

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Électrique

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

En Commande Electrique

Présenté par :

Douis Boubaker Et Gadi Nadjib

Thème

**Commande de vitesse de moteur à courant continu
par réseau de neurone artificiel avec une carte
arduino**

Devant un jury composé de :

Présidente : Mr . Zelouma Laid

Encadreur : Mr.Bekakra Youcef

Examineur :Mr.Kechida Ridha

Année Universitaire : 2018/2019

Dédicaces

Grace Allah...

Je dédie ce modeste travail:

A mes parents:

*Ma chère mère, pour l'affection et l'amour qui m'ont donné le courage et la force dans les moments les plus difficiles.

*Mon père **kaddour** : pour son soutien moral et ses conseils les plus précieux qui m'ont servi dans ma vie et son encouragement sans limite.

Vous resterez à jamais dans mon cœur.

Mes frères : **Dr : mostafa . imad Eddine. Dr : Taoufik et khalifa**

Pour toutes nos chamailleries passées mais surtout pour l'amour de ce même sang qui coule dans nos veines.

A toutes ma famille **GADI**

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la mise au point de ce travail, trouve ici notre profonde reconnaissance. Surtout :

Guerfi Kheireddine ,Dr : Obeidi Nabil ,Dr : Cherif Hakima ,

Dr : Mohamed Cherif Dhiaeddine

A tous mes amis d'enfance et les collègues d'étude.

A toute *mes amis* la promotion 2018/2019.

Gadi Nadjib

Dédicace

Ma Mère, Mon Père

Affable, honorable, aimable : vous représentez pour moi

Le symbole de la bonté par excellence, la source de

Tendresse

Et l'exemple du

Dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier

pour moi.

Soyez sûrs que je continuerai mon chemin.

Je vous dédie ce travail en témoignage de mon profond

Amour.

Puisse Dieu, le tout puissant, vous préserver et vous

Accorder santé,

Longue vie, et bonheur.

A mes sœurs

A mes frères

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de

L'affection que je porte pour vous.

A tous les membres de ma famille, petits et grands

A tous mes amis de proches :

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de

Mon

Affection

Remerciements

Avant tout, nous remercions dieu le tout puissant de nous
Avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé
durant toutes ces longues années d'étude.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous nos
Enseignants de l'université Hama Lakhdar d'EL OUED, notamment à notre

Encadreur Dr . Youcef Bekakra

D'avoir proposé le sujet sur lequel nous avons travaillé, et qui a
Assuré la direction et l'encadrement du travail présenté dans ce

Enfin, mes remerciements vont à tous ceux qui mon soutenu
De près ou de loin à réussir ce travail.

Nos vives salutations.

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire est la réalisation de technique de réseau de neurone artificiel pour commander la vitesse du moteur à courant continu avec une carte arduino à l'aide le logicielle Matlab/Simulink.

La dernier partie de ce mémoire fait l'objet de la réalisation d'un protocole pour suivi la vitesse du moteur à courant continu sa valeur de référence, où les résultats de simulation sont comparé avec les résultats obtenu par la pratique. D'autre part, les résultats obtenus par RNA sont comparé avec celles obtenus par la régulation classique par PID.

Finalement, l'objectif principal de ce mémoire est d'utiliser des techniques de l'intelligence artificielle dans l'industrie et l'automatique.

Mots clés : Moteur à courant continu , Regulateur PID , Reseau de neurone artificiel , Matlab/Simulink .

المخلص

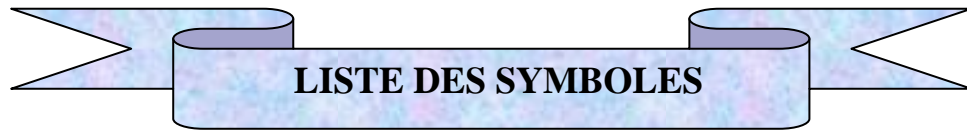
يتمثل العمل المقدم في هذه المذكرة في تحقيق تقنية الشبكة العصبية الاصطناعية للتحكم في سرعة المحرك ذو التيار المستمر باستخدام لوح اردوينو وبمساعدة برنامج الماتلاب-سيمولينك.

الجزء الأخير من هذه المذكرة هو الهدف من إنجاز بروتوكول من أجل تتبع سرعة المحرك قيمتها المرجعية، بحيث تم مقارنة نتائج المحاكاة مع النتائج التطبيقية. من جهة أخرى، النتائج المتحصل عليها من الشبكات العصبونية الاصطناعية تم مقارنتها بالتالي تم الحصول عليها من التحكم الكلاسيكي عن طريق PID .

أخيراً، الهدف الأساسي من هذه المذكرة هو استعمال تقنيات الذكاء الاصطناعي في الصناعة والتحكم الآلي.

الكلمات المفتاحية :

محرك التيار المستمر ، معدل PID، شبكة الخلايا الاصطناعية ، ماتلاب / سيمولينك



LISTE DES SYMBOLES

NOTATIONS	
AC	Courant alternative
DC	Courant Continue
B_s	Champ inducteur
Φ	Flux magnetique
FTBF	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
FTBO	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
F	Force de laplace
I	index
L	distance
B	majeur
K	interepteur
M	Moteur
U	tension
I	courant
P	Constant de Laplace
K_p	Gain proportionnel
K_i	Gain integral
P_{jr}	Perte par effet joul rotorique
P_{fr}	Perte fer rotorique
P_m	Perte mecanique

Liste des symboles

P_c	Perte constant
P_a	Puissance absorbet
$P_{ém}$	Perte électromécanique
P_u	Perte utile
H	rendement
E	La force électromotrice
R	Résistance
L_f	inductance
C_r	Couple résistance
W	La vitesse
Ω	La vitesse angulaire
K	Constant
I_e	Le courant traversant le circuit d'inducteur
U_e	La tension qui alimente l'inducteur
C_e	Couple électromanétique
Φ_e	Flux inducteur
L_e	Inductance
R_e	Résistance
L_{ea}	Mutuelle inductance entre l'inducteur et l'induit
R_a	La résistance de l'induit
L_a	L'inductance de l'induit
U_a	La tension aux bornes de l'induit
I_a	Le courant traversant le circuit d'induit
J	Inertie
F	Frottement
RNA	Réseaux des neurones artificiels

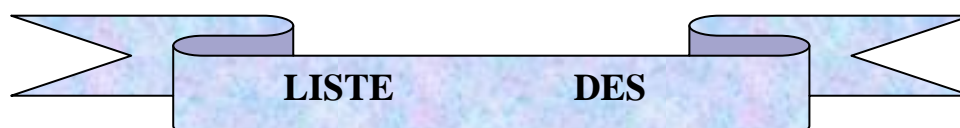
Liste des symboles

USB	Universel serial bus
HEX	Hexadécimal
PWM	Puls width modulation
MCC	Moteur à courant continu
FT	Fonction de transfert
PID	Proportionnel, intégral, dérivé
K_p	Gain proportionnel
K_i	Gain intégral
K_d	Gain dérivé



Liste des Tableaux :

Tableau	Désignation	Chapitre	Page
Tableau 1	Domaine D'application d'un moteur à excitation série	II	12
Tableau 2	Domaine D'application d'un moteur à excitation shunt	II	12
Tableau 3	Domaine D'application d'un moteur à excitation compound	II	13
Tableau 4	Domaine D'application d'un moteur à excitation séparé	II	14



LISTE DES

Liste des figures

Figure	Désignation	Chapitre	Page
Figure 1	Construction du stator	I	3
Figure 2	Construction du stator	I	3
Figure 3	rotor d'un moteur à courant continu	I	4
Figure 4	présentation du collecteur dans le rotor	I	4
Figure 5	présentation des balais	I	5
Figure 6	Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu	I	5
Figure 7	Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu	I	5
Figure 8	Moteur à aimant permanent	I	6
Figure 9	moteur à excitation séparée	I	7
Figure 10	moteur à excitation série	I	7
Figure 11	moteur à excitation shunt	I	7
Figure 12	moteur à excitation composée	I	8
Figure 13	Bilan de la puissance	I	8
Figure 1	Modes de fonctionnement de la machine à courant continu	II	10
Figure 2	Mise en évidence d'un couple moteur	II	11
Figure 3	Modélisation électrique d'un moteur à excitation série Domaine d'application	II	11
Figure 4	Modélisation électrique d'un moteur à excitation shunt Domaine d'application	II	12
Figure 5	Modélisation électrique d'un moteur à excitation compound	II	13
Figure 6	Modélisation électrique d'un moteur à excitation séparée Domaine d'application	II	13
Figure 7	schéma bloc tension-vitesse de la machine à courant continu à excitation séparée.	II	17
Figure 8	schéma bloc tension-vitesse de la machine à courant continu à excitation série.	II	18
Figure 9	schéma bloc tension-vitesse du moteur à courant continu à excitation shunt.	II	20
Figure 10	La vitesse du moteur à courant continu	II	21
Figure 11	Le couple du moteur à courant continu	II	21
Figure 12	Le courant du moteur à courant continu	II	22
Figure 13	La vitesse du MCC shunt	II	23
Figure 14	Le couple du MCC shunt	II	23
Figure 15	Le courant du MCC shunt	II	24
Figure 16	La vitesse du MCC série	II	25
Figure 17	Le couple du MCC série	II	25

Liste des figures

Figure 18	Le courant du MCC série	II	26
Figure 1	Structure d'un neurone artificiel	III	28
Figure 2	La carte Arduino UNO.	III	30
Figure 3	Module Driver L298N	III	31
Figure 4	photo réel de montage de travail (en laboratoire).	III	33
Figure 5	Model de simulation du montage en boucle fermer (avec régulateur PID).	III	33
Figure 6	Modélisation de système en boucle ouvert.	III	34
Figure 7	identification de système au Matlab.	III	34
Figure 8	importe data input et output de workspace de Matlab.	III	34
Figure 9	Estimateur la fonction de transfert de MCC	III	35
Figure 10	Extraction de la fonction de transfert.	III	35
Figure 11	importe de fonction de transfert.	III	35
Figure 12	choisir le type de régulation.	III	36
Figure 13	variation les paramètre pour estime la réponse et show la nouvelle paramètre.	III	36
Figure 14	Modélisation de système avec régulateur PID.	III	36
Figure 15	Allure de vitesse avec régulation PID	III	37
Figure 16	les paramètres d'entraînement des RAN	III	38
Figure 17	runé le programme de RNA	III	38
Figure 18	l'opération d'entrainement de système (l'apprentissage)	III	39
Figure 19	block de commande RNA pour contrôle MCC	III	39
Figure 20	Modélisation de système avec technique de RNA	III	39
Figure 21	l'allure de vitesse controler par RNA	III	40

Sommaire



Liste des symboles

Liste de figures

Liste des tableaux

Introduction Générale..... 1

CHAPITRE I : Généralités sur les moteurs à courant continu

I. Introduction	02
II. Description d'un moteur à courant continu	02
III. Constitution du moteur	02
III.1 Stator du moteur à courant continu	02
III.2 Rotor du moteur à courant continu	04
III.3 Le Collecteur d'un moteur à courant continu	04
III.4 Les balais	05
IV. Principe de fonctionnement	05
V. Les différents types de moteurs	06
V.1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent	06
V.2 Les moteurs à inducteur bobiné	06
V.2.1 Le moteur à excitation séparée	07
V.2.2 Le moteur à excitation série	07
V.2.3 Le moteur à excitation shunt	07
V.2.4 Le moteur à excitation composée	08
VI. Bilan de la puissance	08
VII. Le rendement	08
VIII. conclusion	09

CHAPITRE II : Modélisation du moteur à courant continu

I. Introduction	10
II. Principe de Fonctionnement	11
III. Type de la machine à courant continu	11
III.1. Moteur à excitation série	12
III.2. Moteur à excitation shunt (Dérivée)	12
III.3. Moteur à excitation compound (composée)	13
III.4. Moteur à excitation séparée	14
IV. Choix du moteur à courant continu	15
V. Les avantages et les inconvénients des machines à courant continu	15
VI. Modélisation du moteur à courant continu	16
VI.1. Moteur à courant continu à excitation séparée	16
VI.1.1. Les paramètres de la machine à CC à excitation séparée	16
VI.1.2. Equations électriques	17
VI.1.3. Equations électromécaniques	17
VI.1.4. équation mécanique	17
VI.1.5. Transformées de Laplace	17
VI.1.6. Schéma bloc	18
VI.2. Moteur à courant continu à excitation série	18
VI.2.1. Les paramètres de la machine à CC à excitation série	18
VI.2.2. Equations électriques	19
VI.2.3. Equations électromécaniques	19
VI.2.4. Equation mécanique	19
VI.2.5. Transformées de Laplace	19
VI.2.6. Schéma bloc	20
VI.3. Moteur à courant continu à excitation shunt	20
VI.3.1. Les paramètres de la machine à CC à excitation shunt	20
VI.3.2. Equations électriques	21
VI.3.3. Equations électromécaniques	21
VI.3.4. équation mécanique	21
VI.3.5. Transformées de Laplace	21
VI.3.6. Schéma bloc	22

VII. Simulation du moteur à courant continu	22
VII.1. Simulation du moteur à courant continu à excitation séparée	22
VII.1.2. Les paramètres du moteur	22
VII.1.3. Les résultats de simulation	23
VII.1.4. Interprétation	24
VII.2. Simulation du moteur à courant continu à excitation shunt	24
VII.2.1. Les paramètres du moteur	24
VII.2.2. Les résultats de simulation moteur shunt	24
VII.2.3. Interprétation	25
VII.3. Simulation du moteur à courant continu à excitation série	26
VII.3.1. Les paramètres du moteur	26
VII.3.2. Résultats de simulation MCC série	26
VII.3.3. Interprétation	27
VIII. Conclusion	27

CHAPITRE III : Commande d'un Moteur à Courant Continu par Réseaux de Neurones Artificiels avec Carte Arduino

1. Introduction	28
2. Définition des réseaux des neurones artificiels	28
3. Histoire	29
4. Application	29
3. Structure du réseau	29
4. Le modèle neurophysiologique	30
5. Apprentissage	30
5.1. Mode supervisé	31
5.2. Mode non supervisé	31
6. Différents types de réseaux de neurones	31
7. Définition du module Arduino	33
8. Module Driver L298N	33
❖ Les matériels utilisés dans ce travail	34
I. Commande de vitesse de MCC par régulateur PID	35
11. Identification paramétrique du système	35

Sommaire

11.1 Interprétation :	39
II. Commande de vitesse de MCC par Réseau de Neurone Artificiel	39
11.2 Interprétation	41
II.2. Comparaison entre les deux technique	41
II.3. Les avantage et les inconvénient des RNA	42
II.3.1. Les avantage	42
II.3.2. Les inconvénient	42
II.4 Conclusion	43
Conclusion générale	44

Introduction

Générale

Introduction générale :

Ainsi aujourd'hui, les moteurs à courant continu, qui sont par nature des machines à vitesse variable sont très utilisés. Le réglage de la vitesse de ces moteurs demeure cependant difficile quand on dispose d'une tension fixe [1].

C'est pourquoi on est amené à les alimenter par des variateurs de tension. Actuellement ces variateurs sont des dispositifs électroniques à thyristors compte tenu de l'importance que revêtent le réglage et la variation de la vitesse dans les quatre quadrants [1].

Les réseaux de neurones artificiels présente une alternative prometteuse pour de nombreux domaines ; à savoir la reconnaissance de formes, le traitement d'images, le control industriel et l'identification. S'inspirant des règles de la génétique, les techniques neuronales interviennent dans un contexte où les outils courants ont atteint leurs limites.

Grace à leurs propriétés d'approximation universelle, les réseaux de neurones on vu leur champ d'application s'étaler à de nouvelles classe de problèmes, réputés de complexe avec succès. Les études antérieures ont montré qu'avec un réseau neuronal à une seule couche cachée et un nombre suffisant de neurones cachés on peut identifier n'importe quel système avec n'importe quelle précision.

Dans ce travail, les réseaux de neurones artificiels sont utilisés pour la commande de vitesse d'un moteur à courant continu avec une carte Arduino.

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation du moteur à courant continu.
- Le deuxième chapitre est basé sur la modélisation et simulation du moteur à courant continu en boucle ouverte avec ses types.
- Le troisième chapitre est consacré à l'application des réseaux de neurones artificiel pour commander la vitesse du moteur à courant continu expérimentalement ave une carte Arduino.

En fin une conclusion générale clôture le mémoire.

Chapitre I

I.1 Introduction :

Jusqu'à un passé récent, les machines à courant continu ont été majoritairement utilisées dans les entraînements à vitesse variable. Ceci tient au fait que son fonctionnement est d'une grande simplicité, de même que sa modalisation, mais surtout à ses performances statiques et dynamiques exceptionnelles.

Dans le cadre de ce chapitre, on présentera une brève description du moteur à courant continu, et des différents types existant dans la littérature. Une modélisation du moteur et ensuite illustrée en se basant sur des équations mathématiques[2].

I.2 Description d'un moteur à courant continu:

Un moteur à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique, d'où l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique[3].

I.3 Constitution du moteur :

I.3.1 Stator du moteur à courant continu :

Le stator est constitué de la carcasse du moteur et du circuit magnétique proprement dit. Un circuit magnétique est constitué d'une structure ferromagnétique qui canalise le flux magnétique, créé par une source de champ magnétique : aimant permanent ou électroaimant. Le circuit magnétique du stator crée le champ magnétique appelé « champ inducteur » (B_s). L'inducteur magnétise le moteur en créant un flux magnétique (Φ) dans l'entrefer. L'entrefer est l'espace entre les pôles du stator et le rotor. Le flux magnétique est maximal au niveau des pôles magnétiques.

Il s'agit du moteur courant continu qui assure l'entraînement du Scootelec de Peugeot[1].

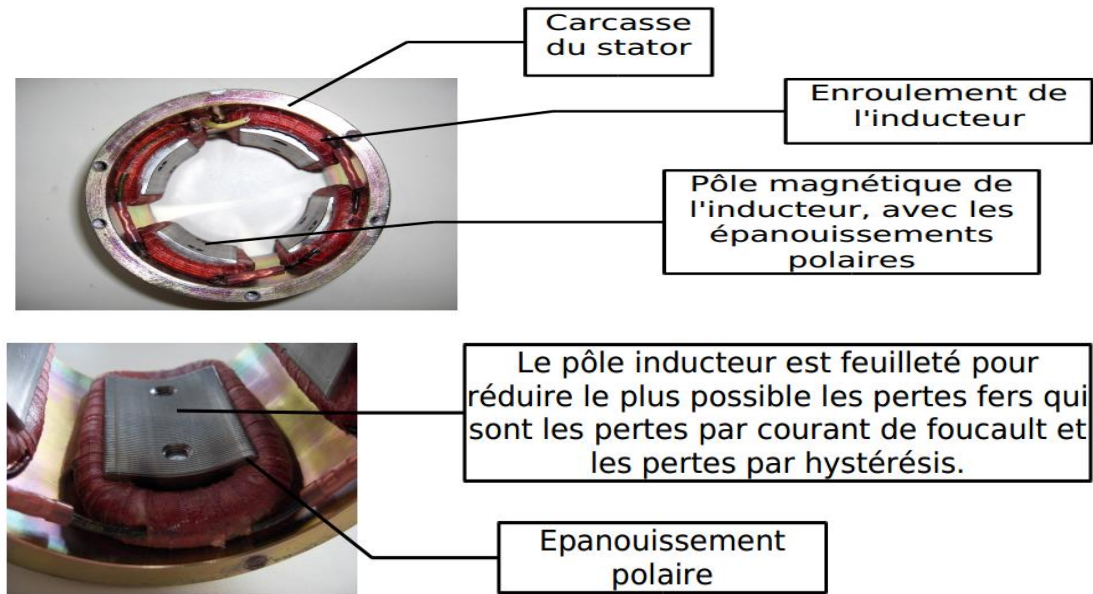


Figure I.1: Construction du stator.

Revenons à la photo d'ensemble pour la commenter d'un point de vue magnétique :

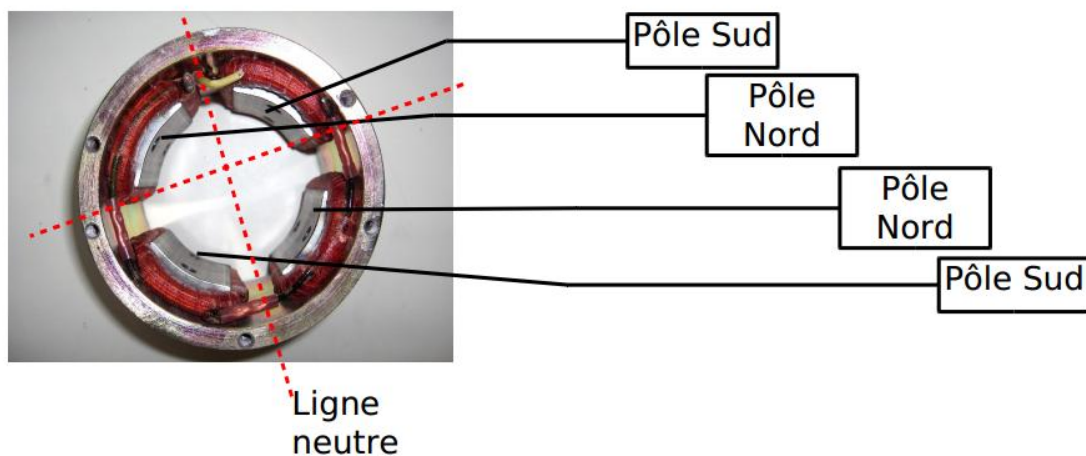


Figure I.2: Les pôles du stator.

Ce moteur possède 2 paires de pôles inducteurs (Nord – Sud) pour mieux répartir le flux magnétique dans la machine. Les lignes de champ magnétique vont du pôle Nord vers le pôle Sud. La configuration des pôles est donnée pour un sens du courant inducteur. Si le courant est inversé, le pôle Sud devient un pôle Nord et inversement. C'est une possibilité pour inverser le sens de rotation du moteur, mais elle est peu utilisée. Lorsque la spire, ou section, de l'induit (paragraphe suivant) est sur la « ligne neutre », les forces électromotrices induites dans les conducteurs sont nulles et la spire est en courtcircuit par les balais[3].

I.3.2 Rotor du moteur à courant continu :

Le rotor ou l'induit comporte un circuit magnétique feuilleté muni d'encoches régulièrement distribuées à la périphérie.

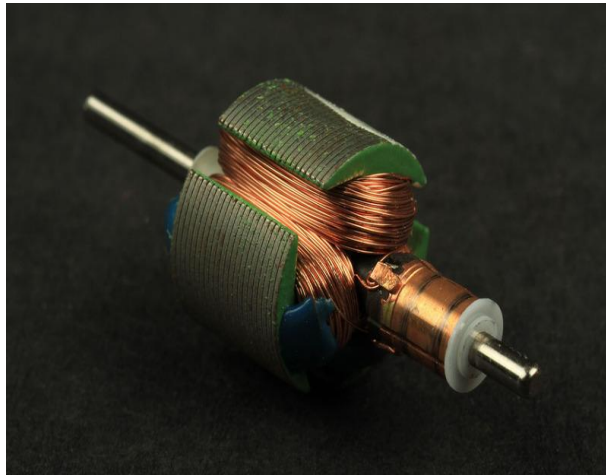


Figure I.3 : Rotor d'un moteur à courant continu.

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

Est claveté sur l'arbre de l'induit, sur lequel frottent les balais. Il se compose de lame de cuivre de section trapézoïdale, portent chacune une ailette de connexion à l'enroulement de l'induit et isolées par du mica.

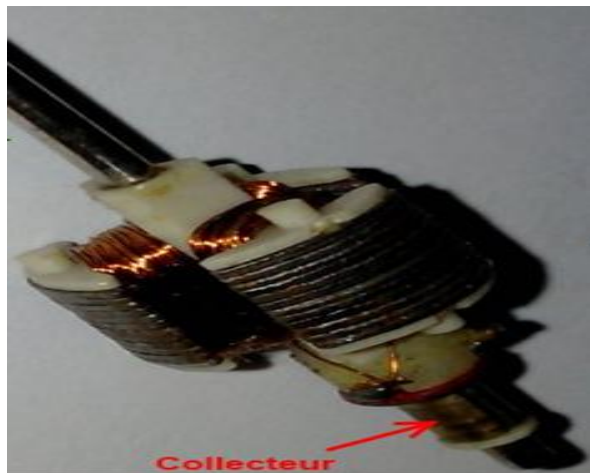


Figure I.4: Présentation du collecteur dans le rotor.

I.3.4 Les balais sont fixes, en charbon graphitique,

Appuient sur des lames diamétralement opposées du collecteur, ils sont immobiles, isolés électriquement du bâti de la machine.

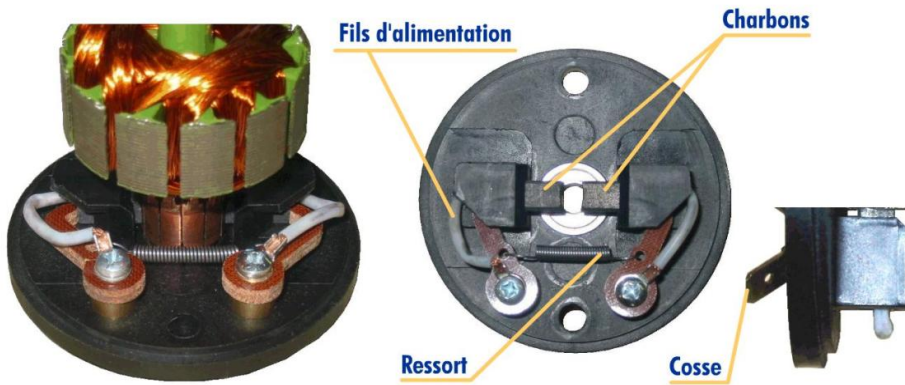


Figure I.6 : Présentation des balais

I.4 Principe de fonctionnement :

Mise en évidence d'un couple moteur :

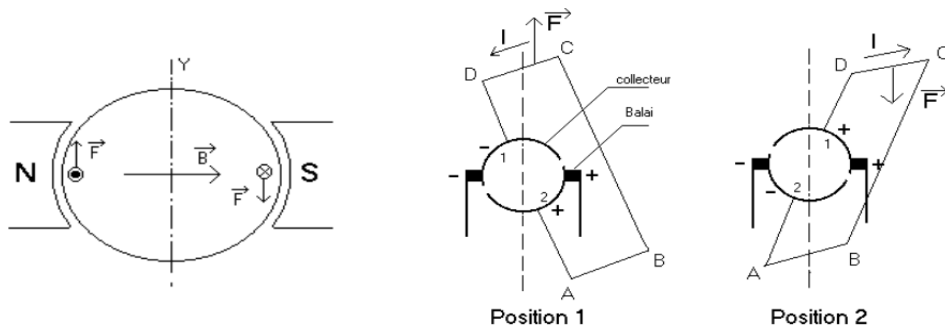


Figure I.7 : Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu

Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force électromagnétique dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite .

($F = I * L \wedge B$), F : force de laplace , I: index et B: Majeur.

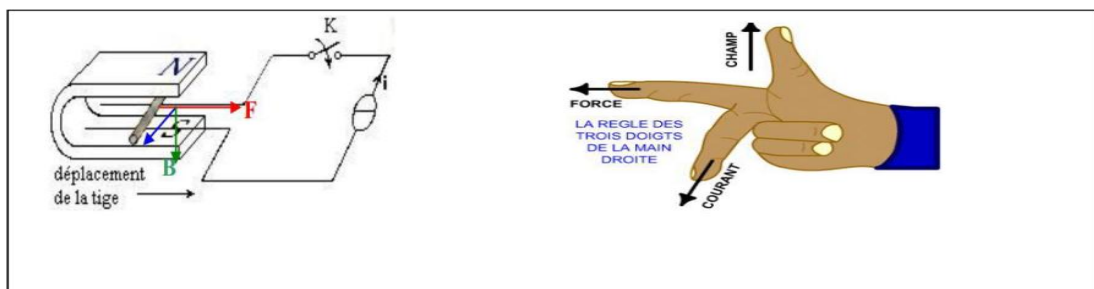


Figure I.8 : Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu

Le rotor se met donc à tourner. Quand le conducteur arrive en Y (figure de gauche ci-dessus) il faut changer le sens de la force en inversant le courant dans le conducteur pour que le rotor continue à tourner: C'est le rôle du collecteur. Grâce au collecteur, bien que la tension appliquée soit continue, le courant dans une spire s'inversera sous l'axe de commutation et la rotation pourra être permanente. Schéma de droite : dans la position 1, le courant parcourt la spire dans le sens ABCD et dans le sens contraire pour la position 2, grâce au système de balai collecteur [3].

I.5 Différents types de moteurs :

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

I.5.1. Moteurs à inducteur à aimant permanent :

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent.

Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples d'utilisation.

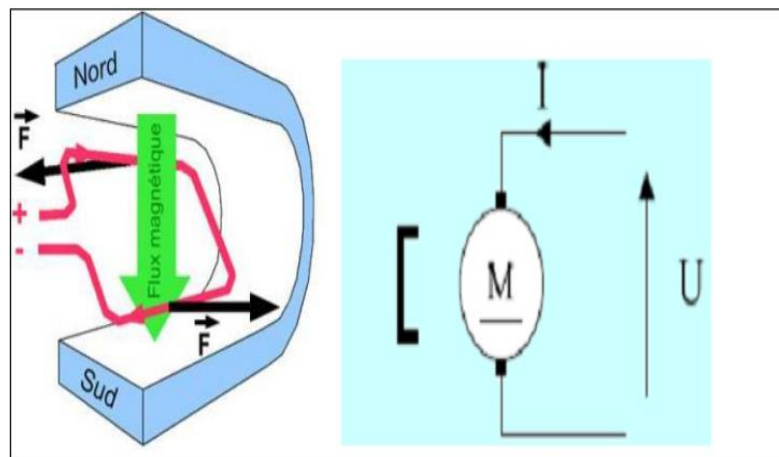


Figure I.9: Moteur à aimant permanent.

I.5.2. Moteurs à inducteur bobiné :

Il existe 4 types différents de moteurs électriques qui sont classés en fonction du type d'excitation qui est employé, qui sont :

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

❖ **Moteur à excitation séparée:**

Le moteur à excitation indépendante est raccordé à une alimentation à courant continu séparée. par conséquent, le courant qui alimente l'inducteur est indépendante de celui qui alimente l'induit.

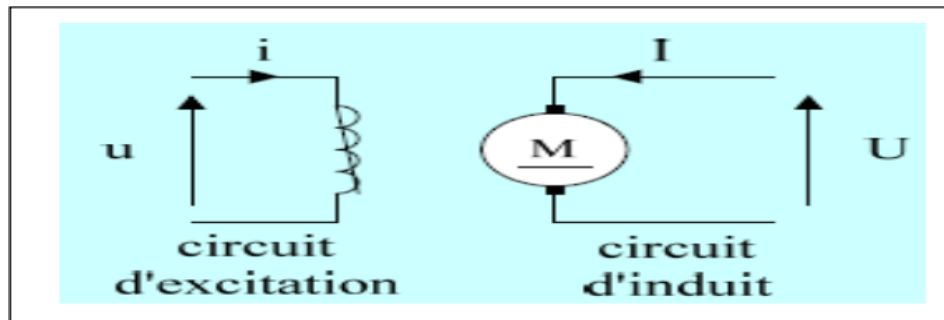


Figure I.10: Moteur à excitation séparée.

❖ **Moteur à excitation série:**

L'induit et l'inducteur sont alimentés par la même source de tension. Ce type de moteur présente un très fort couple au démarrage, il reste encore utilisé dans certaines applications de traction électrique.

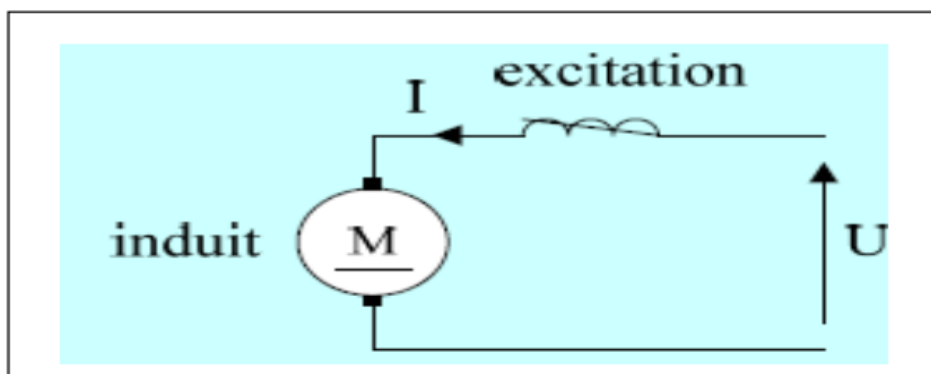


Figure I.11: Moteur à excitation série.

❖ **Moteur à excitation shunt:**

La même source d'alimentation alimente l'induit et l'inducteur. L'inducteur est mis en parallèle avec l'induit.

Ce mode d'excitation offre à l'utilisateur une fréquence de rotation pratiquement indépendante de la charge et qui peut démarrer à vide.

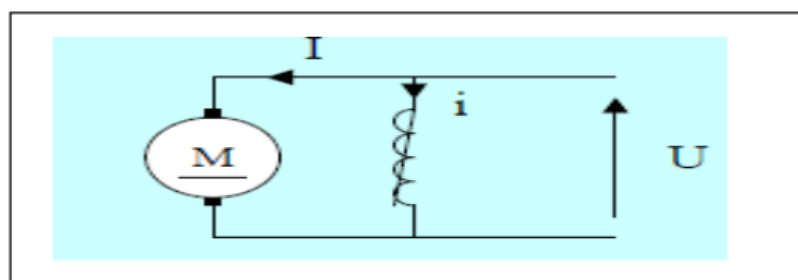


Figure I.12: Moteur à excitation shunt.

❖ Moteur à excitation composée :

Le moteur à excitation composé, est a raccordé à avec deux excitations, excitation série et excitation shunt en même temps[4].

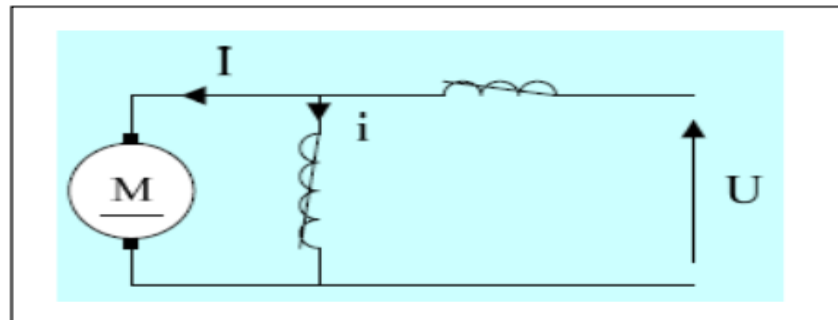


Figure I.13: Moteur à excitation composée.

I.6 Bilan de la puissance:

On peut représenter le bilan des puissances mises en jeu dans un moteur à courant continu en fonctionnement nominal par une flèche qui rétrécit au fur et à mesure que la puissance diminue[4].

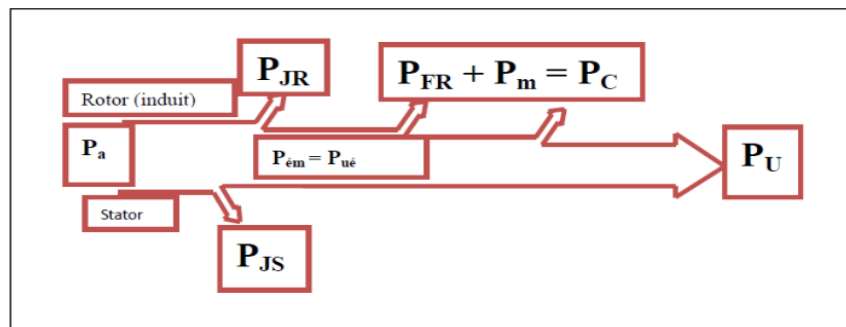


Figure I.14: Bilan de la puissance.

P_a : Puissance absorbée.

P_u : Puissance utile.

$P_{ém}$: Puissance électromagnétique.

P_{JS} : Pertes par effet joule dans l'inducteur.

P_{JR} : Pertes par effet joule dans l'induit.

P_c : Pertes fer + pertes mécaniques : dites pertes constantes.

I.7 Le rendement:

Les moteurs à courant continu consomment une partie de l'énergie absorbée pour leur fonctionnement. L'énergie mécanique fournie sera toujours plus petite que l'énergie électrique absorbée. Le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie absorbée est le rendement[4].

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{I.1})$$

avec:

P_u : puissance utile.

P_a : puissance absorbée.

I.8 Conclusion:

Nous avons conçu ce chapitre pour rappeler les moteurs à courant continu, leurs composants, leur fonctionnement et leur type. Après notre étude nous avons constaté que les moteurs à excitation séparée et à aimant permanent sont les plus adaptés pour la variation de vitesse.

Chapitre II

II.1 Introduction:

Les machines à courant continu sont des membres de la famille des actionneurs.

Les actionneurs sont des éléments qui produisent une action. Il existe ainsi deux types d'actionneurs, d'un côté nous trouvons les génératrices qui transforment l'énergie mécanique en énergie électrique créant un courant continu. Mais les machines continues sont également réversibles, on obtient alors notre second type de machine continue, les moteurs. Les moteurs à courant continu sont ainsi des machines à courant continu transformant dès lors l'énergie électrique en énergie mécanique créant une rotation.

Ainsi moteur et génératrice, comme le montre la figure II.1, sont une seule et même machine, laquelle est réversible par construction. La loi d'Ohm s'écrit donc selon deux conventions:

-Convention récepteur (moteur): $U=E+ RI$

-Convention générateur (génératrice): $U=E - RI$

Les moteurs à courant continu sont généralement employés dans des domaines spécifiques. Par exemple, nous les retrouvons dans les domaines de la traction, du levage et du positionnement pour les fortes puissances. Mais il est également envisageable d'employer ce dernier lorsqu'un système utilise une source d'énergie autonome (pile ou batterie) [5].

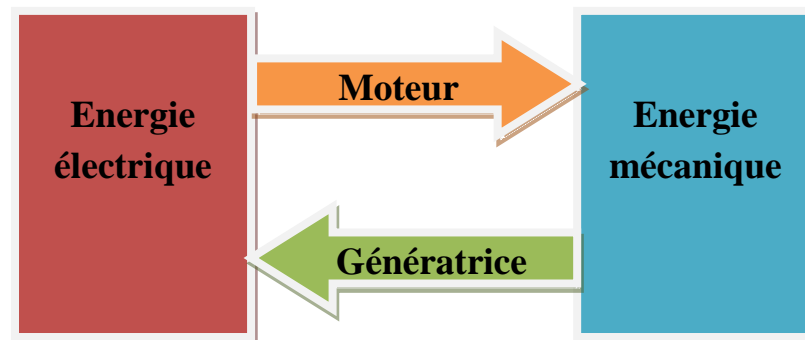


Figure II.1: Modes de fonctionnement de la machine à courant continu.

II.2 Principe De Fonctionnement :

Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force électromagnétique dont le sens est donné par la règle des trois

$$F = I * L \wedge B \quad (II.1)$$

Avec:

F : force de Laplace;

I: index;

B: Majeur.

Le rotor se met donc à tourner. Quand le conducteur arrive en Y (figure de gauche ci-dessus) il faut changer le sens de la force en inversant le courant dans le conducteur pour que le rotor

continue à tourner: C'est le rôle du collecteur. Grâce au collecteur, bien que la tension appliquée soit continue, le courant dans une spire s'inversera sous l'axe de commutation et la rotation pourra être permanente. Schéma de droite : dans la position 1, le courant parcourt la spire dans le sens ABCD et dans le sens contraire pour la position 2, grâce au système de balai collecteur [6]. La figure II.2, présente la mise en évidence d'un couple moteur du MCC.

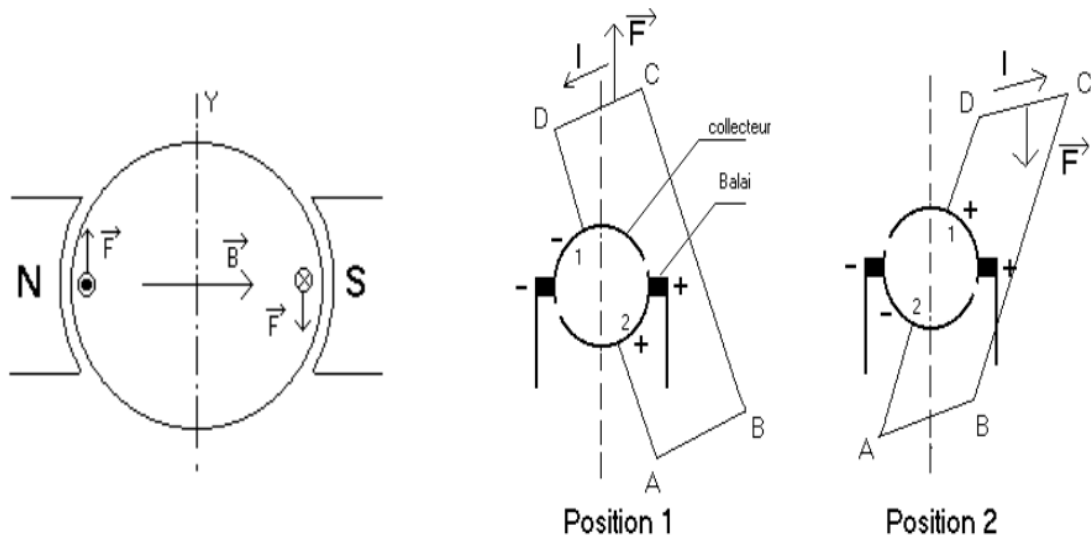


Figure II.2: Mise en évidence d'un couple moteur.

II.3 Type de la machine a courant continu :

Les machines à courant continu se classent selon le mode de branchement de l'enroulement d'excitation par rapport à l'induit, on a donc des machines à excitation séparée, série, shunt et composée.

III.3.1 Moteur à excitation série:

Le circuit d'excitation est placé avec l'induit du moteur. Sa particularité est d'avoir un inducteur qui est traversé par le même courant, l'inducteur possède donc une résistance plus faible que celle des autres types de machines. L'inducteur est en série avec l'induit : une seule source d'alimentation suffit. On change le sens de rotation en permutant les connexions de l'induit et de l'inducteur.

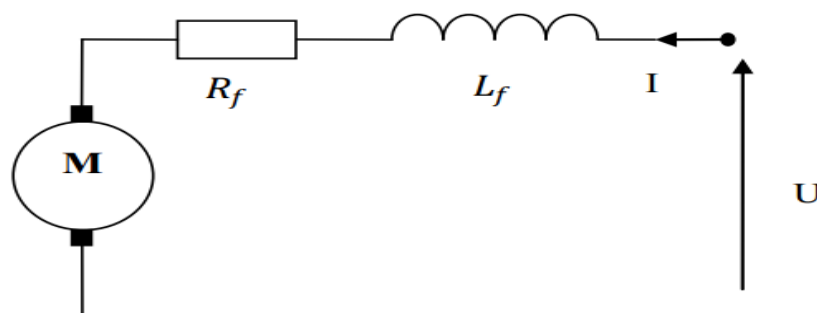


Figure II.3: Modélisation électrique d'un moteur à excitation série.

II.3.1.1 Domaine d'application:

Tableau II.1: Domaine d'application d'un moteur à excitation série.

Particularités	Emplois
<ul style="list-style-type: none"> - Moteur autorégulateur de puissance. - Possède un très grand couple de démarrage mais risque d'emballement à vide. - La vitesse décroît quand la charge augmente. 	Le moteur qui convient le mieux en traction électrique

II.3.2 Moteur à excitation shunt (Dérivée):

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas, l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est représenté par la suivante :

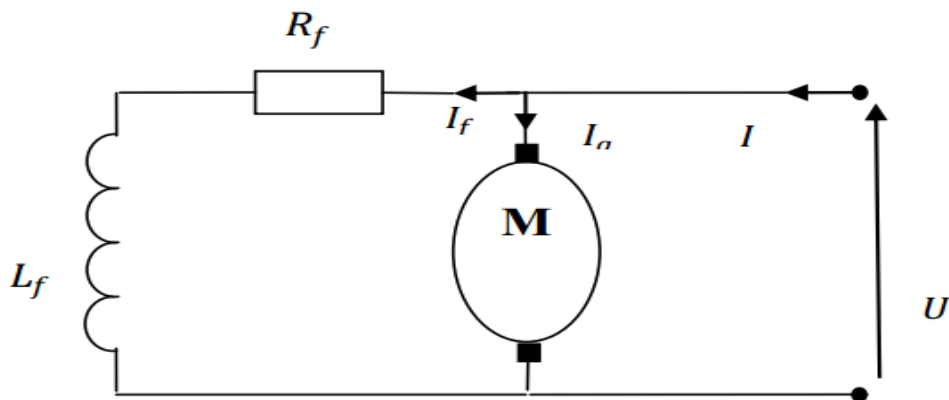


Figure II.4: Modélisation électrique d'un moteur à excitation shunt

III.3.2.1 Domaine D'application:

Tableau II.2: Domaine D'application d'un moteur à excitation shunt.

Particularités	Emplois
<ul style="list-style-type: none"> - Ne s'emballe pas - Couple de démarrage meilleur qu'en excitation dérivative . 	Appareils de levage et de manutention Utilisé aussi en excitation indépendante.

II.3.3 Moteur à excitation compound (Composée):

C'est une combinaison des excitations shunt et série, on peut réaliser un compound- additif (Si les flux des deux enroulements s'additionnent) ou soustractif (dans le cas contraire).

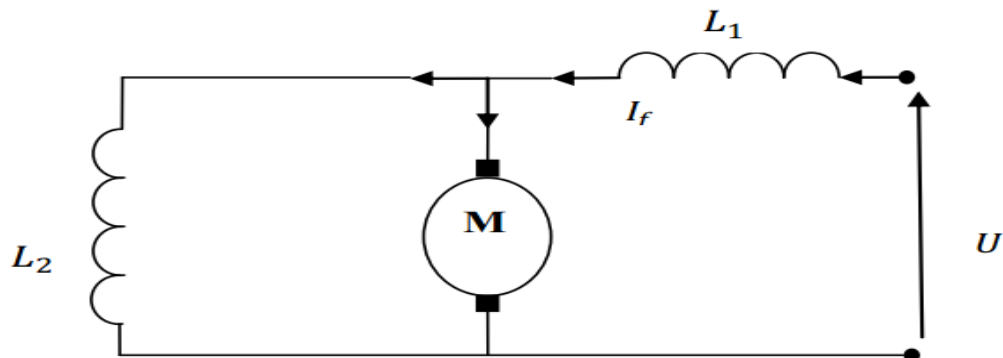


Figure II.5: Modélisation électrique d'un moteur à excitation compound.

II.3.3.1 Domaine d'application :

Tableau II.3: Domaine d'application d'un moteur à excitation compound.

Particularités	Emplois
Risque d'emballement du fait de l'annulation de flux résultant des enroulements.	Pratiquement ce n'est plus utilisé.

II.3.4 Moteur à excitation séparée :

Ce mode d'excitation nécessite deux sources d'alimentations distinctes.

L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale. On change le sens de rotation en permutant les bornes de l'induit ou de l'inducteur.

Le circuit électrique est représenté par la suivante [6]:

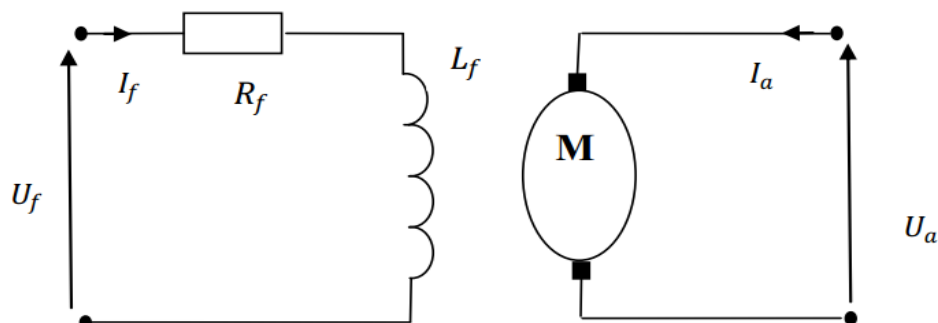


Figure II.6: Modélisation électrique d'un moteur à excitation séparée.

II.3.4.1. Domaine d'application:

Tableau II.4: Domaine d'application d'un moteur à excitation séparé

Particularités	Emplois
<ul style="list-style-type: none"> - Moteur autorégulateur de vitesse . - La vitesse est relativement constante quelque soit la charge . 	Entraînement de machines-outils (Remplacé par le moteur asynchrone triphasé).

II.4 Choix du moteur à courant continu :

Le choix d'un moteur à courant continu doit permettre l'entraînement de la machine accouplée avec les performances imposées par le cahier des charges à savoir :

- Le nombre de quadrants de fonctionnement.
- Le couple sur toute la plage de vitesse : caractéristique $C_r = f(\Omega)$
- La vitesse maximum / minimum.
- L'accélération et la décélération maximum.
- La qualité, la précision et la dynamique du couple et de la vitesse.

Et le respect des normes pour le réseau d'alimentation énergétique :

- La consommation d'énergie réactive.
- Le taux d'harmoniques imposé au réseau.
- La compatibilité électromagnétique [9].

II.5 Les avantages et les inconvénients des machines à courant continu:

Les machines à courant continu présentent des avantages très important surtout les moteurs. Ils sont moins polluants et moins bruyants, ils démarrent seuls et facilement, facilite d'emploi dans le cas de démarrage fréquent, régularité du couple utile, possibilité d'inversion du sens de rotation sans intervention de dispositifs mécaniques.

Les machines à courant continu ont des avantages mais aussi des inconvénients. Ces inconvénients sont :

Ils ont une partie fragile (considérons comme point faible des machines à courant continu), cette partie est le collecteur et les ballais, il faut changer les ballais de temps en temps pour assurer le meilleur contact.

Le prix d'un moteur à courant continu est plus de deux fois celui d'un moteur triphasé asynchrone de même puissance [6].

II.6 Modélisation du moteur à courant continu :

Le moteur à courant continu peut être modélisé par les équations: électrique, électromécanique, mécanique.

Ces trois groupes d'équation nous permettrons de mieux appréhender le moteur à courant continu dans son fonctionnement réel.

Du côté électrique, nous pouvons dire que le moteur à courant continu se définit par un circuit d'induit et un circuit inducteur; l'induit de la MCC peut être vu comme une résistance **R_a** et une inductance **L_a** en série avec une source de tension commandée **e_m(t)** proportionnelle à la vitesse **ω(t)**.

Du côté mécanique, nous représentons le moteur à courant continu par l'inertie de l'induit augmentée de celui de la charge entraînée [7].

II.6.1 Moteur à courant continu à excitation séparée:

II.6.1.1 Les paramètres de la machine à CC à excitation séparée :

- La tension aux bornes de l'induit U_a(t)
- le circuit électrique de l'induit, faisant apparaître :
 - La résistance de l'induit R_a ;
 - L'inductance de l'induit L_a ;
 - Une tension E(t) appelée f.e.m. (force électro-motrice), proportionnelle à la vitesse angulaire Ω(t) ;
 - Le courant traversant le circuit d'induit I_a(t) ;
- La tension qui alimente l'inducteur U_e(t) ;
- le courant qui circule dans l'inducteur I_e(t) ;
- Le circuit électrique de L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation Φ_e, il comporte :
 - une résistance R_e, et une inductance L_e ;
 - L_{ea} : Mutuelle inductance entre l'inducteur et l'induit ;
 - Le courant traversant le circuit d'inducteur I_e(t) ;
 - La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie J, frottement f) ;
 - La vitesse du rotor du moteur Ω(t).[8]

II.6.1.2 Equations électriques :

❖ équation d'inducteur :

$$U_e(t) = R_e \cdot I_e(t) + L_e \cdot \frac{dI_e(t)}{dt} \quad (\text{II.1})$$

❖ équation d'induit :

$$U_a(t) = R_a.I_a(t) + \frac{d\psi}{dt} = R_a.I_a(t) + L_a \cdot \frac{d\Omega \cdot \Phi_e(t)}{dt}$$

$$U_a(t) = R \cdot I_a(t) + L_a \cdot \frac{dI_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.2})$$

❖ équation du flux magnétique :

$$\Phi_e(t) = L_a \cdot I_e \quad (\text{II.3})$$

II.6.1.3 Equations électromécaniques :

- La tension induite $e(t)$, appelée f.e.m ("force électromotrice") est proportionnelle à la vitesse angulaire $\Omega(t)$ et au flux inducteur $\Phi_e(t)$:

$$e(t) = K \cdot \Phi_e(t) \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.4})$$

K : est une constante dépendant de la construction de la machine.

La première équation montre que $e(t)$ s'oppose à $U_a(t)$, c'est à dire que le moteur réagit en créant une f.e.m $e(t)$ tendant à s'opposer à $U_a(t)$. Cet effet est bien visible dans le schéma fonctionnel du moteur[8].

- Le couple électromagnétique C_e développé a pour expression :

$$C_e = K \cdot \Phi_e(t) \cdot I_a(t) \quad (\text{II.5})$$

II.6.1.4 Equation Mécanique :

En assimilant le couple moteur au couple électromagnétique, il devient :

$$C_e - C_r = \Sigma J \cdot \frac{d\Omega(t)}{dt} + f \cdot \Omega(t) \quad (\text{II.6})$$

Où C_r est le couple résistant imposé par la charge, ΣJ le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et f le coefficient de frottement proportionnel à la vitesse de rotation $\Omega(t)$ [8].

II.6.1.5 Transformées de Laplace :

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

$$U_e = R_e \cdot I_e + p \cdot L_e \cdot I_e$$

$$U_a = R_a \cdot I_a + p \cdot L_a \cdot I_a + E$$

$$\Phi_e = L_a \cdot I$$

$$E = K \cdot \Phi_e \cdot \Omega$$

$$C_e = K \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$e - C_r = \Sigma J \cdot p \cdot \Omega + f \cdot \Omega$$

II.6.1.6 Schéma Bloc :

Les transformées de Laplace obtenues nous permettent de modéliser le moteur sous forme de schéma bloc ou schéma fonctionnel. Ces schémas présentent les fonctions de transfert suivant les paramètres d'entrée et de sortie considérés.

Si on considère comme grandeur d'entrée, la tension appliquée aux bornes de l'induit et comme grandeur de sortie, nous obtenons le schéma bloc tension – vitesse. Ce dernier nous permet de voir l'évolution de la vitesse avec la tension [8].

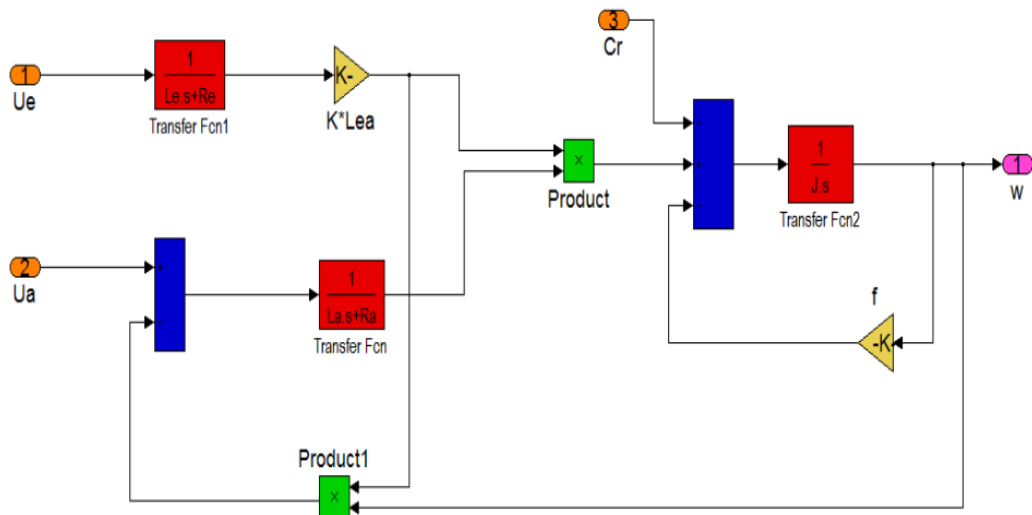


Figure II.7 : Schéma bloc tension-vitesse de la machine à courant continu à excitation séparée.

II.6.2 . Moteur à courant continu à excitation série:

II.6.2.1 Les paramètres de la machine à CC à excitation série :

- La tension aux bornes de l'induit $U_a(t)$
- La résistance de l'induit R_a ;
- L'inductance de l'induit L_a ;
- Une tension $e(t)$ appelée f.e.m. (force électromotrice), proportionnelle à la vitesse angulaire $\Omega(t)$;
- Le courant traversant le circuit d'induit $I_a(t)$;
- L'inducteur créant un flux magnétique d'excitation Φ_e ; il comporte :
 - une résistance R_e , et une inductance L_e ;
 - L_{ea} : Mutuelle inductance entre l'inducteur et l'induit ;
- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie J , frottement visqueux, élasticité de la transmission, etc.) ;
- La vitesse du rotor du moteur $\Omega(t)$ [8]

II.6.2.2 Equations électriques :

❖ Equation d'induit :

$$U_a(t) = (R_a+R_e).I_a(t) + (L_a+L_e). \frac{dI_a(t)}{dt} + e(t) \tag{II.7}$$

❖ équation de flux :

$$\Phi_e(t) = L_e.I_a \tag{II.8}$$

II.6.2.3 Equations électromécaniques :

La tension induite $e(t)$, appelée f.e.m ("force électromotrice") est proportionnelle à la vitesse angulaire $\Omega(t)$ et au flux inducteur $\Phi_e(t)$:

$$e(t) = K.\Phi_e(t).\Omega(t)$$

$$e(t) = K.L_e.I_a.\Omega(t) \Rightarrow e(t) = K'.I_a.\Omega(t) \tag{II.9}$$

Le couple électromagnétique C_e développé a pour expression :

$$C_e = K.\Phi_e(t).I_a(t) \tag{II.10}$$

II.6.2.4 équation mécanique :

En assimilant le couple moteur au couple électromagnétique, il devient :

$$C_e - C_r = \Sigma J. \frac{d\Omega(t)}{dt} + f.\Omega(t) \tag{II.11}$$

II.6.2.5 Transformées de Laplace :

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

$$U_a = (R_a+R_e).I_a + s.(L_a+L_e).I_a + E$$

$$\Phi_e = L_e.I_a$$

$$E = K.\Phi_e.\Omega \Rightarrow C_e = K.\Phi_e.I_a$$

$$C_e - C_r = \Sigma J.s.\Omega + f.\Omega$$

II.6.2.6 Schéma bloc :

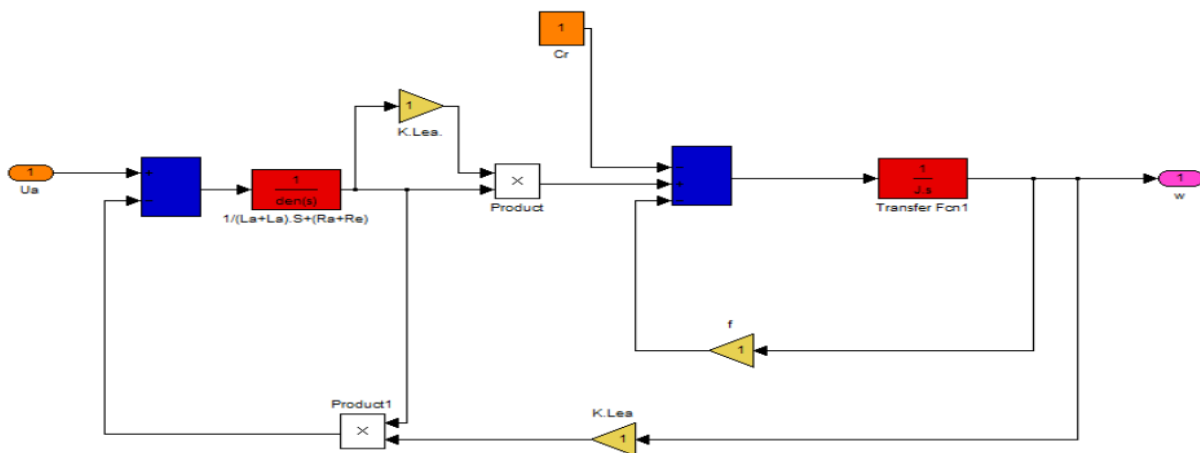


Figure II.8: Schéma bloc tension-vitesse de la machine à courant continu à excitation série.

II.6.3. Moteur à courant continu à excitation shunt :

II.6.3.1 Les paramètres de la machine à CC à excitation shunt :

- La tension aux bornes de l'induit et de l'inducteur $U_a(t)$
- La résistance de l'induit R_a ;
- L'inductance de l'induit L_a ;
- Une tension $E(t)$ appelée f.e.m. (force électro-motrice), proportionnelle à la vitesse angulaire $\Omega(t)$;
- Le courant traversant le circuit d'induit $I_a(t)$;
- le courant qui circule dans l'inducteur $I_e(t)$;
- L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation Φ_e ; il comporte une résistance R_e , et une inductance L_e ;
- L_{ea} : Mutuelle inductance entre l'inducteur et l'induit ;
- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie J , frottement visqueux, élasticité de la transmission, etc.) ;
- La vitesse du rotor du moteur $\Omega(t)$. [8]

II.6.3.2 Equations électriques :

❖ équation d'induit :

$$U_a(t) = R_a.I_a(t) + \frac{d\psi}{dt} = R_a.I_a(t) + L_a.\frac{dN\Phi_e(t)}{dt}$$

$$U_a(t) = R_a.I_a(t) + L_a.\frac{dI_a(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II.12})$$

❖ équation d'inducteur :

$$U_e(t) = R_e.I_e(t) + L_e.\frac{dI_e(t)}{dt} \quad (\text{II.13})$$

❖ équation de flux :

$$\Phi_e(t) = L_{ea}.I_e \quad (\text{II.14})$$

II.6.3.3 Equations électromécaniques :

-La tension induite $e(t)$, appelée f.e.m ("force électromotrice") est proportionnelle à la vitesse angulaire $\Omega(t)$ et au flux inducteur $\Phi_e(t)$:

$$e(t) = K.\Phi_e(t).\Omega(t) \quad (\text{II.15})$$

-Le couple électromagnétique C_e développé a pour expression :

$$C_e = K.\Phi_e(t).I_a(t) \quad (\text{II.16})$$

II.6.3.4 équation mécanique :

En assimilant le couple moteur au couple électromagnétique, il devient :

$$C_e - C_r = \Sigma J.\frac{d\Omega(t)}{dt} + f.\Omega(t) \quad (\text{II.17})$$

Où C_r est le couple résistant imposé par la charge, ΣJ le moment d'inertie total (machine + charge entraînée) et f le coefficient de frottement proportionnel à la vitesse de rotation $\Omega(t)$. [8]

II.6.3.5 Transformées de Laplace :

Les transformées de Laplace des équations sont les suivantes :

$$U_a = R_e.I_e + s.L_e.I_e \dots \dots \dots (1)$$

$$U_a = R_a.I_a + s.L_a.I_a + E$$

$$\Phi_e = L_ea.I_e$$

$$E = K.\Phi_e.\Omega$$

$$C_e = K.\Phi_e.I_a$$

$$C_e - C_r = \Sigma J.s.\Omega + f.\Omega \quad [8]$$

II.6.3.6 Schéma Bloc :

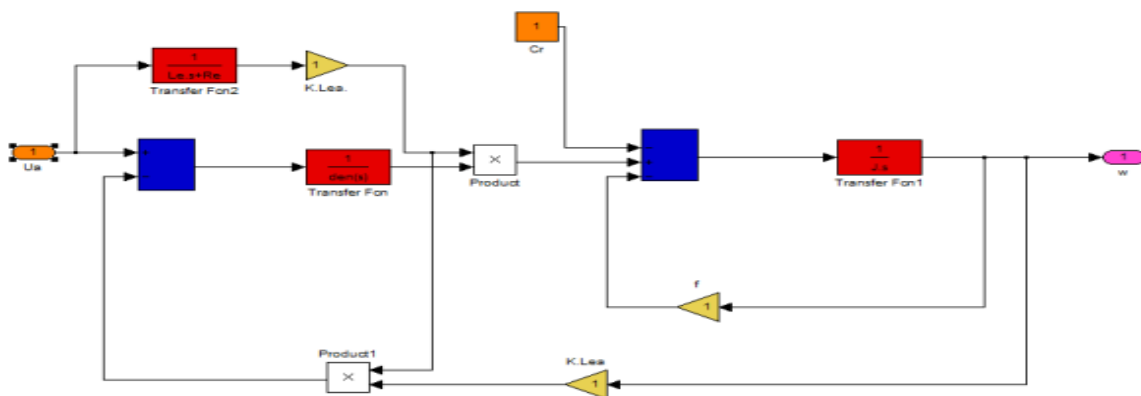


Figure II.9 : Schéma bloc tension-vitesse du moteur à courant continu à excitation shunt.

II.7 Simulation du moteur à courant continu :

Il s'agit, en va faire la simulation et de visualiser le fonctionnement des différents types de machines à courant continu (série, shunt, séparée) en simulant puis en interprétant leurs courbes de fonctionnement. Pour ce faire, nous utiliserons le logiciel MATLAB auquel est intégré l'outil SIMULINK .

Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques. Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes électromécaniques ,

de communications, de traitement du signaletc. [8]

II.7.1 . Simulation du moteur à courant continu à excitation séparée:

II.7.1 .1paramètres du moteur :

$$U=220 \text{ V} , L_a=0.0063\text{H} , K=1.71 , J=0.0236 \text{ kg.m}^2 , f=0.015 \text{ N.m/rad.s}^{-1} , C_r = 20\text{N.m}$$

II.7.1.2 Résultats de Simulation:

On applique une charge à l'instant $t=0.5 \text{ s}$

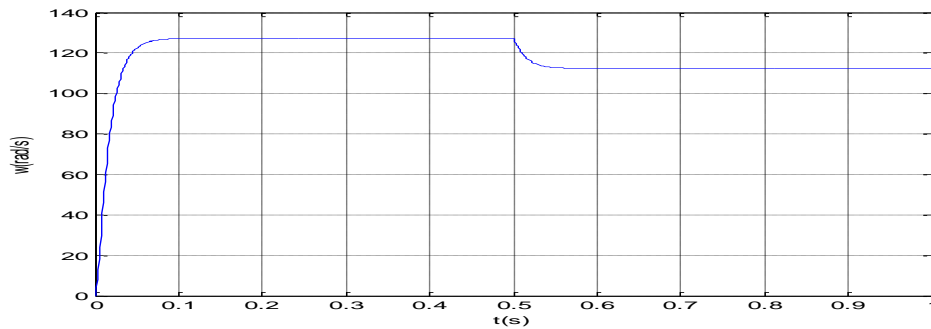


Figure II.10: La vitesse du MCC .

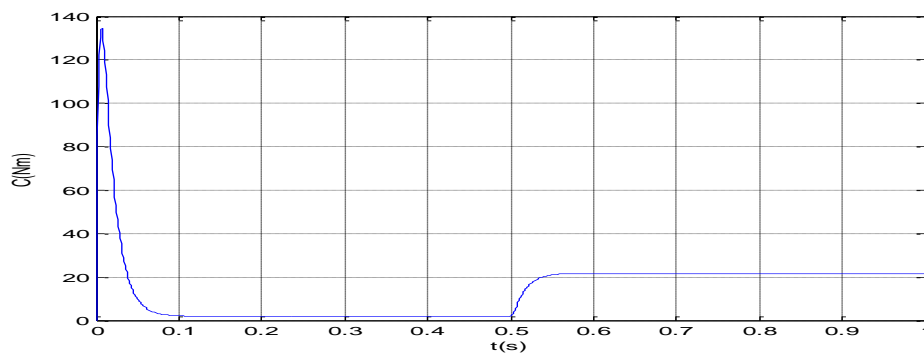


Figure II.11: Le couple du moteur à MC

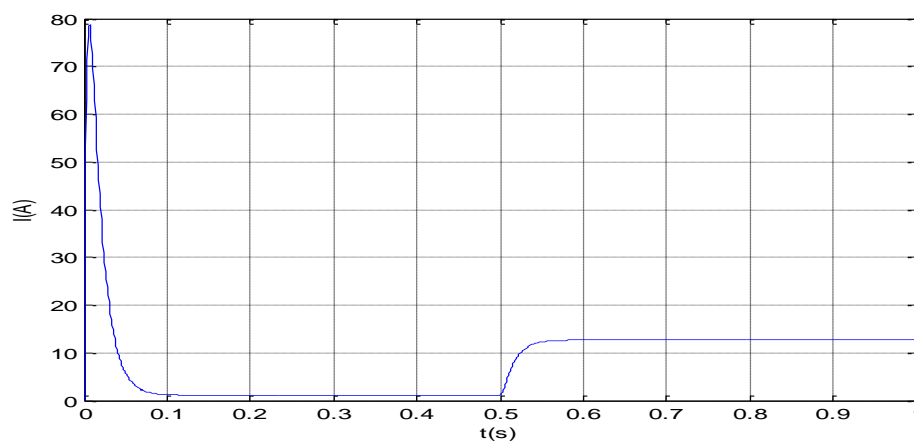


Figure II.12: Le courant du MCC

II.7.1.3 Interprétation:

À vide : (c'est-à-dire le couple résistant est nul)

Les figures (II.9), (II.10) et (II.11) montrent qu'il y a un fort appel du courant pendant le démarrage atteint jusqu'à $I_m = 79A$; puis il revient à zéro.

La forme du couple qui dépend du courant pendant le démarrage, sa valeur atteinte jusqu'à ($C_{max} = 135 N.m$) puis elle revient à zéro (couple à vide).

La vitesse angulaire augmente d'une façon presque linéaire puis se stabilise à ($w=127 rad/s$) qui correspond à la vitesse de la marche à vide idéal.

En charge : ($C_r = 20Nm$)

Les figures [(II.9), (II.10) et (II.11)] met en évidence les conséquences d'un comportement d'un moteur entraînant une charge. On peut remarquer sur la caractéristique du moteur à courant continu, une demande du courant d'induit atteint à 12A. Par contre la vitesse diminue à la valeur ($w=112rad/s$). Pour le couple électromagnétique il prend le même comportement que le courant.

II.7.2 Simulation du moteur à courant continu à excitation shunt :

II.7.2.1 Paramètres du moteur :

Les mêmes paramètres du moteur à courant continu séparé avec :

$$R_{exc} = 10\Omega, L_{exc} = 0.04H$$

II.7.2.2 Résultats de simulation - moteur shunt :

On applique une charge à l'instant $t=0.5 s$

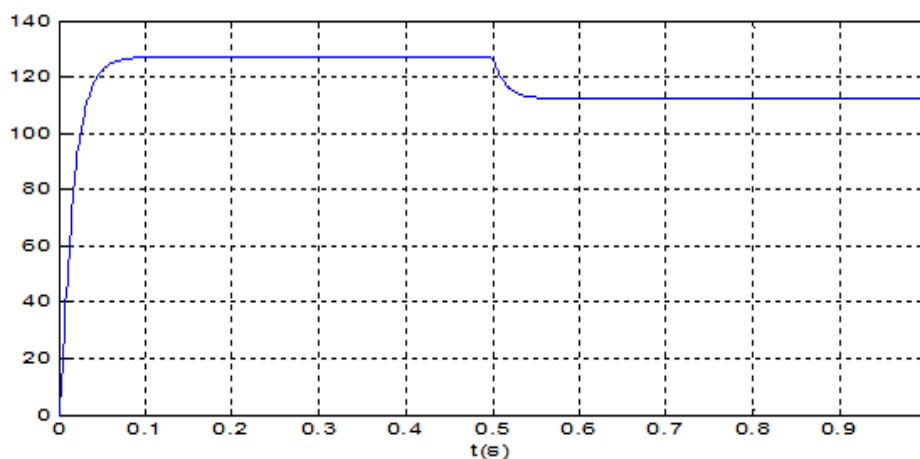


Figure II-13: La vitesse du MCC shunt

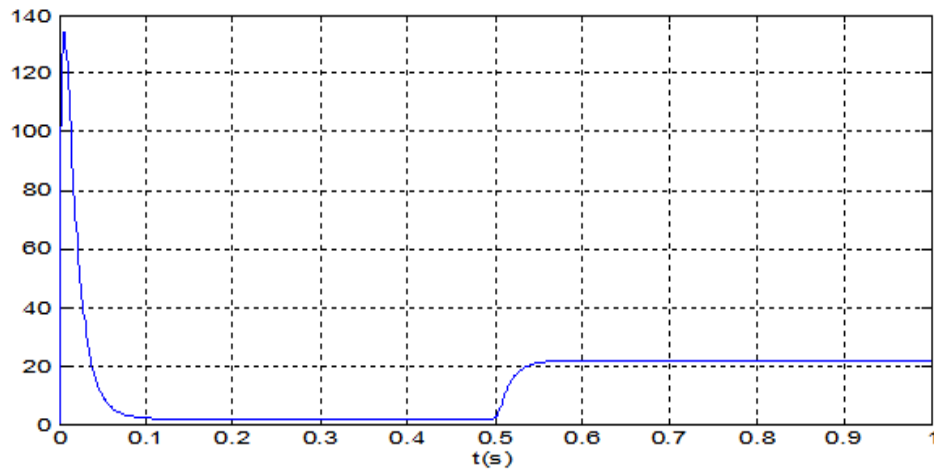


Figure II-14: Le couple du MCC shunt

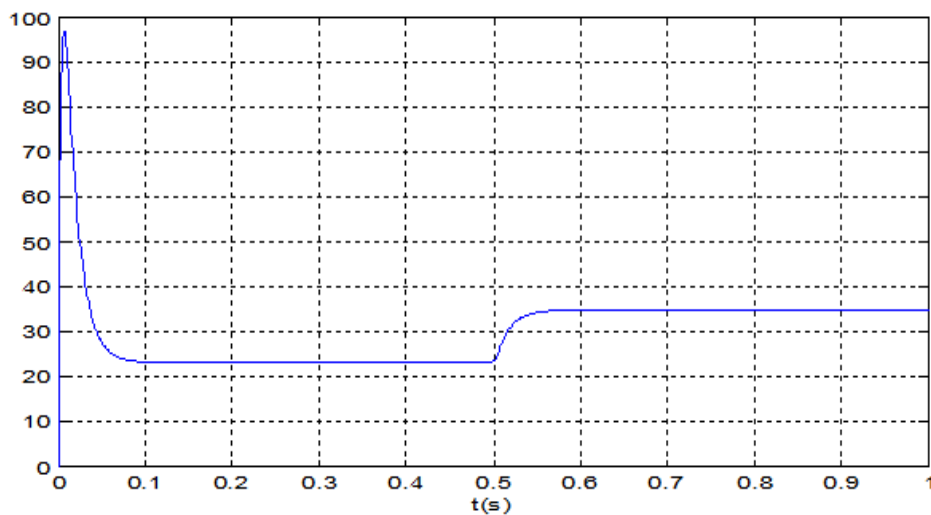


Figure II-15: Le courant du MCC shunt

II.7.2.3 Interprétation :

Pour un moteur à courant continu à excitation shunt, on obtient les mêmes résultats de simulation mais avec une seule variation qui est reliée à le courant de la charge.

A vide:

La figure (II.14) montre qu'il y a un fort appel du courant pendant le démarrage atteint jusqu'à $I_m=97A$ puis il revient à zéro.

En charge :

On peut remarquer sur la caractéristique du moteur à courant continu à excitation shunt que une demande du courant d'induit atteint à 35A lorsqu'on applique un couple résistant.

II.7.3 Simulation du Moteur à Courant Continu à Excitation Série :

II.7.3 .1 Les paramètres du Moteur :

Les mêmes paramètres du moteur à courant continu séparé et série avec:

$$L_f = 0.868 \text{ H} \quad R_f = 1.158 \Omega$$

II.7.3 .2 Résultats de simulation MCC série :

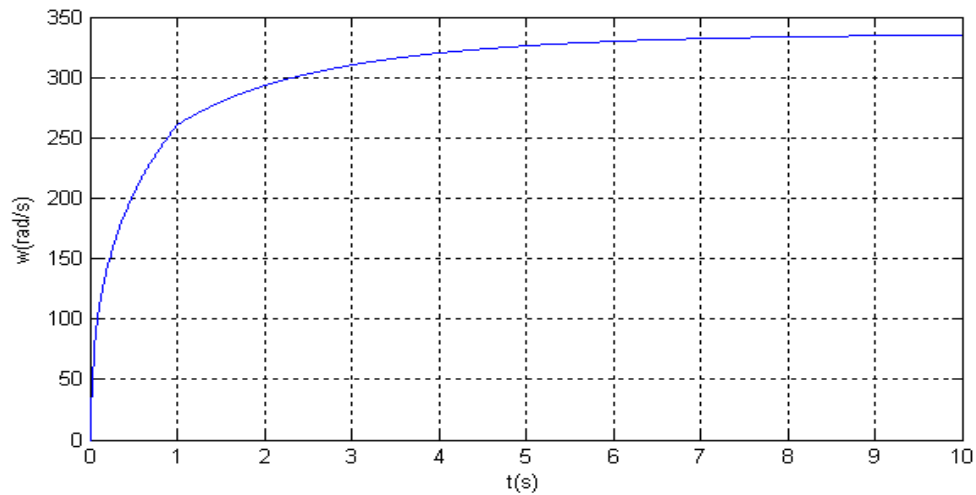


Figure II.16: La vitesse du MCC série

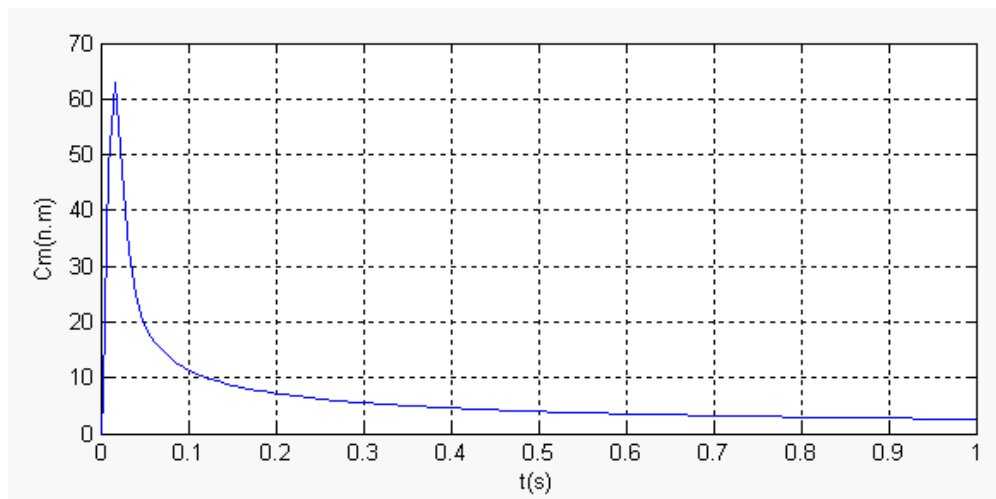


Figure II-17: Le couple du MCC série

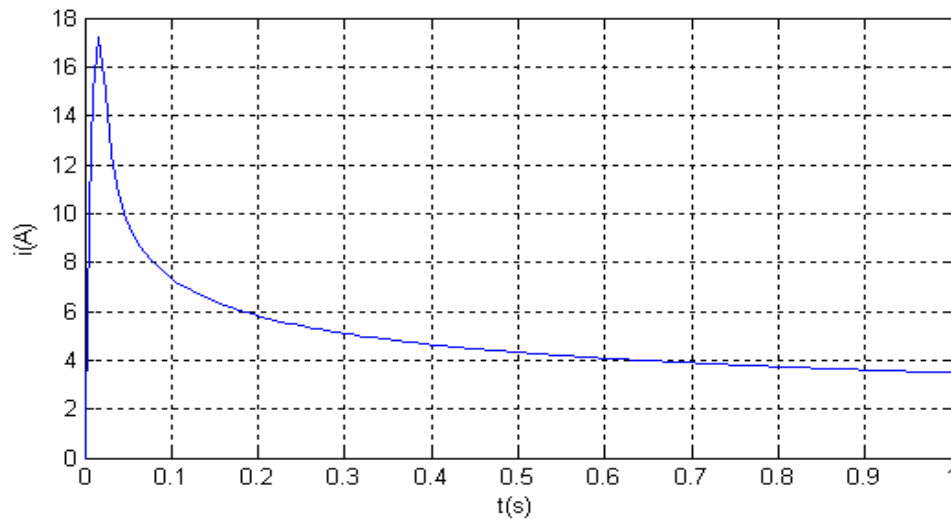


Figure II-18: Le courant du MCC série

II.7.3 .4 Interprétation :

Les figures (II.15), (II.16) et (II.17) montrent qu'il y a un fort appel du courant pendant le démarrage atteint jusqu'à $I_m = 19A$,puis il revient à zéro.

La forme du couple qui dépend du courant pendant le démarrage, sa valeur atteinte puis elle revient à zéro (couple à vide), jusqu'à ($C_{max}=65 N.m$)

La vitesse angulaire augmente d'une façon presque linéaire puis se stabilise à ($w=340 rad/s$) qui correspond à la vitesse de la marche à vide idéal[8].

II.8 Conclusion :

La simulation de la machine à courant continu est une moyenne importante pour extraire les caractéristiques de ces machines après la formation de schéma bloc à partir du modèle électrique qui représente la transformation de LAPLACE d'équation électrique et mécanique.

Malgré la validation de simulation avec le programme MATLAB/SIMULINK mais elle ne remplace pas les essais pratiques de ces machines. Ce projet représente notre prochain chapitre.

Chapitre 03

III.1 Introduction :

Aujourd'hui de nombreux termes sont utilisés dans la littérature pour désigner le domaine des réseaux de neurones artificiels, comme connexionnisme ou neuromimétique. Pour notre part, il nous semble qu'il faut associer à chacun de ces noms une sémantique précise. Ainsi, les réseaux de neurones artificiels ne désignent que les modèles manipulés; ce n'est ni un domaine de recherche, ni une discipline scientifique. Connexionnisme et neuromimétique sont tous deux des domaines de recherche à part entière, qui manipulent chacun des modèles de réseaux de neurones artificiels, mais avec des objectifs différents. L'objectif poursuivi par les ingénieurs et chercheurs connexionnistes est d'améliorer les capacités de l'informatique en utilisant des modèles aux composants fortement connectés. Pour leur part, les neuromiméticiens manipulent des modèles de réseaux de neurones artificiels dans l'unique but de vérifier leurs théories biologiques du fonctionnement du système nerveux central[9].

Maintenant dans ce chapitre nous avons utilisé la théorie de réseau de neurone artificiel pour commander le moteur à courant continu avec une carte Arduino.

Le module Arduino est un circuit imprimé en matériel libre (plateforme de contrôle) dont les plans de la carte elle-même sont publiés en licence libre dont certains composants de la carte : comme le microcontrôleur et les composants complémentaires qui ne sont pas en licence libre. Un microcontrôleur programmé peut analyser et produire des signaux électriques de manière à effectuer des tâches très diverses.

De plus, l'Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée ; le modélisme, la domotique mais aussi dans des domaines différents comme l'art contemporain et le pilotage d'un robot, commande des moteurs et faire des jeux de lumières, communiquer avec l'ordinateur, commander des appareils mobiles (modélisme).

Chaque module d'Arduino possède un régulateur de tension +5 V et un oscillateur à quartz 16MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles). Pour programmer cette carte, on utilise le logiciel IDE Arduino.[10]

III.2 Définition des Réseaux des Neurones Artificiels :

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau [11].

III.3 Histoire :

La première application concrète des réseaux de neurones artificiels est survenue vers la fin des années 1950 avec l'invention du réseau dit «perceptron» par Frank Rosenblatt. Rosenblatt et ses collègues ont construit un réseau et démontré ses habilités à reconnaître des formes. Vers la fin des années 1960, un livre publié par Marvin Minsky et Seymour Papert sur les réseaux de neurones. Ces deux auteurs ont démontré les limitations des réseaux développés par Rosenblatt et Widrow-Hoff. Dans les années 1980, ils ont inventés l'algorithme de rétropropagation des erreurs. C'est ce nouveau développement, généralement attribué à David Rumelhart et James McClelland, mais aussi découvert plus ou moins en même temps par Paul Werbos et par Yann LeCun, qui a littéralement ressuscité le domaine des réseaux de neurones. Depuis ce temps, c'est un domaine où bouillonne constamment de nouvelles théories, de nouvelles structures et de nouveaux algorithmes[11].

III.4 Application :

Les réseaux de neurones servent aujourd'hui à toutes sortes d'applications dans divers domaines. Par exemple, on a développé un autopilote pour avion, ou encore un système de guidage pour automobile, on a conçu des systèmes de lecture automatique de chèques bancaires et d'adresses postales, on produit des systèmes de traitement du signal pour différentes applications militaires, un système pour la synthèse de la parole, des réseaux sont aussi utilisés pour bâtir des systèmes de vision par ordinateur, pour faire des prévisions sur les marchés monétaires, pour évaluer le risque financier ou en assurance, pour différents processus manufacturiers, pour le diagnostic médical, pour l'exploration pétrolière ou gazière, en robotique, en télécommunication etc...[11].

III.5 Structure Du Réseau :

Un réseau de neurones est en général composé d'une succession de couches dont chacune prend ses entrées sur les sorties de la précédente. Chaque couche (i) est composée de N_i neurones, prenant leurs entrées sur les N_{i-1} neurones de la couche précédente. À chaque synapse est associé un poids synaptique, de sorte que les N_{i-1} sont multipliés par ce poids, puis additionnés par les neurones de niveau i , ce qui est équivalent à multiplier le vecteur d'entrée par une matrice de transformation. Mettre l'une derrière l'autre les différentes couches d'un réseau de neurones reviendrait à mettre en cascade plusieurs matrices de transformation et pourrait se ramener à une seule matrice, produit des autres, s'il n'y avait à chaque couche, la fonction de sortie qui introduit une non linéarité à chaque étape. Ceci montre l'importance du choix judicieux d'une bonne fonction de sortie : un réseau de neurones dont les sorties seraient linéaires n'aurait aucun intérêt.

Au-delà de cette structure simple, le réseau de neurones peut également contenir des boucles qui en changeant radicalement les possibilités mais aussi la complexité. De la même façon que des boucles peuvent transformer une logique combinatoire en logique séquentielle, les boucles dans un réseau de neurones transforment un simple dispositif de reconnaissance d'entrées en une machine complexe capable de toutes sortes de comportements [11].

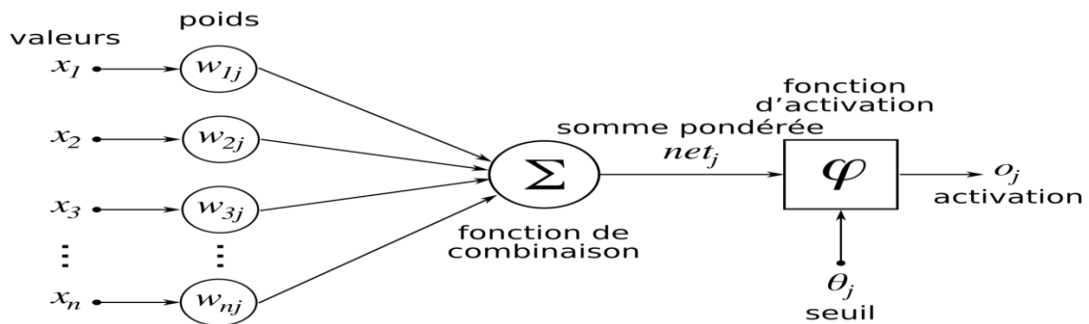


Figure III.1: Structure d'un neurone artificiel

III.6 Le modèle neurophysiologique:

Le cerveau se compose d'environ 10^{12} neurones (mille milliards), avec 1000 à 10000 synapses (connexions) par neurone. Nous allons dans ce chapitre décrire succinctement l'élément de base du système nerveux central : le neurone. L'étape suivante nous conduit à l'étude de petits réseaux de neurones, tels ceux impliqués dans les arcs réflexes. Ceci nous amène à exposer les propriétés d'habituation, de sensibilisation et surtout à concevoir l'idée d'une modification physique des connexions entre neurones pour supporter ces phénomènes. L'étude du mécanisme de la vision chez l'animal (et l'homme) permet d'appréhender les notions de messages somato-sensoriels, de réduction d'information, d'étages de traitement et de complexification de l'information.[11]

III.7 Apprentissage :

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

L'apprentissage neuronal fait appel à des exemples de comportement, Il existe divers algorithmes pour ajuster les poids d' un réseau neuronal, et éventuellement sa topologie.

L'apprentissage peut s'effectuer de divers manières. Il peut être supervisé, non supervisé ou par renforcement:

III.7.1 Apprentissage supervisé :

On fournit au réseau le couple (entrée , sortie) et on modifie les poids en fonction de l'erreur entre la sortie désirée et la sortie obtenue.

Les coefficients synaptiques sont alors ajustés dans le but de minimiser un critère de coût. Une fois l'apprentissage est effectué, le réseau est apte à accomplir la tâche prévue.

Les performances du réseau sont évalués à l'aide d'un ensemble d'exemples (de même nature que l'ensemble d'apprentissage ou d'entraînement) dit ensemble de test. La méthode la plus utilisée pour ce type d'apprentissage est la rétro-propagation .

III.7.2 Apprentissage non supervisé :

Le réseau doit détecter des poids communs aux exemples présentés, et modifier les poids afin de fournir la même sortie pour des entrées aux caractéristiques proches .

Dans ce type d'apprentissage d'adaptation des coefficients synaptiques n'est pas basée sur la comparaison avec une certaine sortie désirée, mais c'est le réseau qui organise lui-même les entrées qui lui sont présentées de façon à optimiser une certaine fonction de coût, sans lui fournir d'autres éléments, de réponses désirées. Cette propriété est dite Auto organisation (self organisation).[12]

III.8 Différents types de réseaux de neurones :

L'ensemble des poids des liaisons synaptiques détermine le fonctionnement du réseau de neurones. Les motifs sont présentés à un sous-ensemble du réseau de neurones : la couche d'entrée. Lorsqu'un motif est appliqué à un réseau, celui-ci cherche à atteindre un état stable. Lorsqu'il est atteint, les valeurs d'activation des neurones de sortie constituent le résultat. Les neurones qui ne font ni partie de la couche d'entrée ni de la couche de sortie sont dits neurones cachés[12].

Les types de réseaux de neurones diffèrent par plusieurs paramètres:

- Topologie des connexions entre les neurones;
- la fonction d'agrégation utilisée (somme pondérée, distance pseudo-euclidienne...);
- la fonction de seuillage utilisée (sigmoïde, échelon, fonction linéaire, fonction de Gauss...);
- l'algorithme d'apprentissage (rétropropagation du gradient, cascade de corrélation);

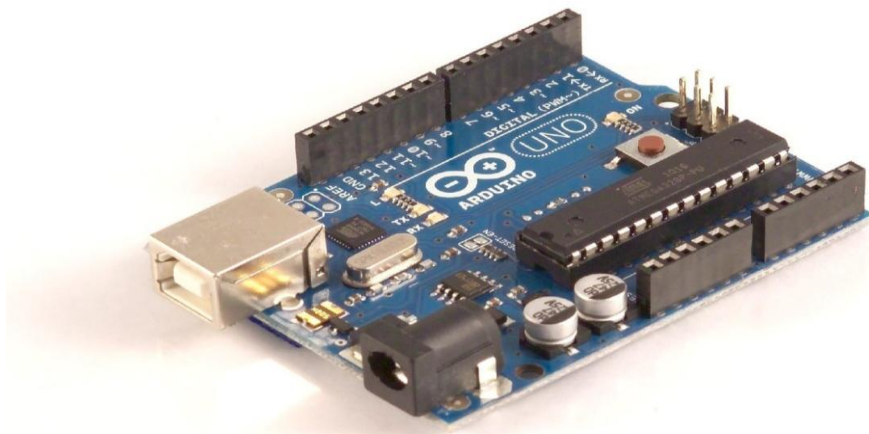
D'autres paramètres, spécifiques à certains types de réseaux de neurones, tels que la méthode de relaxation pour les réseaux de neurones (réseaux de Hopfield par exemple) qui ne sont pas à propagation simple (perceptron multicouche par exemple).

De nombreux autres paramètres sont susceptibles d'être mis en œuvre dans le cadre de l'apprentissage de ces réseaux de neurones [14].

Réalisation expérimental de commande d'un MCC par RNA avec l'Arduino

III.9 Définition du module Arduino :

Nous avons choisi la carte Arduino UNO (carte Basique). L'intérêt principal de cette carte est de faciliter la mise en œuvre d'une telle commande qui sera détaillée par la suite. L'Arduino fournit un environnement de développement s'appuyant sur des outils « open source » comme interface de programmation. L'injection du programme déjà converti par l'environnement sous forme d'un code « HEX » dans la mémoire du microcontrôleur se fait d'une façon très simple par la liaison USB. En outre, des bibliothèques de fonctions "clé en main" sont également fournies pour l'exploitation d'entrées-sorties. Cette carte est basée sur un microcontrôleur ATmega328 et des composants complémentaires. La carte Arduino contient une mémoire morte de 1 kilo. Elle est dotée de 14 entrées/sorties digitales (dont 6 peuvent être utilisées en tant que sortie PWM), 6 entrées analogiques et un cristal à 16 MHz, une connexion USB et Possède un bouton de remise à zéro (Reset) et une prise jack d'alimentation. La carte est illustrée dans la figure III.2 [10].



La carte Arduino uno

Figure III.2: La carte Arduino UNO.

III.10 Module Driver L298N :

Ce *break out board* est un double Pont-H destiné au contrôle de moteur continu (*H-Bridge Motor Driver*). Il est basé sur le composant L298N qui est un double Pont-H conçu spécifiquement pour ce cas d'utilisation.

C'est un module extrêmement utile pour le contrôler de robots et ensembles mécanisés. Il peut contrôler deux moteur à courant continu ou un moteur pas-à-pas à 4 fils et à 2 phases. Il est conçu pour supporter des tensions plus élevées, des courants importants tout en proposant une commande logique TTL (basse tension, courant faibles, idéal donc pour un microcontrôleur).

Il peut piloter des charges inductives comme des relais, solénoïdes, moteurs à courant continu et moteurs pas-à-pas. Les deux types de moteurs peuvent être contrôlés aussi bien en vitesse

(PWM) qu'en direction. Toutes les sorties en puissance sont déjà protégées par des diodes anti-retour.

Il s'agit d'un module prêt à l'emploi [13].

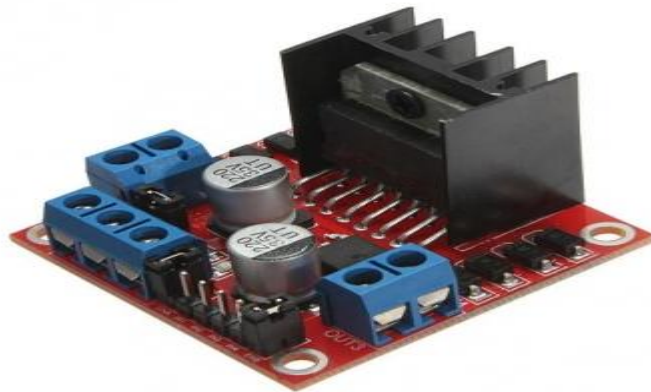


Figure III.3 : Module Driver L298N

❖ **Les materiel utilisé dans ce travail :**

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

1. Un moteur à courant continu .
2. Source de tension continu.
3. Une carte arduino .
4. Une carte driver L298N.
5. Un capteur de vitesse .
6. Fils de connexion.

Logiciel utilisé est Matlab 2013a, en utilisant le Simulink pour réaliser la commande de système.

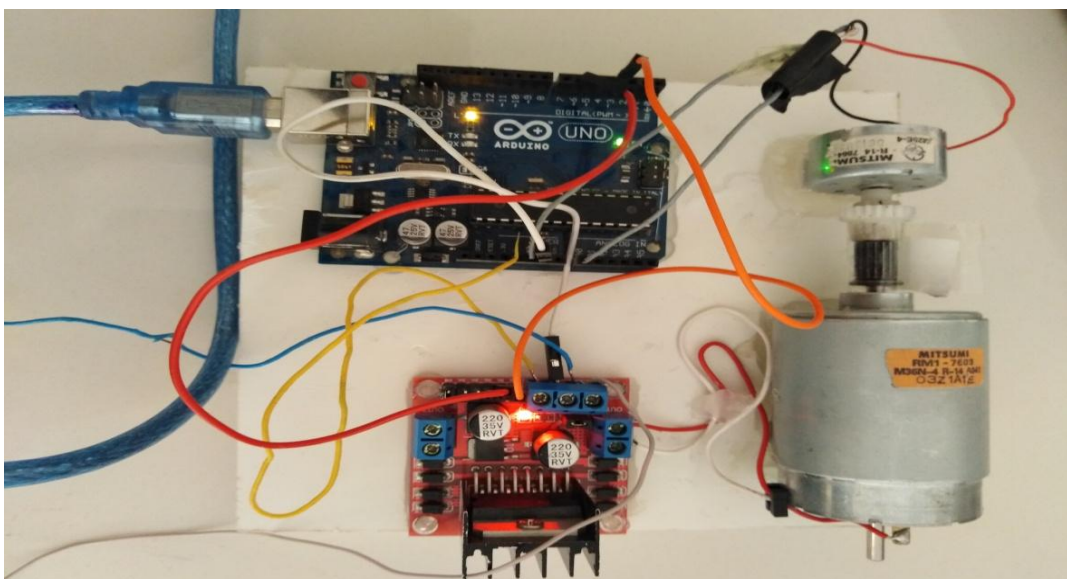


Figure III.4 : Photo réel de montage de travail (en laboratoire).

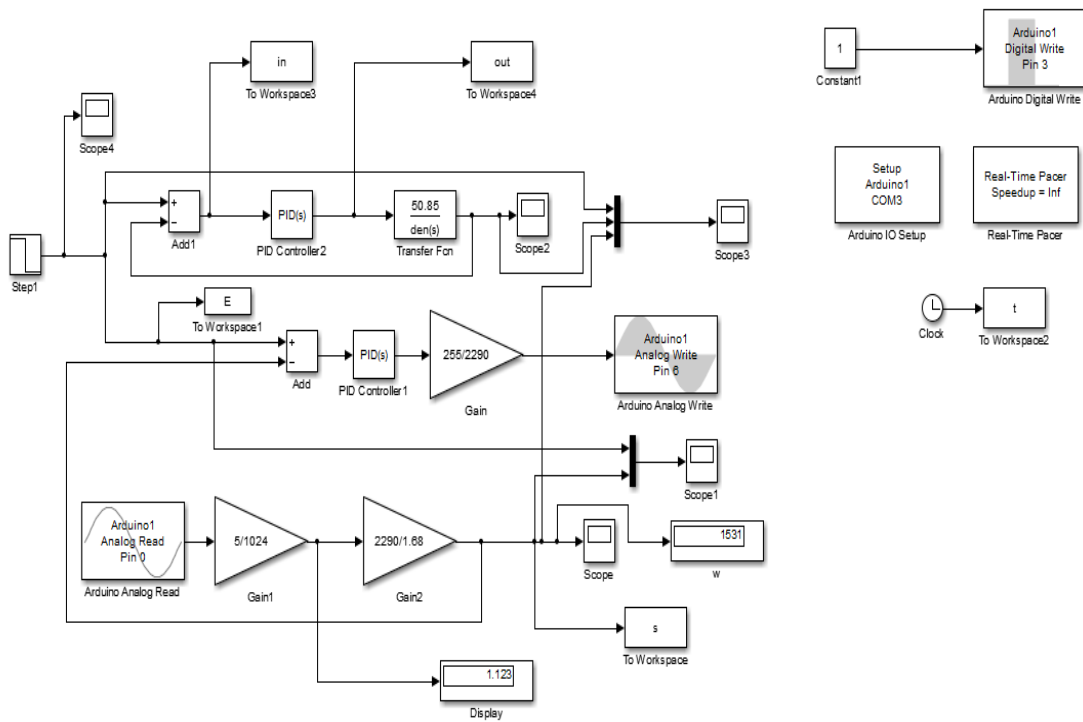


Figure III.5 : Model de simulation du montage (avec régulateur PID)

Partie 01 :Commande De Vitesse De MCC Par Régulateur PID :

✓ **Le régulateur PID:**

Appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégral et dérivé) est un système de contrôle permettant d'améliorer les performances d'un asservissement, c'est-à-dire un système ou procédé en boucle fermée. C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

III.11 Identification Paramétrique Du Système :

Pour identifier les paramètres du système nous nous tournons vers logiciel Matlab et applique :

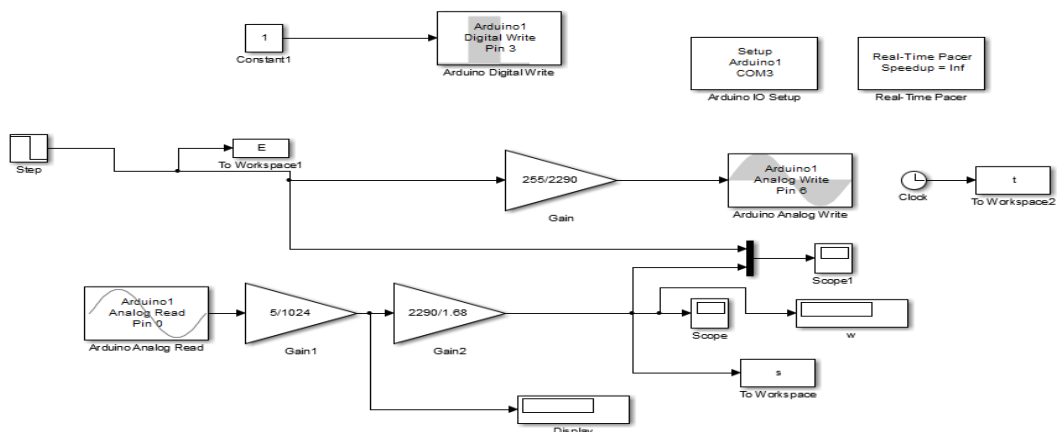


Figure III.6 : Model de simulation du montage

Après d'obtenir la réponse de système expérimentalement on passe vers l'application « APPS » et puis on l'icône « SYS identification »



Figure III.7: Identification de système au Matlab.

cliquer sur le choix 'time domaine signal' de 'importe data' pour importer input et output et appuyer sur 'importe'.

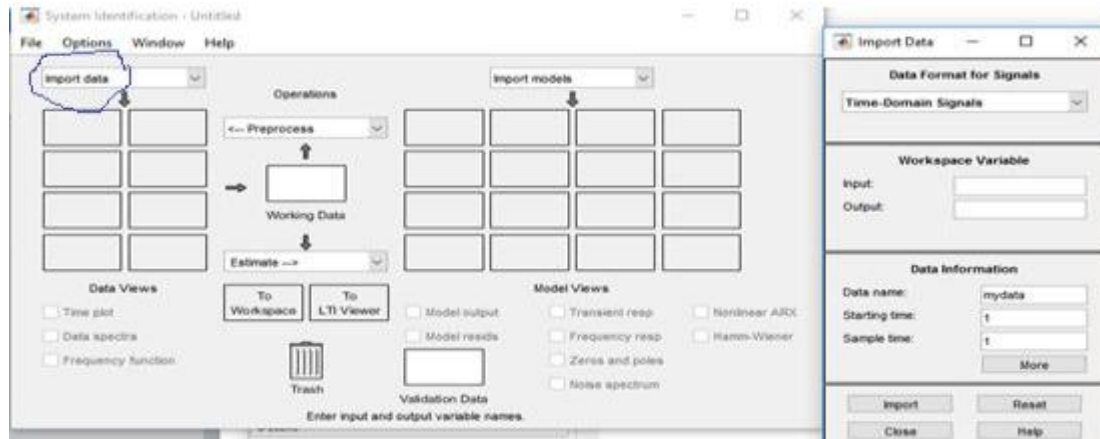


Figure III.8: Importe data input et output de workspace de Matlab.

Après d'introduire des données d'entrée et de sortie on importera les datas en cliquant sur 'estimât' et on choisit la forme de la fonction de transfert. Le système à étudier est de deuxième ordre donc on pose valeur 0 sur « le zéro pole » et valeur 2 sur « les pôles » et puis on clique sur « estimât ».

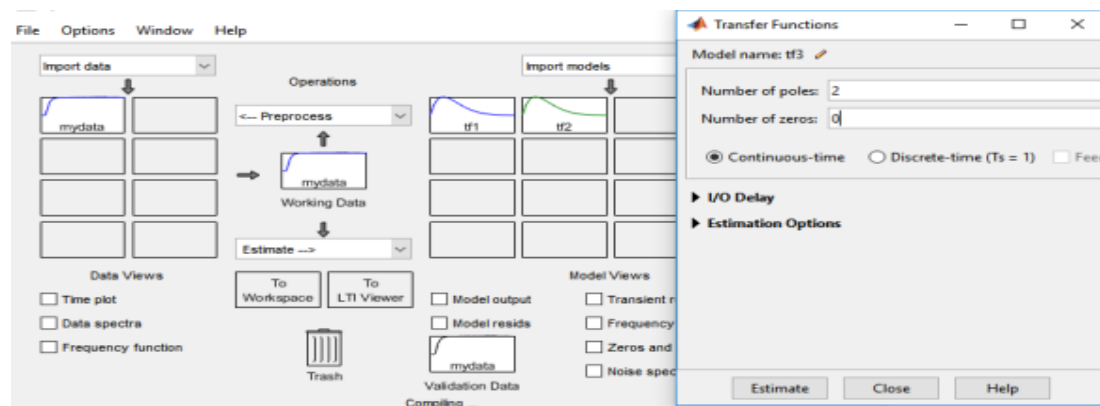


Figure III.9 : Estimateur de la fonction de transfert de MCC

La figure III.9 montre comment exporter l'expression de la fonction de transfert en cliquant sur export pour sauvegardera la FT.

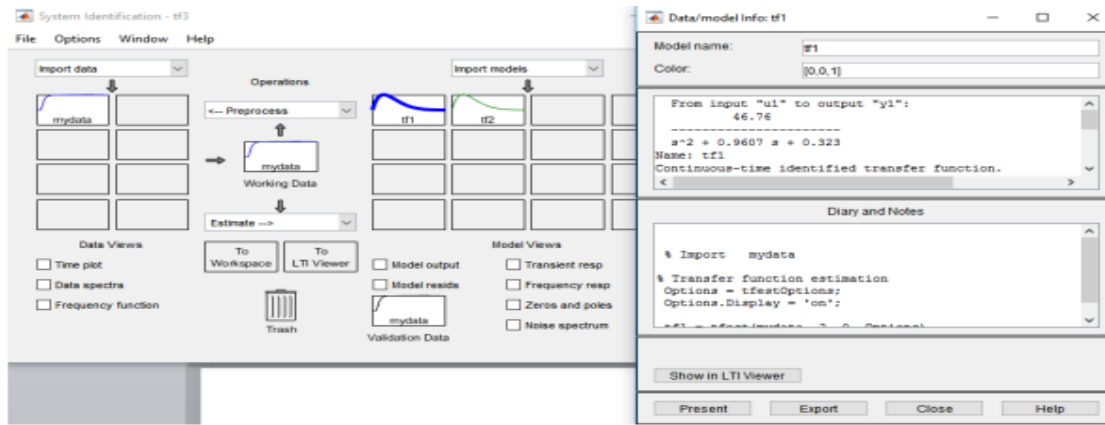


Figure III.10: Extraction de la fonction de transfert.

Après notre extraction de la fonction de transfert, on passe vers l'application « APPS » et puis on clique sur l'icône « PID Tuner » pour ajuster les paramètres du correcteur PID.

Où les valeurs de régulateur PID (K_p , K_i , K_d) sont:

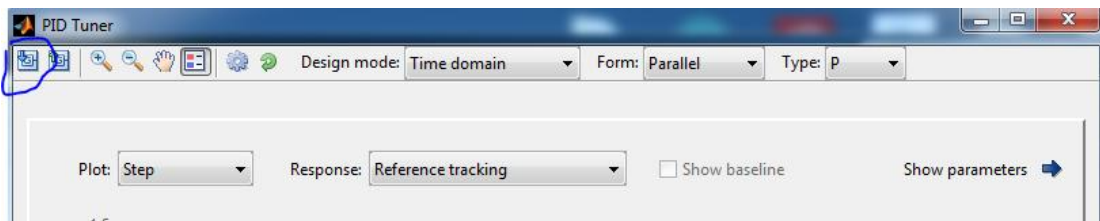


Figure III.11: Importe de fonction de transfert

Après l'importation de la fonction de transfert, on clique sur "type" pour choisir le type de régulation (P, PI, PID, PD,...).

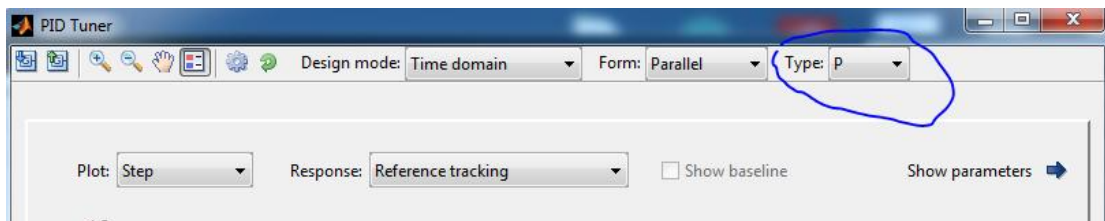


Figure III.12 : Choisir le type de regulation.

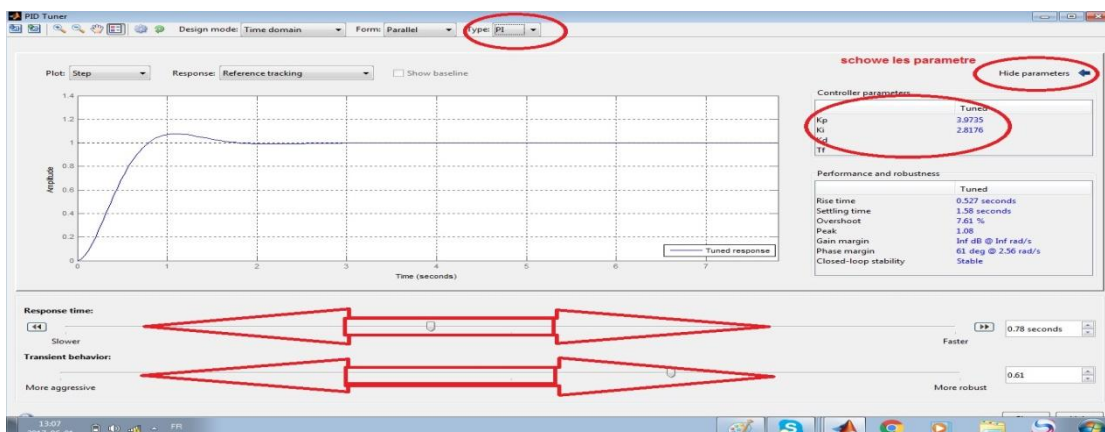


Figure III.13 : Variation des paramètres pour estimer la réponse et voir les nouveaux paramètres.

Après l'identification, on trouve:

$$FT = \frac{50.07}{P^2 + 15.45P + 49.74}$$

Avec un régulateur PID est :

Kp= 61.3057, Ki= 136.9256 , Kd= 2.8351.

Pour visualiser les résultats de simulation, on remplace les paramètres obtenus dans le modèle sous Matlab/Simulink de la figure III.13 et simule :

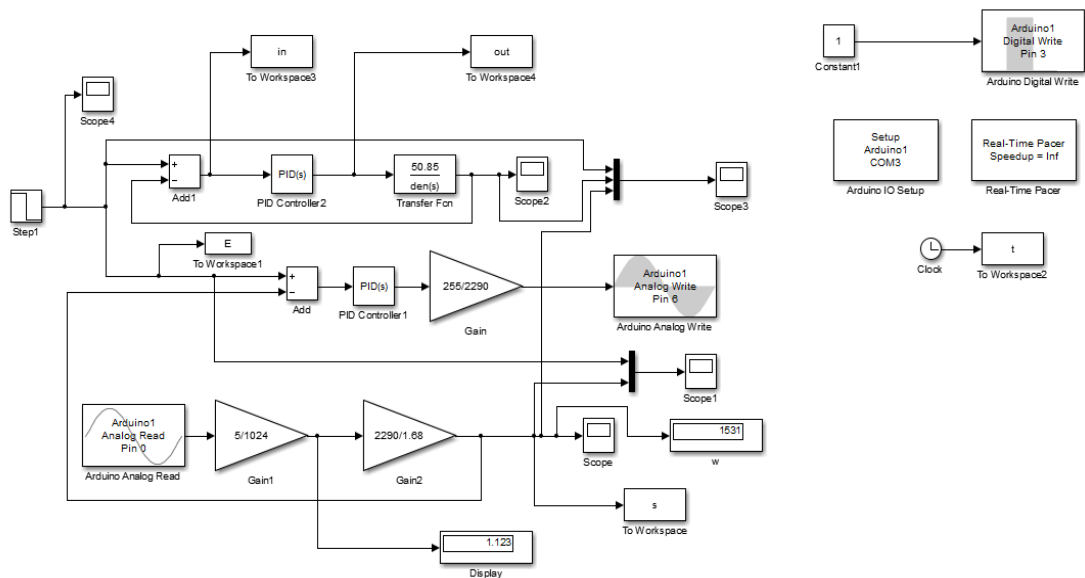


Figure III.14: Modélisation de système avec régulateur PID

Nous obtenons le résultat suivant :

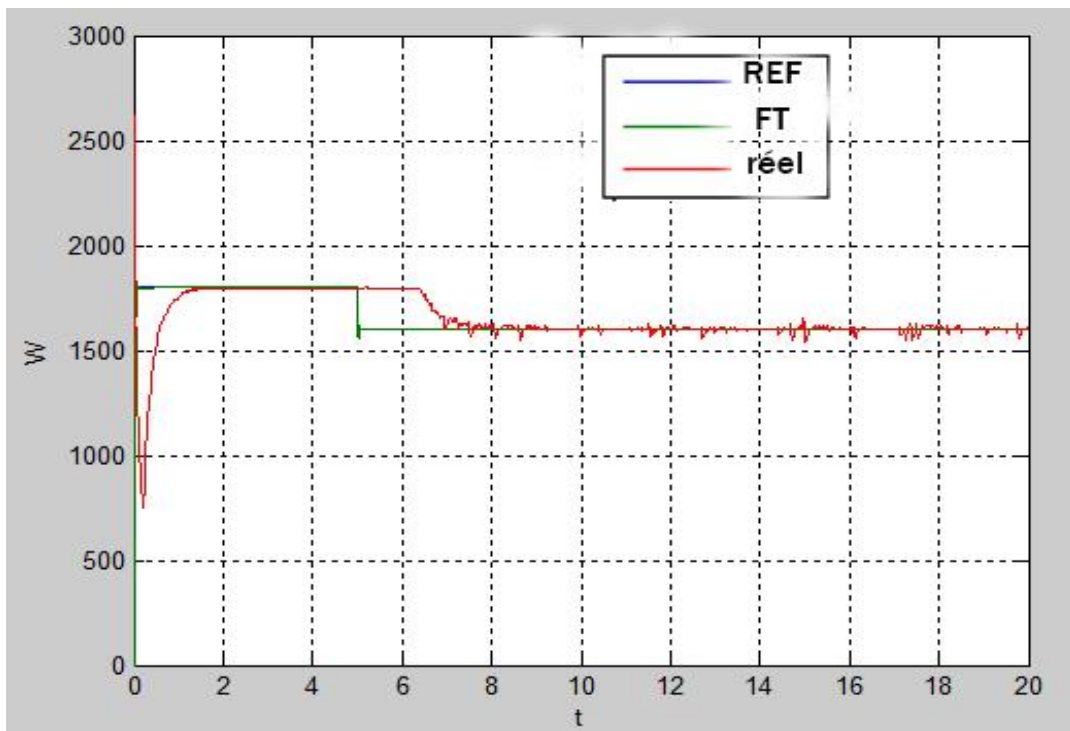


Figure III.15 : Allure de vitesse avec régulation PID

III.11.1. Interprétation :

Dans ce cas, nous avons regardé un retard dans la commande de vitesse de moteur dans l'allure pratique et nous avons remarqué un retard dans le suivi de la valeur de référence. Par contre, dans le cas de l'allure de fonction de transfert nous avons remarqué qu'il s'agit d'une suivie de la valeur de référence.

Partie 02 :Commande de vitesse de MCC par Réseau de Neurone Artificiel :

Les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) constituent à ce jour une technique de traitement de données bien comprise et bien maîtrisée. De façon formelle, un RNA est une fonction mathématique associant à des entrées, des grandeurs de sortie à l'aide de paramètres ajustables appelés des poids. Grâce au processus d'apprentissage, les RNA sont des approximateurs universels parcimonieux capables d'estimer un modèle complexe avec une précision voulue. Ils réalisent à la fois des fonctionnalités d'identification, de contrôle ou de filtrage.[14]

Dans ce partie, nous réalisons la technique de commande de MCC par les réseaux de neurones artificiels pratiquement , ensuite nous analysons les resultates de contrôle avec réseaux de neurones, Puis comparez-les avec le résultat précédent de regulateur PID .

Maintenant , nous allons commencer le travail pratique :

Premièrement, nous allons ouvrir un fichier "m.file" dans Matlab et entrer les informations des RNA comme le figure (III.16) .

```

1 -   clc
2 -   X=in';
3 -   T=out';
4 -   net=newff(minmax(X), [18 1], {'tansig' 'purelin'}, 'traingdm')
5 -   net.trainparam.epochs=50000;
6 -   net.trainparam.goal=0;
7 -   net=train(net,X,T);
8 -   Y=sim(net,X);
9 -   plot(X',T',X',Y', 'r')
10  plot(T')
11  hold on
12  plot(Y', 'r')
13  gensim(net)
14

```

Figure III.16 : Paramètres d'entraînement des RAN .

Ensuite, nous simulons le block Précédent de la figure III.14 pour identifier les paramètres et entrainer le syteme Pour un résultat plus précis , après la simulation ,nous revenons à la page précédente de "m.file " pour déterminé le nombre des epochs "50000" (pour un resultate plus précise nous donnons un grand nombre des epochs) , et puis nous simulons ,

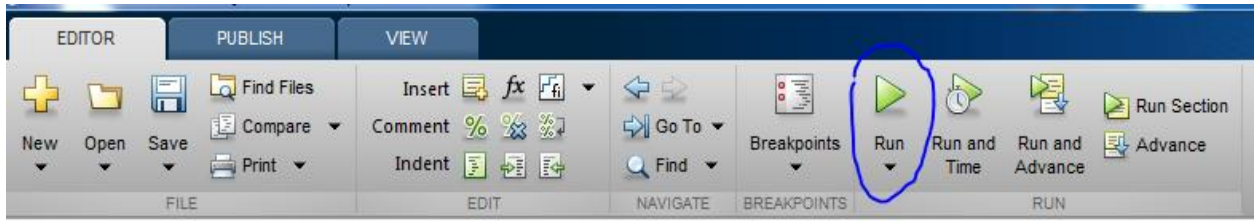


Figure III.17 : Runé le programme de RNA

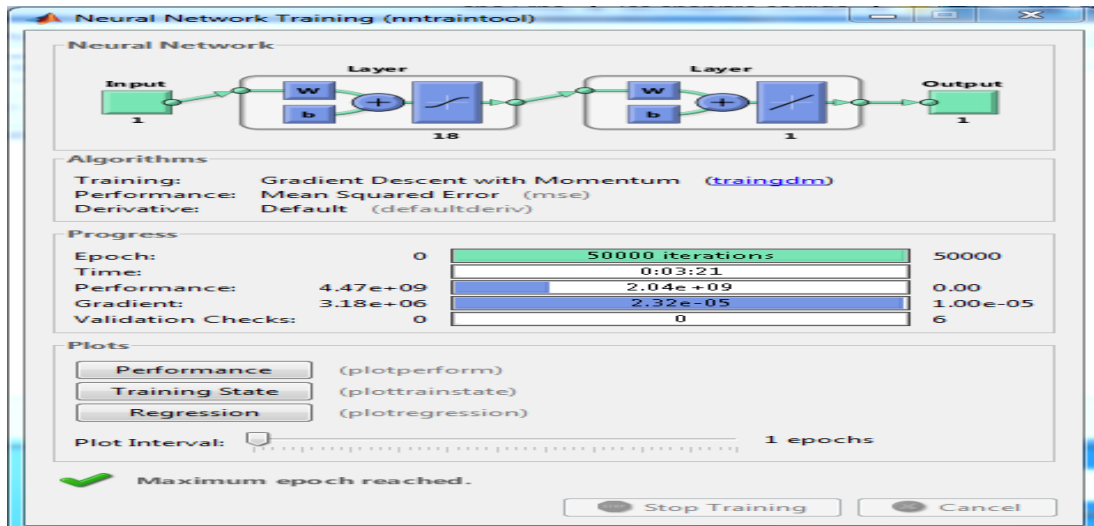


Figure III.18:L'opération d'entrainement de système (l'apprentissage).

Après cette opération , nous obtenons un système qualifié pour un contrôle plus précis ;

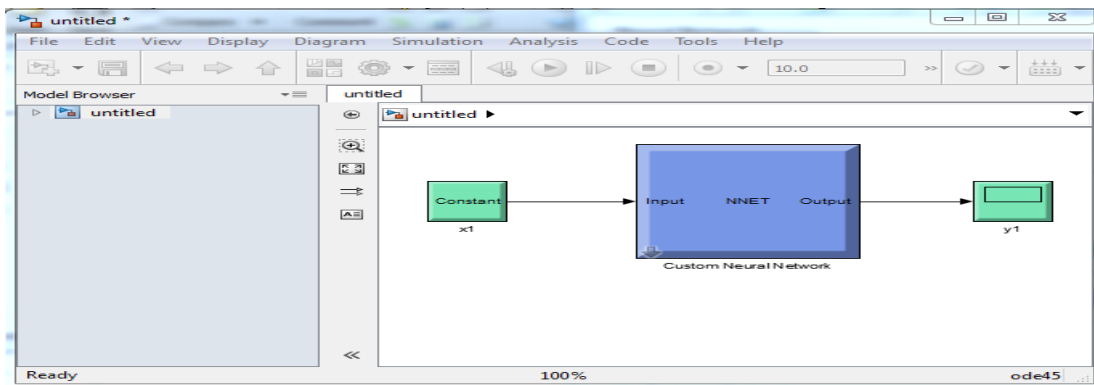


Figure III.19:Block de commande RNA pour contrôle MCC .

Après nous avons extrait cette block de commande , Maintenant, on entre sur schéma de contrôle dans simulink le figure III.20 .

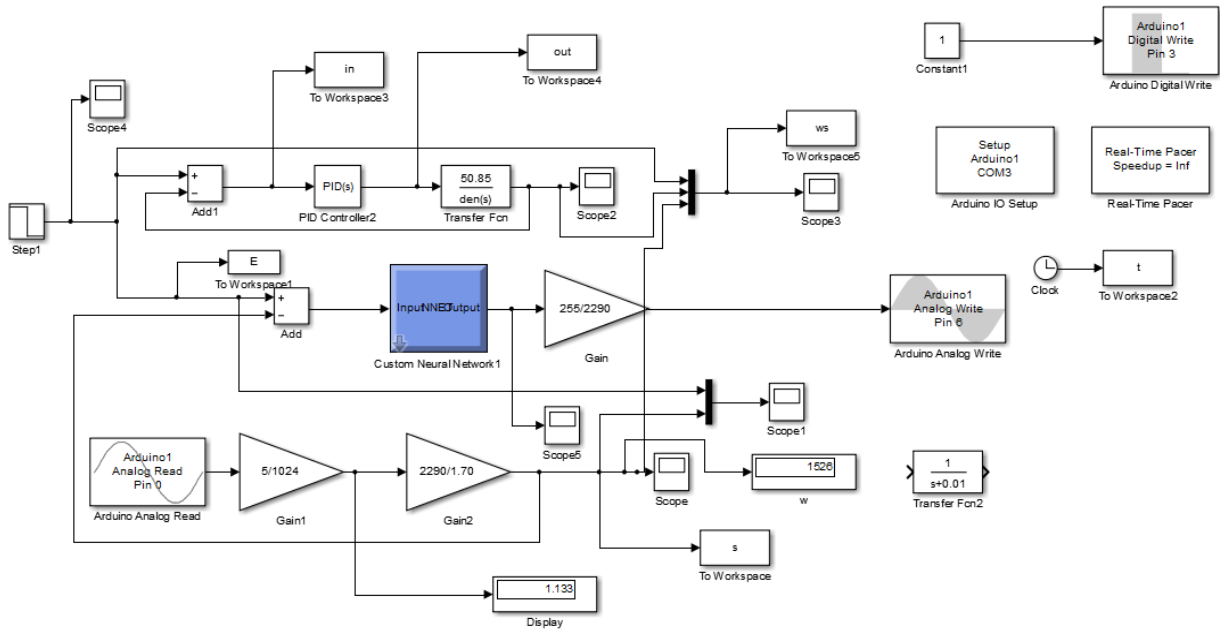


Figure III.20 : Modélisation de système avec technique de RNA.

Après la simulation , nous optenuons le resultat suivant :

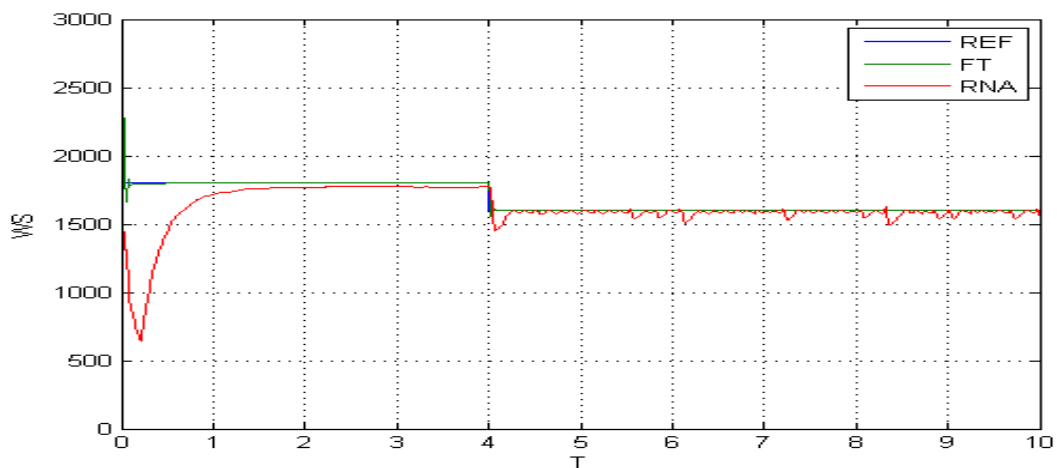


Figure III.21:L'allure de vitesse controler par RNA.

III.11.2 Interprétation :

La simulation montre la bonne réponse qui est obtenue avec cette technique de commande neuronale, plus rapide et plus précise. Dans les deux cas (fonction de transfert et pratiquement).

III.12. Comparaison entre les deux technique :

La réponse qui est obtenue dans le premier cas (avec régulateur PID) , nous observons un retard dans le temps de réponse pour suivre la référence qui est donnée.

Par contre , dans les deuxièmes cas (avec RNA) nous notons une réponse plus rapide et plus précise avec un peu de bruité coulé par le capteur de vitesse n'est pas aussi précise que nécessaire.

III.13. Les avantages et les inconvénient des RNA :

III.13.1. Les Avantage:

Les réseaux de neurones peuvent apprendre et généraliser à partir des simples données d'entrée et de sortie. Il est ainsi possible de développer un modèle sans disposer de formule exprimant le phénomène modélisé.

- Les seuls paramètres requis sont ceux directement liés à l'irradiation.
- les réseaux de neurones sont en effet de « approximateurs universels ».
- Leur utilisation permet de passer directement des données au prédicateur, sans intermédiaire, ou interprétation sujette à caution.
- Un réseau de neurones possède également une grande résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données, et les réseaux de neurones sont également capables d'analyser des relations spatiales et topologiques.
- L'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables. Elle est intuitive.
- Le modèle fourni se prête bien à la visualisation, à une recherche de profils-type.
- Ces propriétés des réseaux de neurones sont intéressantes car elles sont complémentaires des techniques statistiques classiques qui imposent des fortes restrictions.
- Les régressions se font sur des fonctions de dépendance simples (linéaire, logarithmique) qui ne sont pas toujours très réalistes.
- Enfin le traitement des calculs impose de faire appel à des méthodes compliquées pour transformer les données initiales.
- Par contre, un réseau de neurones bien conçu est capable de représenter n'importe quelle dépendance fonctionnelle et d'extraire de l'information sans modèle préconçu [15].

III.13.2. Les Inconvénient :

Un réseau de neurones ne dispense pas de bien connaître son problème, de définir ses classes avec pertinence, de ne pas oublier de variables importantes, etc. Un réseau de neurones est une « boîte noire » qui n'explique pas ses décisions.

Les réseaux de neurones ont une très bonne prédiction statistique (ayant la capacité de s'accommoder de valeurs très bruitées ou même manquantes), mais ils sont complètement impossibles à inspecter. La perte partielle de compréhension est compensée par la qualité des prédictions [15].

On peut résumer ces inconvénient par les points suivants :

- Le choix de l'architecture est critique.
- Le temps d'apprentissage peut être long.
- Présence de minima locaux de la fonction de coût.
- Difficultés d'interprétation des résultats en terme de connaissance

III.14. Conclusion :

Les réseaux de neurones, avec leurs capacités de traitement parallèle, d'apprentissage et d'approximation peuvent être considérés comme une classe tout à fait différente des calculateurs habituels. Plusieurs architectures des réseaux de neurones peuvent être obtenues par l'interconnexion de plusieurs éléments de base (neurones), qui sont inspirés du prototype biologique de la cellule nerveuse, l'élément essentiel du cerveau humain. Deux types d'apprentissages sont utilisés pour entraîner de tels réseaux, à savoir : l'apprentissage supervisé et non supervisé. La méthode la plus utilisée pour l'apprentissage supervisé des réseaux statiques, est la rétro- propagation qui repose simplement sur la technique de calcul du gradient, appliquée à toute fonction dérivable.

Conclusion Général

Conclusion Générale

La commande en vitesse du moteur à courant continu reste une méthode accessible et développée dans le domaine de robotique et l'industriel, tellement le développement des moteurs à vitesse variable de plus en plus augment, notamment dans les applications automobiles, dans des applications de faible puissance utilisant des batteries ou encore pour la traction électrique.

L'objectif général de ce mémoire était l'application des techniques de l'intelligence artificielle pour la commande de vitesse d'un moteur à courant continu.

Pour atteindre cet objectif, nous avons commencé par aborder en détail, la description et la modélisation du la moteur à courant continu.

Après la profondeur dans les composants et la méthode de fonctionnement du moteur à courant continu, nous avons appliqué la technique de commande classique avec régulateur PID et extrait les résultats de vitesse, puis nous avons appliqué la technique de RNA et extrait les résultats, Ensuite, nous avons comparé les résultats obtenus entre deux méthodes.

En fin, nous avons conclu que la méthode de contrôle de vitesse par Réseau de Neurone Artificiel pour le moteur à courant continu donne un satisfaisant résultat.

Annexe



L293D
L293DD

PUSH-PULL FOUR CHANNEL DRIVER WITH DIODES

- 600mA OUTPUT CURRENT CAPABILITY PER CHANNEL
- 1.2A PEAK OUTPUT CURRENT (non repetitive) PER CHANNEL
- ENABLE FACILITY
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)
- INTERNAL CLAMP DIODES

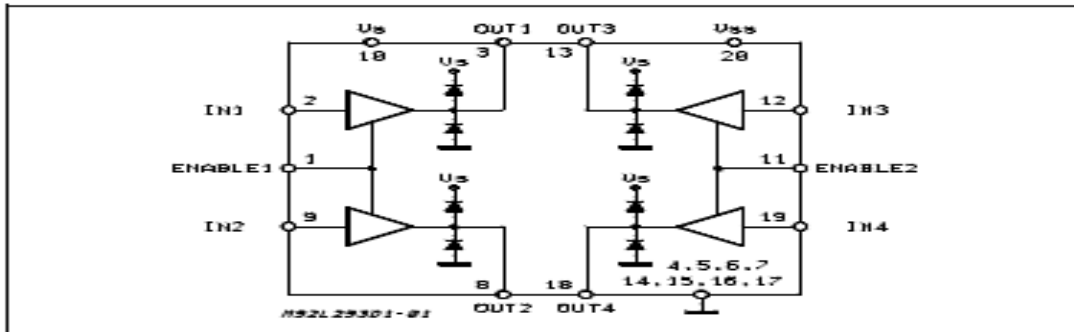
DESCRIPTION

The Device is a monolithic integrated high voltage, high current four channel driver designed to accept standard DTL or TTL logic levels and drive inductive loads (such as relays solenoids, DC and stepping motors) and switching power transistors.

To simplify use as two bridges each pair of channels is equipped with an enable input. A separate supply input is provided for the logic, allowing operation at a lower voltage and internal clamp diodes are included.

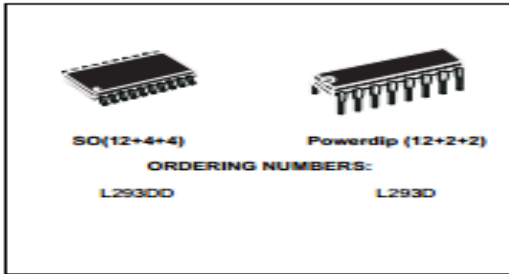
This device is suitable for use in switching applications at frequencies up to 5 kHz.

BLOCK DIAGRAM



July 2003

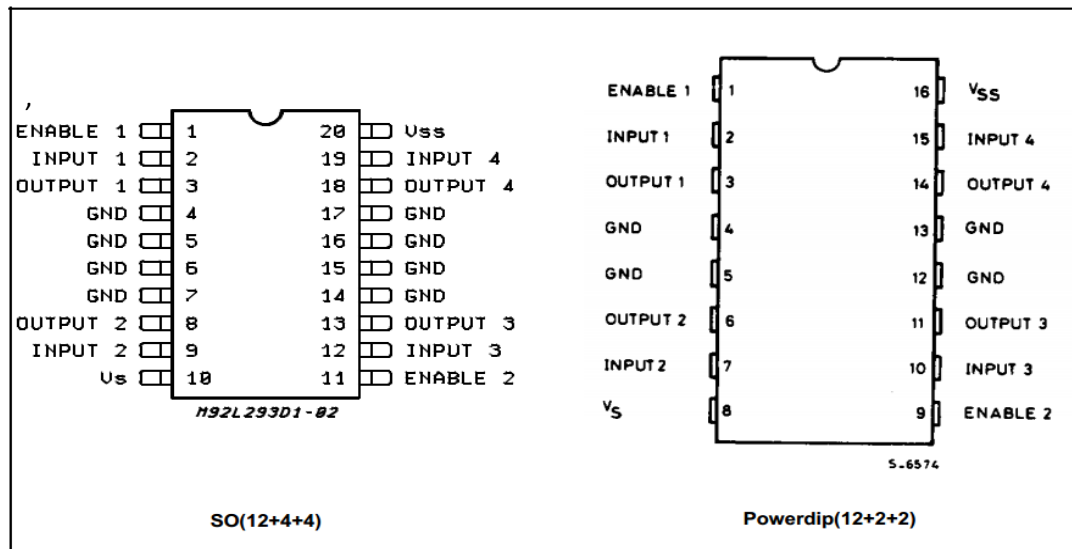
1/7



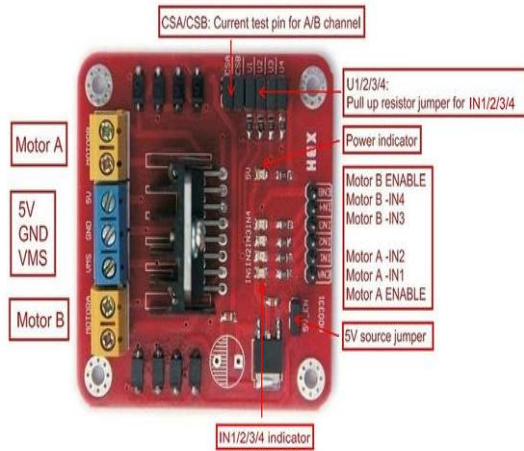
The L293D is assembled in a 16 lead plastic package which has 4 center pins connected together and used for heatsinking

The L293DD is assembled in a 20 lead surface mount which has 8 center pins connected together and used for heatsinking.

PIN CONNECTIONS (Top view)

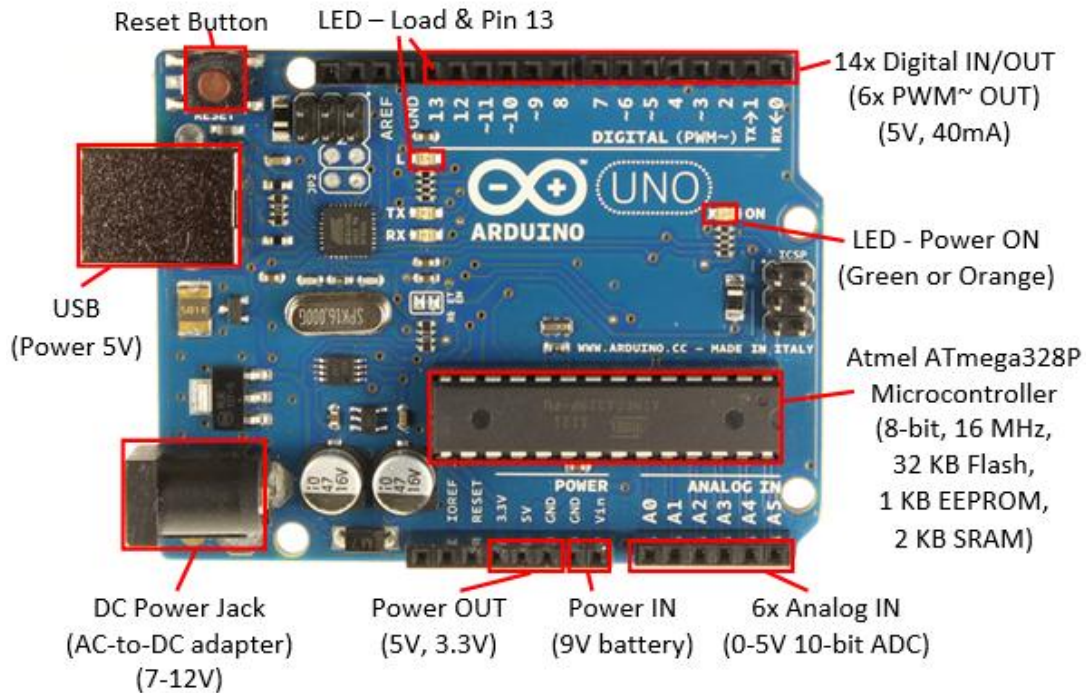


La fiche technique de L 293D (01)

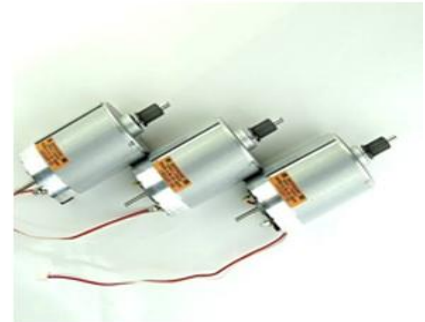
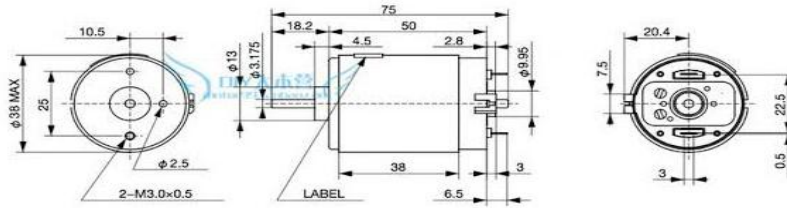


- CSA: The current test pin for motor A, this pin can be wired a resistor for current testing or tied a jumper to disable it.
- CSB: The current test pin for motor B, this pin can be wired a resistor for current testing or tied a jumper to disable it.
- VMS: VMS is the 5V-35V power source for motor. VMS is positive, GND is negative.
- 5V: Power input for the logic circuit on the board.
- 5V-EN: 5V source jumper. When the jumper is put on, The 78M05 supplies the 5V power for logic circuit on the board from the VMS port(7V < VMS < 18V). The power of logic circuit of the board is supplied by the 5V port when this jumper put off.
- U1/2/3/4: Pull up resistor for IN1/2/3/4. Putting on the jumper enable the pull up resistor for the microcontroller, putting off it disable it.
- EA/EB: EA/EB is the enable pin for the two motor A/B, the motor speed also can be controlled by the PWM of this pin.
- IN1/2/3/4: IN1/2/3/4 is the pin for the motor control. Motor B is same as Motor A.

La fiche technique de Driver L298N



La fiche technique de Arduino Uno



仕様 / SPECIFICATIONS

項目/Items	仕様/Specifications	
定格電圧	Rated Voltage	24.0V
使用電圧範囲	Voltage Range	8.0~30.0V
定格トルク	Rated Load	58.0mN·m
無負荷回転数	No Load Speed	4,500rpm
無負荷電流	No Load Current	160mA以下/or less
始動トルク	Starting Torque	175mN·m
回転方向	Rotation	CW/CCW

La fiche technique de moteur à courant continu

Micro DC Brush Spindle Motor
Mitsumi M25e-4 R-14 7864
MT-xxx

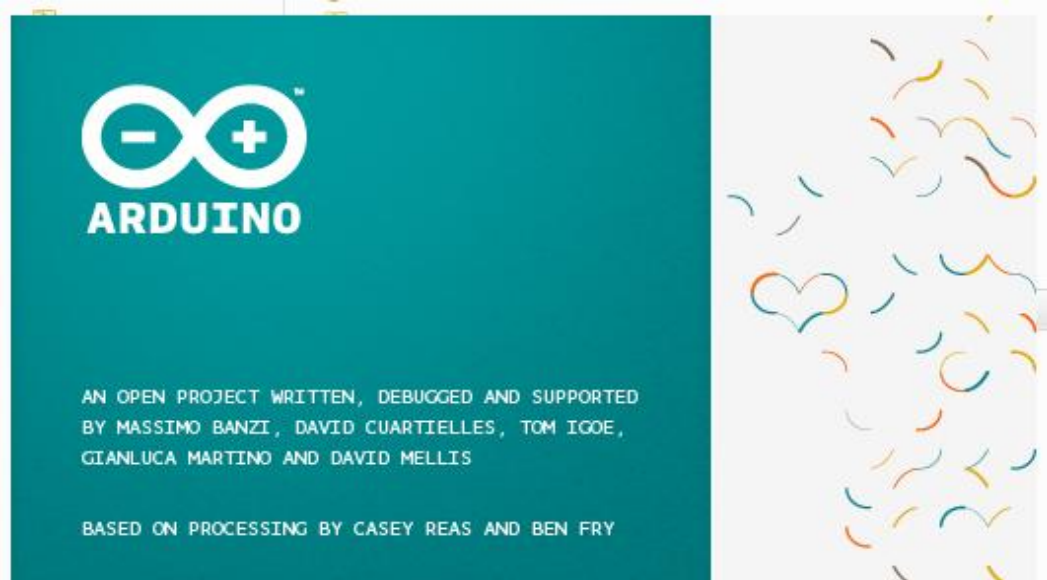
Features:

- Category: DC Motor
- Applications: Door Mechanism Motor for
 - CD Drive CD-ROM/DVD-ROM Drive
 - CD-R/RW Drive
- Manufacturer: Mitsumi
- Series: M25E-4
- P/N: R-14 7864
- Spec:
 - Rated Voltage (V): 5
 - Voltage Range (V): 1.0~7.0
 - Rated Load (mN-m): 1.47
 - Rated Speed (rpm): 2750
 - Rated Current (mA): 300 max.
 - Starting Torque (mN-m): 1.67 min.
 - Rotation: CW
 - Info Source:
 - Mitsumi - DC Mini-Motors M25E-4 Series
 - Subject to change without prior notice.
- Connector: 2-pin 2-conductor Connector
- Wire Length: 73 mm (about 2-7/8 inch)
- Package Contains:
 - DC Mini-Motor
 - 2x Mounting Screw
- Condition: Used

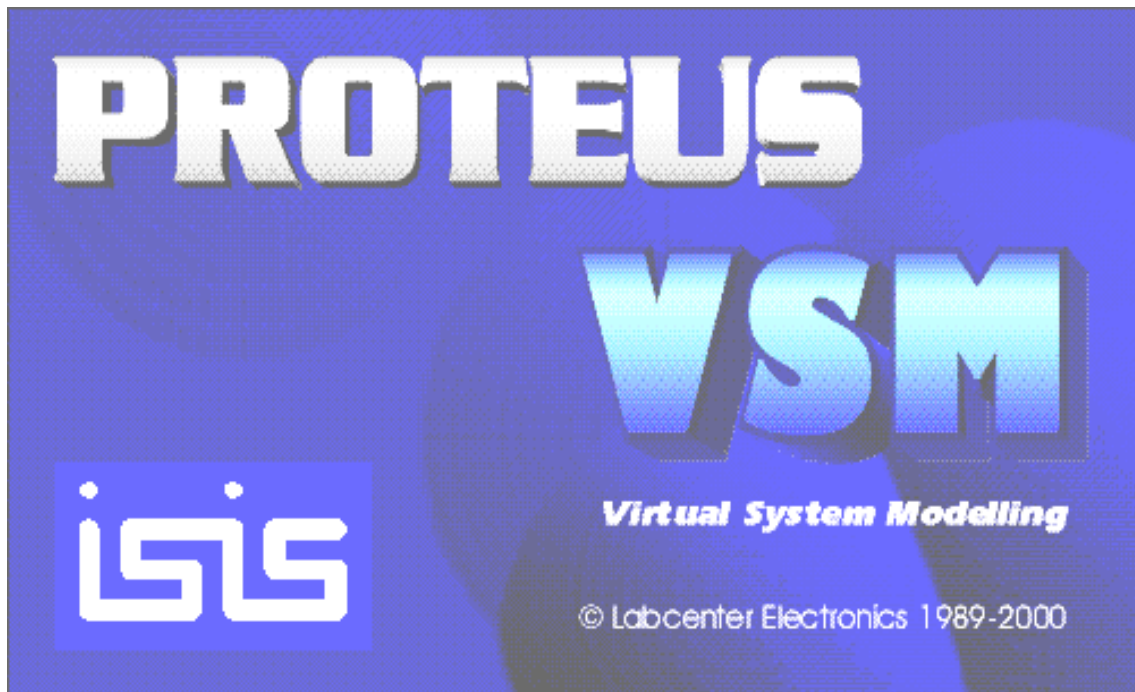


La fiche technique de génératrice (capteur de vitesse).

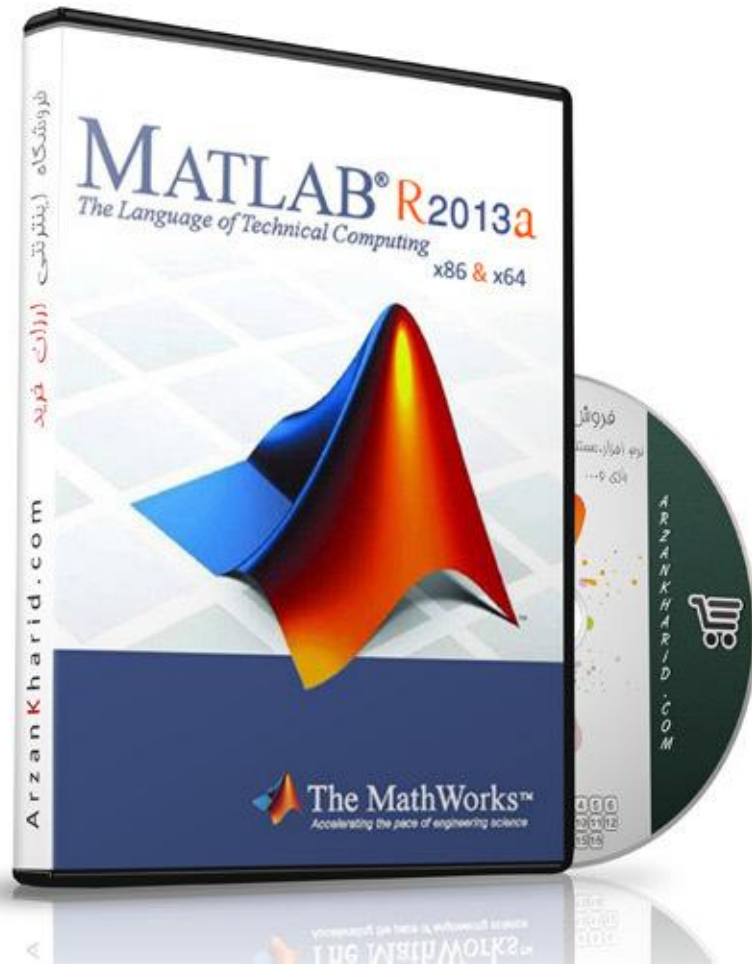
Les Logiciels Utilisés



Pour programmer Arduino



Pour la simulation virtuelle de notre carte



Pour la simulation et suivie les réponse

Bibliographie

Bibliographie

Bibliographie

[1]:"Boulakroune Souad", memoire de master "Commande à vitesse variable d'un moteur à Courant continue alimente par hacheur Bidirectionnel en courant" , UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2017/2018.

[2]:" Manseri Sonia", memoire de master " Commande adaptative indirecte d'un moteur à courant continu", Université A.MIRA Bejaïa 2011/2012.

[3]:" Zoghmar Mahieddine , Habchi Aboubakar seddik", memoire de master "Étude comparative entre deux régulateurs PID et FLC appliqués à la Machine à Courant Continu" , Université Oum El Bouaghi 2011/2012.

[4]:lycée polyvalent Louis COUFFIGNAL 11 , rout de la Fédération 6705 strasbourg

[5]:Projet de Physique P6 STPI / P6 / 2017 – 033 .

[6]:"Zoghmar Mahieddine , HABCHI Aboubakar seddik", memoire de master "Étude comparative entre deux régulateurs PID et FLC appliqués à la Machine à Courant Continu" , Université Oum El Bouaghi 2011/2012.

[7] : " Iilten Athmane", Mémoire de Master en électrotechnique " Banc d'essai virtuel pour un moteur à courant continu" Promotion : 2012/2013.

[8] : " Claude TOUZET " ,COURS, EXERCICES ET TRAVAUX PRATIQUES ,Juillet 1992.

[9]:"obeidi Nabil, Bouguettaya Tarak", Mémoire de Master " Commande d'un MCC Alimenté par Hacheur avec la Carte Arduino", Université Echahid Hamma Lakhdar d'ELoued 2013/2014.

[10]:" mémoire de fin d'etude "Contrôle de Tension d'un Système Photovoltaïque Connecté à un Réseau Local par Réseau de Neurones" .

[11]:"Merzouka Nouressadat", Pour l'obtention du diplôme de MAGISTER " Etude des performances des réseaux de neurones dynamiques à représenter des systèmes réels : une approche dans l'espace d'état " , UNIVERSITE DE SETIF 1 04/07/2009.

[12] : Contrôle de Tension d'un Système Photovoltaïque Connecté à un Réseau Local par Réseau de Neurones .

[13]: M. Kostenko et al : Machines électriques. Edition : Moscou, 1979.

[14]: M. Hubin: Moteur à courant continu. CNRS France, 2003.

Bibliographie

[15]: F.Bernot : Machine a courant continu « constitution et fonctionnement ». Technique de l'ingénieur, D3556 ; D3555.0.10 ,Vol.17. pp. 919-930 , 2004.

[16]: C. Tavernier, « Arduino applications avancées ». Version Dunod.

[17]: Jean- Noël, « livret Arduino en français » , centre de ressources art sensitif .