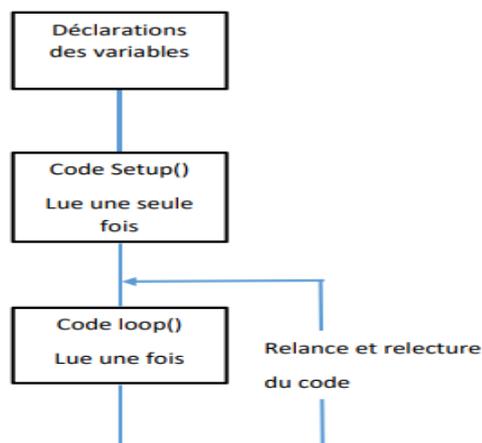


Fig. III.9 : Les étapes de traitement de programme.

On peut créer notre propre fonction insérer dans le programme (partie de code écrite en dehors du programme de base permettant de réaliser d'autres fonctions). Mais en règle générale, le programme d'un Arduino tourne en boucle.

## III.2. Application de la commande du moteur à courant continu

### III.2.1. Commande du moteur en deux sens de marche

#### III.2.1.1. Partie hardware

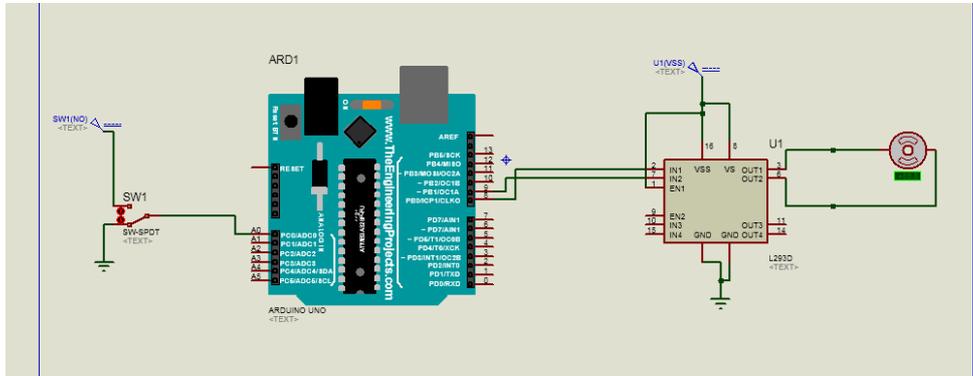


Fig. III.10: Schéma de commande en 02 sens de marche d'un moteur à CC.

Dans un premier lieu, on va essayer de commander la rotation du moteur depuis notre circuit de commande « ARDUINO » en l'interfaçant à un pont H. Le microcontrôleur utilisé est le « ARDUINO UNO » et le circuit de puissance utilisé est L293D, où un Switch permet de contrôler le sens de rotation (dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre).

#### III.2.1.2. Partie software

L'organigramme suivant représente le fonctionnement général de la commande dans les deux sens de rotation d'un moteur à courant continu.

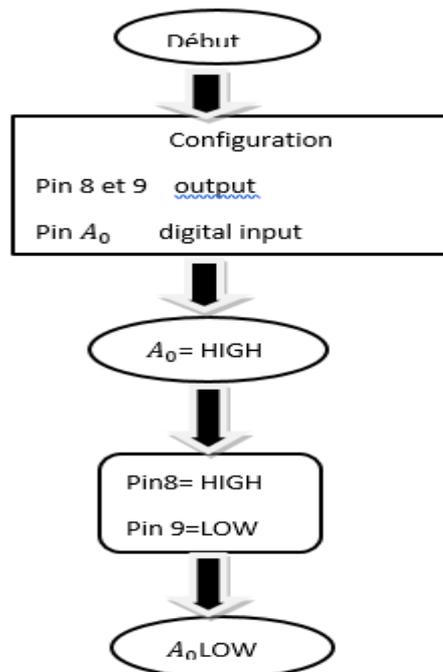


Fig. III.11 : Organigramme pour de commande en 02 sens de marche d'un moteur à CC.

### III.2.2. Variation de vitesse du moteur à courant continu

#### III.2.2.1. Partie hardware

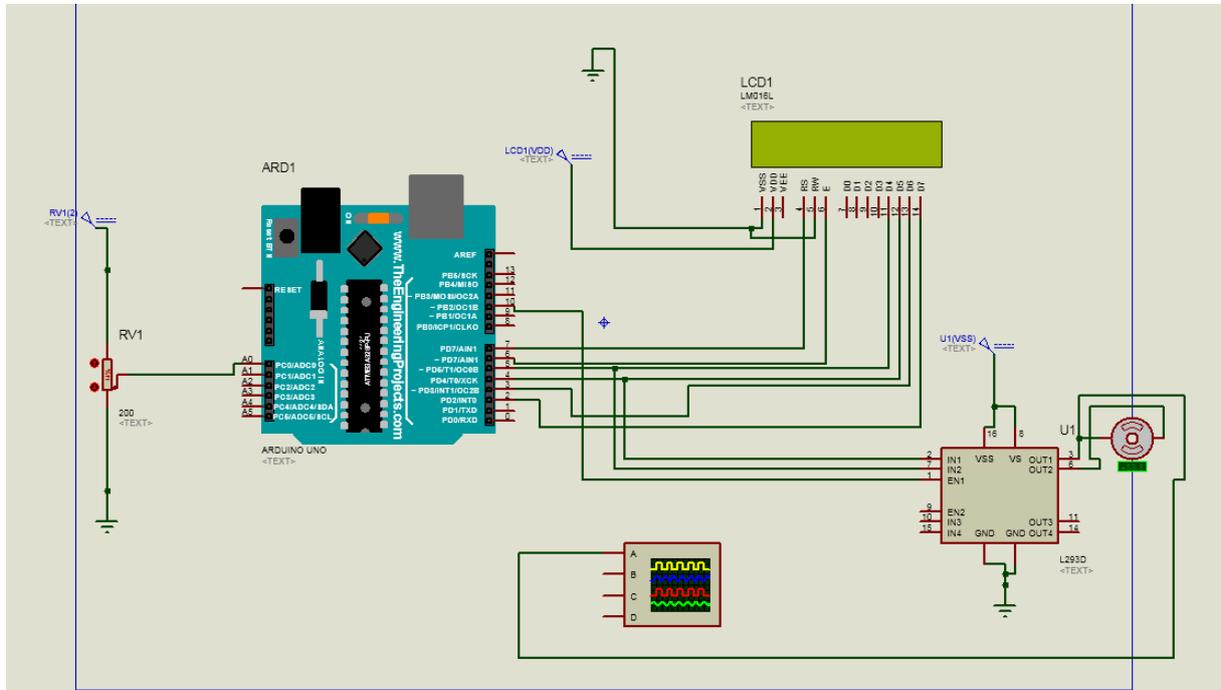


Fig. III.12 : Variation de vitesse d'un moteur à CC.

Maintenant, On va varier la vitesse du moteur à courant continu en utilisant la modulation en largeur d'impulsion (MLI). L'idée est de faire varier la vitesse du moteur à courant continu en fonction de la valeur lue depuis un potentiomètre, sachant que la résolution du convertisseur analogique / numérique de l'Arduino UNO est de 10bit, donc notre convertisseur peut distinguer 1024 niveaux différents, soit des valeurs numériques générées entre 0 et 1023. Donc, on doit faire correspondre ces valeurs aux valeurs désirées du signal MLI qui s'étale sur 8 bit, soit entre 0 et 255.

#### III.2.2.2. Partie software

L'organigramme suivant représente le fonctionnement général de variation de vitesse :

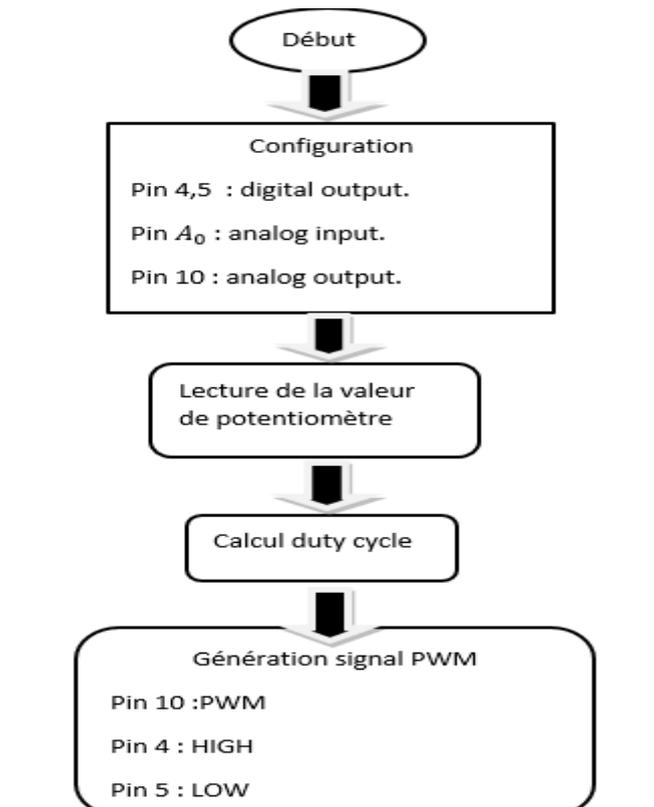


Fig. III.13: Organigramme du programme de variation de la vitesse.

### III.2.3. Contrôle de vitesse du moteur à courant continu

Pour cette partie, On va reproduire l'application précédente, mais cette fois on va mesurer la vitesse de rotation pour la contrôler. Pour que l'information de vitesse soit visible, on va ajouter un afficheur LCD de type 16x2.



Fig. III.14 : Schéma simplifié de l'afficheur LCD 16x2.

#### III.2.3.1. Afficheur LCD (Liquide Crystal Display)

Les afficheurs à cristaux liquides, autrement appelés afficheurs LCD (Liquide Crystal Display) sont des modules compacts intelligents et nécessitent peu de composants externes pour un bon fonctionnement. Ils consomment relativement peu (de 1 à 5mA), sont relativement bons marchés et s'utilisent avec beaucoup de facilité.

## Chapitre III : Simulation de la commande du moteur à courant continu

L'afficheur LCD est en particulier une interface visuelle entre un système (projet) et l'homme (utilisateur). Son rôle est de transmettre les informations utiles d'un système à un utilisateur. Il affichera donc des données susceptibles d'être exploiter par l'utilisateur d'un système.

### Caractéristiques de l'afficheur LCD

La première information à connaître est le nombre de caractères affichables par ligne. Pour ce modèle, c'est 16 caractères sur deux lignes soit au total de 32 caractères. De toute évidence, on retrouve cette information dans la datasheet sous la forme 16 X 02, mais aussi dans la référence 1602 A.

La deuxième information est l'information du mode de transmission de données sur quatre ou huit bits.

La troisième c'est les tensions d'exploitations, caractéristiques électriques et mécaniques de l'afficheur LCD.

#### 2.0 ABSOLUTE MAXIMUM

Item	Symbol	Min.	Max.	Unit
Power Supply for logic	Vdd	-0.3	+7.0	V
Power supply for LCD Drive	Vlcd	Vdd-10.0	Vdd+0.3	V
Input Voltage	Vi	-0.3	Vdd+0.3	V
Operating Temperature	Ta	0	+50	°C
Storage Temperature	Tstg	-10	+60	°C

#### 3.0 ELECTRICAL CHARACTERISTICS

(Ta=25°C; Vdd=3.0V±10%, otherwise specified)

Item	Symbol	Test Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit
Power Supply for Logic	Vdd	--	4.7	5.0	5.5	V
Operating Voltage for LCD	Vdd-Vo	--	--	5.0	--	V
Input High voltage	Vih	--	2.2	--	Vdd	V
Input Low voltage	Vil	--	-0.3	--	0.6	V
Output High voltage	Voh	-Ioh=0.2mA	2.4	--	--	V
Output Low voltage	Vol	Iol=1.2mA	--	--	0.4	V
Power supply current	Idd	Vdd=3.0v	--	1.1	--	mA

#### 4.0 MECHANICAL PARAMETERS

Item	Description	Unit
PCB Dimension	80.0*36.0*1.6	mm
View Dimension	69.5*14.5	mm

Fig. III.15: Tableau des tensions d'exploitations, caractéristiques électriques et mécaniques.

#### 1. 0 FEATURES

- Display Mode: STN, BLUB
- **Display Formate: 16 Character x 2 Line**
- Viewing Direction: 6 O'Clock
- **Input Data: 4-Bits or 8-Bits interface available**
- Display Font : 5 x 8 Dots
- Power Supply : Single Power Supply (5V±10%)
- Driving Scheme : 1/16Duty,1/5Bias
- BACKLIGHT (SIDE) : LED (WHITE)

Fig. III.16 : Caractéristiques globales de l'afficheur LCD.

### Fonctionnement d'un afficheur LCD

LCD contient deux types d'information à l'afficheur :

- ❖ **Les commandes** : Qui permettent de l'initialiser : positionnement du curseur, effacement écran, etc...
- ❖ **Les données** à afficheur : L'entrée **RS** permet de spécifier si envoi une commande ou une donnée :
  - **RS=0** : instruction (commande).
  - **RS=1** : caractère (donnée).

L'afficheur dispose d'une entrée **R/W** pour spécifier une lecture ou une écriture :

- **R/W=0** : écriture vers l'afficheur.
- **R/W=1** : lecture de l'afficheur.

Il est possible d'utiliser l'afficheur LCD en mode huit bit normal ou en mode quatre bits pour économiser les broches de son microcontrôleur par exemple, c'est assez pratique :

#### ✓ **Mode quatre bits**

Dans le cas de la non disponibilité d'un assez nombre de broches d'entrées / sorties sur un microcontrôleur, on peut utiliser le mode quatre bits de l'afficheur LCD. Dans ce mode, seuls les quatre bits de poids fort (D4 à D7) de l'afficheur sont utilisées pour transmettre les données et les lire. Les quatre bits de poids faible (D0 à D3) sont alors connectés à la masse. Les données sont écrites ou lues en envoyant séquentiellement les quatre bits de poids fort suivi des quatre bits de poids faible, une impulsion positive d'au moins 450 ns doit être envoyée sur la ligne E pour valider chaque demi-octet ou nibble.

### Brochage de l'afficheur LCD

- Premièrement, les **broches 1, 2 et 3** sont dédiées à **l'alimentation**. La **broche 1 et 2** pour **l'alimentation générale**. La **broche 3** pour le branchement d'un potentiomètre qui **contrôle le contraste de l'afficheur**.
- Deuxièmement, les **broches 4, 5 et 6** pour le **pilotage de la transmission des données**. Elles pilotent l'écriture ou la lecture des données.
- Troisièmement, les **broches de 7 à 14** pour le **transfert des données elles-mêmes**.
- Et pour finir, les **broches 15 et 16** pour **l'alimentation du rétro-éclairage**.

5. 0 PIN ASSIGNMENT			
No.	Symbol	Level	Function
1	Vss	--	0V
2	Vdd	--	+5V
3	V0	--	for LCD
4	RS	H/L	Register Select: H:Data Input L:Instruction Input
5	R/W	H/L	H--Read L--Write
6	E	H,H-L	Enable Signal
7	DB0	H/L	Data bus used in 8 bit transfer
8	DB1	H/L	
9	DB2	H/L	
10	DB3	H/L	
11	DB4	H/L	Data bus for both 4 and 8 bit transfer
12	DB5	H/L	
13	DB6	H/L	
14	DB7	H/L	
15	BLA	--	BLACKLIGHT +5V
16	BLK	--	BLACKLIGHT 0V-

Fig. III.17 : Tableau descriptif de brochage.

### III.2.3. Description de L293D

Le L293D est un circuit intégré, à haut voltage, grand courant, quatre canaux pilote. Ce circuit intégré peut être utilisé pour des moteurs DC et alimentation jusqu'a 36 V et qu'il peut fournir un maximum de 600 mA par canal.

Le L293D est aussi connu pour être une sorte de pont-H. Typiquement, un pont H est un circuit électrique qui permet d'appliquer une tension en sortie sur une charge dans une direction ou l'autre. Par exemple, un moteur.

Cela signifie principalement qu'on peut inverser la direction du courant et donc renverser le sens de rotation du moteur. Le principe de fonctionnement est basé sur quatre éléments du circuit communément nommés contacts et identifiés comme suit : Haut-Côté Gauche, Haut-Côté Droit, Bas-Côté Droit et Bas-Côté Gauche.

En utilisant différentes combinaisons de fermetures, il est possible de démarrer, Stopper ou Inverser le courant.

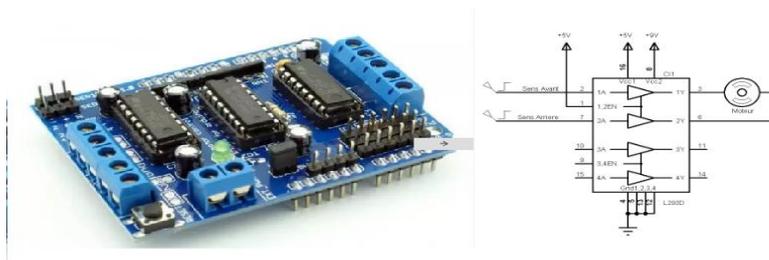


Fig. III.18: Schéma simplifiée de L293D.

### Caractéristiques techniques du L293D

Les caractéristiques techniques du composant **L293D** :

- ✓ Nombre de pont-H : 2.
- ✓ Courant Max Régime continu : 600mA (x2).
- ✓ Courant de pointe Max < 2 ms : 1200mA.
- ✓ VS Max Alim moteur : 36v.
- ✓ VSS Max Alim logique : 7v.
- ✓ Nombre de Broches : 16 DIP.
- ✓ Perte de tension : 1.3v.

### Branchement du L293D

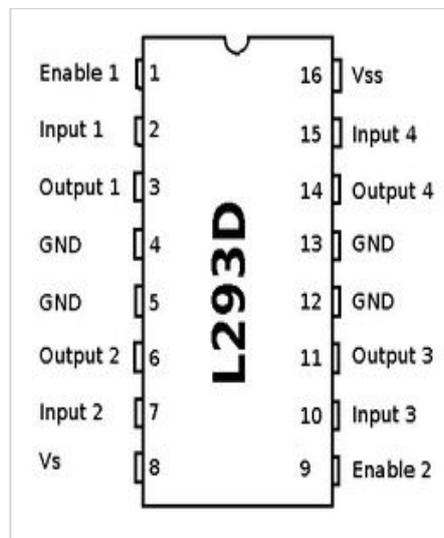


Fig. III.19 : Les pins de L293D.

#### ➤ **Enable1**

Permet d'envoyer (ou pas) la tension sur les sorties du moteur via OUTPUT1 et OUTPUT2 et commande l'activation/désactivation du premier Pont-H.

Si ENABLE1 = GND, le pont-H est déconnecté et le moteur ne fonctionne pas.

Si ENABLE1 = VSS, le pont-H est connecté aux sorties et le moteur fonctionne dans un sens ou l'autre ou pas en fonction des tensions appliquées sur INPUT1 & INPUT2.

#### ➤ **Input1**

Avec Input 2, sont les broches de commande du Pont-H Output1/Output2. Il sera directement branché à votre Arduino pour commander le sens du courant entre Output 1 et Output 2.

#### ➤ **Output1**

Avec Output 2, sera branché directement sur le moteur.

#### ➤ **GND**

Qui doit être raccorder à la masse de la source d'alimentation de puissance VS et à la masse de la source d'alimentation de la logique "VSS" (donc GND Arduino).

## Chapitre III : Simulation de la commande du moteur à courant continu

- **Output2**  
Avec Output 1, sera branché directement sur le moteur.
- **Input2**  
Avec Input 1, sont les broches de commande du Pont-H Output1/Output2. Il sera directement branché à votre Arduino pour commander le sens du courant entre Output 1 et Output 2.
- **VS**  
Alimentation de puissance des moteurs.
- **Enable2**  
Commande l'activation du second pont-H constitué de Output3/Output4.
- **Input3**  
Avec Input 4, sont les broches de commande du Pont-H Output3/Output4. Il sera directement branché à votre **Arduino** pour commander le sens du courant entre Output 3 et Output 4.
- **Output3**  
Avec Output 4, sera branché directement sur le moteur.
- **Output4**  
Avec Output 3, sera branché directement sur le moteur.
- **Input4**  
Avec Input 3, sont les broches de commande du Pont-H Output3/Output4. Il sera directement branché à votre **Arduino** pour commander le sens du courant entre Output 3 et Output 4.
- **VSS**  
Alimentation de la logique de commande (5V). A raccorder à la borne +5V de votre **Arduino**.

Les pins Enable1 et Enable2 permettent de moduler la vitesse du moteur en utilisant des broches **PWM** (MLI) de l'**Arduino**. Si on ne souhaite pas moduler la vitesse du **moteur DC**, il suffit de brancher Enable1 sur la broche VSS de l'**Arduino**.

### Fonctionnement de L293D

Le tableau suivant nous permettra de faire fonctionner notre moteur DC en utilisant le composant L293D :

Enable 1	Input 1	Input 2	Fonction
High	Low	High	Tourne dans le sens horlogique
High	High	Low	tourne dans le sens anti-horlogique
High	Low	Low	Stop
High	High	High	Stop
Low	Non applicable	Non applicable	Stop

Fig. III.20 : tableau des commandes.

### Utilisation du L293D avec Arduino et deux moteurs CC

Avec un seul pont **L293D** et un **Arduino** on va être capable de piloter deux moteurs à courant continu indépendamment l'un de l'autre. Si la puissance de nos moteurs est faible, on peut même utiliser le 5V en sortie de l'**Arduino** pour alimenter les **moteurs CC**.

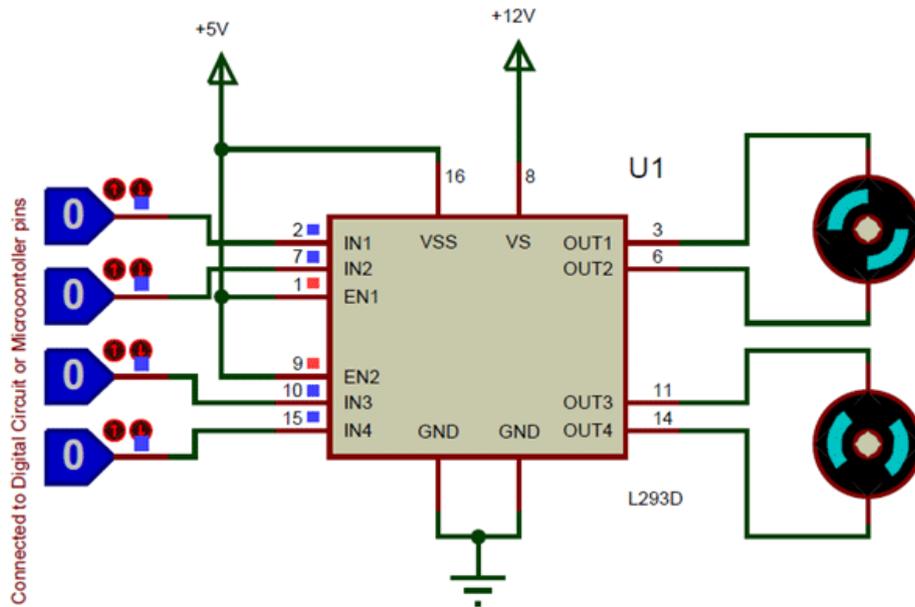


Fig. III.21 : Brochage de L293D avec deux moteurs sous ISIS.

#### III.2.4. Partie hardware de l'application

Dans notre application, on utilise un seul signal A qui vient du potentiomètre pour faire varier la vitesse de notre moteur à courant continu en se basant sur la commande MLI avec un afficheur LCD qui nous permet d'afficher la vitesse, Duty cycle et toutes les informations sur notre moteur.

La figure suivante représente notre application implantée sur la plateforme de simulation ISIS-PROTEUS :

## Chapitre III : Simulation de la commande du moteur à courant continu

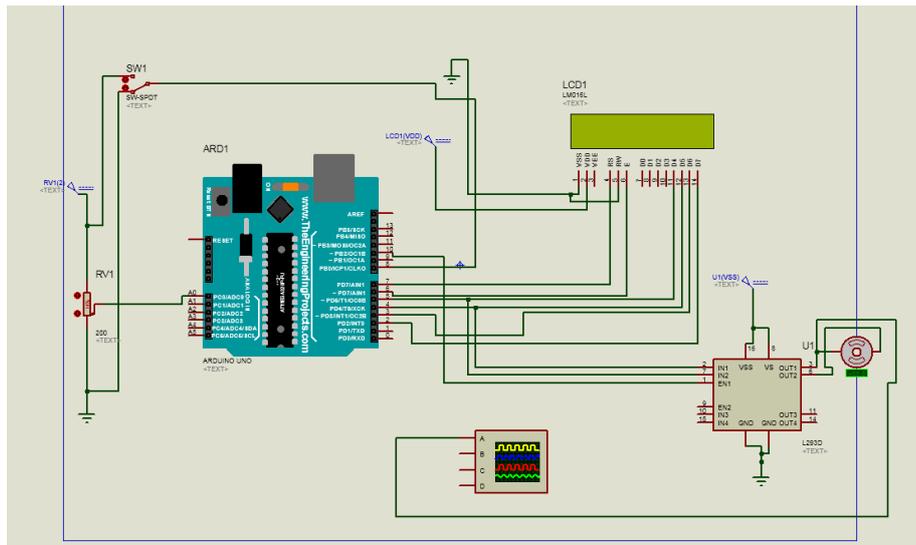


Fig. III.22: Schéma du circuit de simulation de contrôle de vitesse (Isis-Proteus).

Les composants utilisés sont :

1. Arduino UNO.
2. Interface de puissance : pont H de type L283D.
3. Un moteur à courant continu.
4. Une Switch monté sur l'axe du moteur et qui délivre une impulsion pour la variation du sens de rotation.
5. Un oscilloscope pour visualiser le signal MLI.

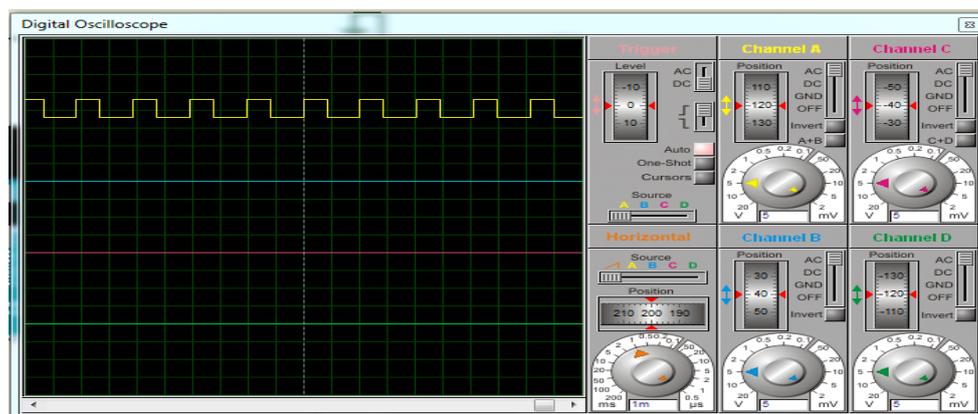


Fig. III.23 : Signal MLI.

### III.2.5. Partie software de l'application

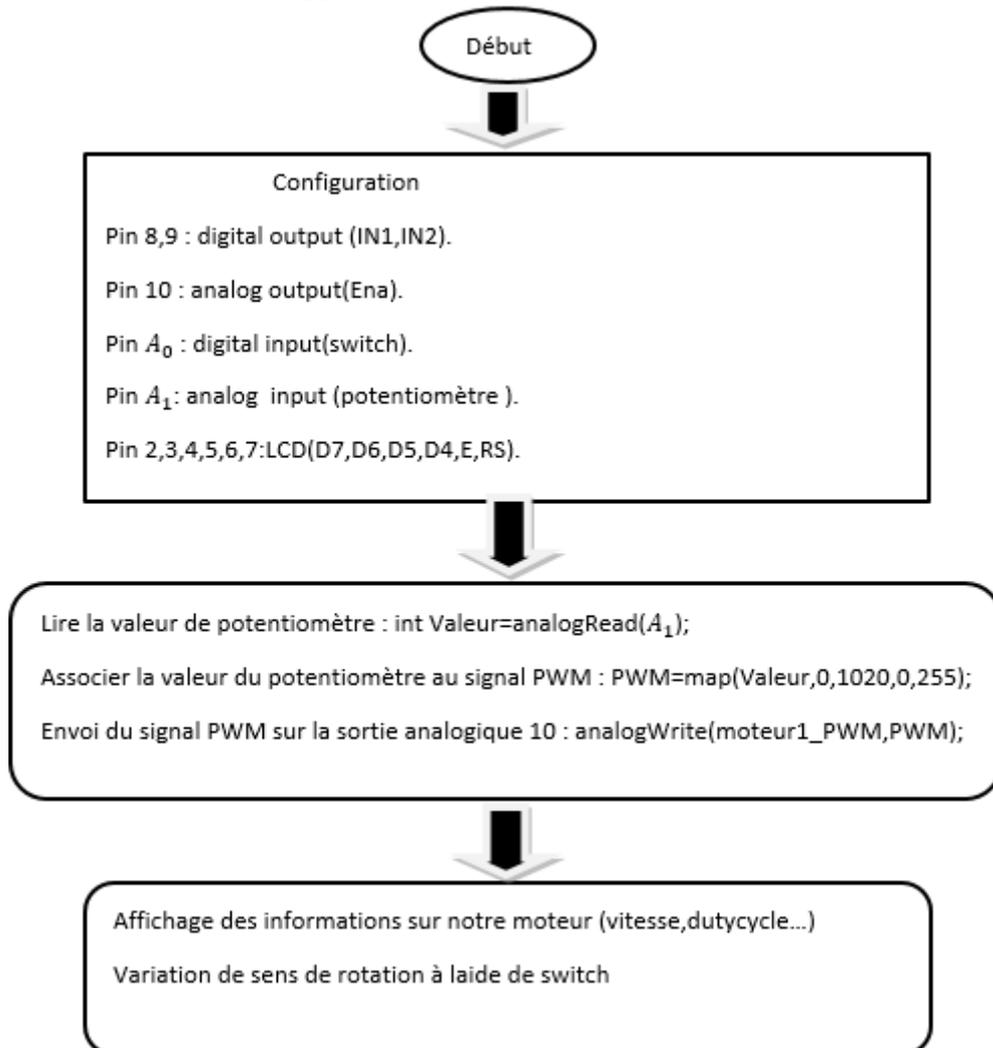


Fig. III.24 : Organigramme du programme de variation de la vitesse.

### Conclusion

Dans ce chapitre, on a réalisé la simulation de régulation de vitesse et le sens de rotation du moteur à courant continu en commandant l'hacheur (pont H de circuit L293D) par le signal MLI d'un arduino Uno. On a aussi visualisé le signal de commande par un oscilloscope.

# Conclusion Générale

## Conclusion Générale

Pour faire varier la vitesse de rotation du moteur on utilise le plus souvent un hacheur à quatre quadrants qui alimente les bobinages de l'induit et lui-même est alimenté par un arduino.

Aujourd'hui le moteur à courant continu est sérieusement concurrencé par le moteur asynchrone, aussi appelé moteur à induction par les anglo-saxons. En effet, le moteur asynchrone, dans sa technologie dite à cage, utilise un rotor (induit) en court-circuit et ne nécessite aucune collection de courant en éliminant les inconvénients du moteur à courant continu.

La variation du rapport cyclique varie la tension aux bornes du moteur à courant continu et on peut aussi inverse le sens de rotation du moteur avec un hacheur quatre quadrant.

L'expérience menée durant ce travail, nous a permis d'acquérir plusieurs disciplines et concepts qui ont montré que l'étude par simulation était très proche à celle faite par réalisation pratique, mais malheureusement on n'a pas eu la chance de vérifier cela (les circonstances actuelles (le COVID\_19) n'ont pas permis d'aller jusqu'au bout.) et on est très fière de notre travail et on désire que notre travail soit développé et qu'il soit réalisé.

### Bibliographie

- [1] : Souad Boulakroune, « Commande à vitesse variable d'un moteur à Courant continue alimenté par hacheur Bidirectionnel en courant », Mémoire de master, 2018, Université Badji Mokhtar, Annaba.
- [2] : Gérard Guihéneuf, « les moteurs électriques expliqués aux électroniciens (démarrage, variation de vitesse, freinage) », Deuxième édition augmentée, 2012, Publitronic\_Elektor International Media, Pays -bas.
- [3] : Mohammed Garar, Ibrahim Yousfi, « Variateur de vitesse de deux moteurs à courant continu par TIC 16F876 en MLI », Mémoire de master,2013/2014, Université de Aboubakr Belkaid,Tlemcen.
- [4] : Sonia Manseri, « Commande adaptative indirecte d'un moteur à courant continu », Mémoire de fin d'étude, 2012, Université A.Mira, Bejaïa.
- [5] : Robert Chauprade, « Commande électronique des moteurs à courant continu », 1978, Edition Eyrolles, France.
- [6] : M Kostenko et L Piotrovski, « Machines électriques (Machines à courant continu. Transformateurs) », Tome 1, Troisième édition, Edition MIR, MOSCOU,1979.
- [7] : Jacques Laroche, « Electronique de puissance (convertisseurs) cours et exercices corrigés », 2005, DUNOD, France.
- [8] : Kenza Madi, Katia Asloun, « Commande d'un ascenseur à base d'Arduino », Mémoire de fin d'étude, 2019, Université A.Mira, Bejaïa.
- [9] : Michel Pinard, « Commande électronique des machines électriques », 2004, DUNOD,France.
- [10] : Imad Hadri, « Support du cours d'électronique de puissance (les convertisseurs DC/DC et DC/AC) », PDF, Institut supérieur des études technologiques, Nabeul.
- [11] : Abdellatif Kerboua, « Cours d'électrotechnique de la 4ème année chapitre 6 : Machine courant continu », PDF.
- [12] : Amar Talbi, « Réalisation d'un redresseur triphasé commande par la carte arduino », Mémoire de Master, 2014, Université de Constantine1, Constantine.
- [13] : Yamina Chiha, « Commande à vitesse variable d'un moteur à courant continu », Mémoire de fin d'étude, 2017, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouagi.

# Annexes

```
// ... m_3, 10);
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);
const int switchPin = A0; // setup switch in pin 8

int Moteur_sens1=8; // Pin 4 Arduino vers broche A+ du L293D
int Moteur_sens2=9; // Pin 5 Arduino vers broche A- du L293D
int PWM; // Variable PWM image de la vitesse
int moteur1_PWM = 10; // Pin 10 Arduino PWM vers EN1 du L293D
// the setup function runs once when you press reset or power the board
int poten=A1;
void setup() {
  lcd.begin(16,2);
  // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output.
  // pinMode(m_1, OUTPUT);
  // pinMode(m_2, OUTPUT);
  pinMode(switchPin , INPUT);
  //pinMode(m_3, INPUT);

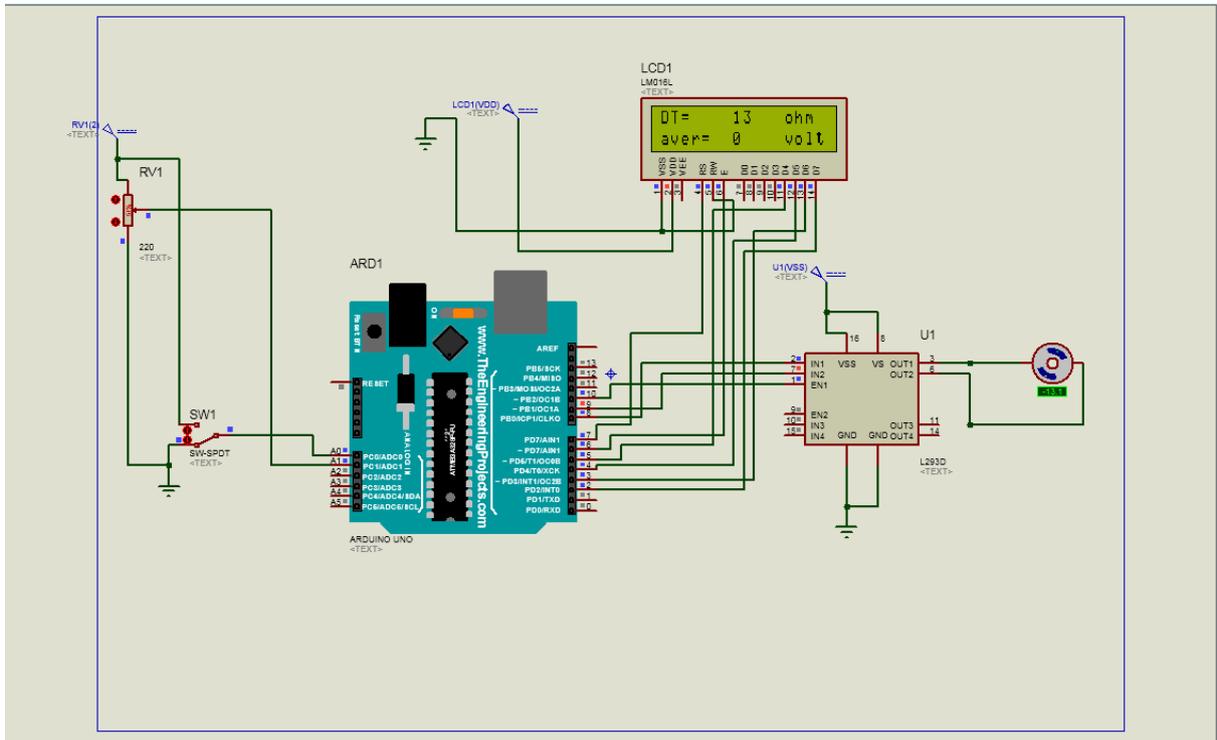
  //lcd.setCursor(0,0);
  //lcd.print("Res=");
  //lcd.setCursor(12,0);
  //lcd.print("ohm");

  pinMode(moteur1_PWM, OUTPUT); // Pin 10 Arduino en sortie PWM
  pinMode(Moteur_sens1, OUTPUT); // Pin 4 Arduino en sortie digitale
  pinMode(Moteur_sens2, OUTPUT); // Pin 5 Arduino en sortie digitale
  pinMode(poten, OUTPUT); // Pin 5 Arduino en sortie digitale
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  int Valeur=analogRead(A1);
  int valRes=map(Valeur,0,1023,0,200);
  int valVol=Valeur*5/1023;
  PWM=map(Valeur,0,1020,0,255); // Associer la valeur du potentiomètre au signal PWM
  analogWrite(moteur1_PWM,PWM); // Envoi du signal PWM sur la sortie analogique 10
  int DT=(PWM*100)/255;
  // -----
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("DT=");
  lcd.setCursor(12,0);
  lcd.print("ohm");
  lcd.setCursor(7,0);
  lcd.print(DT);
  if(digitalRead(switchPin) == HIGH) // if you press the switch
  {
    //digitalWrite(ledPin , HIGH); // turn on the LED
    digitalWrite(Moteur_sens1, HIGH); // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
    // wait for a second
    digitalWrite(Moteur_sens2, LOW);
  }
  else // otherwise
  {
    //digitalWrite(ledPin , LOW); // turn off the LED
    digitalWrite(Moteur_sens1, LOW);
    digitalWrite(Moteur_sens2, HIGH);
  }
}}
```

Compilation terminée.

**Fig. 1 : Le programme de simulation sous Arduino.**



**Fig. 2 : Simulation de variation de vitesse et de sens de rotation sur ISIS.**