

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان-

Université Aboubakr Belkaïd–Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

Par : KAZI TANI NADJIB

Intitulé du mémoire

Etude des propriétés fondamentales des machines à courant continu

Soutenu publiquement, le 00 / 06 / 2022 devant le jury composé de :

MERZOUG S Mohammed	Professeur	Univ.Tlemcen	Président
YAKOUBI Boumediene	Maitre-assistant 'A'	Univ.Tlemcen	Examineur
GHLAM Karima	Maitre-assistant 'B'	Univ.Tlemcen	Encadreur

Année universitaire : 2021- 2022

Dédicace

A ma très chère Mère et à mon cher Père

En témoignage et en gratitude de leurs dévouements, de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite. A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance

Dédicace : les amis

- *Islem Kazi Aoul*
- *Ghomari Mohamed*
- *Omar Didi*
- *Benmalek Saïd*
- *Bendimered Mehdi*
- *Bendimered Mohammed Anes*

Remerciements

Tout d'abord, on remercie le bon dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Le présent travail a été préparé sous la direction de Madame GHLAM Karima Maitre-assistant 'B' 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.

J'exprime mes plus sincères remerciements à chacun des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions :

Monsieur MERZOUG S Mohammed, Professeur à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury.

Monsieur YAKOUBI Boumediene Maitre-assistant 'A' à l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer mon travail.

En fin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

Dédicace

Remerciement

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature

Introduction générale.....	2
Chapitre I : Informations sur les moteurs à courant continu	5
I.1 Introduction	6
I.2 Types de moteurs [2,5].....	7
I.3 comparaison des types de machine électrique [5,7].....	10
I.4 Moteur à courant continu	12
I.5 Moteur brushed et moteur brushless	12
I.5.1 les moteurs à balais (brushed)	13
I.5.2 Les moteurs brushless (sans balais)	15
I.6 Intérêt de la machine à courant continu	17
I.7 Les fabricants des moteurs	18
I.8 Moteur CC de FAULHABER [10]	19
I.9 Moteur CC de LEROY-SOMER Moteurs à courant continu	21
I.10 Excitation à aimants	24
I.11 Conclusion	26
CHAPITREII : Etude de la machine à flux constant.....	28
II.1 Introduction.....	29
II.2 Généralités des Moteurs à courant continu (DC).....	30
II.3 Principe de fonctionnement :	30
II.4 Les divers types de machine à courant continu	32
II.5 Expression de la f.é.m.....	34
II.6 Equations du moteur à flux constant.....	35

II.7 Réglage de la vitesse [7]	38
II.8 Les Courbes caractéristiques de la machine à courant continu.....	38
II.8.1 Caractéristique de vitesse.....	39
II.8.2 Caractéristique de couple.....	39
II.8.3 Caractéristique en charge	40
II.8.4 Caractéristique mécanique	41
II.8.5 Caractéristiques des moteurs PMDC	42
II.9 Conclusion	44
CHAPITRE III : Essai et Mesure sur un moteur PMDC sous Sim scape	45
III.1 Introduction :	46
III.2 Moteur électrique à courant continu de Sim scape.....	46
III.3 Modélisation d'un moteur à aimant permanent.....	48
III.3.1 Caractéristiques électriques	48
III.3.2 Caractéristiques mécaniques.....	48
III.3.3 Variation des moments d'inertie	52
III.3.4 Caractéristiques du DC moteur.....	54
III.3.5 Caractéristique mécanique.....	58
III.3.6 Caractéristique électromécanique de couple	60
III.3.7 Caractéristique électromécanique de vitesse	60
III.4 Conclusion :	61
Conclusion général	63

Référence bibliographique

تلخيص

Résumé

Abstract

Liste des figures

Figure I.1 : La très grande étendue, dans le domaine des puissances, des machines électromagnétiques [8]	6
Figure I.2: moteur asynchrones	7
Figure I.3 : moteur synchrones	8
Figure I.4 : Moteur pas à pas	8
Figure I.5 : moteur à courant continu	9
Figure I.6 : Moteur DC à balais de la marque BODINE	13
Figure I.7 : Moteur brushless de la marque Maxon.....	15
Figure I.8 : moteurs C.C. FAULHABER	21
Figure.I.9 : des moteurs à courant continu MS1 - MS2 de LEROY-SOMER	22
Figure I.10 : diagramme de présentation de la gamme LSK.....	23
Figure I.11 : MCC : a : culasse se refermant aux extrémités, b : structure à culasse classique, induit à 3 encoches et collecteur à 3 lames, c : photographie [2]......	25
Figure I.12 : Moteur FAULHABER SR 6 V8, 5W [Faulhaber]	26
Figure II.1 : Moteurs à courant continu de 0,7 W, 25 kW et 1'960 kW [14]	30
Figure II.2 : Fonction du collecteur dans un moteur à courant continu [15].....	31
Figure II.3 : Symbole d'un moteur DC à aimants permanents.....	32
Figure II.4 : inducteur a et b	33
Figure II.5 : machine est à champ radial	33
Figure II.6 : moteur a rotor disque à champ axial	34
FigureII.7 : Moteur DC à aimants permanents	35
Figure II.8 : Caractéristique vitesse - couple d'une machine à courant continu pour une vitesse Ω positive puis pour un fonctionnement quatre quadrants.....	37
Figure II.9 : caractéristique de vitesse en fonction du courant [1]	39
Figure II.10 : caractéristique de couple en fonction du courant [1]	40
Figure II.11 : caractéristique en charge de la tension en fonction du courant [1]	41
Figure II.12 : caractéristique mécanique du couple en fonction du la vitesse [1].....	42
Figure II.13 : Caractéristiques mécaniques des moteurs à collecteur [19].....	43
Figure II.14 : Caractéristiques mécaniques des moteurs à collecteur [2].....	43
Figure III.1 : les paramètres électriques du moteur DC	47

Figure III.2 : bloc du moteur DC valeur physique de Sim scape	49
Figure III.3 : PMDC avec des blocs Sim scape	50
Figure III.4 : les courbes de tension et le courant en fonction du temps	51
Figure III.5 : la courbe de la vitesse angulaire en fonction du temps.....	51
Figure III.6 : la courbe de courant l'induit en fonction du temps.....	52
Figure III.7 : système d'entraînement sous Simscape	53
Figure III.8 : les courbes de tension et de courant en fonction du temps	53
Figure III.9 : Système d'entraînement par PMDC sous Simscape	54
Figure III.10 : la courbe la vitesse en fonction du temps	55
Figure III.11 : la courbe de courant de l'induit en fonction du temps.....	55
Figure III.12 : la courbe de vitesse en fonction du temps.....	56
Figure III.13 : la courbe de vitesse en fonction du temps.....	56
Figure III.14 : la courbe de vitesse en fonction du temps.....	57
Figure III.15 : Caractéristique mécanique $C = f(\Omega)$	59
Figure III. 16 : Caractéristique mécanique $C = f(\Omega)$ pour 1.5 V et 1.25 V.	59
Figure III.17: la courbe de couple en fonction de courant l'induit.....	60
Figure III.18 : la courbe de vitesse en fonction du courant l'induit	61

Liste des tableaux

Tableau I.1 comparaison des types de machine électrique	11
Tableau I.2 Comparaison entre le moteur brushless et le moteur courant continu à aimants [2].	16
Tableau I.3 Descriptif des moteurs à courant continu MS1 - MS2 de LEROY-SOMER.....	22
Tableau III.1 : Les paramètres de la machine.....	50
Tableau III.2 : un micromoteur CC Faulhaber série 0615.....	54
Tableau III.3 : Résultats de l'étude de l'effet du couple de charge sur la vitesse et le courant (1.5V).....	58
Tableau III.4 : Résultats de l'étude de l'effet du couple de charge sur la vitesse et le courant (1.25V).....	58

Nomenclature

MCC : *Moteur à courant continu*

PMDC : *Moteur courant continu à aimant permanent*

MAS: *Machine asynchrone*

MSRB: *Machine asynchrone a rotor bobiné*

MSAP : *Machine synchrone aiment permanent*

MRV : *Machine a réluctance variable*

AC : *Courant alternatif*

DC : *Courant continu*

$E(t)$: *Source de tension commandé*

$\Omega(t)$: *Vitesse angulaire*

F.é.m. : *Force électromotrice*

N : *Nombre de conducteur actif de l'induit*

K : *La constant de la proposionnalité*

E : *Force électromotrice*

Φ : *Le flux magnétique*

U_a : *La tension de l'induit*

R_a : *La résistance de l'induit*

T_u : *Le couple utile*

P_H : *Les pertes par hystérésis*

P_S : *Les pertes du frottement sol ide*

T_P : *Le couple total de perte*

L_a : inductance

P_F : Les pertes par courant Foucault

P_V : Les pertes mécaniques de ventilation

f : Le coefficient frottement visqueux total

T : Le couple résistante du moteur

I_0 : Le courant à vide

T_{em} : Le couple électromagnétique

a : Nombre de pair de voies l'enroulement deux balais

P : Nombre de pair de pole

DU : Chute de la tension

U : La tension

C_j : Couple dynamique positive du moteur

C_r : Couple dynamique négative

C : couple moteur généré

T_e : Couple électromotrice

$W(t)$: la vitesse

n : la vitesse de rotation

Introduction générale

Introduction générale

Presque tous les développements mécaniques que nous voyons autour de nous sont accomplis par une machine électrique. La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie, totalement réversible, elle peut fonctionner soit en moteur, convertissant de l'énergie électrique en énergie mécanique, soit en génératrice, convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique. Beaucoup d'applications nécessitent un couple de démarrage élevé. L'usage des moteurs à courant continu est plutôt restreint, car la distribution se fait à courant alternatif.

Cependant, pour certaines applications il est parfois avantageux d'utiliser des moteurs à courant continu alimentés par des convertisseurs qui transforment le courant alternatif en courant continu. La supériorité de ces moteurs réside dans le fait qu'ils se prêtent facilement à un contrôle souple, continu et presque instantané de leur vitesse.

Le Moteur à Courant Continu (MCC) possède une caractéristique couple/vitesse de pente importante, ce qui permet de vaincre un couple résistant élevé et d'absorber les à-coups de charge : la vitesse du moteur s'adapte à sa charge. D'autre part, la miniaturisation recherchée par les concepteurs trouve dans le moteur à courant continu une solution idéale, car il présente un encombrement réduit grâce à un bon rendement [1].

Dans le secteur des accessoires automobiles, avec plus de 40 millions d'automobiles fabriquées annuellement, la production mondiale de moteurs électriques dépasse le milliard (quasiment tous à collecteur) pour un marché d'environ 4 G\$ (environ 15 millions pour l'Europe de l'Ouest). Des constructeurs comme Nippondenso ou Delphi fabriquent entre 300 et 500 000 moteurs par jour ! Le niveau d'équipement des véhicules évoluant rapidement, la production croît également en conséquence. Une automobile ordinaire exploite d'une dizaine de machines électriques (démarreur, ventilateurs thermique moteur et habitacle, essuie-glace AV et AR, lève-vitres, alternateur...) et une voiture haut de gamme en a près de 100.

La tension d'alimentation de ces moteurs est actuellement de 14 V et passera progressivement à 42 V dans une dizaine d'année, ce qui nécessitera plus de lames au collecteur (pour des raisons de commutation) [2].

En raison des nombreuses différences techniques entre les moteurs à courant continu, ils sont utilisés dans diverses applications et dans tous les domaines. Un contrôle relativement

simple de la vitesse et du couple, un réglage précis et une dynamique élevée leur permettent de se retrouver dans un très large éventail d'applications [3].

Cependant, Le collecteur constitue la partie la plus délicate de la machine à courant continu, et donc la plus sensible à tout abus : l'usure des balais et/ou du collecteur qui, selon la qualité des matériaux employés, les régimes de fonctionnement et la qualité des commutations, offrent des durées de vie limitées. Alors, beaucoup de fabricant actuel de moteur à CC offre des séries de moteur CC, qui se distingue principalement des moteurs CC conventionnels.

Simscape est une extension de Simulink pour modéliser des systèmes physiques dans les domaines électriques, mécaniques, et thermiques, etc..... Contrairement à Simulink, basé sur la notion de fonction de transfert ou des entrées-sorties d'un système, les composants de Simscape sont décrits par les relations mathématiques qui relient ses grandeurs physiques.

Le système physique qui utilise des connections physiques (comme le couple ou la vitesse pour un moteur) peut être directement relié à un modèle Simulink pour le contrôle de ces signaux physiques.

Les modèles Simscape peuvent être utilisés pour développer des systèmes de contrôle et tester les performances du système. La contribution de ce travail est significativement utile dans le domaine des systèmes électromécaniques, qui représente un outil précieux dans l'enseignement des systèmes électromécaniques pour les étudiants en génie électrique.

Avec un banc d'essais de Simscape didactique, bien sûr sécurisé et ultra-performant pour l'étude des entraînements électriques. Les étudiants sont ainsi préparés aux tout derniers développements et aux exigences industrielles réelles.

Cependant, l'objectif principal de ce travail, est l'évaluation par simulation sous Simscape les performances d'un micromoteur CC à aimant permanent de la marque Faulhaber, et l'étude de ces caractéristiques.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à des informations sur les moteurs à courant continu. On y présente, tout d'abord les types de moteur et une comparaison entre ces différents types. Ensuite, nous avons présenté l'intérêt, et les domaines d'application actuelle de la MCC. En fin, nous avons cité quelques fabricant de MCC, comme nous avons présenté deux marques de MCC.

- ✓ Le deuxième chapitre présente des généralités et une étude en régime établi de la machine à flux constant. Aussi, nous avons présentés les courbes caractéristiques des moteurs à courant continu.
- ✓ Le dernier chapitre est consacré à la réalisation d'un bon d'essai à partir de l'extension Simscape de l'environnement Simulink pour atteindre les objectifs souhaités, qui sont la réalisation de mesure, des essais et l'évaluation des performances d'un micromoteur CC Faulhaber série 0615 et d'étudier ses courbes caractéristiques ; électriques, électromécanique, et mécanique.
- ✓ En terminera ce manuscrit par une conclusion générale sur cette étude ainsi que des perspectives envisageables pour un travail futur.

Chapitre I : Informations sur les moteurs à courant continu

I.1 Introduction

Presque tous les développements mécaniques que nous voyons autour de nous sont accomplis par un moteur électrique. Les machines électriques sont une méthode de conversion d'énergie. Les moteurs prennent de l'énergie électrique et produisent de l'énergie mécanique. Les moteurs électriques sont utilisés pour alimenter des centaines d'appareils que nous utilisons dans la vie quotidienne. Les moteurs électriques sont généralement classés en deux catégories différentes : les moteurs à courant continu (CC) et les moteurs à courant alternatif (CA) [4].

Les moteurs électriques sont de nos jours, à l'exception des dispositifs d'éclairage, les récepteurs les plus nombreux dans les industries et les installations tertiaires. Leur fonction, de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, leur donne une importance économique toute particulière qui fait qu'aucun concepteur d'installation ou de machine, aucun installateur et aucun exploitant ne peut les ignorer. La figure (I.1) (échelles logarithmiques) montre les ordres de grandeurs du couple obtenu en fonction des dimensions caractéristiques (ici le diamètre) [5].

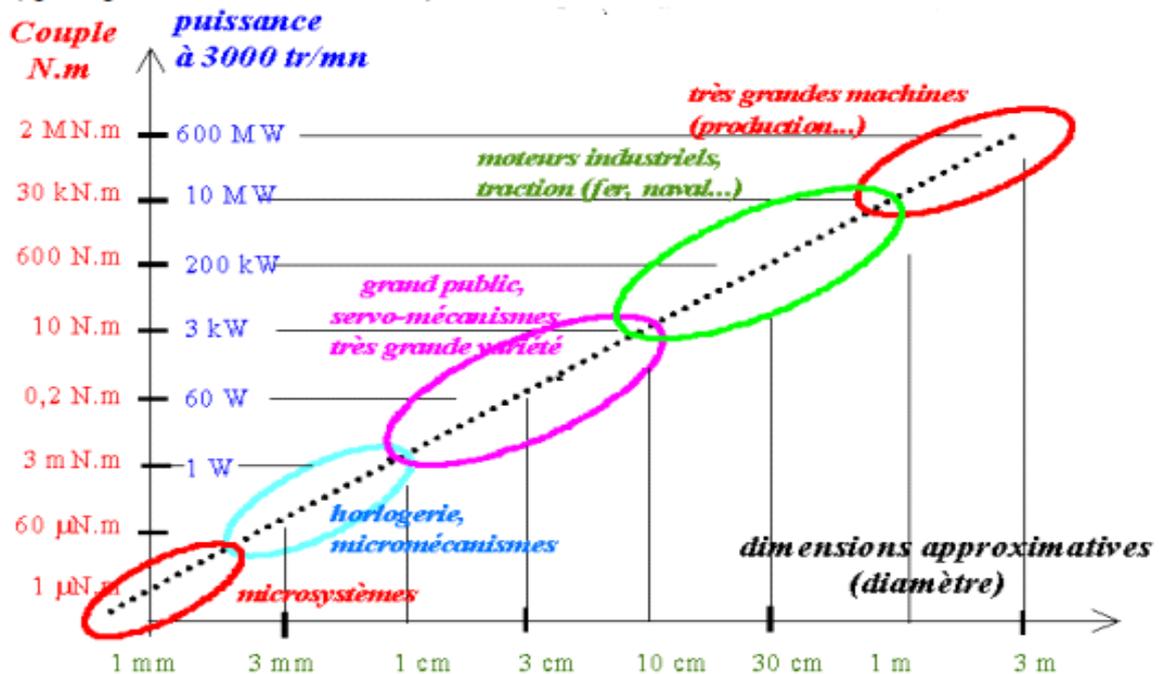


Figure I.1 : La très grande étendue, dans le domaine des puissances, des machines électromagnétiques [8]

I.2 Types de moteurs [2,5]

Les moteurs asynchrones (figure I.2) triphasés sont les plus utilisés pour l'entraînement des machines. Ces moteurs s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : normalisés, ils sont robustes, simples d'entretien, faciles à mettre en œuvre et de faible coût. Le moteur asynchrone monophasé, bien que moins utilisé dans l'industrie que son homologue triphasé, représente néanmoins une part d'applications non négligeable dans les petites puissances et dans les applications du bâtiment qui utilisent le réseau monophasé 230 V. A puissance égale, il est plus volumineux qu'un moteur triphasé. Par ailleurs, son rendement et son facteur de puissance sont beaucoup plus faibles que dans le cas du triphasé et ils varient considérablement en fonction d'une part de la puissance, d'autre part du constructeur.



Figure I.2: moteur asynchrones

Le moteur synchrone (figure I.3) se compose, comme le moteur asynchrone, d'un stator et d'un rotor séparés par l'entrefer. Il s'en différencie par le fait que le flux dans l'entrefer n'est pas dû à une composante du courant statorique : il est créé par des aimants ou par le courant inducteur fourni par une source à courant continu extérieure qui alimente un enroulement placé dans le rotor.

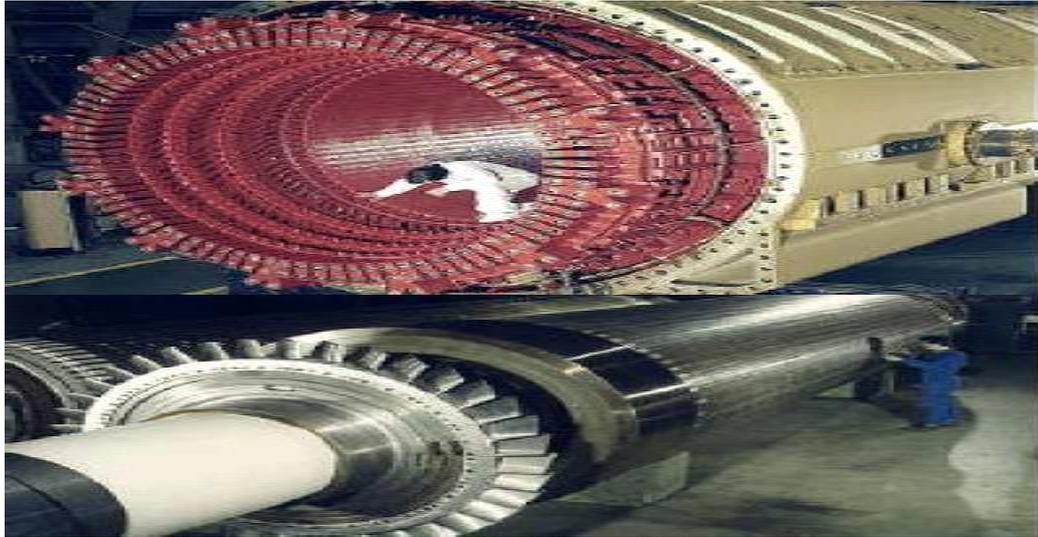


Figure I.3 : moteur synchrones

Le moteur pas à pas (figure I.4) est un moteur qui tourne en fonction des impulsions électriques alimentant ses bobinages. Les moteurs pas à pas peuvent être à réluctance variable, à aimants ou une combinaison des deux. L'angle de rotation minimal entre deux modifications des impulsions électriques s'appelle un pas. On caractérise un moteur par le nombre de pas par tour (c'est-à-dire pour 360°). Les valeurs courantes sont 48, 100 ou 200 pas par tour.

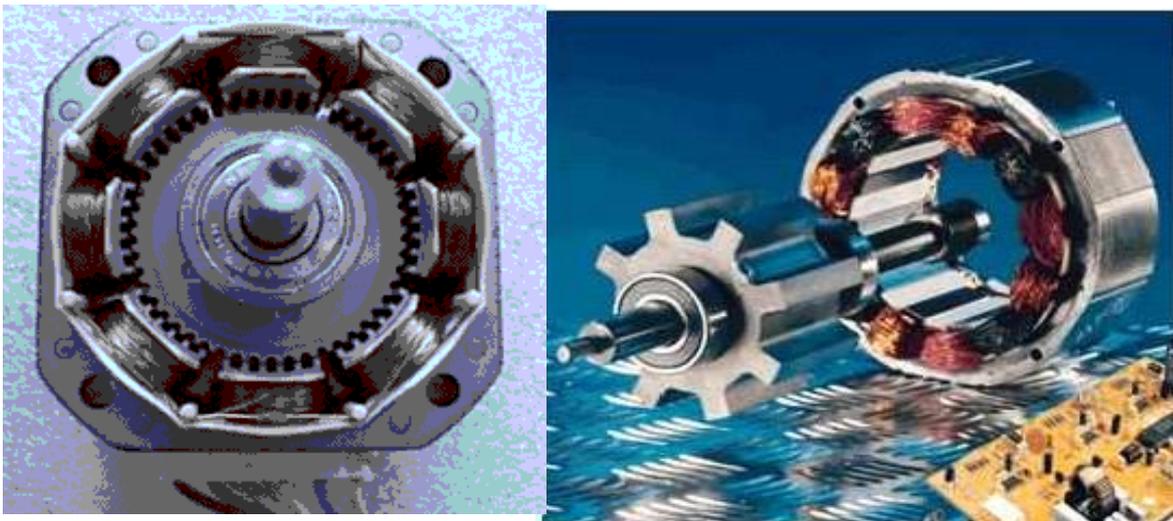


Figure I.4 : Moteur pas à pas

Les moteurs à courant continu à excitation séparée (figure I.5) sont encore quelquefois utilisés pour l'entraînement à vitesse variable des machines. Très faciles à miniaturiser, ils s'imposent dans les très faibles puissances et les faibles tensions. Ils se prêtent également fort bien, jusqu'à des puissances importantes (plusieurs mégawatts), à la variation de vitesse avec des technologies électroniques simples et peu onéreuses pour des performances élevées. Leurs caractéristiques permettent également une régulation précise du couple, en moteur ou en générateur. Leur vitesse de rotation nominale, indépendante de la fréquence du réseau, est aisément adaptable par construction à toutes les applications. Ils sont en revanche moins robustes que les moteurs asynchrones et plus chers, tant en coût matériel qu'en maintenance, car ils nécessitent un entretien régulier du collecteur et des balais.

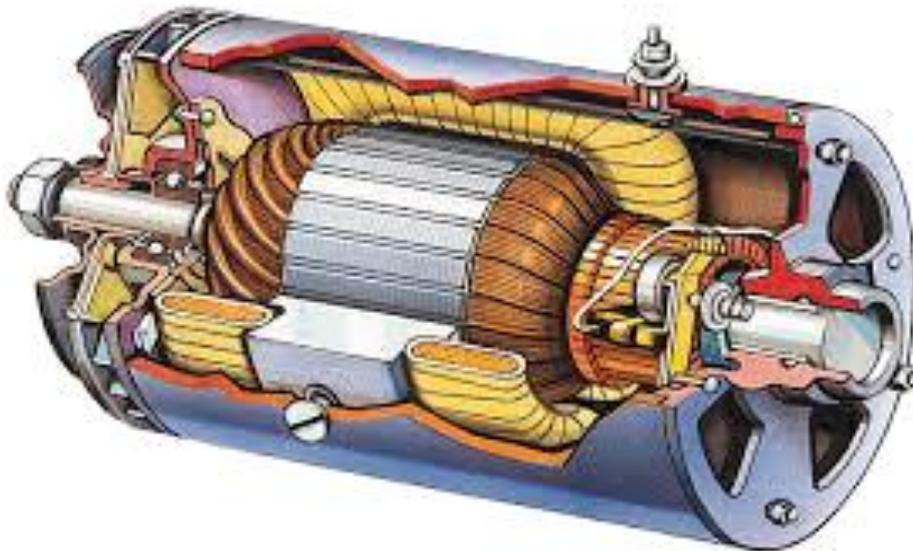


Figure I.5 : moteur à courant continu

I.3 comparaison des types de machine électrique [5,7]

Les moteurs asynchrones triphasés les plus utilisés pour l'entraînement des machines. Ces moteurs s'imposent en effet dans un grand nombre d'applications en raison des avantages qu'ils présentent : normalisés, ils sont robustes, simples d'entretien, faciles à mettre en œuvre et de faible coût.

Le moteur asynchrone monophasé, bien que moins utilisé dans l'industrie que son homologue triphasé, représente néanmoins une part d'applications non négligeable dans les petites puissances et dans les applications du bâtiment qui utilisent le réseau monophasé 230 V. A puissance égale, il est plus volumineux qu'un moteur triphasé.

Les moteurs synchrones peuvent accepter des courants de surcharge importants pour réaliser des accélérations très rapides. Ils sont toujours associés à un variateur de vitesse et ces ensembles moto-variateurs sont destinés à des marchés spécifiques comme ceux des robots ou des machines-outils pour lesquels un moindre volume des moteurs, les accélérations et la bande passante sont des impératifs.

Le moteur à courant continu reste intéressant dans tous les systèmes « embarqués » car ils sont équipés de batteries. Mais le collecteur reste une pièce fragile, produit des étincelles, et ce moteur est à éviter dans un environnement poussiéreux, inflammable ou explosif. Son rendement est inférieur à 95 % le plus souvent, et les moteurs les plus utilisés actuellement sont les moteurs à excitation indépendante notamment avec la commande par variateur. Les moteurs série fréquemment utilisés sont les démarreurs automobiles pour leur grand couple de démarrage. Les Moteurs compounds à flux additif se rencontrent dans la traction ferroviaire ils permettent d'avoir un bon couple au démarrage avec une large plage de variation de vitesse. Les Moteurs compound à flux soustractif étaient utilisés sur certaines machines pour obtenir une vitesse constante avec charge variable. Les moteurs à aimant permanent présentent l'avantage de la simplicité du raccordement, et supprime le risque d'emballement. Ils sont à ce jour les moteurs à courant continu qui sont le plus utilisés (HI FI, multimédia, l'automobile).

Une comparaison entre les différents moteurs cités ci-dessus est présentée par le tableau suivant :

Tableau I.1 comparaison des types de machine électrique

Critère	MCC	MAS	MSRB	MSAP	MRV
Couple	+	-	-	++	+
Rendement	-	-	+/-	++	+
Possibilité de vitesse élevée	-	+/-	-	+/-	+
Facilité du refroidissement	-	-	+/-	+	+
Facilité du défluxage	+	+	+	+/-	+/-
robustesse	-	+	-	+	+
cout	+	+	-	-	+

MCC : Machine à courant continu

MAS : Machine asynchrone

MSRB : Machine Synchrone à Rotor Bobiné

MSAP : Machine synchrone à Aimant Permanent (Brushless)

MRV : Machine à réluctance variable

I.4 Moteur à courant continu

Un moteur AC (courant alternatif) et un moteur DC (courant continu) sont construits différemment [6] :

- La différence la plus fondamentale réside dans la source d'alimentation : le courant alternatif (monophasé ou triphasé) et le courant continu (CC/DC), pour les batteries par exemple.
- La vitesse est un autre marqueur de différenciation. La vitesse d'un moteur DC est contrôlée en faisant varier la tension dans le moteur tandis que celle d'un moteur AC est contrôlée en faisant varier la fréquence, le plus généralement avec un variateur de fréquence.

Les moteurs DC sont également très répandus en milieu industriel car ils présentent des avantages importants selon la construction :

- Ils sont précis et rapides
- Leur vitesse peut être contrôlée en variant la tension d'alimentation
- Ils sont facilement installables, y compris dans des systèmes mobiles (sur batteries)
- Le couple de démarrage est élevé
- Le démarrage, l'arrêt, les accélérations ou marches arrière s'effectuent rapidement

Ils conviennent très bien aux applications dynamiques exigeant une grande précision notamment au niveau de la vitesse, comme dans le cas des ascenseurs, ou au niveau de la position comme pour les robots ou les machines-outils.

Ils peuvent être également intéressants pour des applications requérant de fortes puissances (10 000 kW par exemple). Cependant, ils présentent certains inconvénients suivant leur construction par rapport aux moteurs AC :

- Ils sont moins courants car moins adaptés à des applications requérant de fortes puissances
- Ils sont composés de nombreuses pièces qui s'usent et sont coûteuses à remplacer

I.5 Moteur brushed et moteur brushless

Les deux types de moteur DC les plus courants sont les moteurs à balais et les moteurs brushless [6].

I.5.1 les moteurs à balais (brushed)

Les moteurs à balais (Figure I.6) sont les moteurs les plus simples et les plus fréquemment utilisés notamment pour des équipements industriels basiques et pour des applications à budget faible.

- Les moteurs à balais ont en effet certains bénéfices :
- Ils sont simples à contrôler
- Le couple à bas régime est très bon



Figure I.6 : Moteur DC à balais de la marque BODINE

Quatre types de moteurs à balais existent suivant l'application envisagée.

- **Les moteurs à excitation série**
 - Dans ce type de moteur, le stator est branché en série avec le rotor et la vitesse est contrôlée en variant la tension d'alimentation.
 - Cependant un tel contrôle de la vitesse est plutôt mauvais : la vitesse chute dès que le couple moteur s'accroît.
 - Ce type de moteur est intéressant dans les applications nécessitant un couple de démarrage élevé comme les automobiles ou les grues.
- **Les moteurs à excitation shunt**
 - Dans ce type de moteur, le stator est raccordé en parallèle au rotor, ce qui permet un couple plus élevé sans réduire la vitesse quand le courant du moteur augmente.

- Ce type de moteur convient aux applications avec des vitesses constantes type aspirateurs ou convoyeurs.
- **Les moteurs à excitation compound**
 - Ce type de moteur combine la structure des moteurs à excitation série et des moteurs à excitation shunt.
 - Ainsi, il offre un couple de démarrage élevé en même temps qu'une variation de vitesse plus importante.
 - Il est parfait pour des presses rotatives, des ascenseurs, des carrousels à bagages, des pompes centrifuges ou des compresseurs
- **Les moteurs à aimant permanent**
 - Ce type de moteur contient un aimant permanent qui permet un couple faible.
 - Il est pertinent dans le cas d'application nécessitant une commande précise comme dans la robotique ou les servo-systèmes.

Cependant, tous les moteurs à balais présentent des inconvénients importants :

- Ils sont moins efficaces que les moteurs brushless (75-80% contre 85-90% pour les brushless).
- Leur durée de vie est faible car les balais, du fait des frottements réguliers, s'usent plus rapidement avec le temps (entre 1 000 et 10 000 heures de service en fonction de la fréquence d'application, la puissance, la vitesse, les vibrations...)
- L'arc des balais et du collecteur peut générer des bruits électromagnétiques de nature à créer des incendies.
- De même, les risques d'étincelles dues au frottement rendent son utilisation en milieu explosif peu souhaitable.
- La vitesse est généralement limitée en raison de l'échauffement des balais.
- Les balais composés de graphite génèrent de la poussière qui peut abîmer d'autres appareils notamment les appareils optiques.
- Ils ont besoin d'être lubrifiés, ce qui rend leur utilisation impossible dans les aspirateurs.

I.5.2 Les moteurs brushless (sans balais)

Les moteurs brushless (figure I.7) comblent certains points faibles des moteurs à balais, notamment la présence de balais. Mais ces moteurs présentent également d'autres avantages :



Figure I.7 : Moteur brushless de la marque Maxon

- Ils peuvent opérer à des vitesses plus importantes (jusqu'à 100 000 tours par minute contre 20 000 pour les moteurs à balais).
- Leur durée de vie est plus longue (au-delà de 10 000 heures de service)
- Ils sont plus fiables et plus efficaces.
- Il n'y a pas de pièce d'usure à part les roulements, ce qui réduit les opérations de maintenance.
- La possibilité de ces moteurs d'opérer à de très grandes vitesses rend ce type de moteur particulièrement approprié pour des mouleuses, des ventilateurs ou des scies.
- Les moteurs brushless sont systématiquement dotés d'un encodeur, un capteur qui permet de commuter électroniquement et de déterminer la position du rotor. Ces moteurs sont donc parfaits pour des servomoteurs dans le cadre d'applications de précision.

Cependant, ils présentent certains inconvénients :

- Le coût initial est élevé car il est nécessaire d'intégrer un dispositif de commutation (contrôleur) dédié.

- Ils nécessitent aussi généralement un réducteur dans les applications d'entraînement.

Dans le tableau suivant nous présentons une comparaison entre le moteur brushless et le moteur courant continu à aimants.

Tableau I.2 Comparaison entre le moteur brushless et le moteur courant continu à aimants [2].

	Moteur brushless	MCC à aimants
Avantages	<p><u>Caractéristiques générales</u> Pas d'entretien (pas de collecteur) → Utilisable en atmosphère explosive, corrosive. Excellente dissipation thermique. (Pj au stator seulement).</p> <p><u>Caractéristiques dynamiques et statiques</u> Puissance massique >> (P/m : kW/kg). Vitesse max >>. (pas de collecteur). Faible inertie (forte accélération) d'où une bande passante mécanique >> (rotor saucisson).</p>	<p><u>Caractéristiques générales</u> Simplicité du variateur (hacheur). Pris bas. Pas d'électronique interne.</p> <p><u>Caractéristiques dynamiques et statiques</u> Bien adaptée aux basses vitesses où elles ont une régularité de marche excellente.</p>
Inconvénients	<p><u>Caractéristiques générales</u> Électronique interne. Prix en forte baisse car la production devient importante. Alimentation et de régulation complexe mais maîtrisée.</p> <p><u>Caractéristiques dynamiques et statiques</u> À basse vitesse les harmoniques peuvent créer des ondulations de couple.</p>	<p><u>Caractéristiques générales</u> Entretien (balais, collecteurs). Se dégrade en atmosphère corrosive, explosive.</p> <p><u>Caractéristiques dynamiques et statiques</u> Vitesse max limitée par le collecteur. Puissance massique << MS Inertie >> MS d'où une BP mécanique << MS</p>

On pourrait croire que dans le match moteur à balais vs. Moteurs brushless, les balais sortent perdants et n'aient d'autre choix que de rejoindre le placard. Il n'en est rien car les moteurs à balais restent populaires dans l'industrie et même dans l'espace. Maxon, fabricant suisse de moteurs électriques, développe constamment de nouvelles technologies pour les moteurs à balais et ce sont justement leurs moteurs à balais qui ont équipé Opportunity, le rover de la NASA envoyé sur Mars en 2003.

Opportunity a ainsi embarqué 34 moteurs DC à balais qui ont pu opérer avec succès dans des conditions extrêmes avec de grandes variations de température. Le choix de la NASA était simple : bénéficier de la simplicité de contrôle des moteurs à balais et donc de la possibilité de contrôler les 34 moteurs depuis un seul contrôleur. Les moteurs brushless auraient quant à eux nécessité d'avoir un contrôleur par moteur avec des risques de coûts et de complications [6].

I.6 Intérêt de la machine à courant continu

La machine à courant continu est un "convertisseur électromécanique" encore très utilisé. Malgré le développement spectaculaire des machines à courant alternatif, lié aux progrès de l'électronique de puissance, la machine à courant continu garde des domaines d'application où elle demeure la solution la plus économique :

Ce sont les machines de prédilection dans les applications alimentées en courant continu (accessoires automobiles et équipements basse tension divers) [2]. On la rencontre dans des applications très diverses, par exemple :

- moteur de jouet (très faible puissance, alimentation par pile),
- moteurs d'équipement automobile (démarreur, essuie-glace, ventilateur...),
- moteur d'entraînement à vitesse variable.

Le « moteur universel », favori des équipements électroménagers et du petit outillage est également dérivé d'une machine à courant continu.

La machine à courant continu est relativement simple à modéliser dans le cas où le flux agissant sur l'induit est constant (machine à flux constant). Elle est donc une référence, aussi bien en fonctionnement moteur qu'en génératrice. Les caractéristiques des systèmes associant des convertisseurs de puissance aux machines alternatives synchrones ou asynchrones ressemblent à celles des machines à courant continu. Néanmoins, ces machines présentent deux inconvénients majeurs [7]. :

- elles comportent obligatoirement un collecteur (machine à entrefer radial) ou un système de contact glissant rotor-stator (machine à entrefer axial), ce qui limite les possibilités d'utilisation en surintensité.
- l'induit est nécessairement au rotor. La machine convertit la puissance électrique en puissance mécanique (ou inversement). C'est là que les pertes sont les plus importantes. Le bon fonctionnement de la machine exige une limite en température du rotor.

Le collecteur constitue la partie la plus délicate de la machine à courant continu, et donc la plus sensible à tout abus. Dans des conditions normales le collecteur requiert peu de maintenance en plus des inspections périodiques. La patine uniforme qui se forme lorsque le collecteur est en action est un indice de bon fonctionnement. La chaleur de la patine peut varier en fonctions des substances présentes dans l'environnement. Cela nécessite un grand soin, des spécialistes et des

équipements spéciaux dans le processus de maintenance, menant à un processus d'entretien élevé [8].

Cependant, les collecteurs mécaniques ont une contrepartie : l'usure des balais et/ou du collecteur qui, selon la qualité des matériaux employés, les régimes de fonctionnement et la qualité des commutations, offrent des durées de vie limitées à quelques milliers (voire dizaines de milliers) d'heures. Pour cela Les tout petits moteurs (moins de quelques watts) les fabriquant de moteurs utilisent des balais en métaux précieux, principalement pour minimiser les frottements qui prendraient des proportions inadmissibles dans cette gamme de puissances et si les durées de fonctionnement sont importantes. Pour les puissances plus élevées et/ou pour des applications très impulsives (réglage de rétroviseur ou verrouillage des portes, par exemples), on utilise des balais en carbone [2].

- Aspects système : l'intégration du moteur à la fonction dans un grand nombre d'applications, les moteurs sont intégrés à des systèmes complexes, ils doivent être conçus dans un souci d'intégration (au sens de la compacité et de la compatibilité) à la fonction générale. Leur forme, leur température de fonctionnement, leur pollution électromagnétique (etc...) doivent être déterminés ou limités en fonction d'un grand nombre de contraintes technologiques et économique [2].

I.7 Les fabricants des moteurs

Les fabricants des moteurs de grande série sont soit des producteurs d'équipement qui considèrent que les moteurs font partie des composants « stratégiques ». C'est le cas de la plupart des équipementiers automobiles (DelcoRemy, NipponDenso, Bosch, Ford, TRW, Valeo, MagnetiMarelli, Lucas,..... il existe aussi des spécialistes des moteurs de grande diffusion Par exemple Mabuchi expulse de ses chaînes plus d'un milliard et demi de moteurs par an (principalement des petits moteurs à collecteur) soit environ 50 moteurs chaque seconde ! [2].

Voici quelques marques de moteurs à courant continu proposé par le site **Axes Industries** [9] :

- ✓ Moteurs Courant Continu DMI ABB
- ✓ Moteur électrique à courant continu T T ELECTRIC
- ✓ Moteur électrique à courant continu de ROTALINK
- ✓ Micro Moteurs à Courant Continu de CROUZET AUTOMATISMES
- ✓ Moteur à courant continu de LEROY SOMER
- ✓ Micro moteurs courant continu FAULHABER

En somme, c'est par milliards que sont annuellement fabriqués les petits moteurs électriques dans des usines de productions très automatisées et, de plus en plus, déplacées en Asie du Sud-Est ou en Amériques Centrale et du Sud [2].

Dans ce qui suit nous allons présenter deux marques de moteur à courant continu FAULHABER et LEROY SOMER.

I.8 Moteur CC de FAULHABER [10]

Moteur cc de FAULHABER offre 41 séries de moteur CC, qui se distingue principalement des moteurs CC conventionnels à armature en fer par leur bobine cuivre autoportante sans fer à bobinage oblique. Grâce à cette conception, les entraînements savent convaincre par une inertie de rotor extrêmement faible, une dynamique exceptionnelle et un fonctionnement précis et sans réluctance. La bobine à rotor autoportante sans fer à bobinage oblique - développée par le fondateur de l'entreprise, Fritz Faulhaber senior et brevetée en 1958, - est l'élément central de chaque moteur CC de FAULHABER.

Cette technologie révolutionnaire a eu un impact profond sur de nombreux secteurs industriels et a ouvert de nouvelles possibilités d'application pour les moteurs C.C. en les adaptant aux systèmes exigeant les puissances les plus élevées, les performances dynamiques optimales, la plus petite dimension possible et le poids le plus minime. Les principaux avantages de cette technologie incluent les caractéristiques suivantes :

Pas de couple de détente, ce qui permet un positionnement souple, le contrôle de la vitesse et une plus grande efficacité générale qu'avec d'autres types de moteurs C.C.

- Couple et puissance extrêmement élevés par rapport à la dimension et au poids du moteur
- Relation linéaire absolue entre la charge et le régime, le courant et le couple ainsi que la tension et la vitesse
- La très faible inertie du rotor assure d'excellentes caractéristiques dynamiques pour le démarrage et l'arrêt
- EMI et ondulation du couple extrêmement bas.

Types de moteur C.C FAULHABER

Les moteurs C.C. FAULHABER (figure I.8) sont construits avec deux types différents de systèmes de commutation: la commutation métaux précieux et la commutation graphite.

La « commutation métaux précieux » se rapporte aux matériaux qui sont utilisés dans les balais et dans le commutateur et sont constitués d'alliages de métaux précieux ultraperformants. Ce type de système de commutation est utilisé principalement en raison de sa très petite taille, de sa très faible résistance de contact et de son signal de commutation très précis. Ce système de commutation est particulièrement bien adapté aux applications à faible courant, tels que les appareils fonctionnant avec des batteries.

Dans la plupart des cas, les moteurs à commutation métaux précieux fournissent les meilleures performances générales en régime continu avec une charge correspondant précisément ou approximativement au point efficacité nominale maximale.

La « commutation graphite » se rapporte au matériau utilisé dans les balais en lien avec un commutateur en alliage de cuivre. Ce type de système de commutation est très robuste et convient mieux aux applications dynamiques à haute intensité avec démarrages et arrêts rapides ou conditions de surcharge.

Ce type de système de commutation se caractérise par sa petite taille, la résistance de contact extrêmement faible et le signal de commutation silencieux précis. Il est idéal pour une utilisation dans des systèmes avec une faible charge électrique et dans les applications alimentées par batterie. Les caractéristiques linéaires des moteurs ainsi qu'une inertie minimale du rotor assurent un contrôle simple mais hautement dynamique.

La durée de fonctionnement d'un moteur C.C. FAULHABER dépend principalement du point de travail et des conditions ambiantes pendant le fonctionnement. Le nombre total d'heures de fonctionnement peut donc varier considérablement : de quelques centaines d'heures dans des conditions extrêmes à plus de 25 000 heures dans des conditions optimales. Dans des conditions de charge typique, la durée de fonctionnement d'un moteur C.C. FAULHABER est de 1000 à 5000 heures.

AVANTAGES

- Puissants aimants en terres rares
- Large plage de températures de fonctionnement : -30 °C à +85 °C (en option -55 °C à +125 °C)

- Boîtier entièrement en acier avec revêtement résistant à la corrosion
- Sans réluctance, dynamique élevée, contrôle de vitesse précis
- Faible consommation de courant – faible tension de démarrage
- Conception extrêmement compacte et légère avec codeur



Figure I.8 : moteurs C.C. FAULHABER

I.9 Moteur CC de LEROY-SOMER Moteurs à courant continu

LEROY SOMER commercialise une gamme complète de moteurs à courant de 0.18 à 750 kW. Les moteurs à courant continu, ouverts ou fermés, sont conçus pour des applications exigeant un fonctionnement en vitesse variable et offrent des moments de couples identiques, constants à basse vitesse ou vitesse élevées.

LEROY-SOMER fabrique les moteurs à courant continu MS de 0.44 à 18.5 kW. Ces moteurs, économiques, à carcasse feuilletée, de conception simple, répondent à la plupart des exigences de l'industrie. Ils complètent, dans les faibles puissances, la gamme courant continu LEROY-SOMER.

Tableau I.3 Descriptif des moteurs à courant continu MS1 - MS2 de LEROY-SOMER

Désignations	Matières	Commentaires
1 Stator (ou carcasse)	Tôle magnétique assemblée Cuivre électrolytique.émailé classe H	- assemblage des tôles précontraint soudé par procédé TIG - pôles principaux intégrés sur toute la gamme - pôles auxiliaires rapportés (MS 1001, 1121 & 1122), ou intégrés (MS 1321 & 1322) - système d'isolation classe F (MS 1) ou H (MS 2)
2 Induit	Tôle magnétique isolée à faible taux de carbone. Cuivre électrolytique.émailé classe H	- le faible taux de carbone garantit dans le temps la stabilité des caractéristiques magnétiques - encoches semi fermées inclinées - frettage renforcé par fibre de verre polymérisée à chaud - système d'isolation classe F (MS 1) ou H (MS 2)
3 Collecteur	Cuivre à l'argent moulé sur résine	- type à talon - grand nombre de lames
4 Arbre	Acier	- rainure de clavette débouchante - clavette à bouts droits (MS 1), à bouts ronds (MS 2)
5 Couronne porte-balais Balais	Résine thermodure et acier traité Composé électrographitique	- moulée, rigide - position de calage repérée - porte-balais équidistants indé réglables
6 Flasques paliers	Fonte FGL	- flasque palier à bride FF à trous lisses (MS 801 à 1321) - flasque palier à bride FF à trous lisses ou FT à trous taraudés (MS 1122 à 1322)
7 Roulements et graissage	Acier	- roulements à billes, jeu C3 - de type 2RS, étanches, graissés à vie - précharge sur le roulement avant - roulement arrière bloqué en translation
8 Ventilation	Matériau composite (MS1) Alliage d'aluminium ou tôle (MS2)	- moteur auto ventilé (MS 801 à 1121 & 1321) - ventilation radiale (MS 1122 & 1322)
9 Boîte à bornes	Matériau composite (MS1) ou alliage d'aluminium (MS2)	- IP 55 (étanche) - orientable 4 directions - 4 bornes (MS 801 à 1121, 1122 & 1321) - 6 bornes (pour excitation série -parallèle (MS 1322) - raccordement des options sur dominos (MS 2)

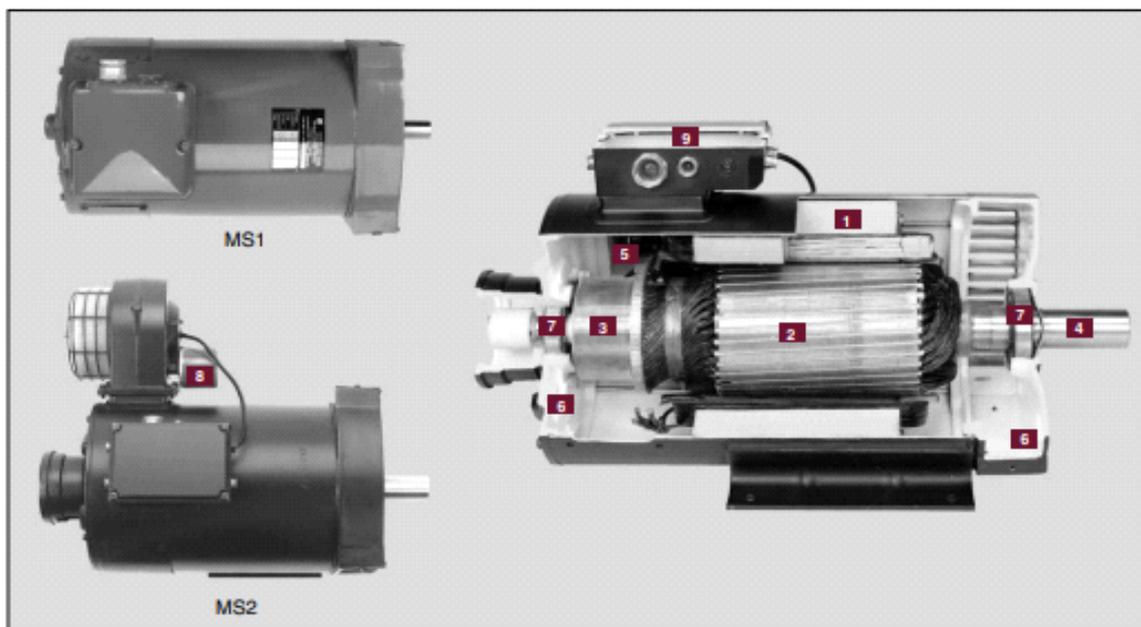


Figure.I.9 : des moteurs à courant continu MS1 - MS2 de LEROY-SOMER

D'autres séries de moteurs, LSK allant de 2 à 560 kW et MBT - MFA - MS Moteurs à courant continu de puissance fractionnaire - 0,06 à 1 kW de LEROY SOMER.

Il est possible de présélectionner un moteur en fonction de la puissance et de la vitesse désirée grâce au diagramme de présentation de la gamme LSK du constructeur (figure I.10).

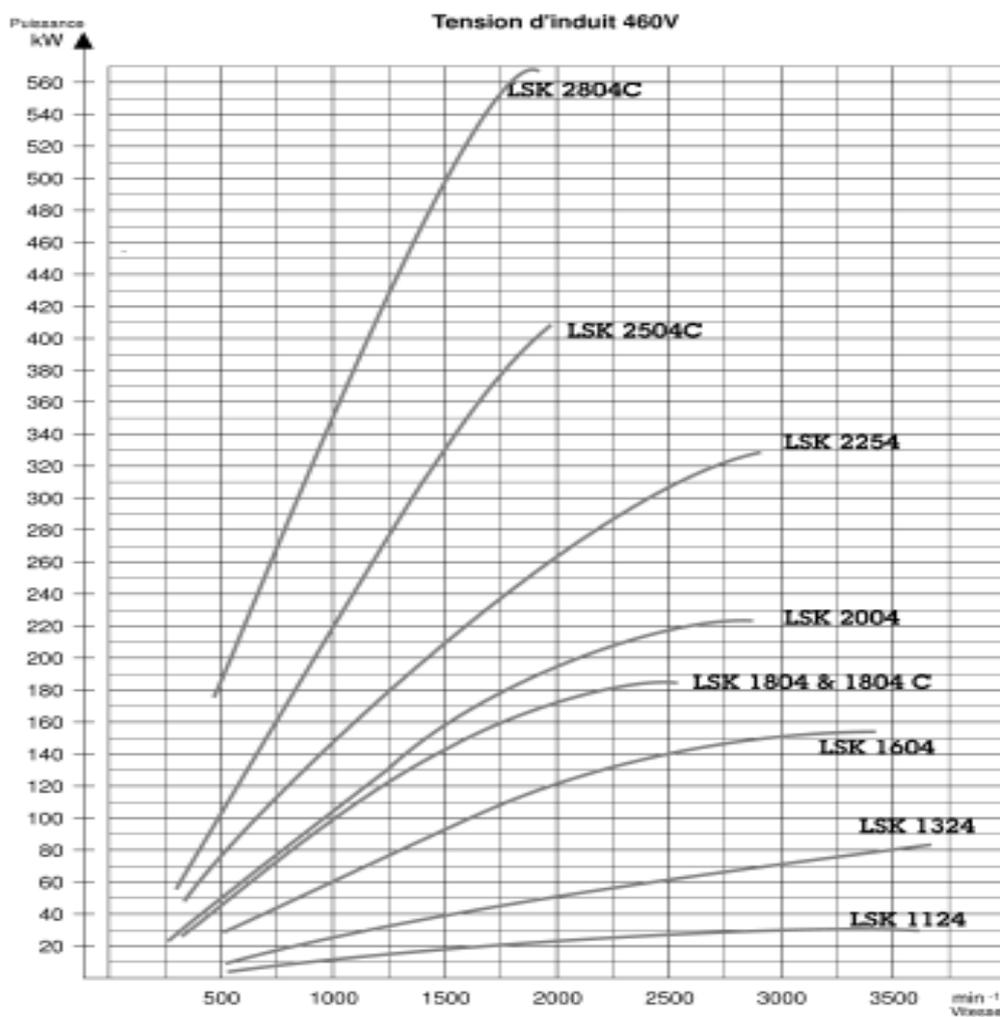


Figure I.10 : diagramme de présentation de la gamme LSK

I.10 Excitation à aimants

Le moteur à courant continu à aimant permanent (PMDC) fonctionne généralement sur une alimentation continue de 6 V, 12 V ou 24 V...etc. obtenue à partir des piles ou des redresseurs. L'interaction entre les conducteurs de rotor porteurs de courant axial et le flux magnétique produit par l'aimant permanent entraîne la génération du couple.

Il s'agit d'un très large domaine recouvrant beaucoup d'applications, presque toujours en basse tension (à partir de piles ou d'accumulateurs ou d'alimentations basse tension). On rencontre ces moteurs d'équipement automobile, les jouets, les appareils photos, la motorisation des commandes de platines cassettes audio, les éjecteurs de lecteur de CD (environ 0,1 W), les petits outils (visseuse, perceuse...) ou appareils électroménagers (aspirateurs) sans fil.

Les aimants sont presque exclusivement en ferrite ou plastoferrite. Mais lorsque les performances (puissance massique, rendement) doivent être élevées et que l'acheteur est prêt à payer le prix (modélisme), on rencontre des aimants hautes énergies (SmCo ou NdFeB) souvent grande vitesse (plus de 20 000 tr/mn) avec des collecteurs à 7 ou 11 lames. L'inducteur possède de 2 à 3, voire 4 paires de pôles. La limite supérieure est liée plus à la complexité du bobinage d'induit qu'à la fréquence. Les induits des moteurs économiques comportent un nombre d'encoches minimal de 3 (structure la plus simple appelée encore induit Siemens avec une seule paire de pôles : Figure I.10 b et c, on rencontre couramment 6, 8, 12, 16 encoches. Plus le nombre d'encoches n'est élevé, meilleures sont la commutation et les ondulations de couple. Les rendements peuvent être très bons, c'est une question de prix, de masse (remplissage en cuivre des encoches...) et de matériaux.

On trouve des petits moteurs de quelques 1/10^{ème} de watt dont les rendements dépassent 50% et des moteurs de quelques centaines de watts pour lesquels on atteint péniblement cette valeur, alors que les effets d'échelle dans le cas d'une complète homothétie devraient conduire à des écarts très importants.

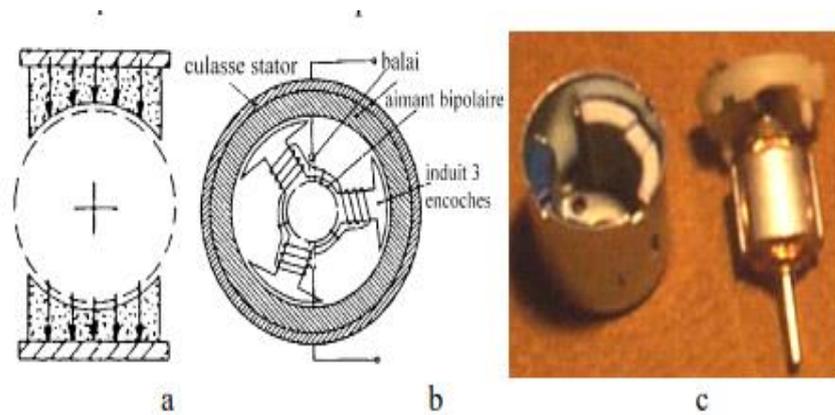


Figure I.11 : MCC : a : culasse se refermant aux extrémités, b : structure à culasse classique, induit à 3 encoches et collecteur à 3 lames, c : photographie [2].

Les moteurs PMDC sont utilisés dans diverse application salant de fractions à plusieurs chevaux. Ils sont développés jusqu'à environ 200 kW pour une utilisation dans diverses industries. Les applications sont données ci-dessous.

- Les moteurs PMDC sont principalement utilisés dans les automobiles pour faire fonctionner les essuie-glaces et les lave-glaces, pour relever les vitres inférieures, pour faire fonctionner les soufflantes des appareils de chauffage et de climatisation, etc.
- Ils sont également utilisés dans les lecteurs d'ordinateurs.
- Ces types de moteurs sont également utilisés dans les industries du jouet.
- Les moteurs PMDC sont utilisés dans les brosses à dents électriques, les aspirateurs portables, les mixeurs.
- Utilisé dans un outil électrique portable tel que des perceuses, des taille-haies, etc.

Voici les avantages du moteur PMDC (moteur DC aimant permanent)

- Ils sont plus petits.
- Pour un classement plus faible, l'aimant permanent réduit les coûts de fabrication et les moteurs PMDC sont donc moins chers.
- Comme ces moteurs ne nécessitent pas d'enroulement de champ, ils ne subissent pas de pertes de cuivre dans les circuits de champ. Cela augmente leur efficacité. [11]

Exemples de moteur PMDC :

Exemples de micromoteur C.C Faulhaber (figure I.11), aimant en terres rares NdFeB.

Commutation métaux précieux la série 2224 U 024 SR:

Diamètre :	22 mm
Longueur :	24.2 mm
Tension nominale :	3 ... 36 V
Vitesse jusqu'à :	9000 min ⁻¹
Couple jusqu'à :	6.8 mNm
Puissance continue jusqu'à :	8.5 W



Figure I.12 : Moteur FAULHABER SR 6 V8, 5W [10]

I.11 Conclusion :

Malgré le développement spectaculaire des machines à courant alternatif, lié aux progrès de l'électronique de puissance, la machine à courant continu garde des domaines d'application où elle demeure la solution la plus économique.

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

Cependant l'intégration du moteur à la fonction dans un grand nombre d'applications, dans des systèmes complexes, ils doivent être conçus dans un souci d'intégration à la fonction générale. Comme par exemple l'utilisation des moteurs PMDC dans une fonction du domaine de la santé (dans les divers équipements médicaux).

D'autre part, 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, nous trouvons des centaines de marques de moteurs à courant continu proposé par le site Axes Industries.

Mais le collecteur reste une pièce fragile, produit des étincelles, et ce moteur est à éviter dans un environnement poussiéreux, inflammable ou explosif. Alors, beaucoup de fabricant actuel de moteur à CC offre des séries de moteur CC, qui se distingue principalement des moteurs CC conventionnels. Comme Les moteurs C.C. FAULHABER sont construits avec deux types différents de systèmes de commutation : la commutation métaux précieux et la commutation graphite. Les moteurs à commutation métaux précieux fournissent les meilleures performances, et la « commutation graphite » est très robuste et convient mieux aux applications dynamiques à haute intensité avec démarrages et arrêts rapides ou conditions de surcharge.

CHAPITRE II : Etude de la machine à flux constant

II.1 Introduction

Dans de nombreuses applications du génie électrique, les machines à commutation mécanique constituent encore à ce jour une solution pertinente à l'implantation d'un actionneur électromécanique. Leur grande fiabilité et leur coût de fabrication relativement limité restent des avantages indéniables malgré les progrès récents de l'électronique. Ceci justifie les recherches actuelles sur ces machines [12].

les moteurs DC sont utilisés pour des applications à très faibles puissances (moins de ~20 W), ou à très hautes puissances (plus de ~200 kW), c'est-à-dire dans les puissances où la différence de coût et de complexité entre les convertisseurs triphasés et DC est significative. L'étude des moteurs DC reste cependant justifiée, dans la mesure où elle permet une approche par étapes du fonctionnement et du choix des moteurs. Leur principe de fonctionnement est relativement simple, ce qui facilite la compréhension des phénomènes électromagnétiques, mécaniques et thermiques dont il faut tenir compte. La plupart de ces phénomènes sont identiques pour les moteurs triphasés, et seule la complexité de leur alimentation en complique un peu la compréhension [5].

Avec l'évolution des matériaux à aimants permanents de haute énergie et les progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les moteurs à aimants permanents ont connu ces dernières années un grand essor [4]. Ils ont été adoptés dans de nombreuses applications de hautes performances telles que la robotique, l'aérospatial, la production des sources d'énergie renouvelables, les divers équipements médicaux, les véhicules électriques et hybrides, etc. [5]. Ceci est dû à leurs hautes performances, puissance massique élevées, couple volumique élevés et grande fiabilité [13].

Dans ce deuxième chapitre nous allons présenter la machine à courant continu, et la modéliser dans le cas où le flux agissant sur l'induit est constant (machine à flux constant).

II.2 Généralités des Moteurs à courant continu (DC)

La construction générale d'un moteur à courant continu (figure II.1) comprend les parties suivantes :

- Le stator est la partie fixe du moteur, formant généralement son enveloppe extérieure : les champs magnétiques sont produits par des aimants permanents ou d'électro-aimants
- Le rotor est la partie mobile du moteur, fournissant le couple utile à la charge par l'intermédiaire de son arbre : comprend un ensemble de spires parcouru par courant d'induit du moteur.
- Le collecteur est le dispositif qui permet d'une part, de transmettre le courant de l'extérieur (fixe) aux spires du rotor (mobiles), et d'autre part de commuter le courant de manière à ce qu'il circule de manière optimale dans les spires du rotor.



Figure II.1 : Moteurs à courant continu de 0,7 W, 25 kW et 1'960 kW [14]

II.3 Principe de fonctionnement :

Dans le modèle simplifié d'un moteur DC, représenté à la (Figure II.2), L'interaction de la spire du rotor parcouru par le courant et du champ magnétique produit par le stator fait apparaître des forces entraînant la rotation du rotor.

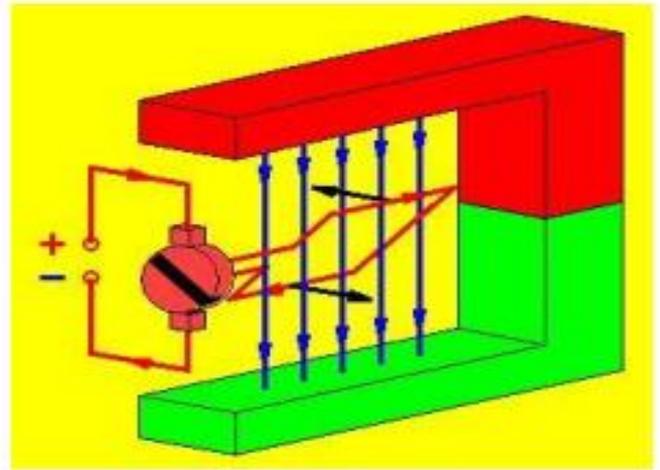
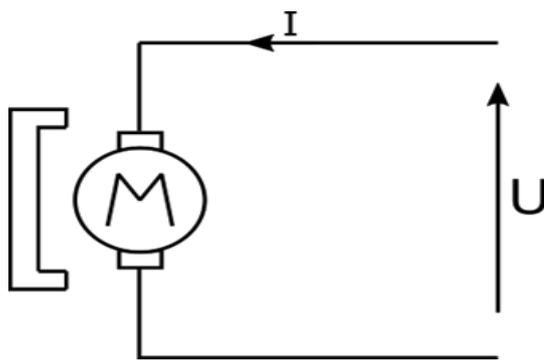


Figure II.2 : Fonction du collecteur dans un moteur à courant continu [15]

Le flux magnétique Φ interceptée par la spire change de sens régulièrement, en fonction de la position angulaire du rotor. Pour éviter que le couple produit par la force F ne s'inverse au même rythme, il faut régulièrement inverser le courant dans la spire. Dans un moteur DC, cette inversion est réalisée par le collecteur. Pour assurer le contact électrique et l'inversion régulière de sens du courant dans la spire, le collecteur est composé de lames de collecteur au rotor, et de balais au stator. Les lames sont en cuivre, alors que les balais sont généralement en graphite, matériau relativement bon conducteur et suffisamment mou pour ne pas griffer les lames.

C'est grâce à cette fonction de commutation assurée par le collecteur que ce type de moteur est en mesure de délivrer un couple en présence d'un courant continu, d'où son nom. De manière abrégée, on parle plutôt de moteur DC (« direct current » en anglais, (figureII.3). L'excitation d'un moteur DC, donc la création du champ magnétique nécessaire à son fonctionnement, peut être réalisée de diverses manières. La plus simple sur le plan du principe de fonctionnement consiste à utiliser des aimants permanents placés dans le stator (figureII.3) [5].

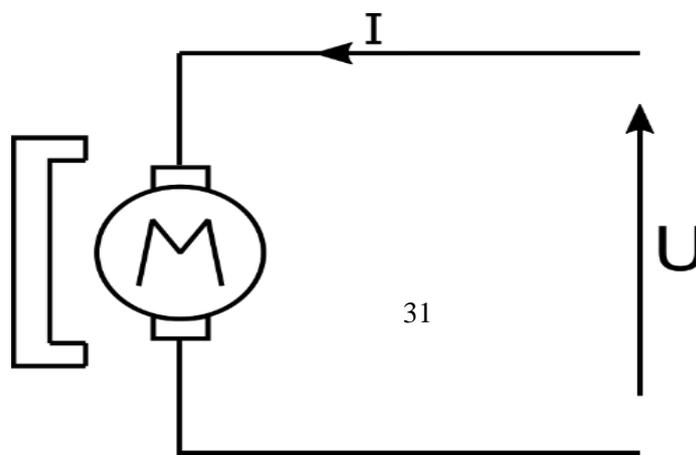


Figure II.3 : Symbole d'un moteur DC à aimants permanents

II.4 Les divers types de machine à courant continu

Les moteurs à courant continu sont très utilisés dans les systèmes automatiques qui nécessitent une variation précise de la vitesse de rotation, peut être modélisée par le biais d'équations électrique, électromécanique et mécanique. C'est trois groupes d'équations nous permettrons de mieux appréhender la machine à courant continu dans son fonctionnement réel.

Du coté électrique nous pouvons dire que la machine à courant continu se définit par un circuit d'induit et un circuit inducteur ; l'induit de la machine à courant continu peut être vu comme une résistance R_a et une inductance L_a en série avec une source de tension commandée $E(t)$ proportionnelle à la vitesse $\Omega(t)$. Du coté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit augmentée de celui de la charge entraînée [16].

Les divers types de machine à courant continu se composent :

- d'un stator comportant, soit **un bobinage inducteur** « d'excitation » parcouru par un courant continu, soit **un aimant permanent** ;



a) bobiné.



b) à aimant permanent.

Figure II.4 : inducteur a et b

- D'un rotor induit. Selon les machines, les lignes de champ magnétique dans l'entrefer sont :
 - Selon une direction normale, à la surface du cylindre constituant le rotor. On dit alors que la machine est à champ radial (figure II.5). Ce type de machine est le plus utilisé car il permet une plus grande puissance massique.) [17].

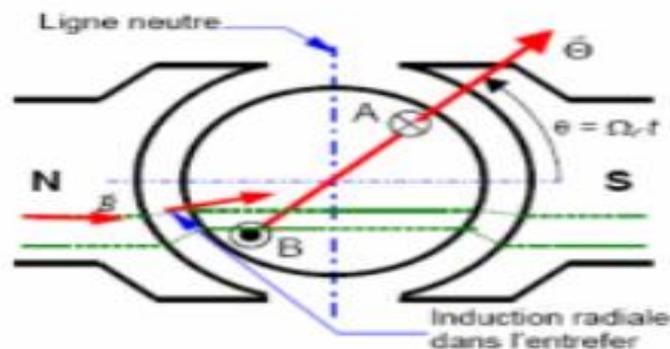


Figure II.5 : machine est à champ radial

- Selon une direction parallèle à l'axe de rotation. Il s'agit de moteur à « rotor disque » à champ axial (figure II.6), plus connu sous le nom de la marque « AXEM ». Le rotor n'est composé que de cuivre sous forme de circuit imprimé et d'isolant et possède un très faible moment d'inertie. Néanmoins, ses caractéristiques sont voisines de celles du moteur à flux constant.

En pratique, le champ magnétique dans l'entrefer ne dépasse guère 1,5 T, sinon le circuit « Fer » du moteur est trop saturé [18].

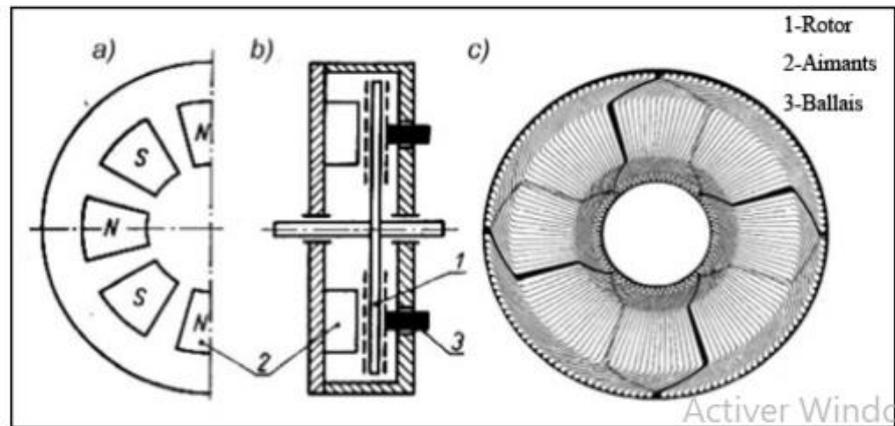


Figure II.6 : moteur à rotor disque à champ axial

II.5 Expression de la f.é.m.

On désigne par Φ le flux magnétique créé par chaque pôle du stator. La f.é.m. induite au rotor, recueillie entre balais, est proportionnelle au flux par pôle et à la vitesse angulaire de rotation. Il s'agit d'une variante de loi de Lenz

$$E = k\Phi\Omega \quad (1)$$

La constante de proportionnalité k ne dépend que du nombre N de conducteurs au rotor, du mode de bobinage (a nombre de paires de voies d'enroulement) et du nombre (p) de paires de pôles.

$$k = \frac{p N}{a 2\pi} \quad (2)$$

Dans le cas où le flux (Φ) est créé par un bobinage inducteur, plusieurs possibilités de branchement existent :

_ le bobinage inducteur est alimenté par un courant continu indépendant. La machine est dite à excitation séparée. Le flux (Φ) est constant.

_ le bobinage inducteur est alimenté par un courant continu égal ou proportionnel (Ajouter une résistance en parallèle sur l'inducteur) au courant passant dans le bobinage induit. La machine est dite à excitation série. Le flux (Φ) est variable.

Plus la puissance nominale de la machine est élevée, plus le nombre de pôles est grand pour mieux répondre aux contraintes et technologies de bobinage.

Le rotor est toujours (feuilleté) pour réduire les pertes par courants de Foucault. Le choix des tôles de rotor doit être tel que les pertes par hystérésis soient les plus faibles possible [7].

II.6 Equations du moteur à flux constant

En régime établi, le courant et la vitesse sont constants en fonction du temps. On désigne respectivement par U_a et R_a la tension et la résistance de l'induit [7]. (Voir figure II.7)

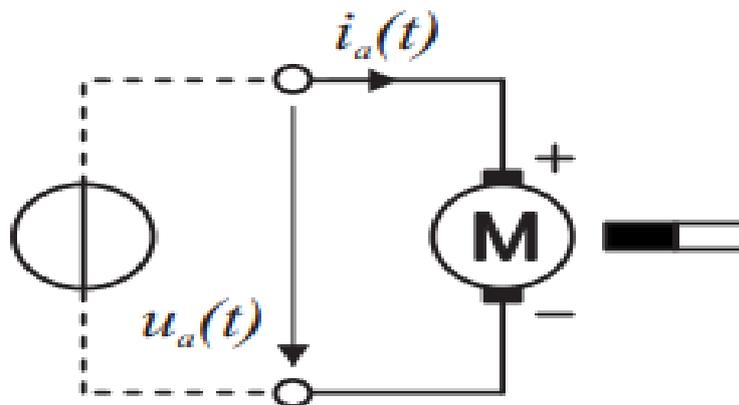


Figure II.7 : Moteur DC à aimants permanents

On considère les pertes par hystérésis P_H et de frottement solide P_S (frottement sec essentiellement dû au contact balai-collecteur et à l'arbre sur les paliers). Ces pertes sont proportionnelles à la vitesse. On introduit un couple total de pertes T_P tel que :

$$P_H + P_S = T_P \Omega \quad (3)$$

Les pertes P_F par courant de Foucault et les pertes mécaniques P_V de ventilation (frottement fluide) sont proportionnelles au carré de la vitesse. On introduit f le coefficient frottement visqueux total équivalent tel que :

$$P_F + P_V = f \cdot \Omega^2 \quad (4)$$

Le couple équivalent de frottement total dû aux pertes autres qu'effet Joule est alors :

$$T = T_P + f \Omega \quad (5)$$

On désigne par T_r , le couple résistant du moteur, ou ce qui revient au même, en régime stationnaire, le couple utile T_u . Les équations du moteur à courant continu à flux constant, et en régime permanent, sont alors :

$$U_a = R_a I_a + k\Phi\Omega \quad (6)$$

$$T_e = k\Phi I_a = T_p + f\Omega + T_r \quad (7)$$

La constante $k\Phi$ intervient à la fois dans l'expression de la f.é.m. et dans celle du couple électromagnétique T_e . Ces équations donnent les caractéristiques du moteur en régime permanent. Comme la machine à flux constant est réversible, on peut considérer que les grandeurs sont algébriques. On obtient à partir des équations (5) et (6), en éliminant la vitesse

$$I_a \left[k\Phi + \frac{fR_a}{k\Phi} \right] = T_p + f \left(\frac{U_a}{k\Phi} \right) + T_r \quad (8)$$

La relation entre le courant d'induit I_a et le couple résistant T_r est linéaire. Mais à couple résistant nul, le courant sera non nul car il faut créer un couple électromagnétique qui corresponde aux pertes fer et mécaniques du moteur. En pratique, le terme de frottement visqueux est très faible (de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} N. ms/rad). Il est possible alors de simplifier l'expression précédente. On obtient alors :

$$k\Phi I_a = T_p + T_r \quad (9)$$

Selon que la machine fonctionne en moteur ou en génératrice, les effets du couple T_p s'additionnent ou se soustraient de ceux du couple T . Ceci est mis en évidence dans la caractéristique « Quatre quadrants » de la machine à courant continu (Voir la figure II.7)

. Le fonctionnement à courant constant correspond en pratique au cas où le moteur est asservi avec une limitation de courant.

Étudions la caractéristique de la vitesse, $\Omega = g(T_r)$ avec : $U_a = cts$ - On part encore des équations (6) et (7), mais cette fois on élimine le courant. Ce qui donne en définitive

$$\Omega \left[k\Phi + \frac{fR_a}{k\Phi} \right] = U_a - R_a \left[\frac{T_p + T_r}{k\Phi} \right] \quad (10)$$

L'allure de ces courbes (pour plusieurs valeurs de la tension d'induit) est la suivante (Voir la figure II.8).

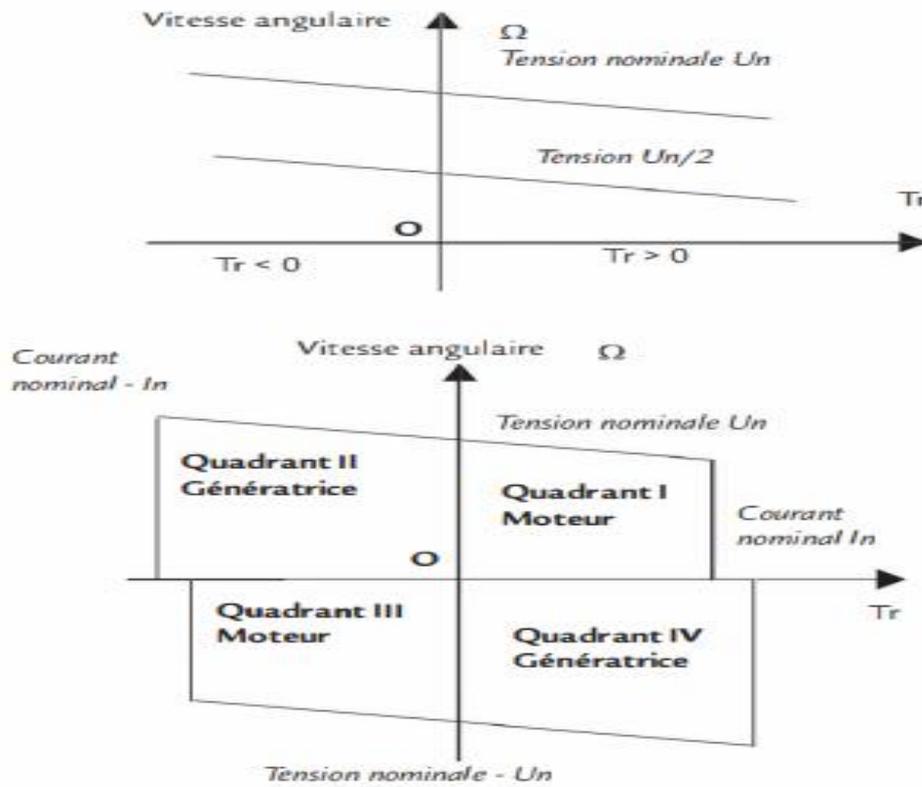


Figure II.8 : Caractéristique vitesse - couple d'une machine à courant continu pour une vitesse Ω positive puis pour un fonctionnement quatre quadrants

Dans les cas où le terme de frottement visqueux est très faible, il est possible de simplifier l'expression précédente. On obtient alors les caractéristiques à tension d'induit constante positive pour les vitesses positives, ($T_p > 0$) (Quadrants 1 et 11):

$$\Omega(T_r) = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{R_a}{(k\Phi)^2} [T_p + T_r] \quad (11)$$

C'est une droite passant par le point de « marche à vide ». $T_r = 0$, et $\Omega(0)$ tel que

$$\Omega(0) = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{R_a T_p}{(k\Phi)^2} \quad (12)$$

Ces caractéristiques montrent la réversibilité de la machine à courant continu. On obtient les caractéristiques à tension d'induit constante négative pour les vitesses négatives, en négligeant le frottement visqueux (quadrants 111 et IV) :

$$\Omega = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{R_a}{(k\Phi)^2} [T_P + T_r] \quad (13)$$

II.7 Réglage de la vitesse [7]

Considérons l'équation suivante :

$$\Omega = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{R_a}{(k\Phi)^2} [T_P + T_r] \quad (14)$$

L'équation (14) montre que la vitesse varie :

- Linéairement en fonction de U_a à flux et couple résistant constants ;
- « presque » linéairement en fonction de l'inverse du flux $\frac{1}{k\Phi}$ à U_a fixée (par exemple la tension nominale). L'augmentation de la vitesse est obtenue en réduisant le courant d'excitation passant dans le bobinage inducteur.

Rappelons que, lorsque qu'un réglage électronique de vitesse est nécessaire, les moteurs à collecteur présentent l'énorme avantage de se satisfaire des structures de convertisseur les plus simples et les plus économiques, ce qui reste, aujourd'hui encore, un de leurs atouts majeurs. En l'absence de réversibilité, un simple hacheur à un seul transistor suffit à partir d'une alimentation en tension continue [2].

II.8 Les Courbes caractéristiques de la machine à courant continu

Les grandeurs : vitesse de rotation, rendement, puissance électrique et puissance mécanique sont données en fonction du couple résistant sur l'arbre moteur pour une tension d'alimentation constante. On utilise un MCC avec une vitesse élevée pour un bon rendement. Les caractéristiques sont des courbes qui traduisent graphiquement les relations entre les variables : courant absorbé, vitesse et couple moteur. Elles varient selon le type du moteur.

II.8.1 Caractéristique de vitesse

L'équation (6) montre que :

$$n = U_a - R_a I_a / k\Phi \quad (15)$$

L'équation (16) montre que la vitesse de rotation du moteur est exprimée en fonction du courant d'induit. La caractéristique de vitesse est présentée par la figure II.9.

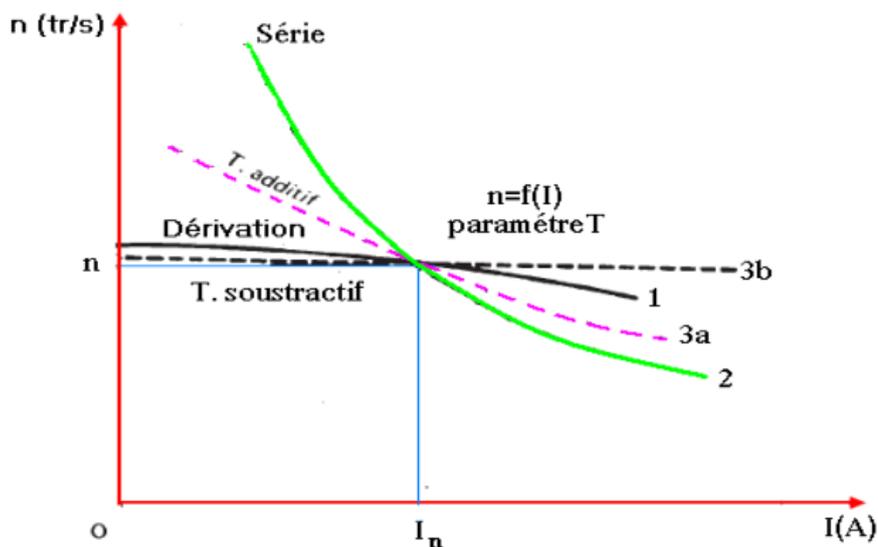


Figure II.9 : caractéristique de vitesse en fonction du courant [1]

1 : Dérivation

3a : composé flux additif

2 : série

3b : composé flux soustractif

II.8.2 Caractéristique de couple

Le couple est proportionnel au flux et au courant absorbé. Si on considère le flux sous un pôle constant, le couple est directement proportionnel à l'intensité :

$C = f(I)$, avec une vitesse constante, et I_0 : Courant à vide. La caractéristique de couple est présentée par la figure II.10

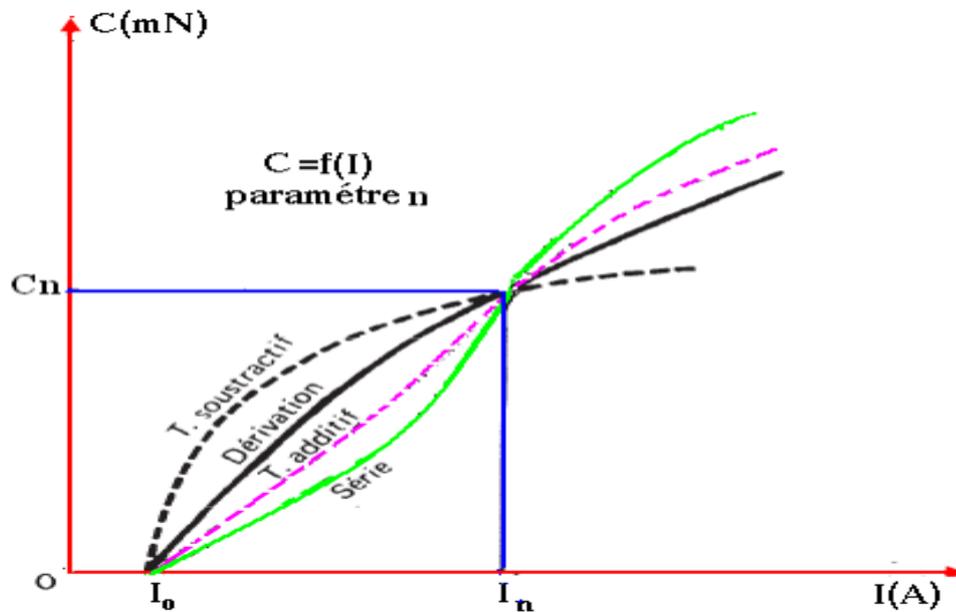


Figure II.10 : caractéristique de couple en fonction du courant [1]

II.8.3 Caractéristique en charge

La caractéristique en charge est exprimée par la tension d'alimentation en fonction du courant de l'induit. En régime établi la résistance du bobinage provoque une légère chute de tension ohmique dans l'induit : $R_a \cdot I_a$

Le courant qui circule dans l'induit crée un flux indésirable. Cela se traduit par une chute de tension supplémentaire : c'est la réaction magnétique d'induit. Pour l'annuler, la machine possède sur le stator des enroulements de compensation parcourus par le courant d'induit : on dit que la machine est compensée. C'est souvent le cas.

$$\text{Pour un moteur} \quad E = U_a - R_a I_a - \Delta U \quad (16)$$

• La distribution du courant d'induit par les balais et le collecteur provoque également une légère chute de tension (souvent négligée). La caractéristique de charge est présentée par la figure II.11.

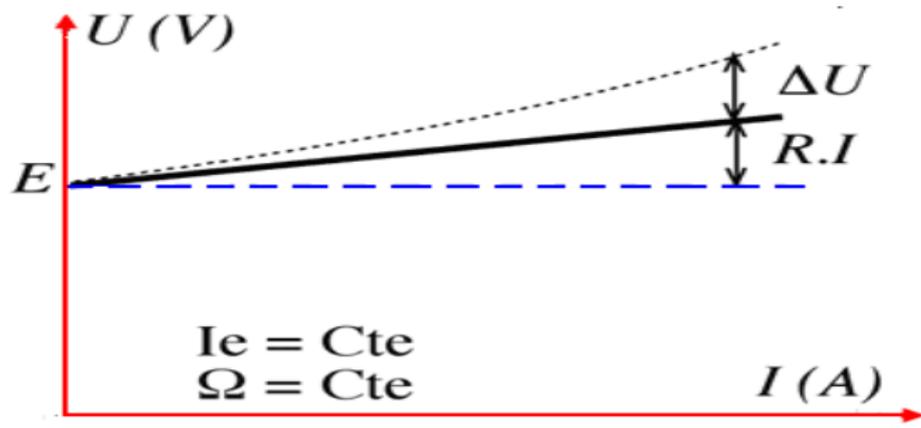


Figure II.11 : caractéristique en charge de la tension en fonction du courant [1]

II.8.4 Caractéristique mécanique

La caractéristique mécanique couple utile -vitesse $C = f(n)$ permet à l'utilisateur de prévoir le comportement de divers moteurs [7].

Les éléments principaux d'un système d'entraînement sont la charge et le moteur électrique. Pour une stabilité de fonctionnement une certaine dépendance est nécessaire entre les caractéristiques mécaniques du moteur et la charge entraînée aussi bien en régime permanent qu'en régimes transitoires. Le couple C du moteur et le couple résistant C_r créé par la machine entraînée sur l'arbre du moteur soient donnés par les courbes 1 et 2 de la (figure II.12) sous dessous et se coupent au point A. le point A est le point de fonctionnement stable du groupe.

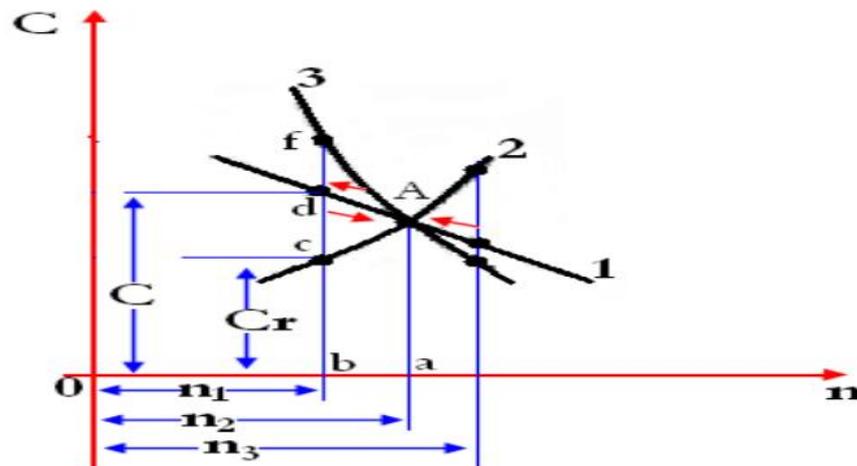


Figure II.12 : caractéristique mécanique du couple en fonction du la vitesse [1]

II.8.5 Caractéristiques des moteurs PMDC

Les caractéristiques des moteurs PMDC sont similaires aux caractéristiques des moteurs shunts à courant continu en termes de couple (figure II.13), de vitesse et de courant d'induit. Cependant, les caractéristiques vitesse-couple sont plus linéaires et prévisibles dans les moteurs PMDC [19].

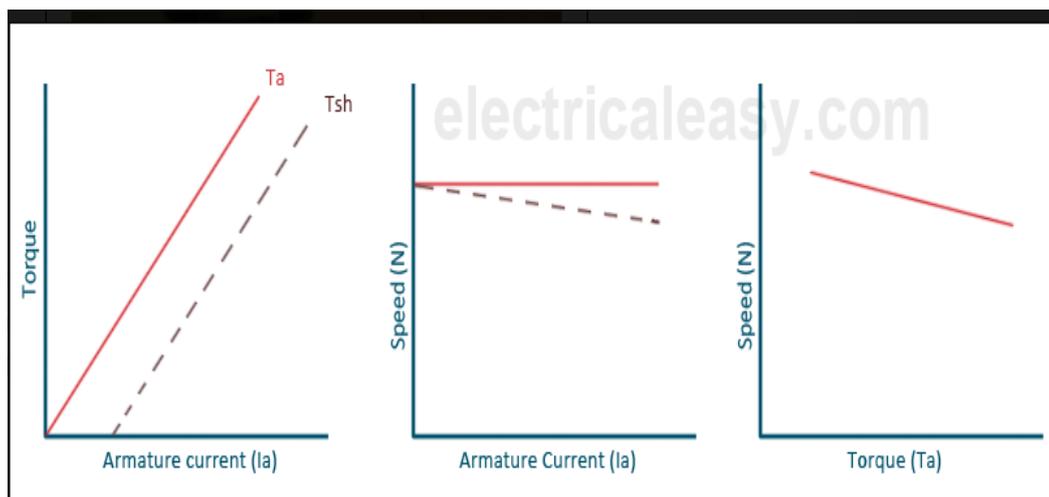


Figure II.13 : Caractéristiques mécaniques des moteurs à collecteur [19]

Les caractéristiques mécaniques des moteurs à collecteur dépendent de leur alimentation et de leur mode d'excitation. La figure II.14 rappelle les allures des caractéristiques couple-vitesse des machines à collecteur à aimants permanents (flux inducteur constant) [2].

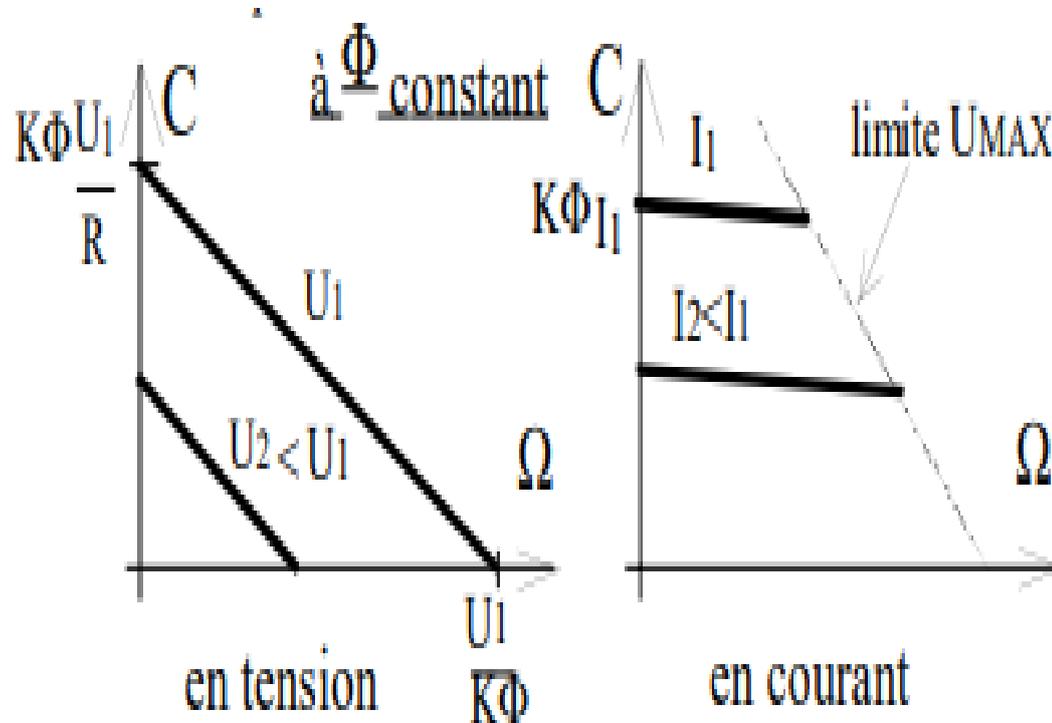


Figure II.14 : Caractéristiques mécaniques des moteurs à collecteur [2]

II.9 Conclusion

Le moteur à courant continu est un convertisseur d'énergie, il est réversible. Beaucoup d'applications nécessitent un couple de démarrage élevé. Ce type de moteur reste intéressant dans tous les systèmes « embarqués » car ils sont équipés de batteries. 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. Le Moteur à Courant Continu (MCC) possède une caractéristique couple/vitesse permet à l'utilisateur de prévoir le comportement de divers moteur: la vitesse du moteur s'adapte à sa charge. D'autre part, la miniaturisation recherchée par les concepteurs trouve dans le moteur à courant continu à aimant permanent une solution idéale, car il présente un encombrement réduit grâce à un bon rendement.

CHAPITRE III : Essai et Mesure sur un moteur PMDC sous Sim scape

III.1 Introduction

Sim scape est une extension à Simulink pour modéliser des systèmes physiques dans les domaines électriques, mécaniques, et thermiques, etc. Contrairement à Simulink, basé sur la notion de fonction de transfert ou des entrées-sorties d'un système, les composants de Sim scape sont décrits par les relations mathématiques qui relient ses grandeurs physiques.

Le système physique qui utilise des connections physiques (comme le couple ou la vitesse pour un moteur) peut être directement relié à un modèle Simulink pour le contrôle de ces signaux physiques.

Sim scape permet aussi de créer des systèmes multi-domaines (comme le moteur à courant continu avec sa partie électrique d'induit et mécanique sur lequel on peut insérer des couples d'inertie, frottements et faire des mesures de vitesse, couple, etc.).

Sim scape, est bâti autour de bibliothèques de composants propres aux applications d'électronique de puissance.

Ces bibliothèques peuvent être classées en 5 catégories :

- sources électriques de tension et de courant mono et triphasées,
- éléments comme les branches et charges RLC, les lignes de transmission et transformateurs,
- machines comme les moteurs alternatifs et à courant continu, régulateurs,
- Composants d'électronique de puissance (thyristor, IGBT, MOSFET, etc.),
- Mesures de tension, courant, multimètre, etc.

III.2 Moteur électrique à courant continu de Sim scape

Les blocs des bibliothèques de Sim scape représentent des composants tels, des résistances, transistors, moteurs, etc. Sim scape comprend plusieurs bibliothèques, telles celle relative à l'électricité, la thermique, la mécanique ou l'hydraulique.

Comme le nombre de ces blocs ne peut couvrir l'ensemble de ceux utilisés dans l'Ingénierie, Sim scape donne la possibilité à l'utilisateur de créer ses propres composants physiques à partir de ceux déjà présents dans la bibliothèque Foundation Library.

Pour cela, on utilise le langage de Sim scape avec lequel on programme les équations mathématiques régissant les signaux d'entrée et de sortie du composant.

De même, les paramètres des composants existants peuvent être paramétrés selon les besoins de l'utilisateur.

Si on prend l'exemple d'un moteur électrique à courant continu (figure III.1), en double-cliquant sur son bloc, nous avons des valeurs par défaut, comme ses paramètres électriques (résistance et self d'induit, etc.) ou mécaniques (couple résistants, etc.) que nous pouvons modifier selon l'utilisation.

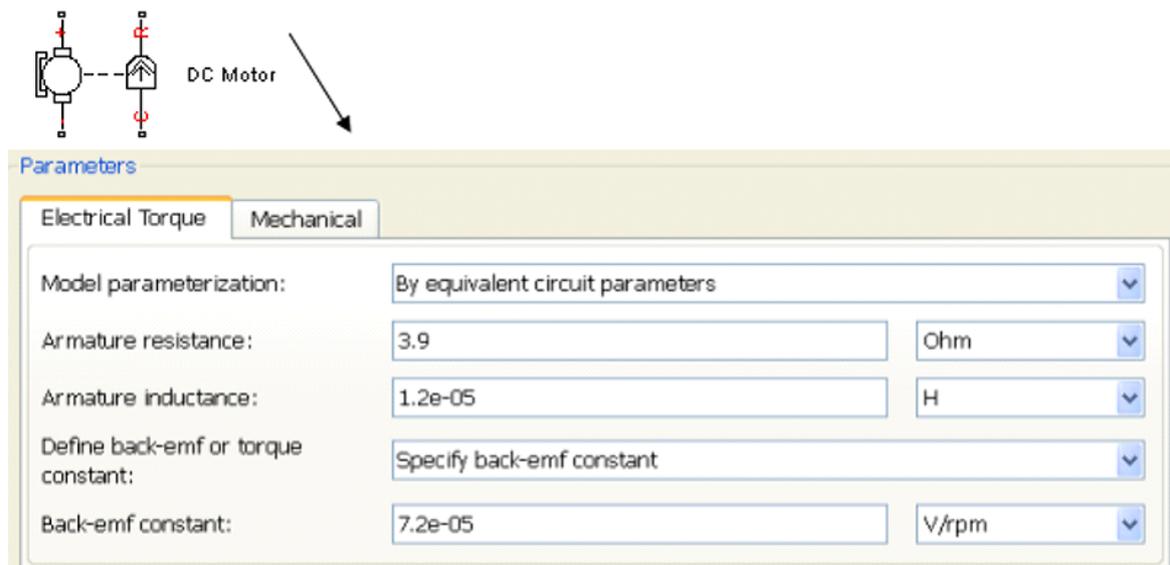


Figure III.1 : les paramètres électriques du moteur DC

Les bibliothèques de Simscape sont représentées comme suit, dans le browser de Simulink.

Nous pouvons remarquer, entre autres, 4 bibliothèques :

- SimDriveLine : systèmes de transmission (véhicule en particulier),
- SimElectronics : systèmes électroniques,
- SimHydraulics : systèmes hydrauliques,
- SimMechanics : systèmes mécaniques.

III.3 Modélisation d'un moteur à aimant permanent

Pour les moteurs à aimant permanent. Le bobinage inducteur est remplacé par un aimant en matériau ferromagnétique. Ces moteurs sont généralement utilisés en robotique (micromoteur). La miniaturisation recherchée par les concepteurs trouve dans le moteur à courant continu une solution idéale, car il présente un encombrement réduit grâce à un bon rendement.

III.3.1 Caractéristiques électriques

Dans chaque spire alimentée, il se crée une force électromotrice. On définit E la somme de toutes les forces électromotrices des spires. Cette f.é.m. est proportionnelle à la vitesse de rotation :

$$E = k_E \Omega \quad (17)$$

Avec :

- E : force électromotrice en V
- k_E : constante de vitesse en V/rd/s
- Ω : vitesse angulaire en rd/s

III.3.2 Caractéristiques mécaniques

Pour les PMDC l'induction magnétique B produite par les aimants est constante, alors le couple produit par le moteur est proportionnel au courant d'induit. Le couple électromagnétique (produit au sein du moteur) est différent du couple à l'arbre (couple mécanique utile). Pour cela il faut en déduire les couples internes de frottement pour obtenir le couple utile à l'arbre.

$$T_e = K_T I_a \quad (18)$$

Où T_e est le couple électromagnétique en Nm, la constante de couple en Nm/A, et I_a le courant d'induit en A.

En combinant l'Équation (14) et l'Équation (15), nous obtenons :

$$E(t) \cdot I_a(t) = [k_E \cdot \Omega(t)] \cdot \left[\frac{T_e(t)}{K_T} \right] = \frac{k_E}{k_T} \Omega(t) \cdot T_e(t) \quad [W] \quad (19)$$

Si le moteur fonctionne à charge et vitesse constante, sans pertes, le couple à l'arbre serait égal au couple électromagnétique, et la tension aux bornes serait égale à la tension d'induit. La

puissance mécanique serait alors égale à la puissance électrique fournie. Cela montre que, pour un moteur DC, les constantes de couple et de vitesse sont égales : $k_T = k_E = k$

Le bloc du moteur à courant continu (DC Motor,) appartient à la bibliothèque Actuators & Drivers de la librairie SimElectronics.

Dans le modèle suivant, nous appliquons à l'induit un échelon de tension de 12V via le sous-système S → V qui permet de passer d'une valeur d'un signal Simulink à une tension en Volts (valeur physique de Simscape). voir (figureIII.2)

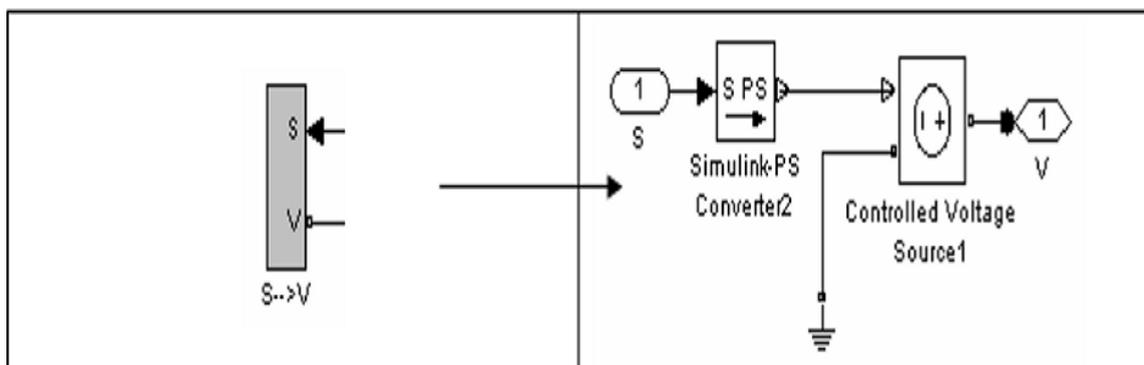


Figure III.2 : bloc du moteur DC valeur physique de Sim scape

Nous pouvons constater la différence de la forme entre les ports d'un sous-système uniquement Simulink et celui de Simscape.

Nous simulons l'entraînement du moteur (figureIII.3), qui est un système couvrant le domaine électrique et mécanique. Nous modélisons les composants physiques du système d'entraînement avec des blocs Simscape™, à les connecter dans un modèle réaliste, et à utiliser également des blocs Simulink®, puis à simuler et modifier un modèle de moteur à aimant permanent.

Le modèle est basé sur un micromoteur CC Faulhaber série 0615. Nous pouvons utiliser le modèle pour évaluer les performances du moteur dans une application donnée en ajoutant le modèle de charge mécanique requis [20].

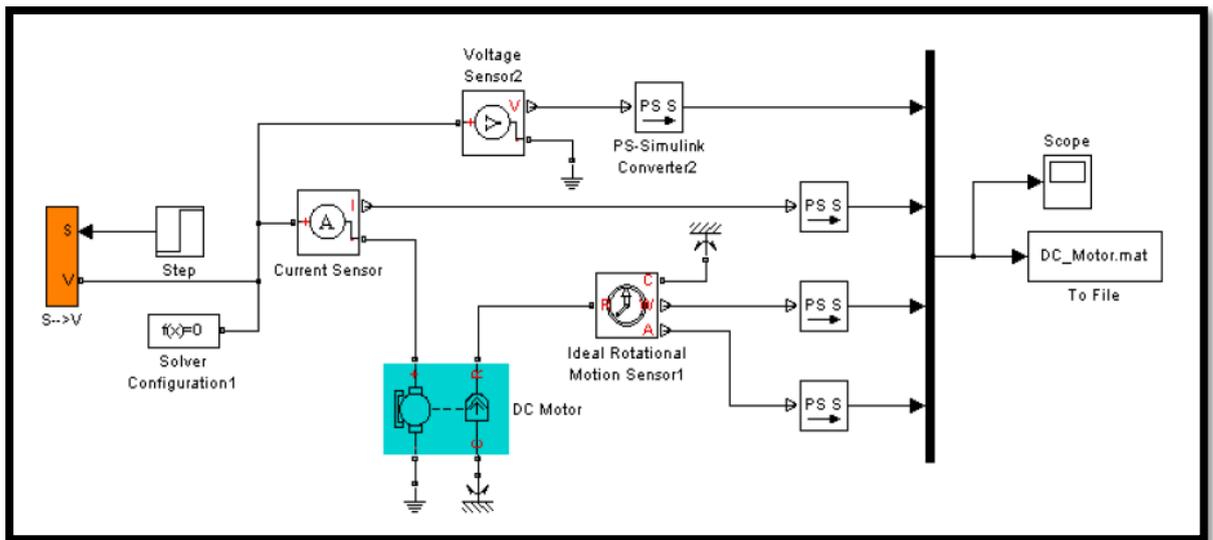


Figure III.3 : PMDC avec des blocs Sim scape

En double-cliquant sur le bloc DC Motor, la boîte de dialogue s’ouvre, dans laquelle nous pouvons introduire les paramètres physiques du moteur.

Tableau III.1 : Les paramètres de la machine

La résistance d’induit self	3.9 Ohm
Constante de la force contre-électromotrice	$7.2 \cdot 10^{-5} \text{ V/ (tr/mn)}$
L’inertie	0.01 g.cm^2
l’amortissement	$10^{-8} \text{ N.m/(rad/s)}$
La vitesse de rotation initiale	0 tr/mn
Courant à vide	0.03 A

Nous traçons la tension et le courant d’induit dans le même graphe (figureIII.4), la courbe de la vitesse angulaire et le courant d’induit en fonction du temps par les figuresIII.5et6.

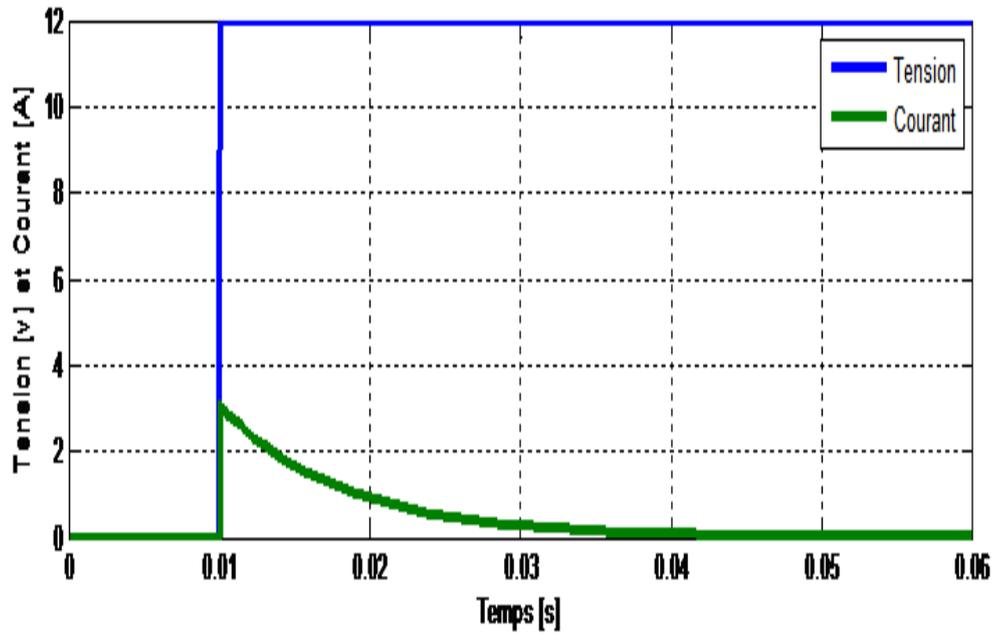


Figure III.4 : les courbes de tension et le courant en fonction du temps

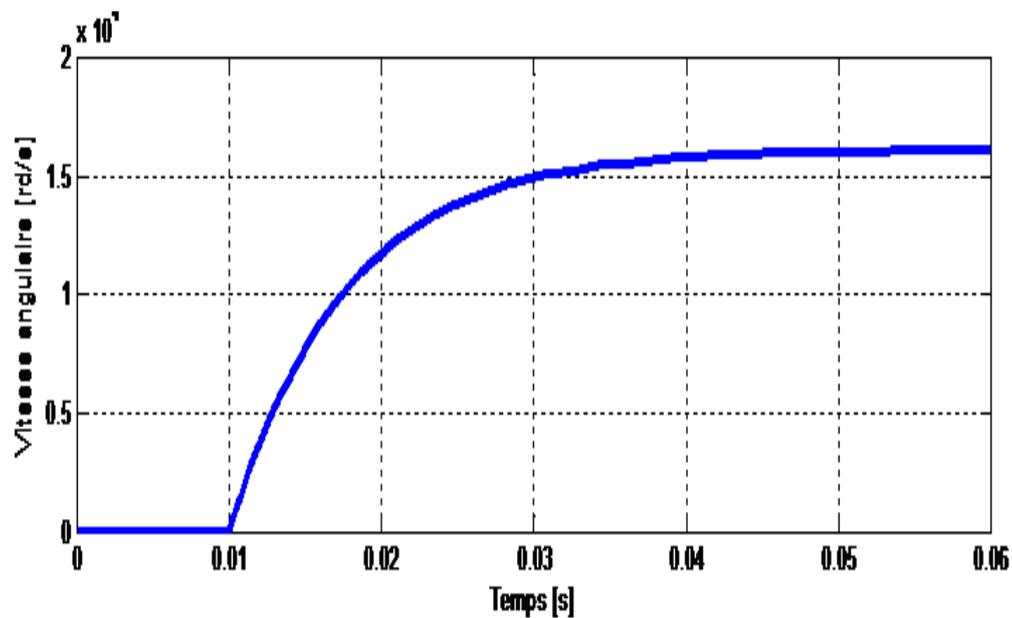


Figure III.5 : la courbe de la vitesse angulaire en fonction du temps

Nous calculons la force contre-électromotrice à la vitesse angulaire de $1.611 \cdot 10^4$ rad/s, alors E vaut :

$$E = 7.210^{-5} \cdot 1.61110^4 \cdot 60 / (2 \cdot \pi) = 11.0764 \text{ V}$$

Nous déduisons que la différence entre la tension appliquée à l'induit (12V) et la force contre électromotrice (11.0764) est dû à la chute de tension, qui est causé par la résistance ohmique de l'induit et nous pouvons introduire la résistance de contact balais-collecteur.

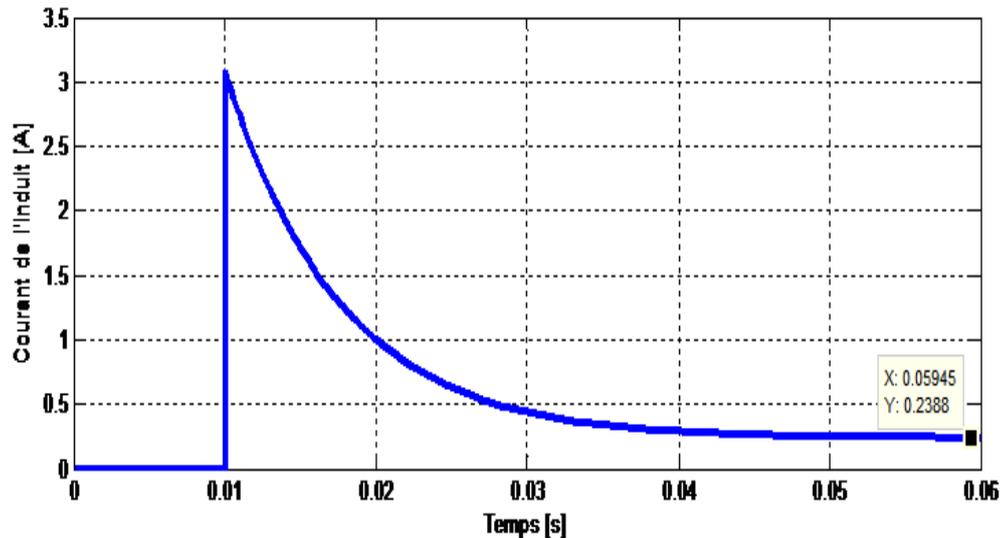


Figure III.6 : la courbe de courant l'induit en fonction du temps

D'après la courbe ci-dessus, le courant obtenu en régime établi est égal à : 0.2388 A. Nous calculons ce même courant à l'aide de l'équation (II.6) comme suit :

$$(12-E)/3.9=0.2368 \text{ A}$$

La valeur du courant d'induit analytique et mesurer sont presque égale, le modèle de Simscape donne de bon résultat.

III.3.3 Variation des moments d'inertie

Nous ajoutons sur l'arbre moteur (rotor) un moment d'inertie Motor Inertia J, de valeur 10 g.cm^2 et un couple de frottements, Friction Mr de $0.02 \cdot 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}$. Comme c'est présenté sur le circuit de la figure suivante.

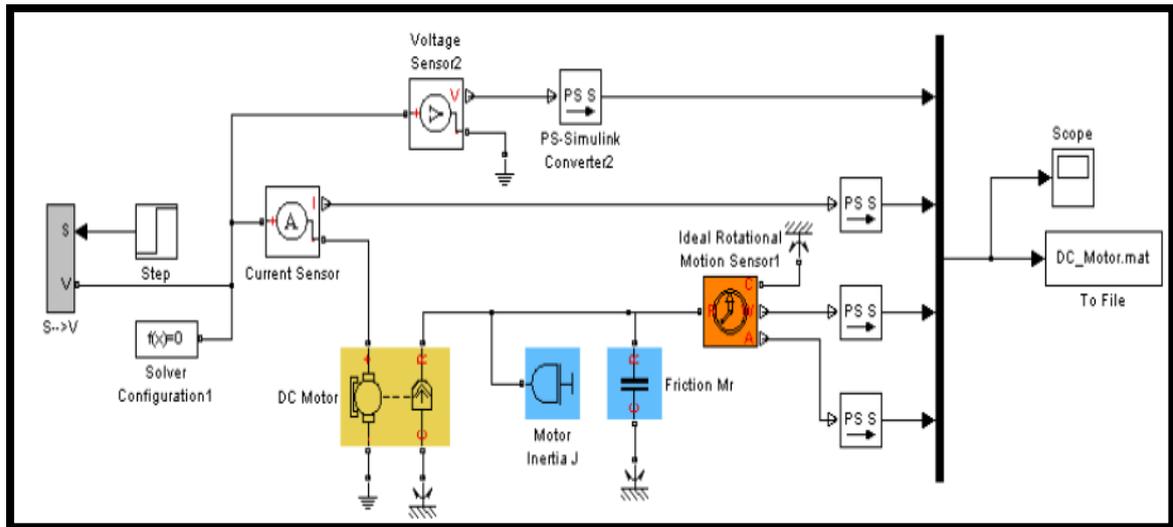


Figure III.7 : système d’entraînement sous Simscape

Nous traçons la tension et le courant d’induit dans le même graphe (FigureIII.8).

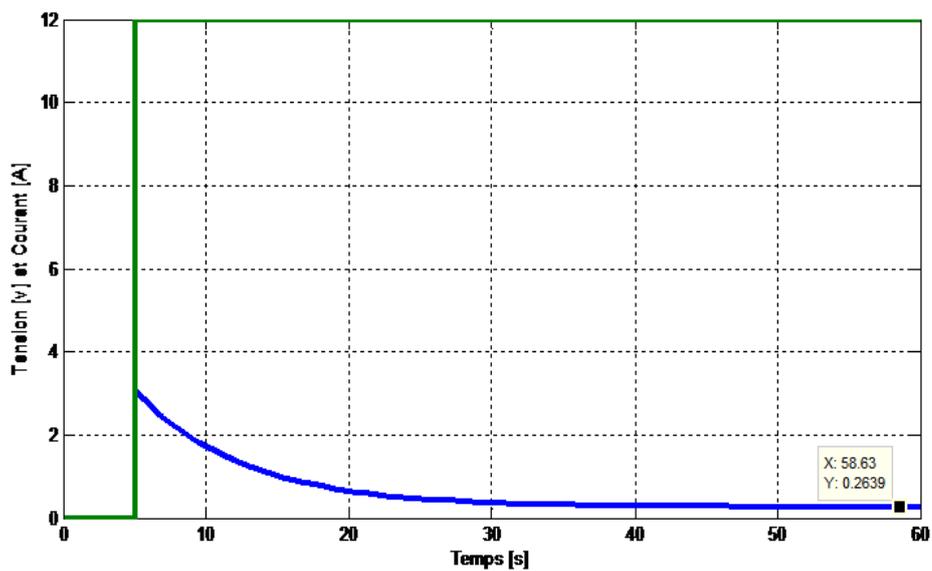


Figure III.8 : les courbes de tension et de courant en fonction du temps

Nous remarquons selon le résultat de la figure III.8 le régime permanent est obtenu en un temps plus long que précédemment dans le cas d’un moteur à vide. La valeur du courant d’induit en régime permanent est plus élevée. Ceci est à cause de la hausse des frottements et de l’inertie. Le courant d’induit diminue vers la valeur statique 0.2639 A.

III.3.4 Caractéristiques du DC moteur

Pour analyser les caractéristiques d'un moteur PMDC nous utilisons un système électromécanique. Ce modèle est basé sur un micromoteur CC Faulhaber série 0615.

Possédant les indications du tableau III.2 suivantes :

Produit	UN (V)	n0 (min ⁻¹)	T _{max} (mNm)	T _{min} (mNm)
0615N1.5S	1,5	19.100	0,24	0,17

Les valeurs des paramètres du moteur sont évalué à la tension nominal 1,5 V. nous vérifions la vitesse à vide, le courant à vide et le couple de démarrage T_{max} indiqués par le fabricant. Nous allons utiliser le modèle pour évaluer les performances du moteur en ajoutant le couple de décrochage en tant que charge à l'arbre du moteur (voir figure III.9).

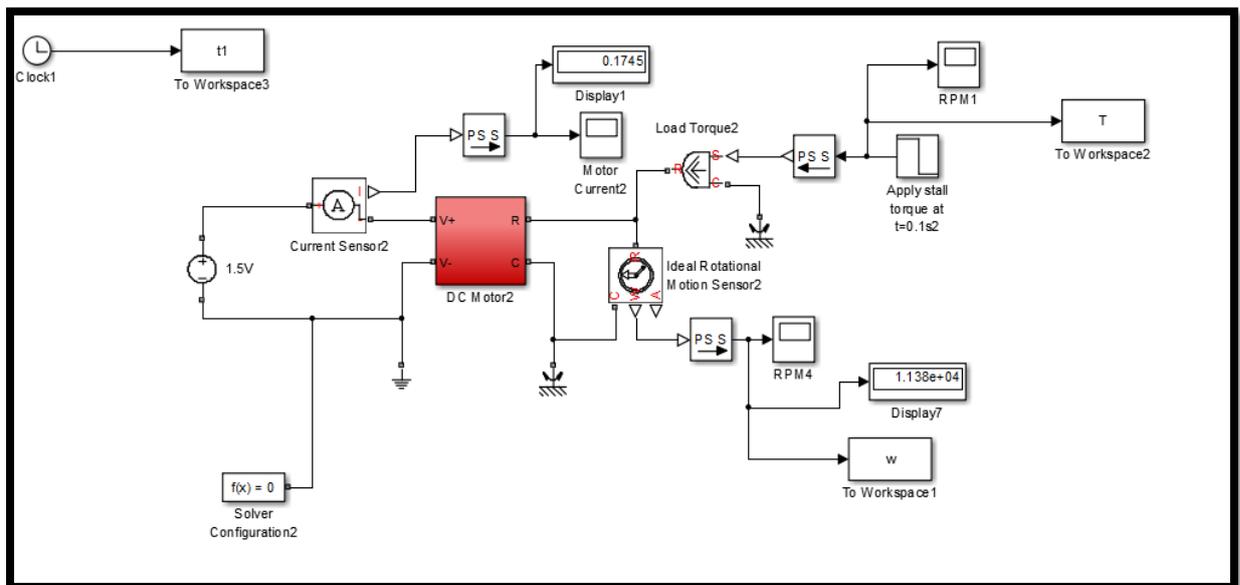


Figure III.9 : Système d'entraînement par PMDC sous Simscape

Pour un essai à vide les courbes de la vitesse, et du courant de l'induit en fonction du temps sont représentées par les figures III.10 et 11 nous constatons que la valeur de la vitesse mesurée est très proche de la valeur donné par le constructeur. Le courant de l'induit vaut : $I \cong 0.03A$. Les résultats montrent un bon niveau de concordance avec les données du constructeur.

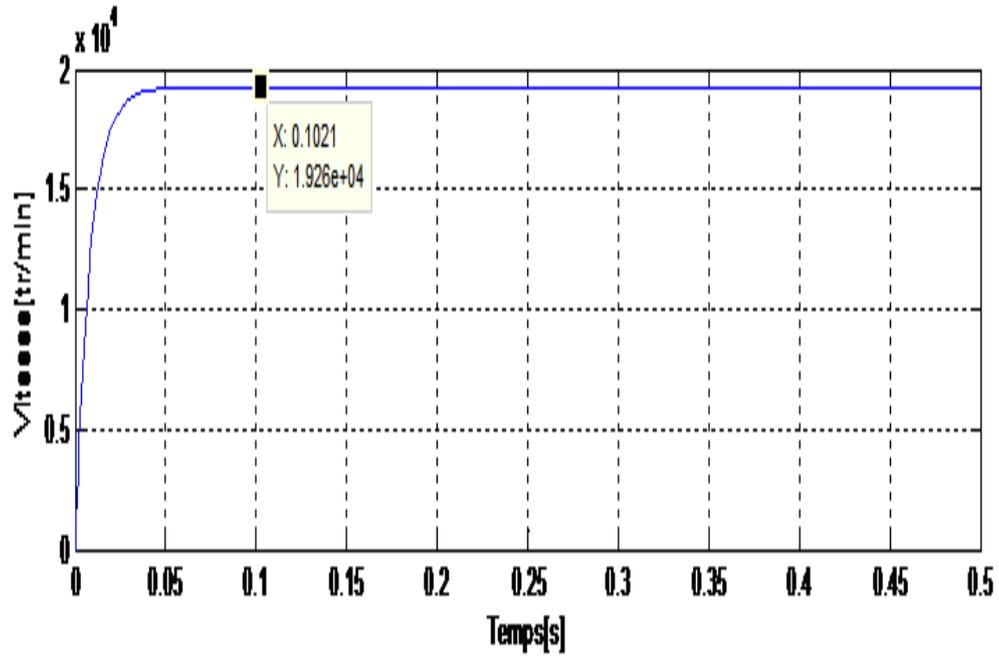


Figure III.10 : la courbe la vitesse en fonction du temps

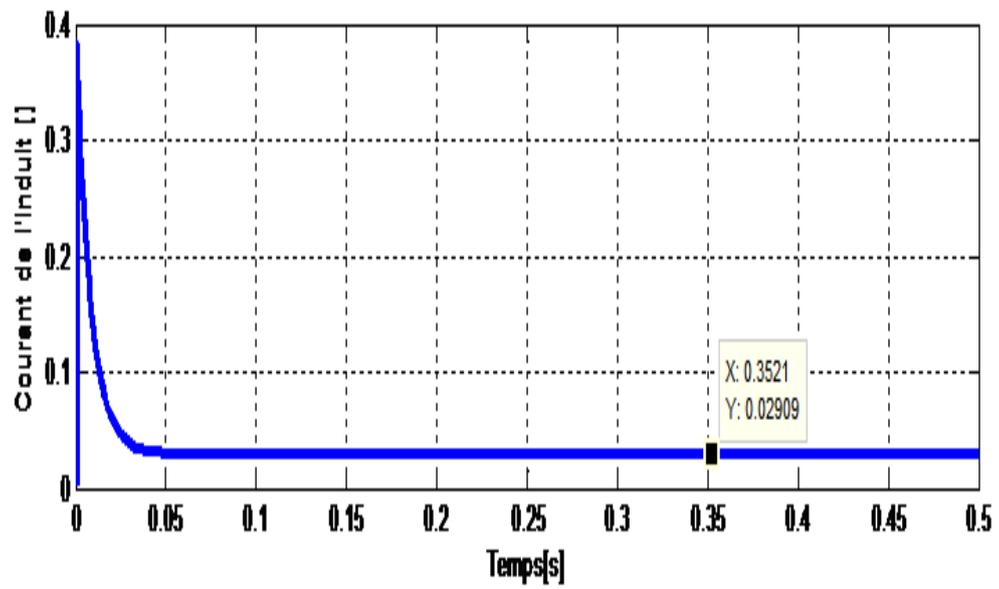


Figure III.11 : la courbe de courant de l'induit en fonction du temps

Couple de démarrage T_{max} [mNm] C'est le couple développé par le moteur à vitesse nulle (rotor bloqué) et à la tension nominale, cette valeur peut varier en fonction du type d'aimant [10]. Nous constatons selon les figures III.12.et 13 prise respectivement pour 0.24mNm et 0.25mNm que le couple de démarrage est bien 0.24 mNm.

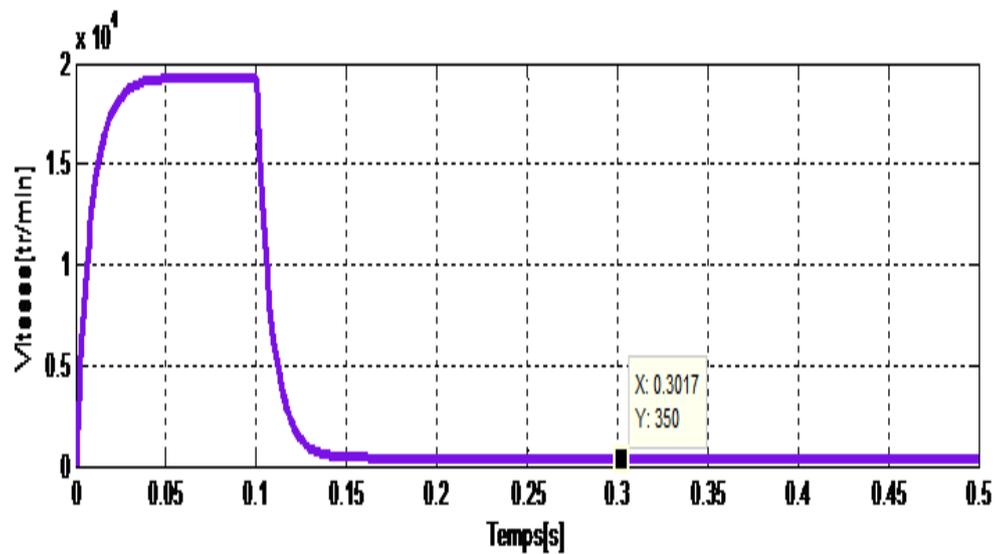


Figure III.12 : la courbe de vitesse en fonction du temps.

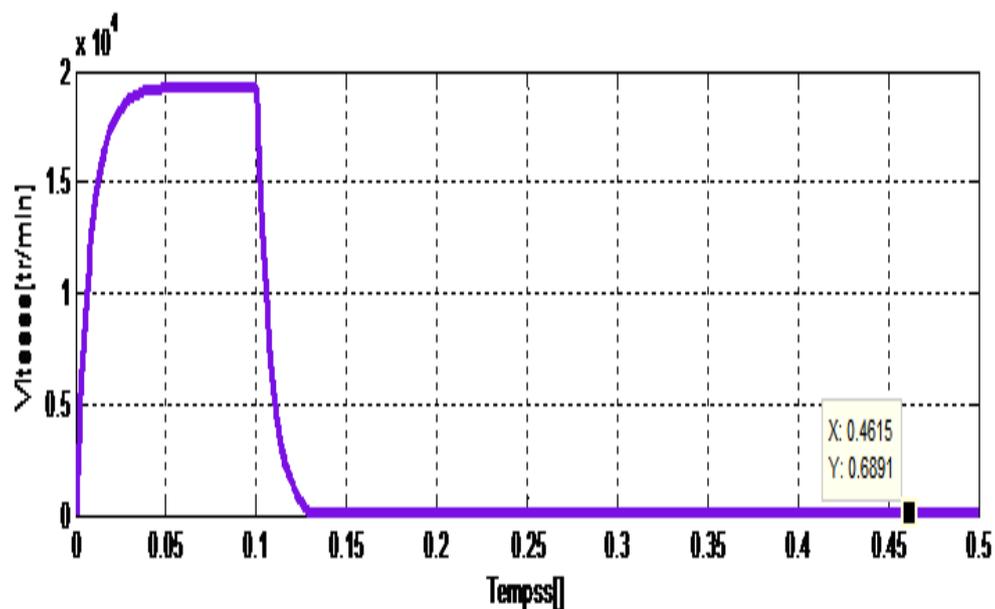


Figure III.13 : la courbe de vitesse en fonction du temps

Nous réduisons la tension d'alimentation à 1,25 volt (pour simuler la décharge de la batterie). Faire varier le couple de charge pour trouver le couple de démarrage correspond à cette tension réduite. Nous réglons le couple de charge par le sous-système : Step Input et double-clique sur le bloc source Step. Entrer différentes valeurs finales pour le signal d'entrée et relancer la simulation.

Selon la (figureIII.14) le couple de démarrage correspondant à la tension d'alimentation 1,25 volt est 0.20 mNm.

Nous validons le résultat de la simulation, en calculant le couple moteur, qui correspond à la tension d'alimentation réduite. Sachant que l'amplitude de la courbe couple-vitesse est proportionnelle à la tension pour un moteur à courant continu. Pour calculer le couple nous utilisons l'équation suivante [10] :

$$T_{max} = k_E \frac{U_n}{R} - T_R \quad (20)$$

$$T_R = k_E I_0 \quad (21)$$

T_R est le couple de frottement, c'est le couple de pertes causées par le frottement des balais, du commutateur et des paliers.

Nous calculons le couple moteur par l'équation (20) :

$$T_{max} = 7.2 \cdot 10^{-5} \frac{1.25}{3.9} - 7.2 \cdot 10^{-5} \cdot 0.03 = 0.202 \text{ mNm}$$

Nous constatons que la valeur mesurée et la valeur calculée sont très proches. Les résultats montrent un bon niveau de concordance.

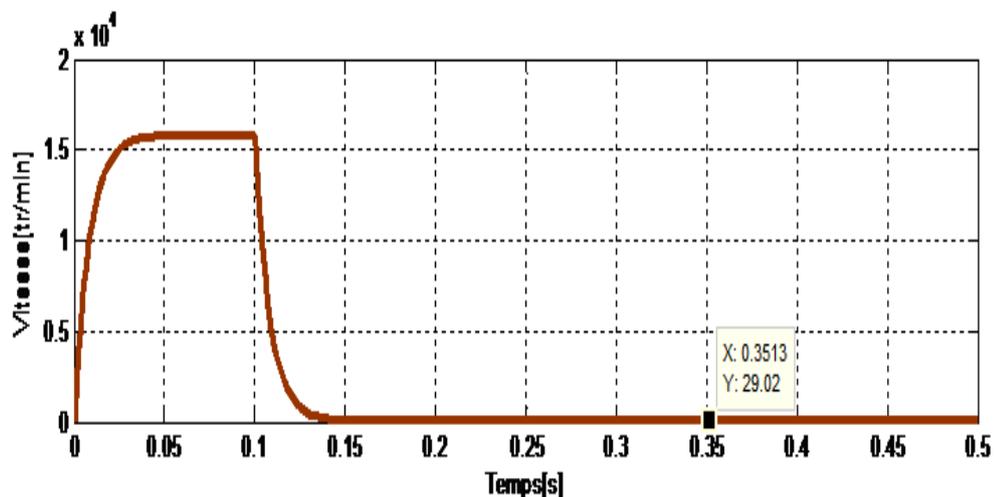


Figure III.14 : la courbe de vitesse en fonction du temps

Le moteur CC à aimant permanent entraine une charge mécanique. Nous maintenons la tension de l'induit à 1,5 V, faire varier le couple de charge, et prendre la valeur de la vitesse de rotation du moteur, ainsi que le courant de l'induit. Ensuite, nous réalisons les mêmes mesures pour une tension de l'induit de 1.25 V. Les valeurs trouvées sont données par les tableaux suivants

Tableau III.3 : Résultats de l'étude de l'effet du couple de charge sur la vitesse et le courant (1.5V)

T [Nm]	-0.1e-3	-0.15e-3	-0.2e-3	-0.25e-3
Ω [tr/min]	11380	7440	3501	0.69
I[A]	0.1745	0.2473	0.32	0.3846

Tableau III.4 Résultats de l'étude de l'effet du couple de charge sur la vitesse et le courant (1.25V)

T [Nm]	-0.1e-3	-0.15e-3	-0.2e-3	-0.25e-3
Ω [tr/min]	7907	3968	29.02	-758.8
I [A]	0.1745	0.2473	0.32	0.32

III.3.5 Caractéristique mécanique

On détermine facilement la caractéristique mécanique $T = f(\Omega)$, (figure III.15) pour la tension 1.5 V à l'aide de la commande Plot, on obtient la courbe du couple moteur en fonction de la vitesse. Pour cela, on utilise le bloc « To Work Space » pour en envoyer les résultats de simulation dans l'espace de travail Matlab ensuite nous déterminons les caractéristique mécanique pour les tensions 1.5 V et 1.25 V (figureIII.16).

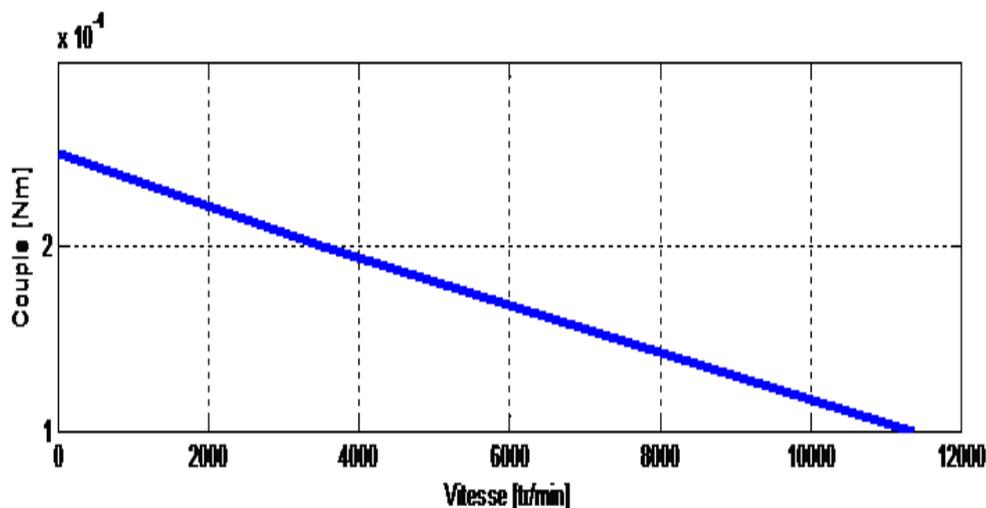


Figure III.15 : Caractéristique mécanique $C = f(\Omega)$.

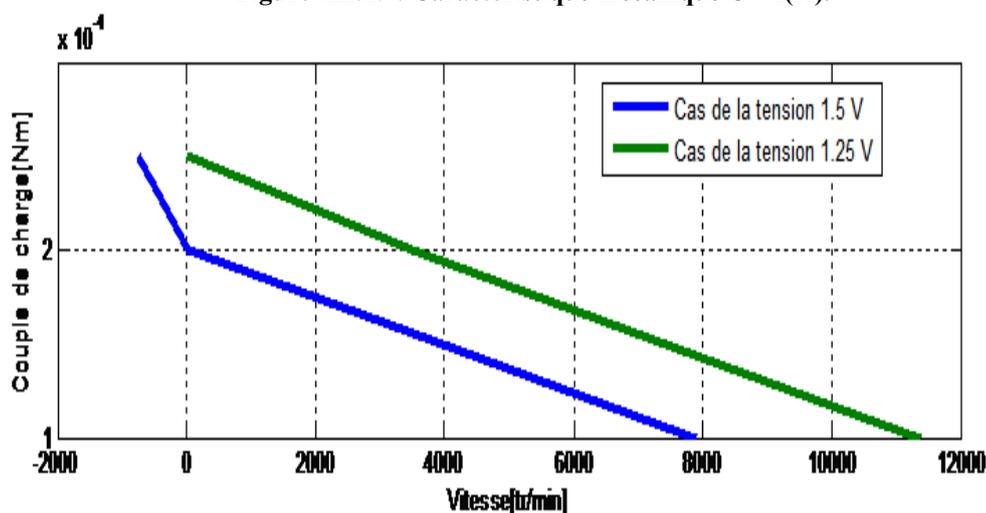


Figure III. 16 : Caractéristique mécanique $C = f(\Omega)$ pour 1.5 V et 1.25 V.

La (figure III.15) montre la variation du couple de charge en fonction de la vitesse de rotation de la MCC. On voit bien que l’augmentation de ce couple fait diminuer la vitesse de rotation pour les deux cas de tension de l’induit. Mais, le taux de diminution diffère légèrement si le couple de charge augmente à des valeurs élevées. Cela est dû à l’effet du terme résistif qui n’est pas le même pour les deux cas.

À la valeur de couple 0.25×10^{-3} mNm la vitesse est nulle, nous déduisons que c’est la valeur de couple de démarrage. À 0.1×10^{-3} mNm la vitesse de rotation du moteur est proche de la vitesse à vide. Nous déduisons que ce moteur peut entrainer une charge qui varie entre 0.1 mNm à 0.24mNm.

Pour la courbe de la figure III.16, qui correspond à 1.25 V au-delà du couple de démarrage la courbe se déforme ; parce que le moteur ne peut pas supporter ce couple qui dépasse ces capacité. Sachant que le moteur est dimensionné Selon la charge à entrainer.

III.3.6 Caractéristique électromécanique de couple

On détermine facilement la caractéristique électromécanique $C = f(I_a)$, (figureIII.17) à l'aide de la commande Plot, on obtient la courbe du couple moteur en fonction du courant d'induit. Pour cela, on utilise le bloc « To WorkSpace » pour en envoyer les résultats de simulation dans l'espace de travail Matlab.

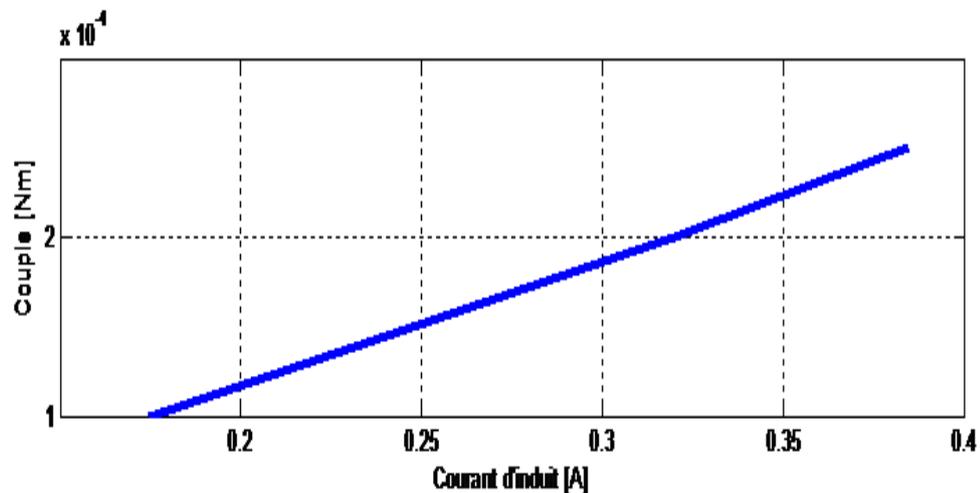


Figure III.17: la courbe de couple en fonction de courant l'induit

La figure III.17, montre la variation du couple de charge en fonction du courant d'induit de la MCC. On voit bien que l'augmentation de ce couple fait augmenter le courant de l'induit. En effet le couple de charge est proportionnel au courant de l'induit.

III.3.7 Caractéristique électromécanique de vitesse

La figureIII.18, montre la variation de la vitesse de rotation en fonction du courant d'induit $\Omega = f(I_a)$ de la MCC. On voit bien que l'augmentation de la vitesse fait diminuer le courant d'induit. Alors l'augmentation de I_a conduit vers la diminution de Ω . Selon l'équation (16) lorsque le courant varie, la vitesse varie linéairement.

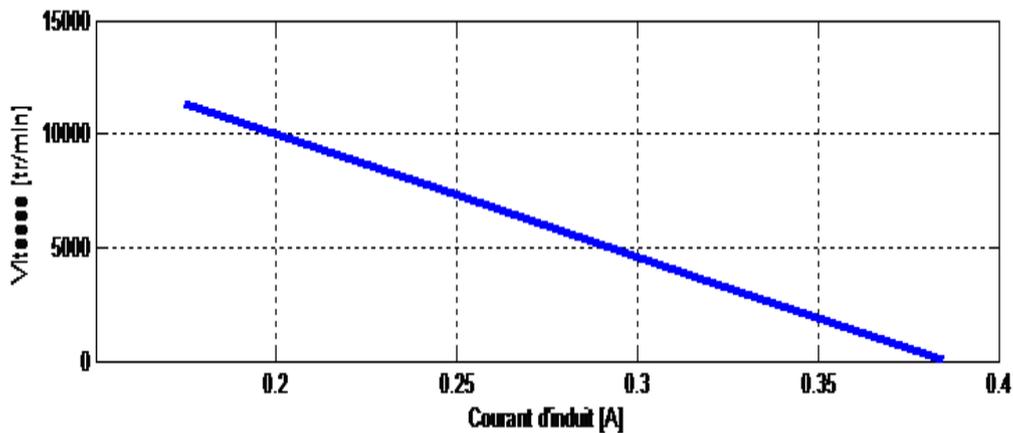


Figure III.18 : la courbe de vitesse en fonction du courant l'induit

Les résultats des courbes de la PMDC sont en concordance avec les notions théoriques et courbes présenté dans la première partie, consacrée au moteur PMDC.

II.4 Conclusion

L'utilisation d'outils de logiciels informatiques a été intégrée dans le domaine de l'ingénierie est intéressant pour avoir des compétences pratiques.

Sim scape, un langage multi domaine, est une extension de Simulink pour modéliser les systèmes électroniques, mécaniques, hydrauliques et thermiques. Simscape permet aussi de créer des systèmes multi-domaines (comme le moteur à courant continu avec sa partie électrique d'induit et mécanique sur lequel on peut insérer des couples d'inertie, frottements et faire des mesures de vitesse, couple, etc.) [7].

Nous avons choisis de simuler notre système en temps réel, car dans la simulation en temps réel, les entrées et sorties du monde virtuel de simulation sont lues ou mises à jour de manière synchrone avec le monde réel. Lorsque le temps de simulation atteint 5, 50 ou 500 secondes, exactement le même temps s'est écoulé dans le monde réel. La simulation en temps réel, permet une exécution en temps réel et fournit des résultats suffisamment proches des résultats obtenus à partir de la simulation de bureau [20].

Le remplacement d'appareils physiques, tels que des moteurs, résistances, et des bobines par des appareils virtuels peut nous offrir des essais proche du réelle, sachant que le moteur est dimensionner selon la charge à entraîner.

Les résultats de simulation ont montré que les courbes des Caractéristiques mécanique, électromécanique, et électromagnétique sont en concordance avec les notions théoriques et courbes présenté dans la première partie, consacrée au moteur PMDC.

Conclusion général

L'avantage principal, qui a fait le succès 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. Ce type de moteur reste intéressant dans tous les systèmes « embarqués » car ils sont équipés de batteries.

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.

L'utilisation d'outils de logiciels informatiques a été intégrée dans le domaine de l'ingénierie est intéressant pour avoir des compétences pratiques. Nous avons choisis de simuler notre système en temps réel, car dans la simulation en temps réel, les entrées et sorties du monde virtuel de simulation sont lues ou mises à jour de manière synchrone avec le monde réel.

Les résultats de simulation ont montré que les courbes des Caractéristiques mécanique, électromécanique, et électromagnétique sont en concordance avec les notions théoriques et courbes présenté dans la première partie, consacrée au moteur PMDC.

Finalement, comme perspective nous recommandons la poursuite des recherches sur le moteur PMDC, ou des modifications par rapport au moteur conventionnel est nécessaire pour réduire ou éliminer les inconvénients du collecteur. Aussi, l'étude des nouvelles marques de moteur PMDC, et l'intégration du moteur à une fonction de domaine.

Référence bibliographique

Référence bibliographique

- [1] Ouari Ahmed, Cour Machine A Courant Continu, Université Badji Mokhtar Annaba, 2020
- [2] Bernard Multon, Hamid Ben Ahmed, Nicolas Bernard, Pierre-Emmanuel Cavarec, Les Moteurs Electriques Pour Application De Grande Serie, Antenne De Bretagne De L'école Normale Supérieure De Cachan, Revue 3ei Juin 2000
- [3] [Https://Harmonicdrive.De/Fr/Glossaire/Moteur-Dc](https://Harmonicdrive.De/Fr/Glossaire/Moteur-Dc)
- [4] [Https://Fr.Jf-Parede.Pt/What-Is-Dc-Motor-Basics](https://Fr.Jf-Parede.Pt/What-Is-Dc-Motor-Basics).
- [5] Bernard Schneider. Motorisation Et Commande Des Machines. Heig-Vd., 2011
- [6] Direcindustry.Fr Site Internet
- [7] Michel Pinard, La Commande Electrique Des Machines, Livre, Paris 2013
- [8] Karim Guerrida Brahim Siradj Etude D'une Machine A Courant Continu Maintenance, Entretien Et Contrôle, Univ. Ghardaïa, 2019
- [9] [Https://Www.Axesindustries.Com/](https://Www.Axesindustries.Com/)
- [10] Faulhaber F. (2021).Faulhaber. Information Techniques
- [11] [Https://Illustrationprize.Com/Fr/551-Permanent-Magnet-Dc-Motor.Html](https://Illustrationprize.Com/Fr/551-Permanent-Magnet-Dc-Motor.Html)
- [12] Aurélien Vauquelin, Contribution A L'amélioration Des Performances Des Machines A Courant Continu A Aimants Permanents Dans Des Applications Automobiles A Forts Courants, Thèse De Doctorat, 2010
- [13] Benbott Samir Merouani Moustapha, Étude De Vibration Et Bruit D'un Moteur A Aimant Permanent, Master, 2012
- [14] Portescap (Www.Portescap.Com) Et Abb (Www.Abb.Ch)
- [15] Walter Fendt (D) – Www.Walter-Fendt.De
- [16] [Https://Pmb-Int.Univ-Temouchent.Edu.Dz/Memoire/](https://Pmb-Int.Univ-Temouchent.Edu.Dz/Memoire/)
- [17] [Http://Elharzli.Com/Structuremcc.Php](http://Elharzli.Com/Structuremcc.Php)
- [18] [Https://Green.Univ-Lorraine.Fr/Fr/Recherche/Themes-Scientifiques/Applications-Des-Supraconducteurs-En-Genie-Electrique/Moteur](https://Green.Univ-Lorraine.Fr/Fr/Recherche/Themes-Scientifiques/Applications-Des-Supraconducteurs-En-Genie-Electrique/Moteur)
- [19] [Https://Www.Electricaleasy.Com/2014/12/Permanent-Magnet-Dc-Pmdc-Motors.Html](https://Www.Electricaleasy.Com/2014/12/Permanent-Magnet-Dc-Pmdc-Motors.Html)
- [20] [Https://Fr.Mathworks.Com/Help/Physmod/Simscape/Ug/Permanent-Magnet-Dc-Motor.Html](https://Fr.Mathworks.Com/Help/Physmod/Simscape/Ug/Permanent-Magnet-Dc-Motor.Html)

تلخيص

لا يزال محرك التيار المباشر قابلاً للاستخدام في العديد من التطبيقات، على الرغم من المشكلة الرئيسية التي تظهر على مستوى الاتصال بين الفرشاة أو "الكربون" والمبدل الدوار. تُستخدم محركات المغناطيس الدائم لتطبيقات الطاقة المنخفضة (أقل من ~20 وات)، ويرجع ذلك أساسًا إلى أن دائرة الطاقة الخاصة بهم سهلة البناء.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو التقييم عن طريق المحاكاة في إطار Simscape لأداء محرك دقيق DC ذو مغناطيس دائم من ماركة Faulhaber، ودراسة هذه الخصائص.

أظهرت نتائج المحاكاة على برنامج MATLAB / Simscape أن مقعد اختبار Simscape فعال للغاية لدراسة المحركات الكهربائية. وبذلك يتم إعداد الطلاب لأحدث التطورات والمتطلبات الصناعية الحقيقية.

كلمات مفتاحية: محرك التيار المستمر، النمذجة بواسطة Simscape، خاصية سرعة عزم الدوران.

Résumé

Le moteur à courant continu est toujours utilisable dans de nombreuses applications, malgré le principal problème qui se pose au niveau de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. Les moteurs à aimants permanent sont utilisés pour les applications de faible puissance (moins de ~20 W), surtout parce que leur circuit d'alimentation est simple à réaliser.

L'objectif principal de ce travail, est l'évaluation par simulation sous Simscape les performances d'un micromoteur CC à aimant permanent de la marque Faulhaber, et l'étude de ces caractéristiques.

Les résultats de simulation sur logiciel MATLAB/Simscape ont montré que un banc d'essais de Simscape est ultra-performant pour l'étude des entraînements électriques. Les étudiants sont ainsi préparés aux tout derniers développements et aux exigences industrielles réelles.

Mots clés : moteur à courant continu, modélisation par Simscape, caractéristique couple-vitesse.

Abstract

The direct current motor is still usable in many applications, despite the main problem, which arises at the level of the connection between the brushes, or "carbons" and the rotary commutator. Permanent magnet motors are used for low power applications (less than ~20 W), mainly because their power circuit is simple to build.

The main objective of this work is the evaluation by simulation under Simscape of the performance of Faulhaber permanent magnet DC micromotor, and the study of these characteristics.

Simulation results on MATLAB/Simscape software have shown that a Simscape test bench is ultra-efficient for the study of electrical drives. Students are thus prepared for the latest developments and real industrial requirements.

Keywords: DC motor, SIMSCAPETM simulation, torque-speed characteristic.