

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIEL

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Modélisation et simulation des machines à courant continu**

Présenté par : TOUATI INES  
AOUFI AYA

Encadrant : AZIZI AMINA

MCB

badji mokhtar annaba

### Jury de Soutenance :

Ncaibia saleh	MCB	Badji mokhtar annaba	Président
Azizi Amina	MCB	Badji mokhtar annaba	Encadrant
Kahoul Nabil	MCA	Badji mokhtar annaba	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

## *Remerciements*

Louange à DIEU le très grand et miséricordieux, le seul et unique qui nous a donné la volonté, la patience et le courage pour terminer nos études et élaborer ce travail.

Avant de commencer la présentation de ce travail, Nous profitons de l'occasion pour remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Nous tenons à exprimer nos vifs et profondes remerciements à notre encadrante Mme **Azizi Amina** qui nous a proposée ce sujet. Nous la remercions pour ses précieux conseils, ses remarques pertinentes et son encouragement et surtout pour nous avoir laissé une grande liberté dans la conception et la rédaction de ce travail.

Nous tenons à gratifier aussi les membres de jury Ms **N.Kahoul** et Ms **S.Ncaibia** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous nos enseignants ainsi que toutes les personnes qui nous ont soutenus au cours de notre cursus universitaire, et qui ne cessent de nous donner conseils et encouragements.

# *Dédicace*

Pour mes parents qui m'ont soutenue et encadré jusqu'à ce jour.

Pour toute ma famille.

Pour toute personne que j'ai connue lors de mon bref passage à l'université.

Pour vous tous je dédie ce modeste travail.

Merci mille fois pour votre gentillesse, votre compétence et votre

Compréhension.

A ceux et celles que j'admire et j'apprécie, ceux et celles qui m'ont montré la

fraternité au vrai sens du terme : Mes frères.

A tous ceux qui m'ont aidé afin de réaliser ce travail.

Tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous sommes là aujourd'hui

c'est bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous.

*Aoufi Aya*

# *Dédicace*

Pour mes parents qui m'ont soutenue et encadré jusqu'à ce jour.

Pour toute ma famille.

Pour toute personne que j'ai connue lors de mon bref passage à l'université.

Pour vous tous je dédie ce modeste travail.

Merci mille fois pour votre gentillesse, votre compétence et votre

Compréhension.

A ceux et celles que j'admire et j'apprécie, ceux et celles qui m'ont montré la

fraternité au vrai sens du terme : Mes sœurs.

A tous ceux qui m'ont aidé afin de réaliser ce travail.

Tous les professeurs qui nous ont enseigné car si nous sommes là aujourd'hui

c'est bien grâce à vous tous, donc un grand merci pour vous.

*Touati Ines*

## *sommaire*

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I: généralités sur la machine à courant continu .....</b>	<b>2</b>
I.1.Introduction.....	3
I.2.Définition de la machine à courant continu.....	3
I.3.Constitution de la machine à courant continu .....	3
I.3.1. Inducteur : .....	4
I.3.2. Induit:.....	5
I.3.3. Collecteur et balais:.....	5
I.4. Types des machines a courant continu:.....	6
I.5. Principe de fonctionnement :.....	7
I.5.1Fonctionnement en génératrice:.....	8
a. Fonctionnement à vide.....	8
b. Fonctionnement sur charge résistive .....	10
c. Point de fonctionnement sur charge résistive.....	11
d. Bilan des puissances d'une génératrice :.....	11
I.5.2 Fonctionnement en moteur :.....	12
a. Fonctionnement en charge .....	12
b. Plaque signalétique du moteur .....	13
c. Bilan des puissances d'un moteur: .....	14
d. Essai à vide : .....	15
e. Essai en charge.....	15
f. Point de fonctionnement:.....	15
g. Le risque d'emballement du moteur:.....	16
I.6.Différents types d'excitation de moteur à courant continu: .....	16
I.6.1. Moteur à excitation série:.....	16
a. Caractéristiques:.....	17
b. Domaine d'utilisation: .....	17
I.6.2.Moteur à excitation shunt:.....	17
a. Caractéristiques:.....	18
b. Domaine d'utilisation: .....	19
I.6.3.Moteur à excitation séparée.....	19
a. Caractéristiques:.....	19
b. Domaines d'utilisation:.....	20
I.6.4. Moteur à excitation composée (compound): .....	20
I.6.4.1. Moteur compound à flux additif: .....	20

I.6.4.2. Moteur compound à flux soustractif:.....	21
I.7. Différents mode de réglage de la vitesse:.....	22
I.7.1 Réglage rhéostatique:.....	23
I.7.2 Réglage par variation de la tension d'induit:.....	23
I.7.3 Réglage par variation du flux d'excitation:.....	23
I.9. Conclusion.....	24
<b>Chapitre II: Modélisation de la machine à courant continu.....</b>	<b>25</b>
II.1 Introduction:.....	26
II.2. Description de la machine à courant continu .....	26
II.3. Equations de la machine à courant continu:.....	26
II.3.1 Equations électriques :.....	28
II.3.2 Equations électromécaniques .....	28
II.3.3. Equation mécanique .....	28
II.4. Transformées de Laplace :.....	29
II.5. Modèle de la machine à courant continu sur les axes d,q.....	29
II.5.1. Equation des tensions .....	30
II.5.2Equation des flux.....	30
II.5.3 Expression du couple électromagnétique.....	32
II.5.4 Equation du mouvement .....	32
II.7. simulation de la MCC sous Matlab Simulink : .....	33
a. dans l'état statique :.....	33
b. Dans l'état dynamique :.....	34
Résultats : .....	35
Conclusion :.....	36
<b>Chapitre III : Commande des machines à courant continu.....</b>	<b>37</b>
III.1. Introduction : .....	38
III.2. L'asservissement.....	38
III.3. La Régulation.....	38
III.4. Types de régulation industrielle.....	39
III.5. Régulateurs .....	39
a>Action proportionnelle (Régulateur P).....	40
b.Action Intégrale (Régulateur I).....	40
c.Action dérivée (Régulateur D).....	41
d.correcteur proportionnelle et intégrale (Régulateur PI).....	41
e.correcteur proportionnelle et dérivée (Régulateur PD) .....	42
f.correcteur proportionnelle, intégrale et dérivée (Régulateur PID) : .....	43
III.6. Choix et dimensionnement des régulateurs: .....	44
A) Critère méplat : .....	44

B) Critère sur la réponse harmonique symétrique: .....	45
III.7.LA LOGIQUE FLOUE : .....	45
III.8. Historique : .....	46
III.9. Fuzzification : .....	46
III.10. le mécanisme d'inférence : .....	47
III.11. Défuzzification :.....	48
III.11.1. Méthode de la moyenne des maxima (MOM): .....	48
III.11.2.La méthode des centres de gravité "centroïde"(COG) :.....	48
III.12. Les avantages et les inconvénients de la commande floue: .....	49
III.13. Les domaines d'applications de la logique floue :.....	49
III.13. Résultat et discussion : .....	50
Interprétation: .....	54
III.14.Conclusion :.....	55
<b>Chapitre IV: La maintenance de la machine à courant continu .....</b>	<b>56</b>
IV .1. Introduction .....	57
IV.2 .Définition de la maintenance :.....	57
IV.3 .Méthode de maintenance :.....	57
IV.3.1 Maintenance préventive: .....	58
IV.3.2. La maintenance corrective :.....	59
IV.4 .La maintenance de la machine à courant continu .....	60
IV.5. Incidents de fonctionnement.....	61
IV.6.Conclusion :.....	62
Conclusion générale :.....	63

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Application, avantage et inconvénient d'un MCC.....	6
<b>Tableau I.2</b> : caractéristique de la plaque signalétique d'un moteur.....	14
<b>Tableau III.1</b> : Les coefficients des régulateurs selon le critère méplat.....	44
<b>Tableau III.2</b> : Les coefficients des régulateurs selon le critère symétrique.....	45
<b>Tableau III.3</b> : Synthèse des différentes méthodes d'inférences .....	47
<b>Tableau III.4</b> : Table des règles floue pour la sortie id (Contrôleur1).....	52
<b>Tableau III.5</b> : Table des règles floue pour la sortie id (Contrôleur5).....	53
<b>Tableau III.6</b> : Table des règles floue pour la sortie id (Contrôleur7).....	54
<b>Tableau IV.1</b> : Incidents de fonctionnement de MCC.....	61

## *Liste des figures*

### **Chapitre1 : généralités sur la machine à courant continu.**

<b>Figure I.1</b> : schéma général de la machine à courant continu.....	3
<b>Figure I.2</b> : constitution de la machine à courant continu.....	4
<b>Figure I.3</b> : Inducteur à aimant permanents.....	4
<b>Figure I.4</b> : Inducteur bobiné.....	5
<b>Figure I.5</b> : Induit.....	5
<b>Figure I.6</b> : collecteur.....	5
<b>Figure I.7</b> : les balais.....	6
<b>Figure I.8</b> : Mode de fonctionnement .....	6
<b>Figure I.9</b> : Principe de fonctionnement de MCC.....	7
<b>Figure I.10</b> : principe des trois doigts.....	7
<b>Figure I.11</b> : Fonctionnement d'une génératrice à vide.....	9
<b>Figure I.12</b> : Modèle équivalent d'une génératrice à vide.....	9
<b>Figure I.13</b> : Caractéristiques $E=f(I_e)$ .....	9
<b>Figure I.14</b> : Fonctionnement d'une génératrice en charge.....	10
<b>Figure I.15</b> : Modèle équivalent de l'induit de la génératrice.....	10
<b>Figure I.16</b> : Point de fonctionnement sur charge résistive.....	11
<b>Figure I.17</b> : Bilan des puissances d'une génératrice.....	12
<b>Figure I.18</b> : Fonctionnement d'un moteur en charge.....	12
<b>Figure I.19</b> : Caractéristique mécanique.....	13

<b>Figure I.20:</b> Plaque signalétique du moteur .....	14
<b>Figure I.21:</b> Bilan des puissance d'un moteur.....	14
<b>Figure I.22:</b> essai en charge.....	15
<b>Figure I.23:</b> Point de fonctionnement d'un moteur.....	15
<b>Figure I.24:</b> moteur à excitation série.....	16
<b>Figure I.25:</b> caractéristiques de la machine à excitation série.....	17
<b>Figure I.26:</b> Moteur à excitation shunt.....	18
<b>Figure I.27:</b> caractéristique de la machine à excitation shunt .....	19
<b>Figure I.28:</b> Moteur à excitation séparée.....	19
<b>Figure I.29:</b> caractéristique du moteur à excitation séparée.....	20
<b>Figure I.30:</b> Schéma électrique du moteur compound à flux additif.....	20
<b>Figure I.31:</b> caractéristique du moteur composé à flux additif.....	21
<b>Figure I.32:</b> schéma électrique du moteur compound à flux soustractif.....	21
<b>Figure I.33:</b> caractéristique du moteur composée à flux soustractif.....	22
<b>Figure I.34:</b> variation de la vitesse par la tension d'induit.....	23
<b>Figure I.35:</b> Variation de la vitesse par flux d'excitation.....	23

## **Chapitre II : Modélisation de la machine à courant continu**

<b>Figure II.1:</b> schéma électrique du moteur à excitation séparée.....	26
<b>Figure II.2:</b> Schéma d'un entraînement avec une MCC à excitation indépendante.....	27
<b>Figure II.3:</b> Représentation de la MCC sur les axes d et q.....	30
<b>Figure II.4:</b> Modèle par transformer de Laplace sous Matlab Sumilink.....	33
<b>Figure II.5:</b> Figure modèle directe sous Matlab Sumilink.....	34
<b>Figure II.6:</b> Modèle dans l'axe d,q sous Matlab Sumilink .....	34
<b>Figure II.7:</b> Courant A vide .....	35
<b>Figure II.8:</b> Vitesse a vide.....	35
<b>Figure II.9:</b> Courant en charge.....	36
<b>Figure II.10:</b> Vitesse en charge.....	36

### **Chapitre III : Commande des machines à courant continu**

<b>Figure III.1 :</b> Modèle général d'un système.....	38
<b>Figure III.2:</b> Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.....	39
<b>Figure III.3:</b> Régulateur P.....	40
<b>Figure.III.4:</b> Régulateur I.....	40
<b>Figure.III.5:</b> Régulateur D.....	41
<b>Figure III.6:</b> Régulateur P.....	41
<b>Figure III.7:</b> Régulateur PD.....	42
<b>Figure.III.8:</b> Régulateur PID.....	43
<b>Figure III.9:</b> Méthode de la moyenne des maxima.....	48
<b>Figure III.10:</b> Schéma bloc d'un MCC régulé par un PID.....	50
<b>Figure III.11:</b> caractéristique de vitesse d'un MCC régulé par un PID.....	50
<b>Figure III.12:</b> bloc de la commande en vitesse d'un moteur à courant continu par RLF.....	51
<b>Figure III.13:</b> Fonction d'appartenance pour $\mu_{\text{v}}$ (forme triangulaire).....	51
<b>Figure III.14:</b> Fonction d'appartenance pour $\mu_{\text{v}}$ de (forme gaussienne).....	51
<b>Fig.III.15:</b> Fonction d'appartenance pour $\mu_{\text{v}}$ id (forme trapézoïdale).....	52
<b>Figure III.16 :</b> Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 3..	53
<b>Figure III.17:</b> Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 5...	53
<b>Figure III.18:</b> Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 7...	54

### **Chapitre IV: La maintenance de la machine à courant continu**

<b>Figure IV.1.:</b> Les méthodes de maintenance.....	57
---	----

## Résumé

Cette thèse explore la modélisation et la simulation d'une machine à courant continu (CC), visant à améliorer la compréhension de son comportement dynamique et à optimiser son utilisation dans divers contextes industriels .et sur le contrôle de la vitesse en utilisant deux approches distinctes : les contrôleurs PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) et la logique floue. Les objectifs principaux sont d'analyser les performances de chaque méthode, de comparer leur efficacité et de proposer des améliorations pour une commande optimale des machines à courant continu. Les résultats montrent que le modèle développé permet de prédire avec précision le comportement Le contrôleur PID offre une bonne performance de régulation de la vitesse avec des paramètres bien ajustés, mais peut montrer des limitations en présence de non-linéarités ou de perturbations importantes. Le contrôleur à logique floue présente une meilleure capacité d'adaptation aux variations de charge et aux perturbations, fournissant une réponse plus lisse et stable comparée au PID classique. La maintenance des machines à courant continu (MCC) est essentielle pour assurer leur bon fonctionnement, prolonger leur durée de vie et prévenir les pannes

Mots clés : MCC ,régulateur flou , régulateur PID,maintenance.

## المخلص

تستكشف هذه الأطروحة نمذجة ومحاكاة آلة التيار المباشر (DC)، بهدف تحسين فهم سلوكها الديناميكي وتحسين استخدامها في السياقات الصناعية المختلفة وفي التحكم في السرعة باستخدام طريقتين متميزتين: PID (المشتق المتناسب والتكاملي) وحدات التحكم والمنطق الغامض. وتتمثل الأهداف الرئيسية في تحليل أداء كل طريقة، ومقارنة كفاءتها واقتراح تحسينات للتحكم الأمثل في أجهزة التيار المستمر. أظهرت النتائج أن النموذج المطور يمكنه التنبؤ بدقة بالسلوك، حيث يوفر جهاز التحكم PID أداءً جيداً في تنظيم السرعة مع معلمات مضبوطة جيداً، ولكنه يمكن أن يظهر قيوداً في حالة وجود عدم خطية أو اضطرابات كبيرة. تتمتع وحدة التحكم المنطقية المضبوطة بقدرة أفضل على التكيف مع اختلافات التحميل والاضطرابات، مما يوفر استجابة أكثر سلاسة واستقراراً مقارنة بوحدة التحكم PID التقليدية. تعد صيانة آلات التيار المباشر (DCM) أمراً ضرورياً لضمان التشغيل السليم لها وإطالة عمرها.

الكلمات المفتاحية : MCC، المتحكم الغامض، المتحكم PID

## **Abstract:**

This thesis explores the modeling and simulation of a direct current (DC) machine, aiming to improve the understanding of its dynamic behavior and optimize its use in various industrial contexts. and on speed control using two distinct approaches : PID (Proportional-Integral-Derivative) controllers and fuzzy logic. The main objectives are to analyze the performance of each method, compare their efficiency and propose improvements for optimal control of DC machines. The results show that the developed model can accurately predict the behavior. The PID controller offers good speed regulation performance with well-adjusted parameters, but can show limitations in the presence of non-linearities or significant disturbances. The fuzzy logic controller has a better ability to adapt to load variations and disturbances, providing a smoother and more stable response compared to conventional PID. Maintenance of direct current machines (DCM) is essential to ensure their proper operation, extend their lifespan and prevent breakdowns

Keywords: MCC, fuzzy regulator, PID regulator, maintenance.

### **Introduction générale:**

Les machines à courant continu jouent un rôle crucial dans de nombreuses applications industrielles et de transport en raison de leur capacité à fournir un contrôle précis de la vitesse et du couple. Leur structure simple, combinée à une grande variété de configurations d'excitation, permet de les adapter à des besoins spécifiques, faisant des MCC des composants essentiels dans le domaine de l'électromécanique.

La modélisation des machines, y compris des machines à courant continu (MCC), vise à créer une représentation mathématique ou simulée de leur comportement dynamique et statique. Cette modélisation permet de comprendre, d'analyser, de concevoir et de contrôler les machines de manière plus efficace.

La régulation industrielle est l'un des éléments les plus importants du monde industriel. Comme la régulation se caractérise par l'obtention des meilleurs résultats dans le système de production. Les nombreux besoins constatés dans le monde ont conduit au développement de la production industrielle, faisant des spécialistes de ce domaine de la régulation un sujet d'étude et de recherche.

L'objectif de notre thème est d'implémenter deux types de commande: une commande PID et une autre dite logique floue sur la machine à courant continu afin de comparer les résultats et les performances de chacune.

Ce mémoire comporte quatre chapitres:

- Le premier chapitre présente des généralités sur la machine à courant continu.
- Le deuxième chapitre présente une Modélisation et simulation de la machine à courant continu.
- Le troisième chapitre introduit les notions de base de la commande PID et logique floue et ses application sur la commande des systèmes.
- Le quatrième chapitre présente La maintenance de la machine à courant continu

***Chapitre I: généralités sur la machine à courant continu***

## I.1.Introduction

Les machines à courant continu sont très utilisées dans les systèmes automatiques qui nécessitent une variation précise de la vitesse de rotation. Dans ce chapitre, nous nous intéresserons aux généralités sur la machine à courant continu qui se traduit par la présentation de sa constitution et son principe de fonctionnement. Il s'agit principalement d'établir les différents types de moteurs à courant continu, leurs domaines d'utilisation ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. [1]

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

Une machine à courant continu est un convertisseur électromécanique. Elle est réversible, elle transforme l'énergie mécanique en énergie électrique (génératrice) ou inversement, c'est-à-dire qu'elle transforme l'énergie électrique en énergie mécanique (moteur). (La Figure. I.1) présente le schéma général de la machine à courant continu. [2]

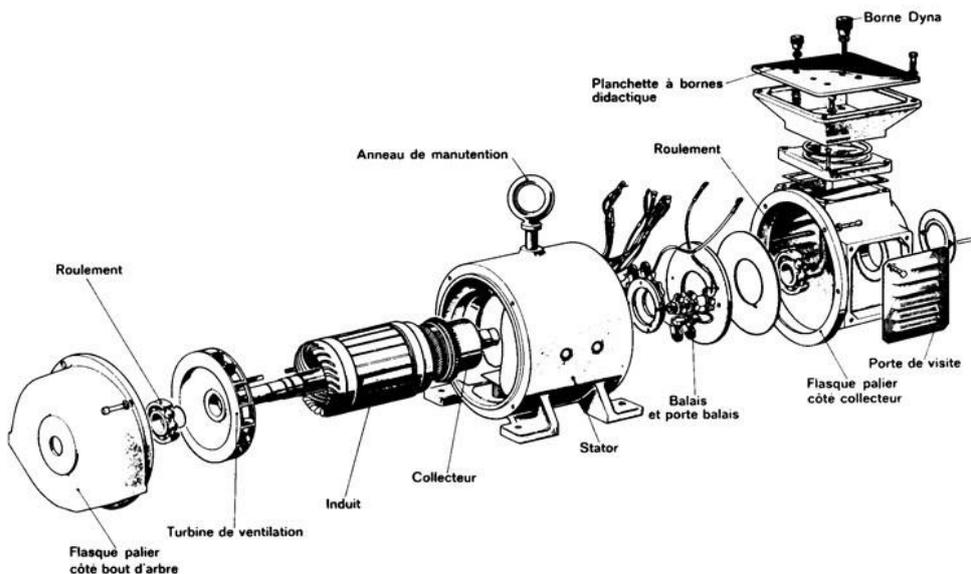


Figure I.1: schéma général de la machine à courant continu.

## I.3.Constitution de la machine à courant continu

Les machines à courant continu sont constituées comme toutes les machines de deux Parties essentielles (Figure. I.2) [3]:

- Partie fixe appelée stator que l'on appelle aussi inducteur.
- Partie mobile appelée rotor que l'on appelle aussi induit.

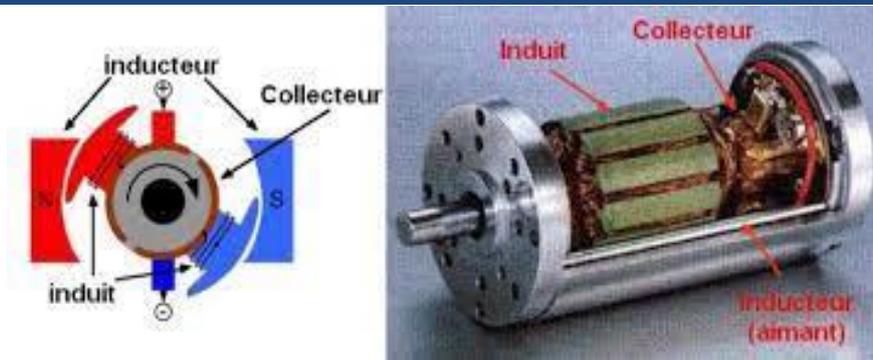


Figure I.2: constitution de la machine à courant continu.

### I.3.1. Inducteur:

Est la partie fixe de la machine créant un champ magnétique permanent ou variable. Il peut être constitué d'aimants permanents ou d'électro-aimants alimentés par un courant continu [3].

#### a. Inducteur à aimant permanent :

Est un type d'inducteur qui utilise des aimants permanents pour créer un champ son induction coercitive est grande, cela lui donne des propriétés particulières comme d'exercer une force d'attraction sur un matériau ferromagnétique. Les matériaux les plus utilisés sont les ferrites.



Figure I.3: Inducteur à aimant permanents.

#### b. Inducteur bobiné :

Il crée un champ rémanent. Il est constitué de bobines enroulées autour d'un noyau polaire (Figure. I.4). Formé d'un empilage de tôles en silicium séparées entre elles par du verni pour réduire les courants, avec une partie plus large appelé épanouissement polaire destiné à mieux répartir l'induction sur une grande partie de l'induit.



**Figure I.4:** Inducteur bobiné

### **I.3.2. Induit:**

Partie mobile de la machine constituée d'un ensemble de bobines conductrices enroulées autour d'un noyau ferromagnétique [4].



**Figure I.5:** Induit.

### **I.3.3. Collecteur et balais:**

#### **a. Collecteur :**

Dispositif rotatif en contact avec les bobines de l'induit, permettant de redresser le courant alternatif généré dans l'induit et de le convertir en un courant continu accessible aux bornes de la machine [4].



**Figure I.6:** collecteur.

**b. Balais:**

Eléments conducteur fixes frottant sur le collecteur, assurant la liaison électrique entre le circuit externe et les bobines de l'induit.

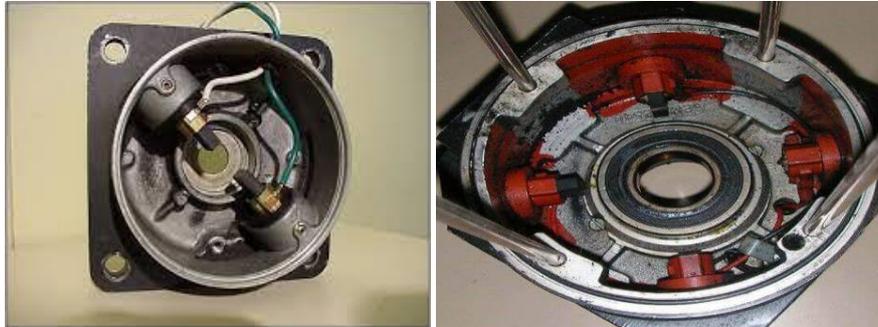
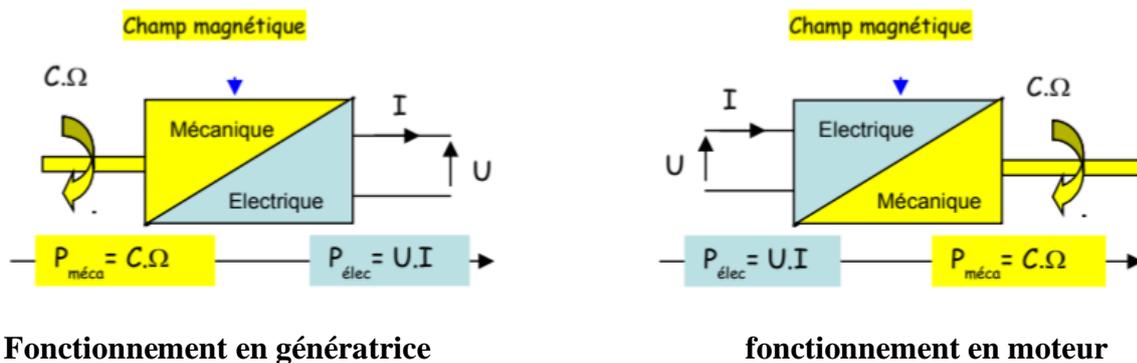


Figure I.7: les balais

**I.4. Types des machines a courant continu:**



Fonctionnement en génératrice

fonctionnement en moteur

Figure I.8: Mode de fonctionnement

	Application	Avantage	Inconvénient
<b>Moteur</b>	Propulsion électrique, treuils, ascenseur, machines-outils, robots, etc.	-couple élevé à basse vitesse. -facilité de contrôle de la vitesse.	-balais et collecteur sujets à l'usure. -cout plus élevé que le moteur à induction.
<b>Générateur</b>	Production d'électricité, batteries de secours, éoliennes, etc.	-réversibilité. -large plage de puissance.	-ondulation du couple et du courant.

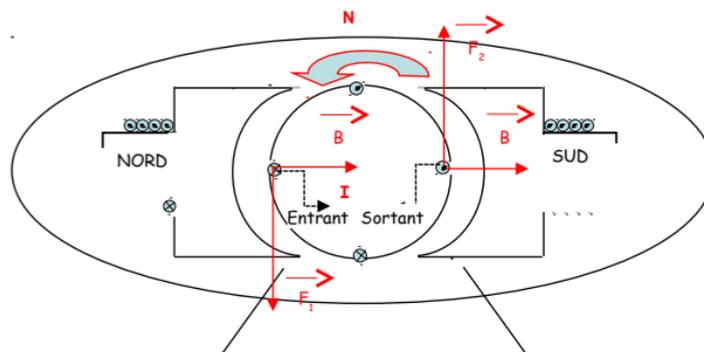
Tab.I.1 :Application,avantage et inconvénient

### I.5. Principe de fonctionnement:

Une machine à courant continu possède un nombre  $n$  de conducteurs actifs au niveau de l'induit. Le flux utile sous un pôle créé par l'inducteur est  $\Phi$ , exprime en webers, et  $N$  représente la fréquence de rotation de l'arbre du rotor, en tours par seconde. Deux cas peuvent se présenter:

- Soit un conducteur est à la fois traverse par un courant électrique et plonge à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors soumis à une force électromagnétique.
- Soit un conducteur est à la fois en mouvement de rotation et plonge à l'intérieur d'un champ magnétique, il est alors le siège d'une force électromotrice.

Ces deux cas peuvent être décrits par (la figure I.9) [5].



**Courant + champ magnétique → force électromagnétique**

**Force + champ magnétique → force électromotrice**

Figure I.9: Principe de fonctionnement de MCC

La Loi de Laplace affirme que l'action d'un champ magnétique  $B$  sur un courant  $I$  dans un conducteur de longueur  $L$ , produit une force  $\vec{F} = I \cdot \vec{L} \wedge \vec{B}$  (I.1)

La résultante de toutes les forces appliquées se traduit par un couple, qui fait tourner le moteur (Figure I.10) [6].

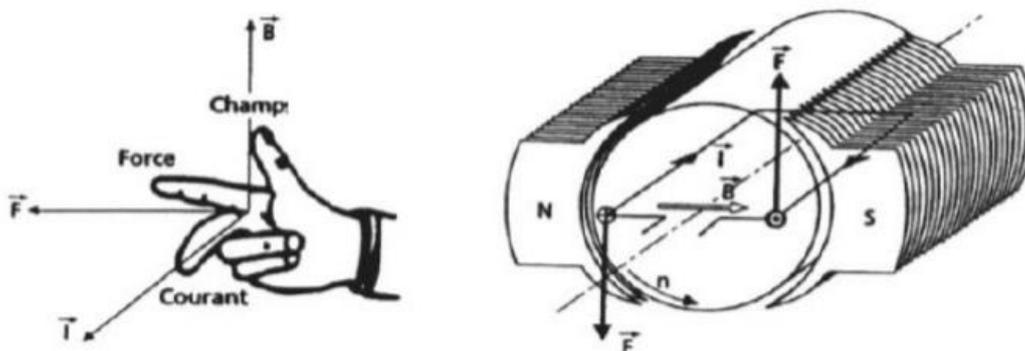


Figure I.10: principe des trois doigts

Les conducteurs actifs, de nombre  $n$ , coupent les lignes du champ magnétique. D'après la loi de Lenz-Faraday, chaque conducteur est donc le siège de forces électromotrices induites

$$E = \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = n.N.\phi \quad (I.2)$$

la force électromotrice f.é.m. résultante de l'ensemble de ces  $N$  spires :

$$E = n.N.\phi \left\{ \begin{array}{l} E \text{ la f.é.m en [V]} \\ N \text{ la fréquence de rotation en [tr.s}^{-1}] \\ \phi \text{ le flux en [Wb]} \\ n \text{ le nombre de conducteurs actifs} \end{array} \right. \quad (I.3)$$

- Cette relation est essentielle pour la machine, car elle est le lien entre le flux  $\phi$  une grandeur magnétique, la tension  $E$  une grandeur électrique, et la fréquence de rotation  $N$ , une grandeur mécanique.
- Sachant que  $\Omega = 2\pi.N$ , une autre relation, reliant les trois types de grandeurs, est fréquemment utilisée, elle prend en compte la vitesse angulaire  $\Omega$  exprimée en radians par seconde :

$$E = k.\phi.\Omega \left\{ \begin{array}{l} E \text{ la f.é.m en [V]} \\ \Omega \text{ la vitesse angulaire en [rad.s}^{-1}] \\ \phi \text{ le flux en [Wb]} \\ k \text{ constant} \end{array} \right. \quad (I.4)$$

**Remarque :** pour une machine à inducteur bobine tournante à Vitesse angulaire constante, la  $f_{em}$  est proportionnelle au Courant d'excitation  $I_e$  si le circuit magnétique n'est pas saturé:

$$E = K. \phi (I_e). \Omega = k .I_e.\Omega \quad (I.5)$$

### I.5.1 Fonctionnement en génératrice:

#### a. Fonctionnement à vide

Le rotor de la machine est entraîné par une source extérieure à la fréquence de rotation  $n$ . Nous dirons que la génératrice fonctionne à vide lorsqu'elle ne débite aucun courant [5].

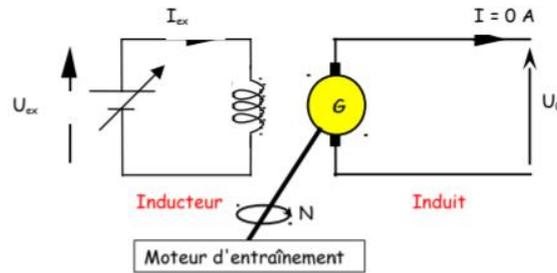
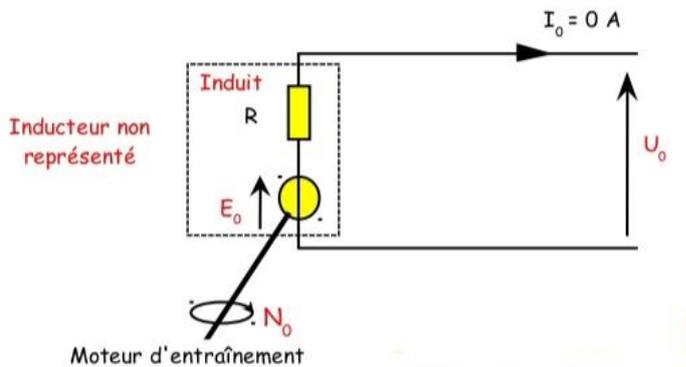


Figure I.11 : Fonctionnement d'une génératrice à vide.

La relation  $E = n.N.\phi$  se caractérise donc par deux constantes, le nombre de conducteurs  $n$ , et la fréquence de rotation  $N$  avec laquelle est entraînée la génératrice. La f.é.m.  $E$  est dans ce cas proportionnelle au flux  $\phi$ , elle est donc à un coefficient près l'image de la courbe de magnétisation de la machine. L'indice «0» caractérise le fonctionnement à vide [7].



- $R$  : la résistance totale de l'induit
- $U_0$  : la tension aux bornes de l'induit
- $E_0$  : la f.é.m de la génératrice
- $I_0$  : l'intensité du courant dans l'induit
- $N_0$  : la vitesse de rotation du rotor

Figure I.12: Modèle équivalent d'une génératrice à vide.

La tension  $U_0$  mesurée directement sur l'induit de la génératrice est exactement égale à la f.é.m.  $E_0$  de la Machine car l'intensité du courant est nulle, il n'y a donc pas de chute de tension due à la résistance de l'induit. Modèle équivalent d'une génératrice à vide

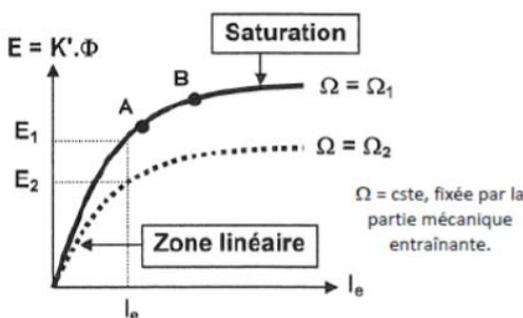


Figure I.13: Caractéristiques  $E=f(I_e)$

Cette caractéristique est en fait valable aussi bien en Moteur qu'en génératrice. Elle montre que la zone Utile de fonctionnement d'une machine se situe au Voisinage de A. Sous le point A, la machine est sous utilisée et après le point B, les possibilités de la machine n'évoluent Augmentent puisque  $I_e$  augmente.

$$k_e = \frac{E_1}{\Omega_1} = \frac{E_2}{\Omega_2} \quad (I.6)$$

Dans la zone linéaire, si  $\Omega = \text{cste}$ , donc si  $I_e = \text{cste}$  [7].

### b. Fonctionnement sur charge résistive

La génératrice est entraînée par un moteur auxiliaire, elle débite un courant d'intensité  $I$  dans un rhéostat de charge (Figure.I.14) [8].

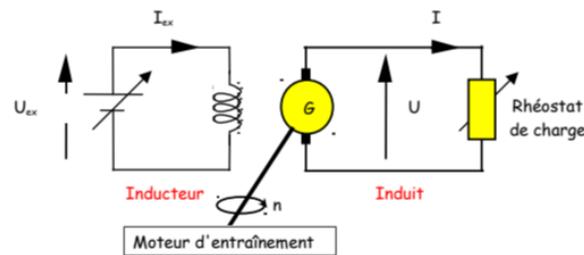


Figure I.14: Fonctionnement d'une génératrice en charge.

L'induit de la génératrice peut être remplacé par son modèle équivalent:

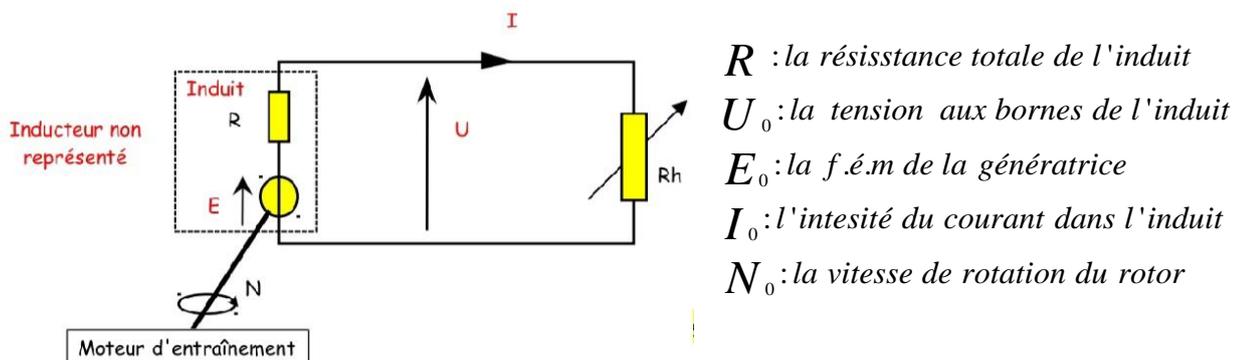


Figure I.15: Modèle équivalent de l'induit de la génératrice.

La loi d'Ohm de l'induit se déduit facilement de son modèle équivalent:

$$U = E - R.I \quad \begin{cases} U \text{ la tension aux bornes de l'induit en [V]} \\ E \text{ la f.é.m de la génératrice en [V]} \\ R \text{ la résistance de l'induit en } [\Omega] \\ I \text{ l'intensité du courant dans l'induit en [A]} \end{cases} \quad (\text{I.7})$$

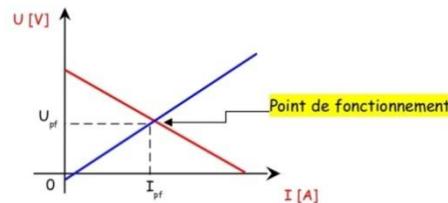
Suivant les valeurs prises par la charge résistive, le moment du couple ( $U ; I$ ) de la tension aux bornes de l'induit et de l'intensité du courant dans l'induit ne peut se déplacer que sur la droite déterminée par deux valeurs particulières [8]:

- $U_0$  valeur maximale de la tension aux bornes de l'induit de la génératrice à vide,  $I = 0 \text{ A}$
- $I_{cc}$  valeur maximale de l'intensité du courant dans l'induit court-circuité,  $U = 0 \text{ V}$

### c. Point de fonctionnement sur charge résistive

Le point de fonctionnement du groupe Induit – Charge résistive peut se déterminer graphiquement. Il correspond au fonctionnement simultané de l'alimentation et du récepteur. Les deux couples (courant ; Tension) issus des deux caractéristiques doivent impérativement être égaux puisqu'ils sont associés, Ainsi : Evaluation graphique du point de fonctionnement

Le point de fonctionnement peut également se calculer à partir des deux équations (Figure.I.16) [9] :



**Figure I.16:** Point de fonctionnement sur charge résistive

Le point de fonctionnement peut également se calculer à partir des deux équations :  
Evaluation graphique du point de fonctionnement

$$\begin{cases} U = E - R.I \\ U = R.I \end{cases} \quad (I.8)$$

Le point d'intersection ( $U_{pf}$  ;  $I_{pf}$ ) de ces deux droites donne les grandeurs communes aux deux dipôles[9].

### d. Bilan des puissances d'une génératrice :

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine mécanique jusqu'à la puissance utile de nature électrique.

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance mécanique à la puissance électrique.

Le bilan, peut être résumé à l'aide de ( Figure I.17) [5].

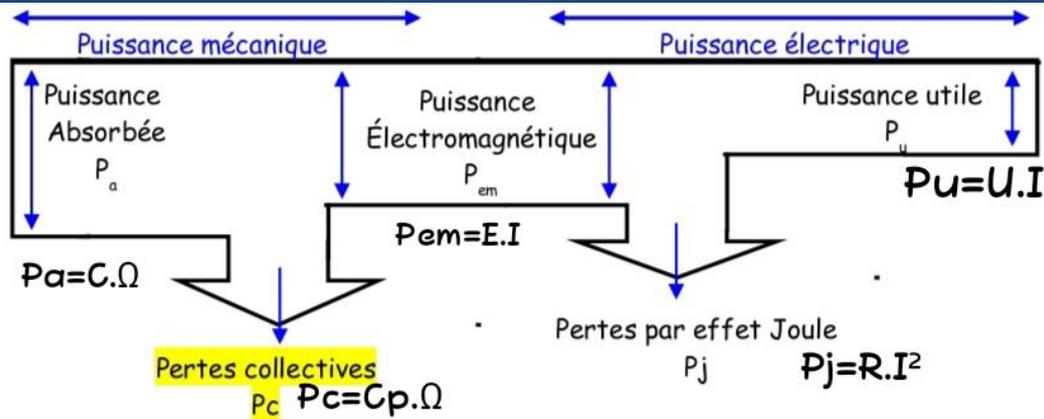


Figure I.17: Bilan des puissances d'une génératrice.

## I.5.2 Fonctionnement en moteur:

### a. Fonctionnement en charge

L'induit du moteur est alimenté par une seconde source de tension continue, il entraîne une charge mécanique à la fréquence de rotation  $N$  (Figure.I.18) [9].

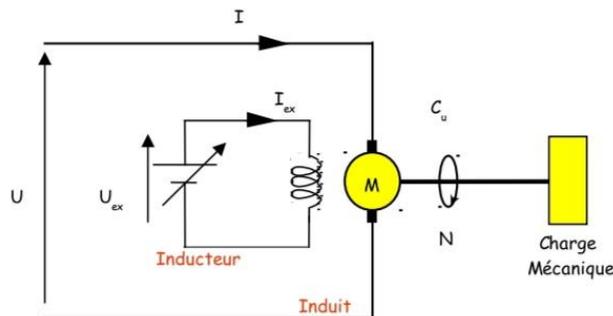


Figure I.18: Fonctionnement d'un moteur en charge.

La puissance électromagnétique  $P_{em}$  donne naissance au couple électromagnétique  $C_{em}$ . C'est cette Puissance qui, aux pertes près, est transformée en puissance utile sur l'arbre.

On a :  $P_{em} = E.I = C_{em}.\Omega$ , soit  $C_{em} = k.\phi.I$  (I.9)

Le couple électromagnétique est proportionnel, à flux constant, au courant d'induit absorbé par la machine.

• Compte-tenu des pertes, le couple utile  $C_u$  (ou couple moteur  $C_m$ ) dont on dispose sur l'arbre du moteur est en réalité légèrement inférieur au couple électromagnétique  $C_{em}$  :

$$C_u = C_{em} - C_p \quad (I.10)$$

• Le couple de pertes  $C_p = C_{em} - C_u$  est du :

-aux pertes ferromagnétiques dans le rotor (hystérésis et courants de Foucault) ;

-aux pertes mécaniques: frottements aux paliers et aux contacts balais-collecteur, Ventilation.

À flux constant et au couple de pertes près, le courant d'induit absorbé par la machine est

Proportionnel au couple mécanique demandé par la charge à entraîner (on fait l'approximation  $I_0 = 0$ , Soit  $C_p = 0$ , dans ce cas). [9]

On exprime la vitesse de rotation du moteur par :

$$\begin{aligned} U &= E + R.I \\ E &= k_e \cdot \Omega \implies \Omega = \frac{U - R.I}{k_e} = \frac{U}{k_e} - \frac{R.I}{k_e} = \Omega_0 - \frac{R.I}{k_e} \end{aligned} \quad (I.11)$$

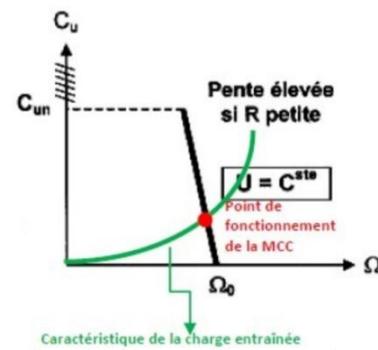


Figure I.19: Caractéristique mécanique

$\Omega_0 = \frac{U}{k_e}$  est la vitesse du moteur à vide si  $I_0 = 0$  dans ce cas :

$$I = \frac{k_e}{R} \cdot (\Omega_0 - \Omega) \implies C_u = k_e \cdot k_c / R \cdot (\Omega_0 - \Omega) \quad (I.12)$$

$$C_u = K\phi \cdot I$$

**Remarque:** c'est la principale caractéristique d'un MCC. Il faut l'associer à la caractéristique couple vitesse de la charge entraînée pour situer le point de fonctionnement

### b. Plaque signalétique du moteur

Le mieux approprié, c'est-à-dire celui qui permet un très bon rendement, pas forcément le plus élevé, Mais qui La plaque signalétique d'un moteur donne de précieux renseignements, ils concernent le fonctionnement Assure une très bonne longévité de la machine. Les valeurs mentionnées pour l'induit, sont Appelées les valeurs nominales, elles ne doivent pas être dépassées de plus de 1,25 fois, elles se Décomposent ainsi :

- U : Tension nominale appliquée aux bornes de l'induit.
- I : Intensité nominale du courant dans l'induit
- N : Fréquence de rotation nominale du rotor
- $p_u$  : Puissance utile nominale, d'origine mécanique délivrée par le moteur [10].

Ci-dessous l'exemple de la plaque signalétique de la machine à courant continu du téléphérique du Pic du Midi.

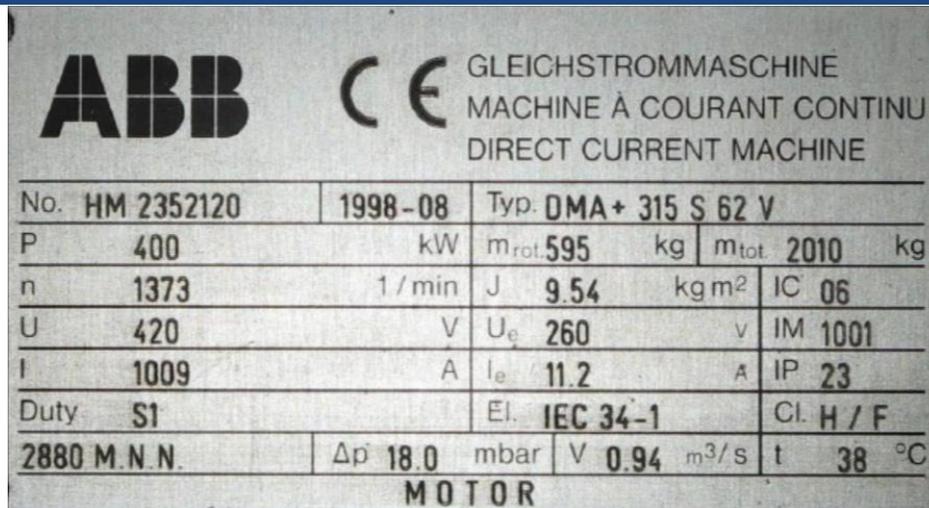


Figure I.20: Plaque signalétique du moteur

On en dire :

Caractéristiques électriques nominales		Caractéristiques mécaniques nominales
Induit	Inducteur	
$U_n = 420 \text{ V}$ $I_n = 1009 \text{ A}$	$U_{en} = 260 \text{ V}$ $I_{en} = 11,2 \text{ A}$	$P_{un} = 400 \text{ kW}$ $N = 1373 \text{ tr/min}$ $C_{un} = 2880 \text{ N.m}$

Tableau I.2: caractéristique de la plaque signalétique d'un moteur.

**c. Bilan des puissances d'un moteur :**

Le bilan des puissances décline toutes les puissances, depuis la puissance absorbée d'origine électrique jusqu'à la puissance utile de nature mécanique.

Entre ces deux termes, l'étude se portera sur toutes les pertes aussi bien mécaniques qu'électriques, et Enfin une puissance sera étudiée tout particulièrement, elle correspond au passage de la puissance électrique a la puissance mécanique [5].

Le bilan, peut être résume à l'aide schéma suivant :

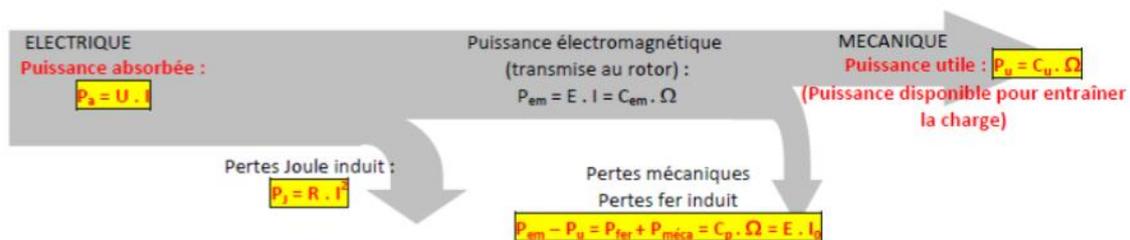


Figure I.21: Bilan des puissance d'un moteur.

**d. Essai à vide:**

Nous dirons que le moteur fonctionne à vide s'il n'entraîne aucune charge sur son arbre. L'indice «o» caractérise cet essai. Sa fréquence de rotation est notée  $n_0$ , elle est légèrement supérieure à sa Fréquence de rotation nominale, l'intensité du courant dans l'induit  $I_0$  est très faible devant sa valeur Nominale et la tension d'alimentation  $U_0$  de l'induit est réglée a sa valeur nominale. En faisant varier  $U_0$ , la tension aux bornes de l'induit mesurée en volts, nous pouvons relever en ampères l'intensité du courant dans l'induit  $I_0$ , et la fréquence de rotation  $n_0$  en tours par seconde [9].

**e. Essai en charge**

Le moteur est maintenant chargé, c'est-à-dire que l'arbre de ce dernier entraîne une charge résistante qui s'oppose au mouvement du rotor.

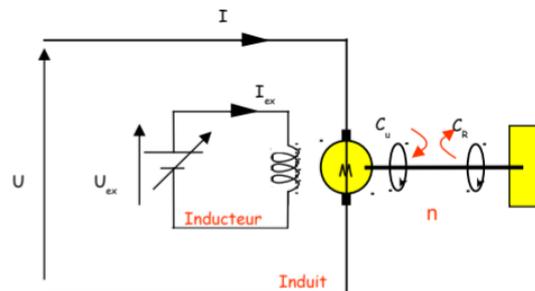


Figure I.22: essai en charge

En régime établi, le moment du couple utile délivré par le moteur est égal au moment du couple résistant que lui oppose la charge mécanique.[5]

**En régime permanent**

$$C_u = C_r \begin{cases} C_u : \text{le moment du couple utile en } [N.m] \\ C_r : \text{le moment du couple résistant } [N.m] \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

**f. Point de fonctionnement:**

Le point de fonctionnement se trouve sur l'intersection de la caractéristique mécanique du moteur et de la courbe qui caractérise le moment du couple résistant de la charge(figure.I.23).

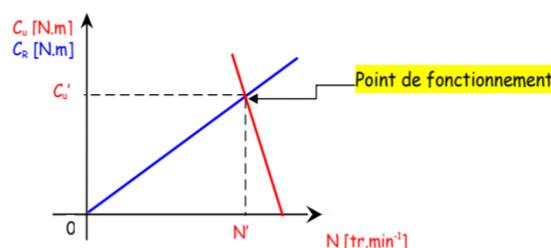


Figure I.23: Point de fonctionnement d'un moteur

**g. Le risque d'emballement du moteur:**

Dans la relation:

$$E = N.n.\phi \longrightarrow n = E/N.\Phi \quad (I.14)$$

Si l'intensité du courant dans l'inducteur s'annule, le flux tend alors vers zéro. Suivant la loi d'Ohm la Valeur de la fem n'est pas nulle

$$E = U - R.I \longrightarrow n = U - R.I / N .\Phi \quad (I.15)$$

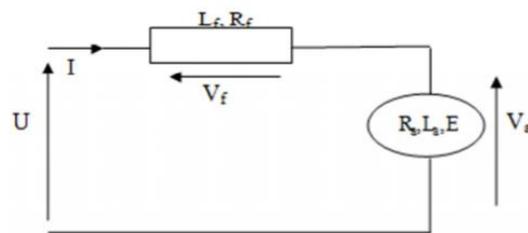
La fréquence de rotation d'un moteur alimenté tend vers l'infini si le flux s'annule.

Une coupure dans le circuit d'excitation entraîne donc un emballement du moteur.

Pour éviter que le moteur s'emballe, il est indispensable de respecter un ordre pour le câblage ainsi qu'un ordre inverse pour le de câblage du moteur. L'inducteur doit être alimenté en premier lors du câblage, il sera débranché en dernier au de câblage du moteur [5].

**I.6. Différents types d'excitation de moteur à courant continu:****I.6.1. Moteur à excitation série:**

Le moteur à excitation série est constitué de deux enroulements, induit et inducteur montés en Série (même courant). Il est alimenté par une source continue de tension  $U$ , et de courant  $I$  qui Débite sur un induit, de résistance  $R_a$ , d'inductance  $L_a$  et de force contre électromotrice  $E$  et d'un inducteur de résistance  $R_f$  et d'inductance  $L_f$  ( Figure. I.24) [11] :



**Figure I.24:** moteur à excitation série.

L'équation de la tension d'alimentation est :

$$U = V_a + V_f \quad (I.16)$$

Les équations du moteur deviennent alors :

$$V_a = E + R_a.I + R_f.I = E + (R_a + R_f)I \quad (I.17)$$

$$C_m = K_m \phi . I_a \quad (I.18)$$

Avec :

$U$  : Tension d'alimentation du circuit d'induit [V].

$I$  : Courant d'induit [A].

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

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

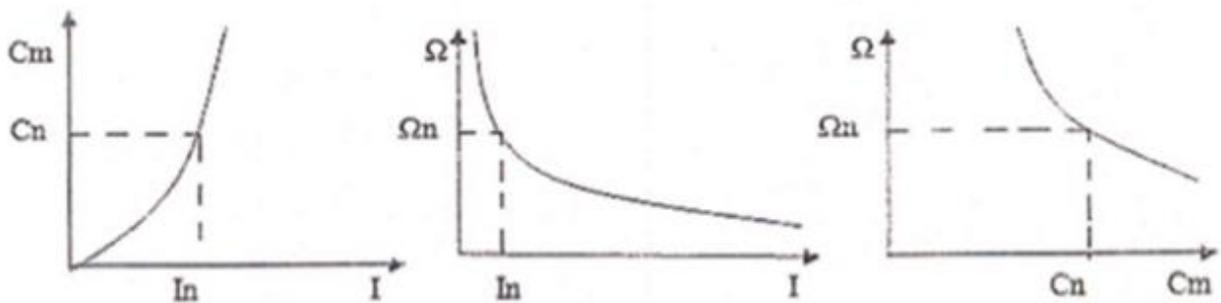
$V_f$  : Tension du circuit d'excitation [V].

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

$E$  : Force contre électromotrice [V].

### a. Caractéristiques:

Le moteur série est autorégulateur de puissance. Sa caractéristique mécanique montre qu'il possède un très fort couple au démarrage qui ne dépend pas de la tension, mais il ne peut pas fonctionner à faible charge car sa vitesse devient infinie (risque de destruction du moteur). Sa vitesse décroît quand la charge augmente d'où l'option de changement de vitesse automatique, cette vitesse est moins sensible aux variations brusques de la tension d'alimentation que le moteur shunt...etc. (Figure. I.25). [3]



a : Caractéristique électromécanique

b : Caractéristique de vitesse en fonction

c : Caractéristique mécanique

**Figure I.25:** caractéristiques de la machine à excitation série.

Avec :

$C_m$  : Couple moteur [N.m].

$I_n$  : Courant nominal d'induit [A].

$\Omega$  : Vitesse angulaire [rd/s].

$\Omega_n$  : Vitesse angulaire nominale [N.m].

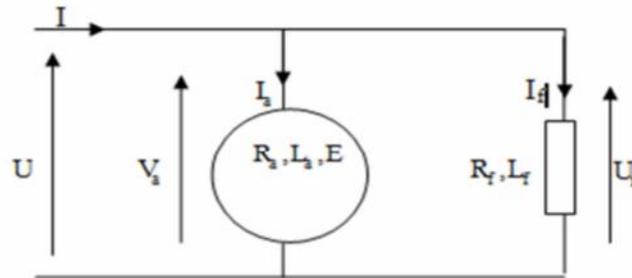
### b. Domaine d'utilisation:

Le moteur à excitation série est utilisé particulièrement dans l'actionnement de pompes (Compresseur), ou ventilateurs traction, transport...etc.

#### I.6.2.Moteur à excitation shunt:

Le moteur à excitation shunt (parallèle) est constitué de deux enroulements, induit et

Inducteur montés en parallèle. Il est alimenté par une seule source continue de tension  $U$  et de Courant  $I$ . Le circuit inducteur constitué d'une self  $L_f$  et d'une résistance  $R_f$  est parcouru par un courant  $I_f$ , et celui de l'induit comportant une résistance, une inductance et une force contre électromotrice respectivement  $R_a$ ,  $L_a$ ,  $E$  est parcouru par un courant  $I_a$  (Figure. I.26). Pour varier la vitesse, il faut varier le courant d'excitation et le couple développé par le moteur .[11]



**Figure I.26:** Moteur à excitation shunt.

Les équations du moteur sont :

$$V_a = E + R_a \cdot I_a \quad (\text{I.19})$$

$$U = R_a \cdot I_a + L_a \cdot \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{I.20})$$

$$C_{em} = K_m \cdot \phi \cdot I_a \quad (\text{I.21})$$

Avec

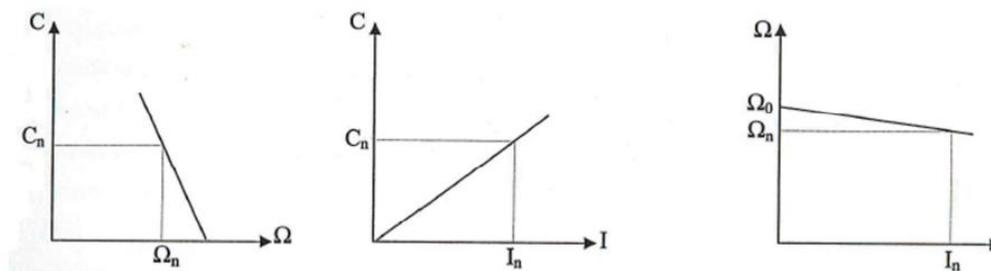
$I_a$  : Courant d'induit [A].

$K_m$  : Constante propre du moteur.

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

### a. Caractéristiques:

D'après les caractéristiques données par ( la Figure. I.27), on remarque que le moteur shunt est un autorégulateur de vitesse dans des limites étroites. Cette dernière n'est pas vraiment influencée par la variation de la tension d'induit. Que le moteur à excitation séparée, elle est relativement constante quel que soit la charge. Il peut fonctionner à vide sans risque d'emballement, utilisé pour l'entraînement des machines dont la vitesse ne doit pas dépendre de la charge, cas des machines-outils, et remplace le moteur série où l'emballement est à craindre [3].



a : Caractéristique mécanique.

b : Caractéristique électromécanique

c : Caractéristique vitesse en fonction

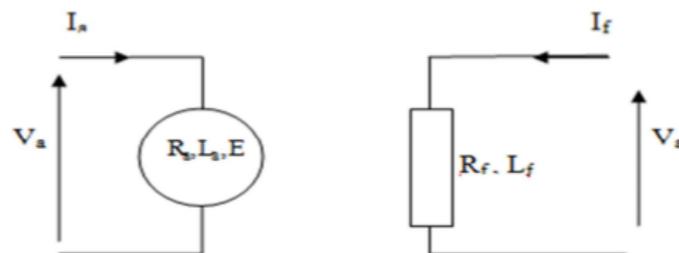
**Figure I.27:** caractéristique de la machine à excitation shunt.

### b. Domaine d'utilisation:

Ce moteur est utilisé dans les machines laminoirs, les broyeuses, les cisailles, appareils de Lavage et téléphérique ...etc.

### I.6.3.Moteur à excitation séparée

Le moteur à excitation séparée est constitué de deux enroulements induit et inducteur qui sont Alimentés séparément par deux sources distinctes. L'inducteur qui comporte une résistance  $R_f$  et une inductance  $L_f$  qu'est excitée par une source continue de tension  $V_f$ , et de courant  $I_f$ , et l'induit qui est constitué d'une résistance, d'une inductance, et d'une force contre électromotrice respectivement  $R_a$ ,  $L_a$  et  $E$ . Il est excité par une source continue de tension  $V_a$ , et de courant  $I_a$  (Figure. I.28) [11] :

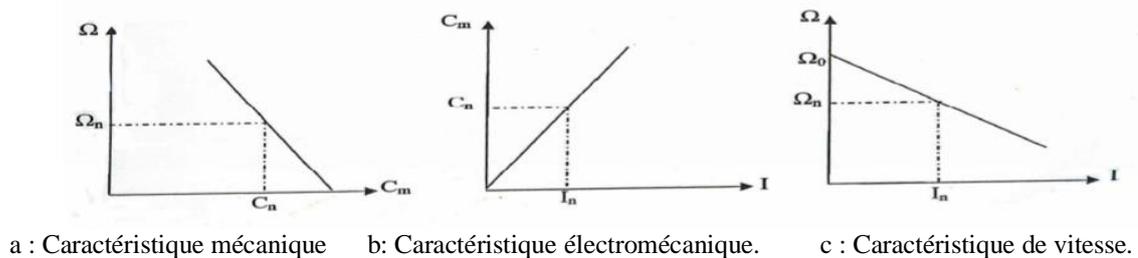


**Figure I.28:** Moteur à excitation séparée.

### a. Caractéristiques:

Le moteur à courant continu à excitation séparée joint à l'avantage d'un réglage de vitesse Dans de larges limites. Cette dernière est très sensible aux variations de la tension d'induit, et Indépendante de la charge, c'est pour cela qu'on peut le coupler à de faibles charges sans risque d'emballement. Son couple est proportionnel au courant d'induit, et très important à

faible vitesse, d'où ses performances dynamiques très élevées. Son courant de démarrage est très fort d'où la nécessité de le limiter pour éviter l'échauffement du circuit induit. Ce moteur est le moteur de base des asservissements de position, aussi bien pour les petites que les grandes puissances. (La Figure I.29), montres les principales caractéristiques du moteur à excitation séparée [12] :



**Figure I.29:** caractéristique du moteur à excitation séparée.

### b. Domaines d'utilisation:

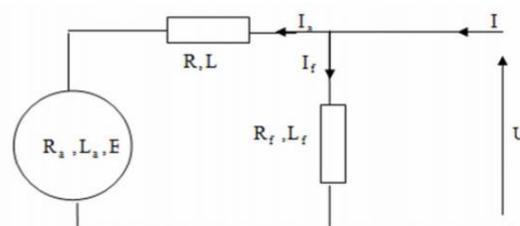
Ce moteur est employé dans les machines d'excitation (les pompes, transport, trolleybus, TG...) et les entraînements d'essuie glaces...etc.

### I.6.4. Moteur à excitation composée (compound):

Le moteur à excitation composé, possède deux enroulements inducteurs, série et shunt. Ce type de moteur a des propriétés intermédiaires entre celles des moteur série et shunt. Suivant le raccordement de l'enroulement inducteur shunt, de cette composition on peut avoir deux types additionnels ou différentiel [3].

#### I.6.4.1. Moteur compound à flux additif:

Le moteur compound à flux additif est alimenté par une source de tension continue  $U$ , et de courant  $I$ . L'inducteur série contenant une résistance  $R$ , et une inductance  $L$ , est parcourue par le même courant que l'induit qui comporte une résistance, une inductance et une force contre électromotrice respectivement  $R_a$ ,  $L_a$  et  $E$  et l'inducteur shunt de résistance  $R_f$  et d'inductance  $L_f$  est parcourue par un courant  $I_f$ , (Figure I.30) [13].



**Figure I.30:** Schéma électrique du moteur compound à flux additif.

### a. Caractéristiques du moteur compound à flux additif:

D'après les caractéristiques données par (la Figure. I.31), on remarque que le moteur Compound à flux additif est un alliage du moteur série et du moteur shunt, il a bénéficié des Avantages des deux moteurs. Son couple de démarrage est plus fort que le moteur shunt. Il peut fonctionner à faible charge sans risque d'emballlement et présente une meilleure stabilité que les deux moteurs précédents, mais il est fait seulement pour l'entraînement à vitesse strictement constante [14].

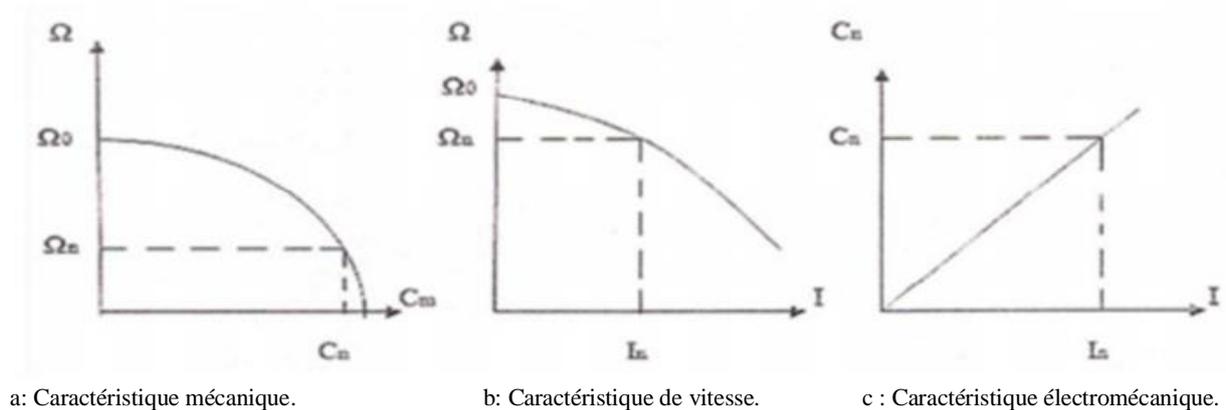


Figure I.31: caractéristique du moteur composé à flux additif.

### b. Domaine d'utilisation:

Ateliers (étaux limeurs, raboteuse, cisailles ...), traction électrique.

#### I.6.4.2. Moteur compound à flux soustractif:

Le moteur compound à flux soustractif est alimenté par une source de tension continue  $U$  et de courant  $I$ . l'inducteur série qui comporte une résistance  $R$ , et une inductance  $L$  est parcourue par le courant d'alimentation  $I$ . L'induit du moteur est constitué d'une résistance  $R_a$ , d'une inductance  $L_a$ , et d'une force contre électromotrice  $E$  et l'inducteur shunt de résistance  $R_f$  et d'inductance  $L_f$  est parcourue par un courant  $I_f$ , (Figure. I.32)[11].

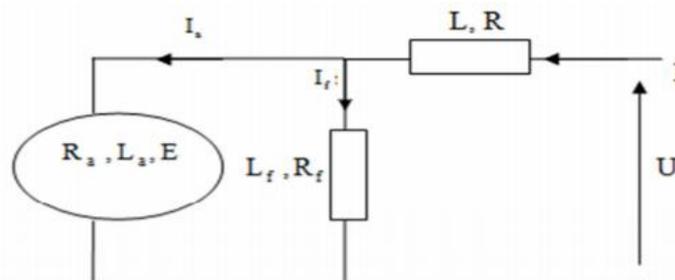
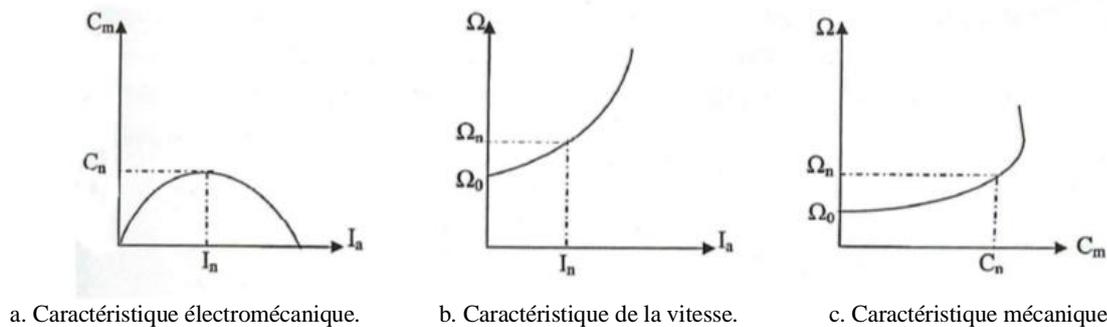


Figure I.32: schéma électrique du moteur compound à flux soustractif.

**a. Caractéristiques:**

Le moteur compound à flux soustractif a une très grande caractéristique mécanique (Indépendance de la vitesse en fonction de la charge). Sa vitesse augmente avec l'augmentation du couple, ce qui présente un très grand danger, car sa vitesse croît jusqu'à l'infini d'où le risque de destruction du moteur. Il présente une très grande instabilité, et un risque d'emballement du fait de l'annulation du flux résultant des enroulements série et shunt. Pratiquement ce moteur n'est plus utilisé [12].



**Figure I.33:** caractéristique du moteur composée à flux soustractif.

**I.7. Différents mode de réglage de la vitesse:**

Pour illustrer les différents modes de réglage de la vitesse d'un moteur à courant continu, nous avons opté pour un moteur à excitation séparée qui est soumis à une alimentation continue. En régime variable nous avons:

$$V_a = R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E \quad (\text{I.22})$$

$$E = K \phi \Omega \quad (\text{I.23})$$

En régime établi (la variation de  $I$  est nulle), les équations (I-22) et (I.23) deviennent :

$$V_a = R_a I_a + E \quad (\text{I.24})$$

A partir des équations (I.23) et (I.24), on déduit l'expression générale de la vitesse de rotation du moteur:

$$\Omega = \frac{V_a - R_a I_a}{K \phi} \quad (\text{I-25})$$

Avec

$K$  : Constante du moteur.

On remarque que la vitesse de rotation  $\Omega$  dépend de trois variables à savoir la tension de

l'induit  $V_a$ , la résistance de l'induit  $R_a$  et le flux  $\phi$  ce qui donne les trois possibilités de réglage suivantes [12]:

### I.7.1 Réglage rhéostatique:

En fixant la tension d'induit et le flux d'excitation à leurs valeurs nominale, on peut varier la Vitesse en agissant sur la résistance d'induit avec un rhéostat monté en série avec l'enroulement induit. Le réglage rhéostatique a l'inconvénient d'amplifier les pertes par effet joule, d'où la rareté son utilisation.[3]

### I.7.2 Réglage par variation de la tension d'induit:

En fixant le flux d'excitation à sa valeur nominale, on fait varier la tension d'induit entre zéro et la tension nominale du moteur. On obtient une famille de droites parallèles à la caractéristique mécanique du moteur, donnée par (la Figure. I.34) [3]:

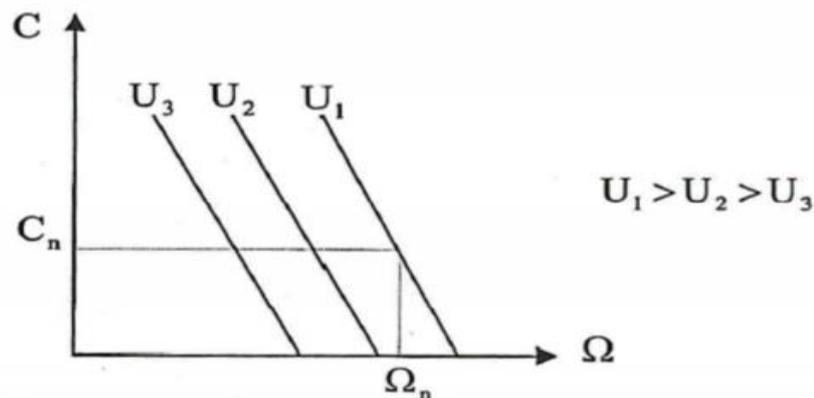


Figure I.34: variation de la vitesse par la tension d'induit.

### I.7.3 Réglage par variation du flux d'excitation:

En fixant la tension d'induit à sa valeur nominale, on fait varier le flux d'excitation entre la Valeur minimale et la valeur nominale, On obtient une famille de droites parallèles à la Caractéristique mécanique donnée par ( Figure I.35):

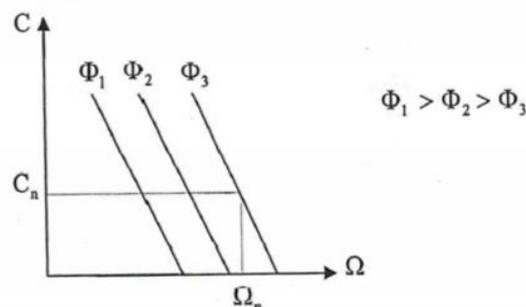


Figure I.35: Variation de la vitesse par flux d'excitation.

Le réglage par la tension d'induit permet seulement de diminuer la vitesse (variation de zéro à  $\Omega_n$ ), par contre le réglage par variation du flux d'excitation permet seulement de l'augmenter, (Variation entre  $\Omega_n$  et  $3\Omega_n$ ). Pour avoir une plage de variation de la vitesse entre zéro et trois fois la vitesse nominale, on combine les deux modes de réglage [3].

## **I.9.Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une façon plus au moins détaillée la machine à Courant continu à savoir les différents constituants, les différents schémas de branchement et les modes d'excitation de la machine à courant continu et leur principale caractéristique, nous avons aussi présenté les équations électriques et mécaniques qui régissent le fonctionnement de la machine. Dans le chapitre suivant nous allons-nous intéresser à la modélisation et la régulation de la machine à courant continu.

***Chapitre II: Modélisation de la machine à courant continu***

## II.1 Introduction:

La machine à courant continu peut être modélisée par le biais d'équations électrique, Électromécanique et mécanique. Ces 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 MCC peut être vu comme une résistance  $R_a$  et une inductance  $L_a$  en série avec une source de tension commandée  $e_m(t)$  proportionnelle à la vitesse  $\omega(t)$ . Du coté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit

Augmentée de celui de la charge entraînée [15].

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

Le moteur à courant continu dont nous allons établir les équations est représenté par (la Figure II.1) :

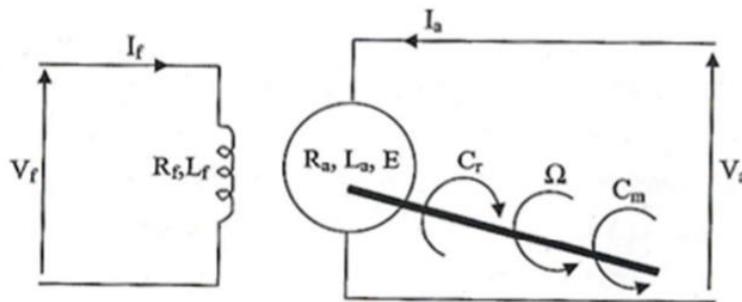


Figure II.1: schéma électrique du moteur à excitation séparée

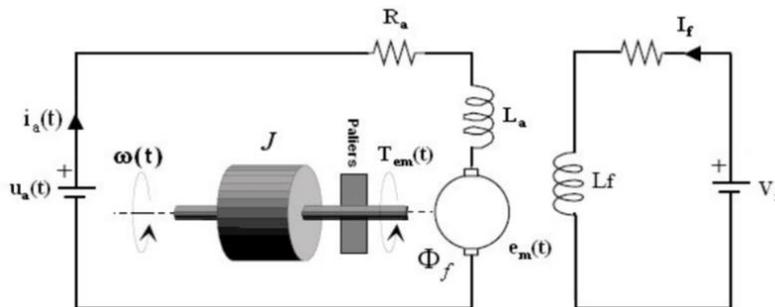
Du coté électrique nous pouvons dire que la machine à courant continu se définit par un circuit d'induit et un circuit d'inducteur ; l'induit de la machine à courant continu peut être vu comme une résistance  $R_a$  et une inductance  $L_a$  en série avec une source de tension commandée  $V_a$  et proportionnelle à la vitesse.

Du coté mécanique, nous représentons la machine à courant continu par l'inertie de l'induit augmenté de celui de la charge entraînée [3].

## II.3. Equations de la machine à courant continu:

Notons d'abord que dans notre modélisation nous allons utiliser le moteur à courant continu afin d'établir les équations et ce qui s'en suit. Du fait que, par des changements de

connexions entre l'induit et l'inducteur on aboutit aux autres types de MCC (par rapport à L'excitation) et que les MCC sont réversibles, nous pourrions donc obtenir les autres modèles Moyennant des modifications à partir du premier (Figure II.2) [15]



**Figure II.2:** Schéma d'un entraînement avec une MCC à excitation indépendante

Les signaux y intervenant sont les suivants :

- La tension aux bornes de l'induit  $u_a(t)$  (l'indice 'a' correspond à Anker, c'est à dire induit en langue allemande) ;
  - le circuit électrique de l'induit, faisant apparaître :
    - La résistance de l'induit  $R_a$  ;
    - L'inductance de l'induit  $L_a$  ;
  - Une tension  $e_m(t)$  appelée f.e.m. (force électro-motrice), proportionnelle à la vitesse angulaire  $\omega(t)$ ;
  - Le courant traversant le circuit d'induit  $I_a(t)$ ;
  - Le couple électromagnétique instantané  $T_{em}(t)$  produit ;
  - L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation  $\phi_f$  ;
  - La charge mécanique, dépendante de l'application ( inertie  $J$  , frottement visqueux, Élasticité de la transmission, etc.) ;
- La vitesse  $\omega(t)$  du rotor du moteur[15].

### II.3.1 Equations électriques :

Prenant en compte la résistance  $R_a$  et l'inductance  $L_a$  du circuit d'induit, du

Collecteur, des balais et des connexions, et en les supposant toutes deux constantes (pas de

Variation due à l'échauffement ni à la saturation magnétique), l'équation de tension induite

S'écrit:

$$U_a(t) = R_a i_a + \frac{d\psi}{dt} = R_a i_a(t) + \frac{d(N \cdot \phi f)}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt} + e_m(t) \quad (\text{II.2})$$

### II.3.2 Equations électromécaniques

La tension induite  $e_m(t)$ , appelée FEM ("force électromotrice" dans l'optique de

l'exploitation en générateur) est proportionnelle à la vitesse angulaire  $\omega(t)$  et au flux

inducteur  $\phi f(t)$  :

$$e_m(t) = k \cdot \phi f(t) \cdot \omega(t) \quad (\text{II.3})$$

$k$  est une constante dépendant de la construction de la machine. La première équation

montre que  $e_m(t)$  s'oppose à  $U_a(t)$ , c'est à dire que le moteur réagit en créant une FEM

$e_m(t)$  tendant à équilibrer à  $U_a(t)$ . Cet effet correspondra à une contre-réaction bien

visible dans le schéma fonctionnel du moteur[15].

Le couple électromagnétique  $T_{em}(t)$  développé a pour expression :

$$T_{em}(t) = k \cdot \phi_f \cdot i_a(t) \quad (\text{II.4})$$

### II.3.3. Equation mécanique

Le moteur en rotation est décrit par l'équation (de la dynamique) d'équilibre suivante :

$$J_t \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - B\omega(t) - T_r(t) - T_f(t) \quad (\text{II.5})$$

Ou

$J_t$  : inertie totale entraînée (moteur  $J_m$  et charge  $J_{ch}$ )

$B_m$  : coefficient de frottement visqueux

$T_r$  : couple résistant

$T_f$  : couple de frottement de coulomb

Voilà en somme les équations régissant le fonctionnement du moteur. Mais pour mieux les exploiter, nous allons utiliser leurs transformées de Laplace [15].

#### II.4. Transformées de Laplace :

$$U = E + RI + L \frac{di}{dt} \quad (\text{II.6})$$

la transformée de la place :

$$U_{(s)} = E + RI_{(s)} + Ls I_{(s)} \quad (\text{II.7})$$

$$\underbrace{U_{(s)} - E}_{\xi_1} = (L_{(s)} + R) I_{(s)} \quad (\text{II.8})$$

$$\boxed{\frac{I_{(s)}}{\xi_1} = \frac{1}{L_s + R}} \quad (\text{II.9})$$

$$J \frac{d\omega}{dt} - C_{em} - f \cdot \omega - c_r \quad (\text{II.10})$$

la transformée de la place :

$$J_s \omega_s = C_{em} - f \cdot \omega - C_r \quad (\text{II.11})$$

$$(J_s + f) \omega_{(s)} = \underbrace{C_{em} - C_r}_{\xi_2} \quad (\text{II.12})$$

$$\boxed{\frac{\omega_{(s)}}{\xi_2} = \frac{1}{J_s + f}} \quad (\text{II.13})$$

#### II.5. Modèle de la machine à courant continu sur les axes $d, q$

La MCC, supposée bipolaire (Fig. II.3), comporte:

- Au stator, suivant l'axe  $d$ , deux enroulements inducteurs série et shunt représentés par les Indices respectivement  $s$  et  $f$ ;

- Au rotor, suivant l'axe  $q$ , un enroulement d'induit, un enroulement auxiliaire et un Enroulement de compensation représentés par les indices respectivement  $a$ ,  $aux$  et  $c$ .

Les pôles auxiliaires et de commutation produisent une f.é.m. de signe opposé de sorte qu'elle annule l'effet de la réaction magnétique d'induit et la f.é.m. qui cause les étincelles. Ces enroulements sont placés en série avec l'enroulement de l'induit par rapport à l'axe  $q$ . [16]

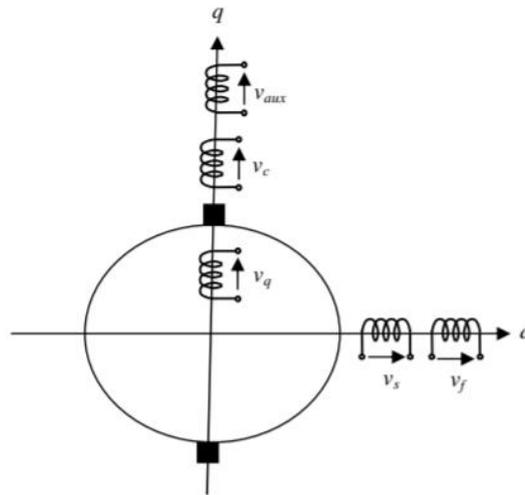


Figure II.3: Représentation de la MCC sur les axes  $d$  et  $q$ .

### II.5.1. Equation des tensions

D'après le modèle de (la Fig.II.3), les relations de tensions, pour le fonctionnement en moteur, sont de la forme ci-dessous :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ v_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ v_c = R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \\ v_{aux} = R_{aux} i_{aux} + \frac{d\psi_{aux}}{dt} \\ v_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + \omega_m \psi_d \end{array} \right. \quad (II.14)$$

### II.5.2 Equation des flux

Les relations de flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \psi_f = L_f i_f + M_{fs} i_s \\ \psi_s = L_s i_s + M_{sf} i_f \\ \psi_c = L_c i_c + M_{cq} i_q + M_{caux} i_{aux} \\ \psi_{aux} = L_{aux} i_{aux} + M_{aux.a} i_a + M_{aux.c} i_c \\ \psi_d = M_{fa} i_f + M_{sa} i_s \\ \psi_q = L i_A + M_{a.c} i_c + M_{a.aux} i_{aux} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Les équations II.14 et II.15 peuvent être réduites en considérant la tension et le flux total aux bornes du circuit d'induit et l'emplacement série de ces enroulements. On peut donc écrire :

$$\begin{cases} v_a = v_q + v_{aux} + v_c \\ i_a = i_s = i_{aux} \\ \psi_a = \psi_q + \psi_{aux} + \psi_c \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Alors :

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \\ v_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\ v_a = R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} + \omega_m \psi_d \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

On obtient finalement :

$$\begin{cases} v_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M_{fs} \frac{di_a}{dt} \\ v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_a}{dt} + M_{fs} \frac{di_f}{dt} \\ v_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega_m (M_{fa} i_f + M_{sa} i_s) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$$\begin{cases} R_a = R + R_{aux} + R_c \\ L_a = R + R_{aux} + R_c \\ \psi_a = L + L_{aux} + L_c + 2(M_{ac} + M_{a.aux} + M_{c.aux}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

### II.5.3 Expression du couple électromagnétique

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

$$p(t) = v_a i_a + v_f i_f + v_s i_s + v_c i_c + v_{aux} i_{aux} \quad (\text{II.20})$$

Ou encore :

$$p(t) = v_a i_a + v_f i_f + v_s i_s \quad (\text{II.21})$$

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

$$dw = p(t) \cdot dt \quad (\text{II.22})$$

$$dw = p(t) \cdot dt \quad (\text{II.23})$$

$$dW = (R_a i_a^2 + R_s i_s^2 + R_f i_f^2) dt + (d\psi_a i_a + d\psi_f i_f + d\psi_c i_c) + \omega_m \psi_d i_a \cdot dt \quad (\text{II.24})$$

$dW$  peut être décomposée

$$dW = dW_f + dW_{mag} + dW_{méc} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$dW_j = (R_a i_a^2 + R_s i_s^2 + R_f i_f^2) dt$  : L'énergie dissipée par effet joule ;

$dW_{mag} = (d\psi_a i_a + d\psi_f i_f + d\psi_c i_c)$  : La variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans le champ de couplage ;

$dW_{méc} = \omega_m \psi_d i_a \cdot dt$  : L'énergie transformée en énergie mécanique.

Le couple électromécanique est donnée par:

$$C_{em} = \frac{\partial W}{\partial \theta} \quad (\text{II.26})$$

$$C_{em} = \psi_d i_a \quad (\text{II.27})$$

En utilisant l'équation (II.15), on aura:

$$C_{em} = (M_{fa} i_f + M_{sa} i_s) i_a \quad (\text{II.28})$$

### II.5.4 Equation du mouvement

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

$$C_{em} - C_r - k_f \Omega = \frac{J}{P} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (\text{II.29})$$

Où :

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique de la machine ;

$C_r$  : Le couple résistant (statique) à l'arbre de la machine ;

$J$  : Le moment d'inertie ;

$k_f$  : le coefficient de frottement ;

$\Omega_m$  : La vitesse électrique du rotor

$P$  : le nombre de paires de pôles.

## II.7. simulation de la MCC sous Matlab Simulink :

### a. dans l'état statique :

#### a.1. Par la transformé de Laplace:

Les parameters de notre machine sont:  $R=1.67 \Omega$  ,  $K_c=60.3 \text{ mNm.A}^{-1}$   $K_e =60.3 \text{ mNm.A}^{-1}$   
 $L= 0.19 \text{ mH}$  ,  $J= 0.0398 \text{ Kg.m}^2$  ,  $F=0.001$ .

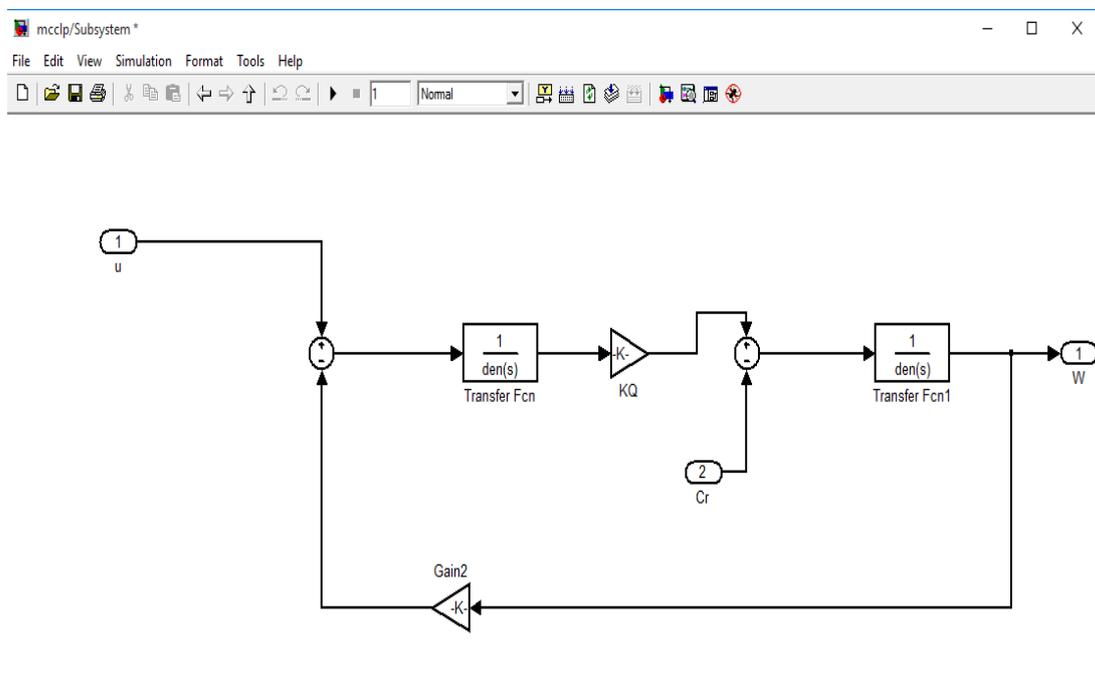
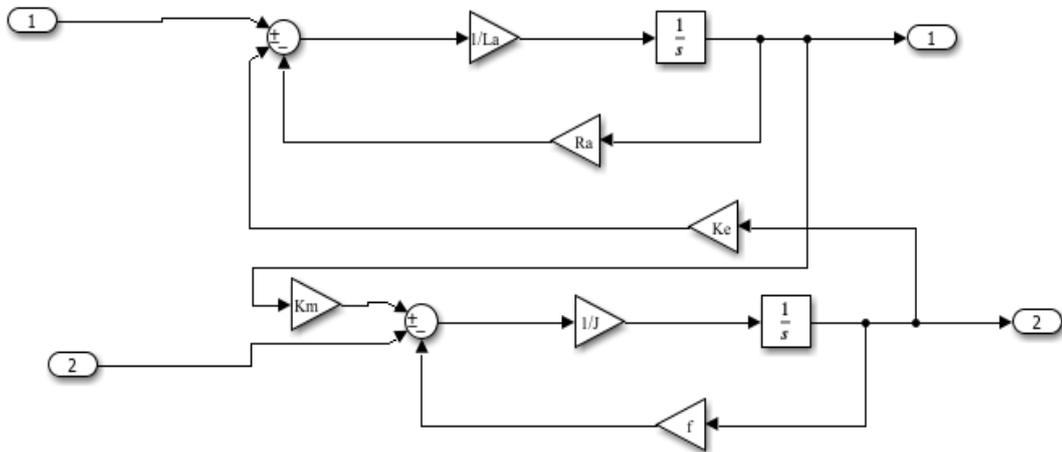


Figure II.4: Modèle par transformé de Laplace sous Matlab Simulink

**a.2. Modèle direct:**

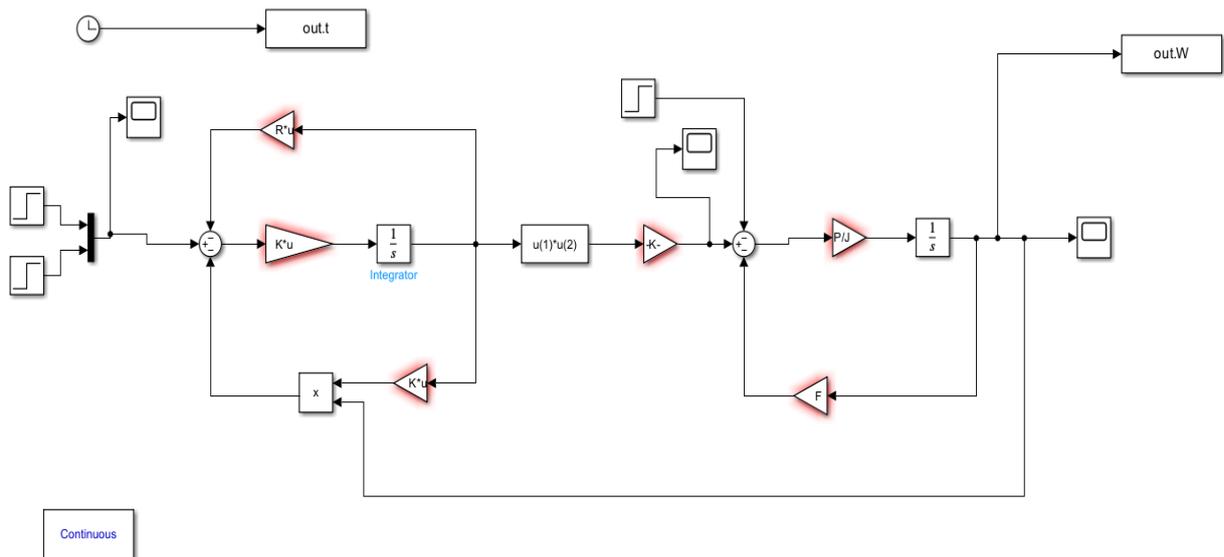
Dans ce modèle on appliqué directement l'équation mathématique de la MCC comme indique la figure suivante:



**Figure II.5:** Figure modèle directe sous Matlab Simulink

**b. Dans l'état dynamique :**

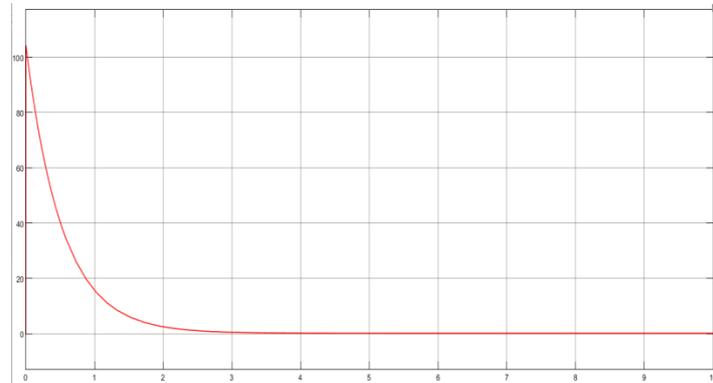
avec  $L_f=55.366H$   $mfd=5.213 H$   $L_a=L$   $R_a=R$ ,



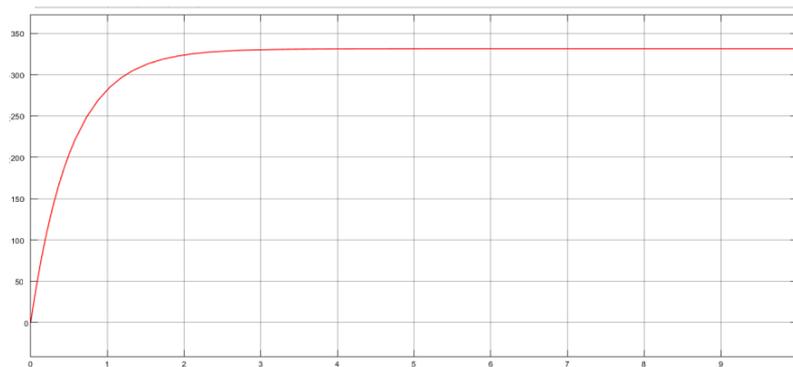
**Figure II.6:** Modèle dans l'axe d,q sous Matlab Simulink

**Résultats :**

Les deux figures suivantes (Fig. II.7 / Fig. II.8) montrent le courant et la vitesse à vide de notre MCC :



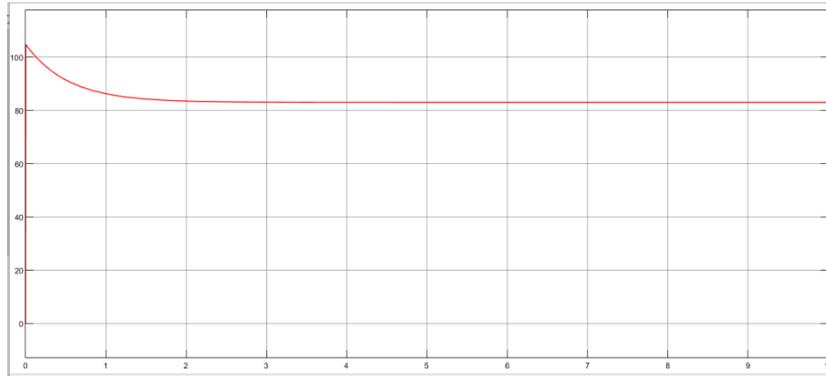
**Figure II.7:** Courant A vide



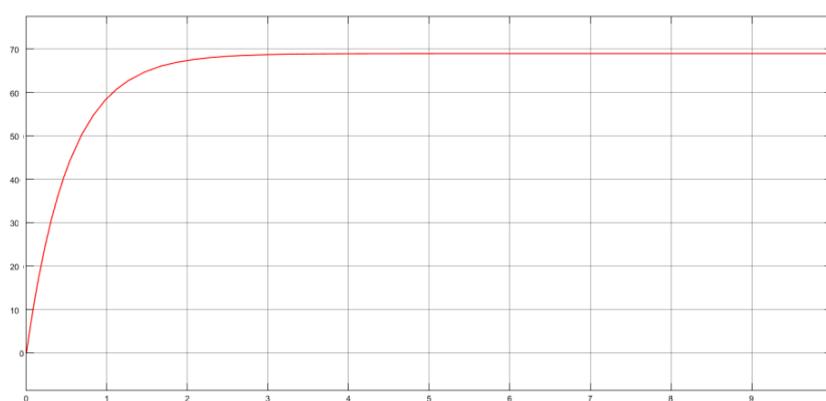
**Figure II.8:** Vitesse a vide

Le courant augmente rapidement jusqu'à atteindre une valeur stable à vide. Cette augmentation initiale est due au fait que le moteur a besoin de surmonter l'inertie et les frottements pour commencer à tourner.

Les deux figures suivantes (Fig. II.9/ Fig. II.10) montrent le courant et la vitesse pour un couple  $C_r$  de 5 N.m de notre MCC :



**Figure II.9:** Courant en charge



**Figure II.10:** Vitesse en charge

Au début de la simulation ( $t=0$ ), la vitesse du moteur augmentera très rapidement. A ( $t=0.1$ ) secondes, la vitesse de rotation diminue progressivement jusqu'à elle se stabilise à une valeur approximative de 70 rad/secondes.

Initialement, en l'absence de charge, le courant est élevé pour maintenir la machine en régime à vide. À mesure que la charge augmente, le courant d'armature croît progressivement pour générer le couple nécessaire à la surmonte du couple résistant.

## II.8.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine à courant continu en utilisant l'environnement MATLAB Simulink. Nous avons introduit les modèles électriques et mécaniques de la machine, et nous avons obtenu des résultats en conditions de marche à vide et en charge. Nous avons également analysé l'effet de ces conditions sur les courbes de vitesse et de courant.

***Chapitre III : Commande des machines à courant continu***

### III.1. Introduction :

En automatique, on appelle système ou processus l'objet à étudier. La définition d'un système est liée aux grandeurs d'entrée et de sortie considérées. Il peut être défini comme un ensemble des éléments exerçant collectivement une fonction déterminée. Un système communique avec l'extérieur par l'intermédiaire de grandeurs, fonctions du temps, appelées signaux. En général, ces signaux (d'entrée et de sortie) ne sont pas de même nature. Les grandeurs d'entrée sont les grandeurs qui agissent sur le système. Il en existe deux types commandes et perturbations. Les signaux de sortie d'un système sont aussi appelés réponse du système. Un système possédant une seule entrée est dit mono variable, si de plus il possède une seule sortie, il est dit scalaire. Pour observer les grandeurs de sortie, on utilise des capteurs. C'est l'information de ces capteurs qui va permettre d'élaborer la commande (Figure III.1) [17].

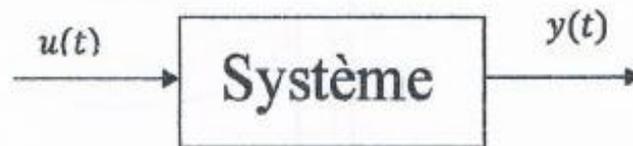


Figure III.1 : Modèle général d'un système.

### III.2. L'asservissement

L'asservissement est une partie de l'automatique. L'objet principal de l'asservissement est d'élaborer la commande d'un procédé afin de lui faire atteindre une grandeur physique déterminée. Un système asservi est un système qui prend en compte, durant son fonctionnement, l'évolution de ses sorties pour les modifier et les maintenir conforme à une consigne.

### III.3. La Régulation

La régulation automatique est l'ensemble des techniques qui permettent de contrôler une grandeur physique (température, vitesse, pression), sans intervention humaine, pour la maintenir à une valeur donnée, appelée consigne. C'est une branche de l'automatisme. Ces techniques ne sont pas seulement un moyen de commander des processus mais aussi un moyen de réduire les pertes de production, d'augmenter la qualité et la quantité des produits, d'augmenter la disponibilité des unités et de diminuer les coûts marginaux de production [14].

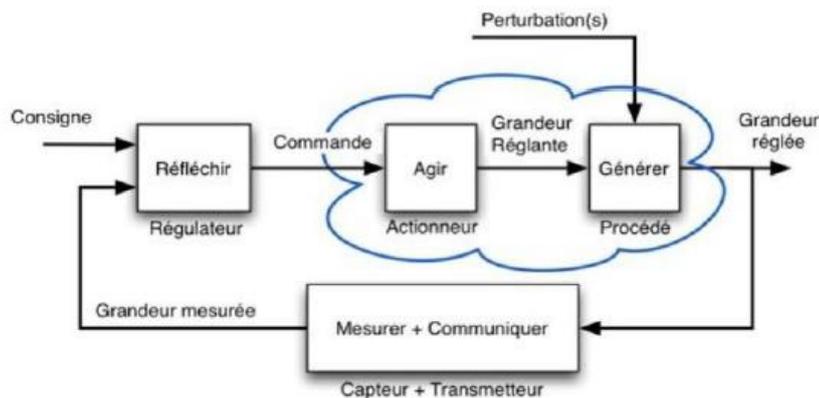
L'objectif global de la régulation peut se résumer par ces trois mots clés [14]:

- mesurer
- comparer
- corriger

Une boucle de régulation doit comporter au minimum les éléments suivants :

- un capteur de mesure
- un transmetteur souvent intégré au capteur
- un régulateur
- un actionneur

On peut représenter une régulation de la manière suivante :



**Figure III.2:** Schéma de principe de fonctionnement d'une régulation.

### III.4. Types de régulation industrielle

Il y'a plusieurs types de régulation industrielle possibles telles que :

1. TOR : Tout Ou Rien (ON-OFF Control).
2. MLI : Modulation de la Largeur d'Impulsion (PWM) avec PID.
3. PID : Continue Proportionnelle, Intégrateur, Dérivateur.
4. FUZZY : Continue PID avec l'introduction de la logique floue.
5. MULTI-BOUCLES : Maître Esclave, Cascade, Rapport.
6. NUMERIQUE: Modèle de référence.

### III.5. Régulateurs

Le régulateur est un élément de l'équipement de régulation. Placé dans la chaîne d'action ou dans une chaîne de réaction auxiliaire, il permet d'assurer plusieurs fonctions :

- Comparaison du signal de sortie au signal de référence ;
- Amplification ;

- Correction.

Dans ce qui suit, on présentera les principaux types d'actions des régulateurs.[18]

### a. Action proportionnelle (Régulateur P)

Ce correcteur élémentaire est le correcteur de base, il agit principalement sur le gain du système asservi, il permet donc d'améliorer notablement la précision. Dans le cas d'un correcteur proportionnel, la loi de commande corrigée ( $t$ ) est proportionnelle à l'écart ( $t$ ).

Ce régulateur produit un signal de commande proportionnel au signal d'erreur (Figure.III.3) [17]:

$$u_{cm}(t) = k_p \xi(t) \quad (\text{III.1})$$

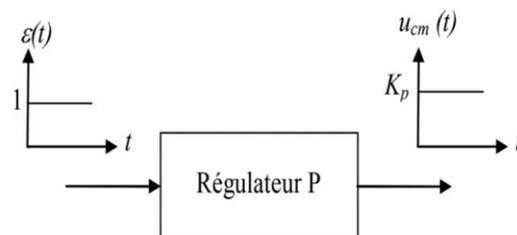


Figure III.3: Régulateur P

Transmittance:

$$G_{rp}(s) = \frac{U_{cm}(s)}{\xi(s)} = K_p \quad (\text{III.2})$$

### b. Action Intégrale (Régulateur I)

Elle crée un signal de commande qui est l'intégrale du signal d'erreur ;

$$U_{cm} = K_i \int_0^t \xi(t) dt \quad (\text{III.3})$$

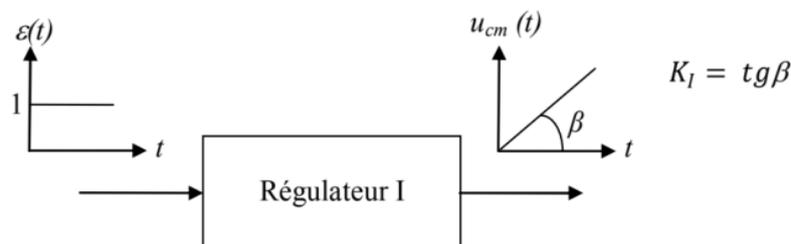


Figure.III.4:Régulateur I

Transmittance:

$$G_{ri} = \frac{U_{cm}(s)}{\xi(s)} = \frac{K_I}{s} = \frac{1}{T_I \cdot s} \quad (\text{III.4})$$

$K_I$  : Gain intégral

$\frac{1}{k_I} = T_I$  : Constante de temps d'intégration

### c. Action dérivée (Régulateur D)

L'action(D) crée un signal de commande qui est la dérivée du signal d'erreur ;

$$u_{cm}(t) = K_D \cdot \frac{d\xi(t)}{dt} \quad (\text{III.5})$$

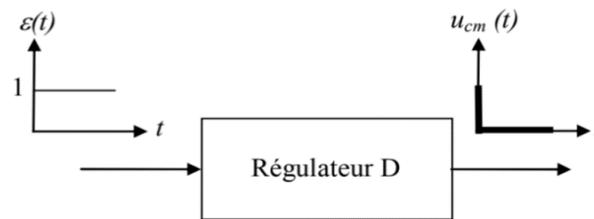


Figure.III.5: Régulateur D

Transmittance:

$$G_{rd}(s) = \frac{U_{cm}(s)}{\xi(s)} = K_D \cdot s = T_D \cdot s \quad (\text{III.6})$$

$K_d$  : Gain dérivé ;

$T_d$  : Constante de temps de dérivation.

### d. correcteur proportionnelle et intégrale (Régulateur PI)

L'action proportionnelle est une fonction qui fait varier le signal de sortie du régulateur proportionnellement à l'écart entre la mesure et la consigne. Le correcteur intégral est fréquemment combiné au correcteur proportionnel pour améliorer le régime permanent et le régime transitoire. Cette combinaison est appelée correcteur proportionnel-intégral.

Le signal de commande est donné par [17] :

$$U_{cm} = K_p \cdot \xi(t) + K_I \int_0^t \xi(t) dt \quad (\text{III.7})$$

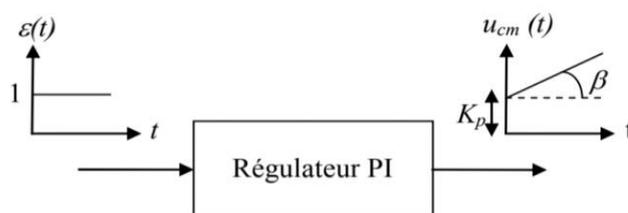


Figure III.6: Régulateur PI

Transmittance:

$$U_{cm}(s) = K_p \cdot \xi(s) + \frac{K_I}{s} \xi(s) \quad (\text{III.8})$$

$$U_{cm}(s) = \left( K_p + \frac{K_I}{s} \right) \cdot \xi(s) \quad (\text{III.9})$$

$$U_{cm}(s) = \frac{K_p \cdot s + K_I}{s} \cdot \xi(s) = \frac{1 + \left( \frac{K_p}{K_I} \right) \cdot s}{\frac{1}{K_I} s} \xi(s) \quad (\text{III.10})$$

$$G_{rPI}(p) = \frac{U_{cm}(s)}{\xi(s)} = \frac{1 + s \cdot T_n}{s \cdot T_I} \quad (\text{III.11})$$

$$T_n = \frac{K_p}{K_I} : \text{Dosage de corrélation d'intégrale}$$

$$T_I = \frac{1}{K_I} : \text{Constante de temps d'intégration}$$

### e. correcteur proportionnelle et dérivée (Régulateur PD)

L'inconvénient majeur du correcteur dérivé est son insensibilité aux variations lentes de l'erreur. Pour cette raison, ce type de correcteur n'est jamais utilisé seul. La solution permettant de minimiser cet inconvénient est de le combiner au correcteur proportionnel

Le signal de commande est donné par :

$$u_{cm}(t) = K_p \cdot \xi(t) + K_D \frac{d\xi(t)}{dt} \quad (\text{III.12})$$

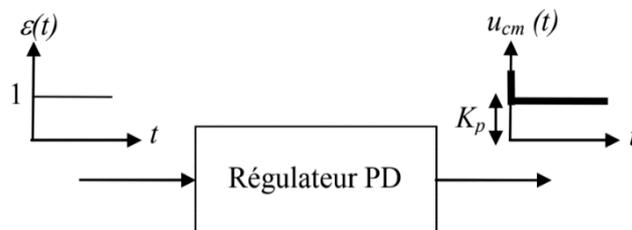


Figure III.7: Régulateur PD

Transmittance:

$$G_{rPD}(s) = K_p + K_D \cdot s \quad (\text{III.13})$$

$$G_{rPD}(s) = K_p \left( 1 + \frac{K_D}{K_p} s \right) = K_p (1 + s \cdot T_d) \quad (\text{III.14})$$

$K_p$  : gain statique

$T_d = \frac{K_D}{K_p}$  : Constante de temps de dérivation

#### f. correcteur proportionnelle, intégrale et dérivée (Régulateur PID) :

Le régulateur PID, appelé aussi correcteur PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur) est un système de contrôle, il est constitué d'un comparateur pour observer l'écart (erreur) entre la mesure et la consigne, et d'un correcteur dont l'algorithme permet d'obtenir une loi d'évolution de la mesure du procédé conforme au cahier des charges. Il permettant d'effectuer un asservissement en boucle fermée d'un système industriel ou « procédé » [13].

Le signal de commande est donné par :

$$u_{cm}(t) = K_p \cdot \xi(t) + K_I \int_0^t \xi(t) dt + K_D \frac{d\xi(t)}{dt}$$

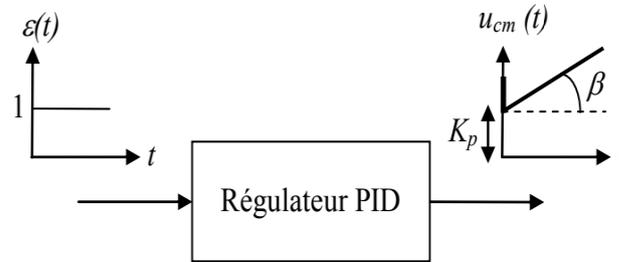


Figure.III.8: Régulateur PID

Transmittance:

$$G_{rPID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D \cdot s \quad (III.15)$$

$$G_{rPID}(s) = \frac{K_p \cdot s + K_I + K_D \cdot s^2}{s} + \frac{1 + \frac{K_p \cdot s}{K_I} + \frac{K_D \cdot s^2}{K_I}}{\frac{1}{K_I} \cdot s^2} \quad (III.16)$$

$$G_{rPID}(p) = \frac{(1 + s \cdot T_n)(1 + s \cdot T_v)}{T_I \cdot s} \quad (III.17)$$

$$T_n = \frac{1}{2} \frac{K_p}{K_I} + \sqrt{T_v^2 \frac{1}{4} \left( \frac{K_p}{K_I} \right)^2 - \frac{K_D}{K_I}} \quad (III.18)$$

$$T_v = \frac{1}{2} \frac{K_p}{K_I} + \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{K_p}{K_I} \right)^2 - \frac{K_D}{K_I}} \quad (III.19)$$

$T_i$  : Constante de temps d'intégration ;

$T_v$  : Dosage de corrélation de dérivée ;

$T_n$  : Dosage de corrélation d'intégrale.

### III.6. Choix et dimensionnement des régulateurs:

Cela consiste à établir des critères qui permettent de choisir le type de régulateur et d'en déterminer les coefficients (constante de temps) dans le but d'aboutir à une régulation stable et amortie.

Il existe plusieurs méthodes pour le dimensionnement des régulateurs standard. Souvent on fait appel aux critères selon Ziegler-Nichols. Dans le domaine des réglages industriels, on utilise d'autres critères qui donnent des résultats plus satisfaisants, à savoir :

- critère méplat ;
- critère symétrique.

#### A) Critère méplat :

Formulation du critère :

- compenser la constante de temps dominante

$$\bullet \left| F_{BF}(j\omega) \right|_{\omega \rightarrow 0} \cong cst$$

Les coefficients des régulateurs déterminés selon le critère méplat sont donnés par le tableau suivant :

$n_s$	Type de régulateur	$T_n$	$T_v$	$T_{v2}$	$T_i$
1	PI	$T_1$	-	-	$2kT_P$
2	PID	$T_1$	$T_2$	-	$2kT_P$
3	PID2	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$2kT_P$

Tableau III.1 : Les coefficients des régulateurs selon le critère méplat

$n_s$  étant l'ordre du système à régler.

**B) Critère sur la réponse harmonique symétrique:**

L'emploi du critère méplat pose des problèmes lorsque le système à régler possède un comportement intégral. De même, si les constantes de temps dominantes sont élevées (le temps de réglage pour annuler l'influence de la grandeur de perturbation devient trop long). Pour pallier ces inconvénients, on peut dimensionner le régulateur selon le critère sur la réponse harmonique symétrique (ou plus court : critère symétrique). Formulation de critère :

- la réponse harmonique du circuit de réglage ouvert doit prendre une forme symétrique ;
- amplification élevée de cette réponse aux faibles valeurs de la pulsation  $\omega$ . Les coefficients du régulateur calculés selon le critère symétrique sont donnés dans le tableau suivant :

$n_s$	Type de régulateur	$T_n$	$T_v$	$T_{v2}$	$T_i$
1	PI	$4T_p$	-	-	$8\frac{K}{T_1}T_p^2$
2	PID	$8T_p$	$8T_p$		$128\frac{K}{T_1T_2}T_p^3$
3	PID2	$12T_p$	$12T_p$	$12T_p$	$3456\frac{K}{T_1T_2T_3}T_p^4$

**Tableau III.2 :** Les coefficients des régulateurs selon le critère symétrique

**III.7.LA LOGIQUE FLOUE :**

La logique floue est un type de modélisation qui s'intéresse à la prédiction d'une variable catégorielle  $Y$  « subjective » au sens où elle n'est pas objectivable : elle dépend de l'observateur (l'individu est « grand », « moyen » ou « petit »). Ce cadre sort de la statistique classique dans lequel la valeur de la variable  $Y$  est objectivable (« l'individu mesure 176 cm »). L'application de la logique floue revient à tenter d'appliquer un raisonnement proche de la pensée humaine :

Les variables prédictives (comme la variable à prédire) sont catégorielles avec des modalités subjectives (« grand », « petit ») et non pas de données objectivables (176 cm). Ces variables catégorielles sont appelées « variables linguistiques ». Dans le cadre statistique usuel, la variable continue initiale (ici la taille en cm) peut être discrétisée pour donner des intervalles distincts, par exemple : « petit < 170cm < moyen < 180cm < grand ». La logique floue vise à prendre en compte les incertitudes qui existent au voisinage des seuils (due en partie à des principes de subjectivité) [19].

### III.8. Historique :

La logique booléenne classique ne permet que deux états : VRAI ou FAUX. La logique floue fut proposée par Zadeh en 1965 ; elle permet d'exprimer différents niveaux, plutôt que seulement 1 ou 0. Par exemple : le moteur est chaud, le moteur est très chaud. Quelle est la différence entre < chaud> et < très chaud>? Ou encore, un homme est haut s'il mesure 170cm. Un homme est très haut s'il mesure 190cm. Où est la ligne de démarcation ? Un homme de 180cm est-il haut ou très haut ? 180.5cm ? 179.5cm ?

La logique floue est une branche des mathématiques qui permet à un ordinateur de modéliser le monde réel de la même façon que les personnes. Elle est préoccupé par la quantification et le raisonnement en utilisant un langage qui permet des définitions ambiguë, comme " beaucoup, peu, petit, haut, dangereux. Elle s'occupe de situations où la question qui est posée et la réponse obtenue contiennent des concepts vagues.

La logique floue permet d'accommoder le concept de vérité partielle : des valeurs entre complètement vrai et complètement faux sont admises. On supporte des modes de raisonnement approximatifs plutôt qu'exactes. Son importance provient du fait que le raisonnement humain est approximatif [20].

### III.9. Fuzzification :

Pendant la fuzzification, les valeurs numériques des entrées/sorties sont transformées en ensembles flous. Par conséquent, ils sont exprimés en variables linguistiques caractérisées par une adhésion appelée sous-ensemble, qui représente chaque point d'espace d'entrée, appelé l'univers du discours. Pour une fonction d'adhésion, l'estimation est généralement donnée plus en degré plutôt qu'en valeur. En comparant avec la logique booléenne, dans laquelle la réponse est soit 0 ou 1, le degré de fonction d'adhésion prend de nombreuses valeurs entre 0 et 1[21].

A cet effet, deux méthodes de fuzzification existent :

- Définition des classes d'appartenances de toutes les variables d'entrée.
- Passage de la grandeur physique (température, pression, âge,...) à une variable linguistique.

Choix de l'opérateur de fuzzification :

- L'opérateur de fuzzification associe à une mesure de la variable  $X_0$  une fonction d'appartenance  $u_{X_0}(X)$

- Si la mesure de  $X_0$  est exacte, la fonction d'appartenance utilisée est le **singleton**
- Si la mesure est incertaine, la fonction d'appartenance généralement utilisée est de forme **triangulaire ou trapézoïdale**.

### III.10. le mécanisme d'inférence :

Les méthodes d'inférences permettent la réalisation des différents opérateurs ET, OU, ALORS, ... intervenant dans les règles d'inférences et s'appliquant aux fonctions d'appartenances .

Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont:

- Méthode d'inférence Max - Min de MAMDANI ;
- Méthode d'inférence Max- Prod de LARSEN ;
- Méthode d'inférence Somme - Prod de ZADAH.

Dans le but d'éclairer le principe de chaque méthode, on propose un tableau récapitulatif basé sur la règle suivante[22] :

Si condition Alors conclusion

Méthode	Au niveau de la condition	Au niveau de la conclusion	Entre deux règles
<b>Méthode Max-Min</b>	<b>ET</b> :est réalisé par la formation du Min. <b>OU</b> ::est réalisé par la formation du Max.	<b>Alors</b> : est réalisé par la formation du Min.	<b>OU</b> :est réalisé par la formation du Max.
<b>Méthode Max-prod</b>	<b>ET</b> :est réalisé par la formation du Min. <b>OU</b> :est réalisé par la formation du Max.	<b>Alors</b> : est réalisé par le produit.	<b>OU</b> :est réalisé par la formation du Max.
<b>Méthode Somme-prod</b>	<b>ET</b> :est réalisé par le produit. <b>OU</b> :est réalisé par la somme.	<b>Alors</b> : est réalisé par le produit.	<b>OU</b> :est réalisé par la somme.

**Tab. III.3** : Synthèse des différentes méthodes d'inférences

### III.11. Défuzzification :

La défuzzification est la dernière étape de la logique floue, elle a pour objectif de transformer la courbe d'activation finale obtenue lors de l'étape d'agrégation en une valeur réelle. Deux méthodes sont alors applicables pour obtenir la valeur retenue de la variable à prédire : La méthode de la moyenne des maxima(MOM) : correspond à la moyenne des valeurs de sortie les plus vraisemblables. La méthode des centres de gravité "centroïde"(COG) : abscisse du centre de gravité de la surface de la courbe de résultats [23].

#### III.11.1. Méthode de la moyenne des maxima (MOM):

Cette méthode est utilisée dans le cas où plusieurs ensembles auraient la même hauteur maximale, on réalise leur moyenne, c.à.d. On prend la moyenne des abscisses du maximum comme présenté dans (la figure.III.9) [23]:

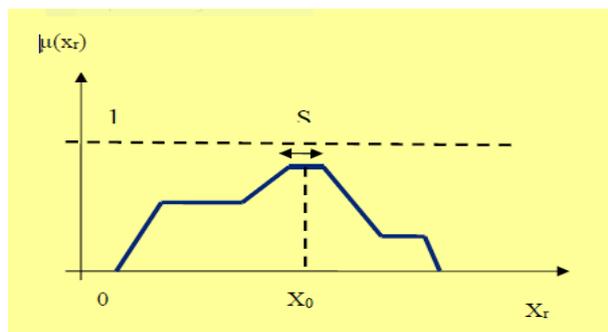


Figure III.9: Méthode de la moyenne des maxima .

#### III.11.2.La méthode des centres de gravité "centroïde"(COG) :

La sortie correspond à l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance résultante.

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} X_{ri} \mu(X_{ri})}{\sum_{i=1}^{n_i} \mu(X_{ri})} \quad (\text{III.20})$$

Cette méthode est la plus coûteuse en temps de calcul mais la plus utilisée, elle est décomposée en deux parties :

- On prend l'union des sous- ensembles flous de sortie et on en tire le centroïde globale (calcul très lourd)
- On prend chaque sous- ensembles séparément et on calcule son centroïde, puis on réalise la moyenne de tous les centroïde [24].

### III.12. Les avantages et les inconvénients de la commande floue:

#### a. Avantages:

- Pas besoin de modèles théoriques.
- Description de systèmes complexes
- L'incorporation directe des informations floues et linguistiques, provenant d'un expert humain, dans le système flou.
- Quand il n'existe pas de modèle mathématique, la logique floue permet l'utilisation d'un modèle empirique (ex : règles de type 'humain').
- Le système flou est une approximation universelle, c'est-à-dire, il est suffisamment générale pour générer n'importe quelle action.
- La logique floue est facile à comprendre par ceux qui ne sont pas des spécialistes, car elle imite la stratégie du raisonnement humain [23].

#### b. inconvénients:

- Absence de réglage et de directives précises.
- Approche "artisanale " du problème (intuition).
- Précision de réglage en général peu élevée.
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité(en l'absence d'un modèle valable).
- la cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible)[23].

### III.13. Les domaines d'applications de la logique floue :

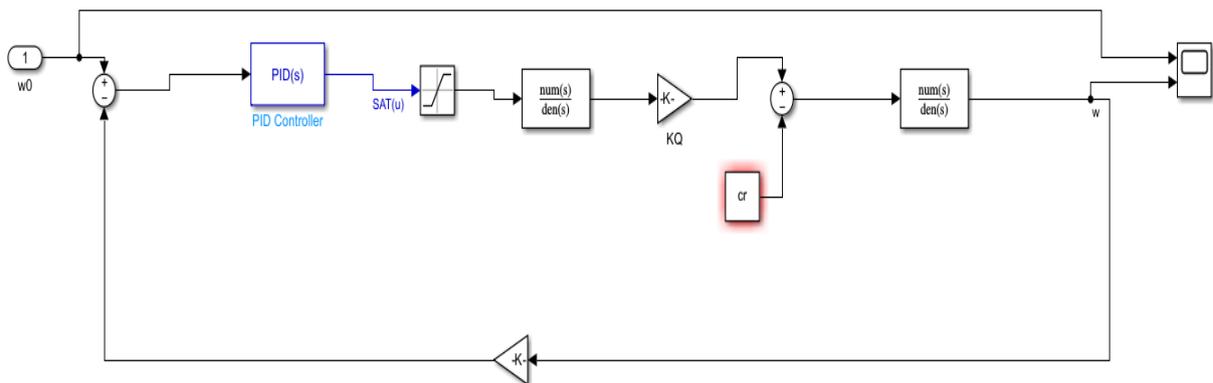
On trouve que les domaines d'applications sont nombreux et plus vastes pour cela on citera que les domaines suivants:

- En automatique, pour faire de la commande et de la régulation floue, etc.
- En traitement du signal, pour faire de la fusion de données, de la classification, de la reconnaissance de forme ou de la recherche d'information, etc.
- En robotique, pour faire de la planification de trajectoire, etc.
- En traitement d'image, pour atténuer le bruit d'une image, pour faire de l'interpolation, etc.
- Médecine (aide au diagnostique, guidage de systèmes chirurgicaux (laser chirurgie de l'oeil par exemple), etc.)
- Contrôle aérien
- Gestions des feux de circulations

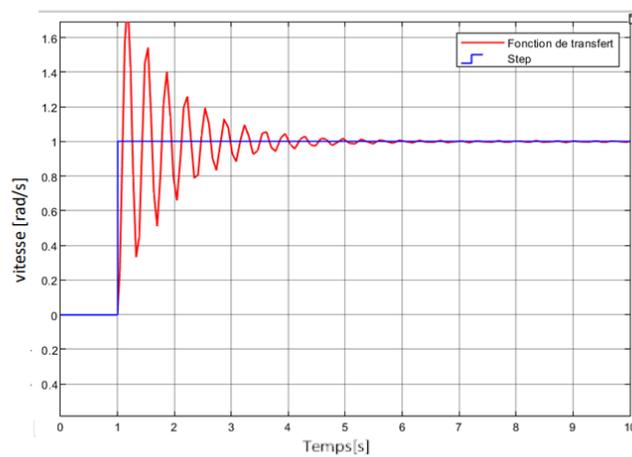
- Assurances et finances (préventions des risques, aide à la décision)
- Environnement (météo, etc.)
- Robotique (freins ABS, machines à laver, etc.).[25]

### III.13. Résultat et discussion :

le schéma suivante représente la MCC avec un régulateur PID avec un matlab sumilink avec les paramètres :  $K_I=0.5$  ,  $k_p=3.5$  ,  $k_d=1$ .



**Figure III.10:** Schéma bloc d'un MCC régulé par un PID



**Figure III.11:** caractéristique de vitesse d'un MCC régulé par un PID

- Le schéma suivant représente la MCC avec RLF avec un matlab similunk avec les paramètres :

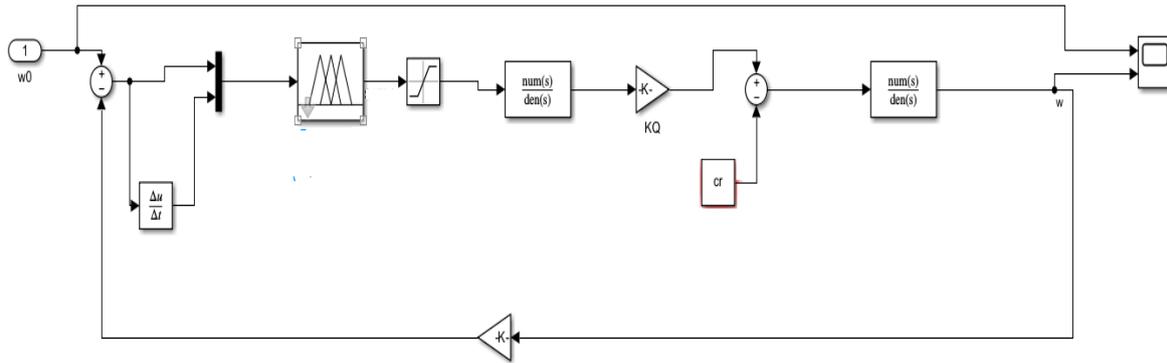


Figure III.12: bloc de la commande en vitesse d'un moteur à courant continu par RLF

Le contrôleur flou utilisé est de type Mamdani avec trois variables linguistiques, deux pour l'entrée (l'erreur (e), la dérivée de l'erreur (de)) et une pour la sortie (courant id générer par le l'induit).

Dans notre étude on a essayé plusieurs fonctions d'appartenance :

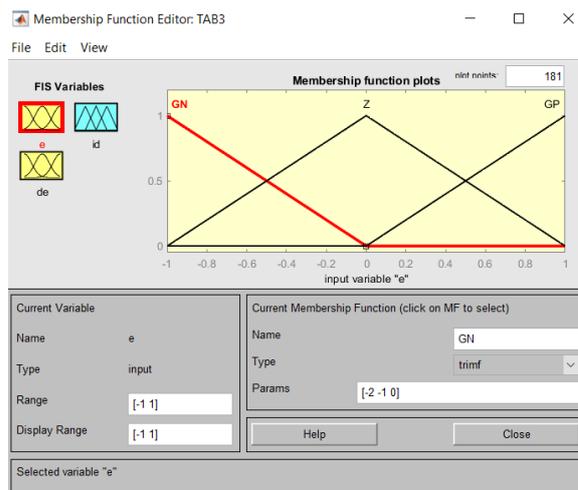


Figure III.13: Fonction d'appartenance pour (forme triangulaire).

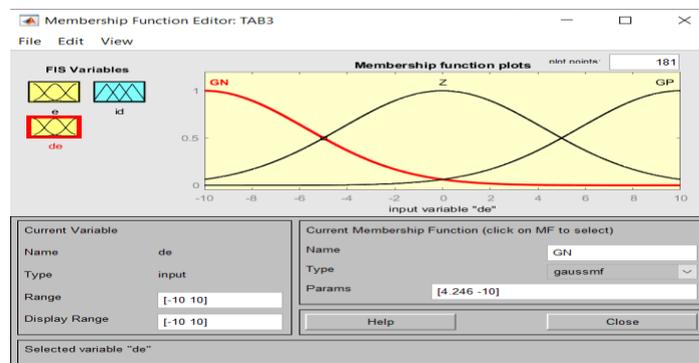
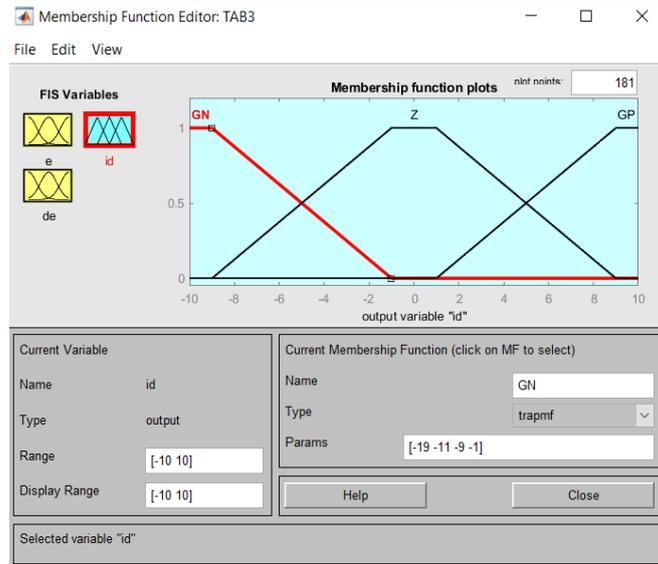


Figure III.14: Fonction d'appartenance pour de (forme gaussienne).



**Fig.III.15:** Fonction d'appartenance pour id (forme trapézoïdale).

Pour concevoir un contrôleur flou optimal, nous pouvons comparer trois différents contrôleurs avec des valeurs linguistiques variées (7, 5 et 3) pour les entrées et la sortie, ainsi que différentes formes de fonctions d'appartenance. Voici un plan détaillé pour cette comparaison :

**Contrôleur 1 (cas de 3 règles X 3 règles):**

e	GN	Z	GP
de	GN	Z	GP
GN	GN	GN	Z
Z	GN	Z	GP
GP	Z	GP	GP

**Tableau III.4 :** Table des règles floue pour la sortie id (Contrôleur1)

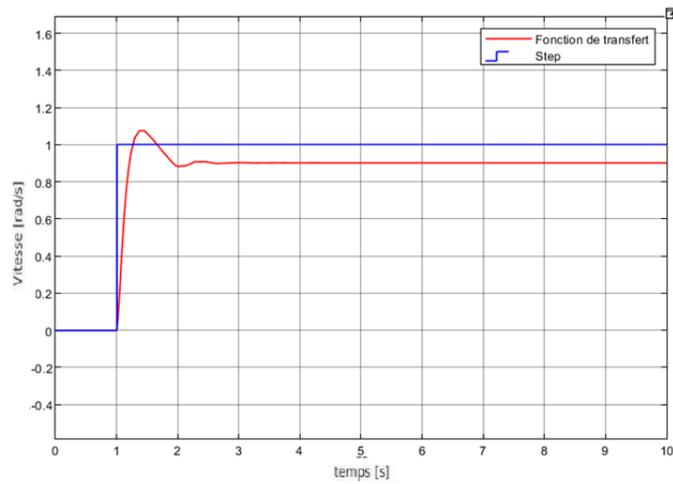


Figure III.16 : Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 3.

Contrôleur 2 (cas de 5 règles X 5 règles) :

e	GN	PN	Z	PP	GP
de	GN	PN	Z	PP	GP
GN	GN	GN	GN	PN	Z
PN	GN	GN	PN	Z	PP
Z	GN	PN	Z	PP	GP
PP	PN	Z	PP	GP	GP
GP	Z	PP	GP	GP	GP

Tableau III.5 : Table des règles floue pour la sortie id (Contrôleur5).

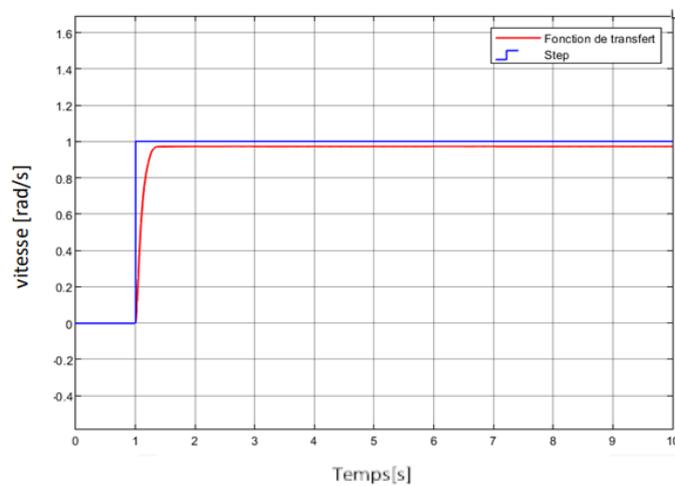
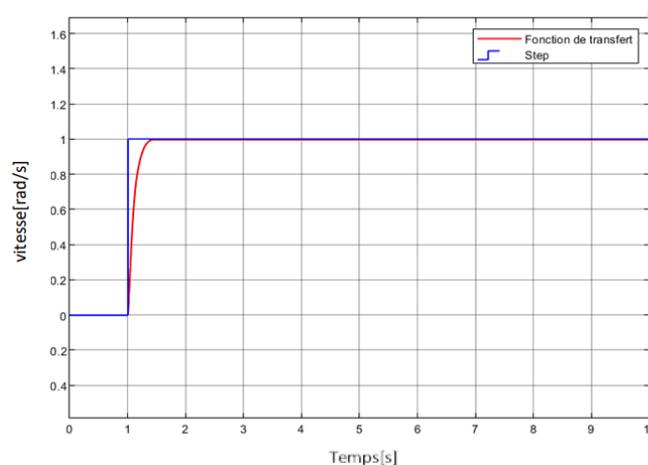


Figure III.17: Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 5.

**Contrôleur (cas de 7 règles X 7 règles) :**

e	GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP
GN	GN	GN	GN	GN	MN	PN	Z
MN	GN	GN	GN	MN	PN	Z	PP
PN	GN	GN	MN	PN	Z	PP	MP
Z	GN	MN	PN	Z	PP	MP	GP
PP	MN	PN	Z	PP	MP	GP	GP
MP	PN	Z	PP	MP	GP	GP	GP
GP	Z	PP	MP	GP	GP	GP	GP

**Tableau III.6 :** Table des règles floues pour la sortie id (Contrôleur7).



**Figure III.18:** Réponse en échelon de la vitesse du moteur obtenu par le contrôleur flou 7

### Interprétation:

En comparant les résultats des deux types de commandes (PID et logique floue), nous constatons que la commande par logique floue est plus stable, rapide et précise. De plus, en analysant les résultats des trois ensembles de règles floues linguistiques utilisées, nous trouvons que la méthode avec 7 règles est la plus précise. Nous constatons que le choix approprié des paramètres du contrôleur flou permet d'obtenir de meilleures performances.

Cette approche se rapproche du raisonnement humain grâce à l'utilisation de variables linguistiques.

### **III.14.Conclusion :**

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application de deux techniques de commande par logique floue et PID pour la machine à courant continu.

La conception de contrôleurs flous avec différentes valeurs linguistiques et formes de fonctions d'appartenance permet d'explorer un large éventail de configurations pour trouver celle qui offre les meilleures performances pour une application spécifique.

## **Chapitre IV: La maintenance de la machine à courant continu**

## IV .1. Introduction

La maintenance s'applique à tous les domaines d'activité et de production. C'est une nécessité. En effet, elle permet de maintenir un outil de production en fonctionnement ou de le réparer avec un impact économique réduit.

## IV.2 .Définition de la maintenance :

Selon la norme AFNOR (Association Française de Normalisation) NF-X 60 000, la maintenance est « l'ensemble des activités ayant pour objectif de maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié de fonctionnement pour établir une fonction requise. ».

La maintenance rassemble donc l'ensemble des actions techniques (prévention, entretien, dépannage, révision et vérification, réparation, contrôle et diagnostic), mais aussi administratives et de management, permettant à une entreprise de conserver le bon fonctionnement des équipements et d'assurer la production.

Les objectifs fixés par la direction permettent de mettre en place une stratégie de maintenance (prise en compte des enjeux humains, techniques, de sécurité, financiers, etc...). De cette stratégie découle ensuite les types de maintenance à déployer [26].

## IV.3 .Méthode de maintenance :

Les méthodes de maintenance peuvent être classées en deux grandes familles : la maintenance préventive, corrective

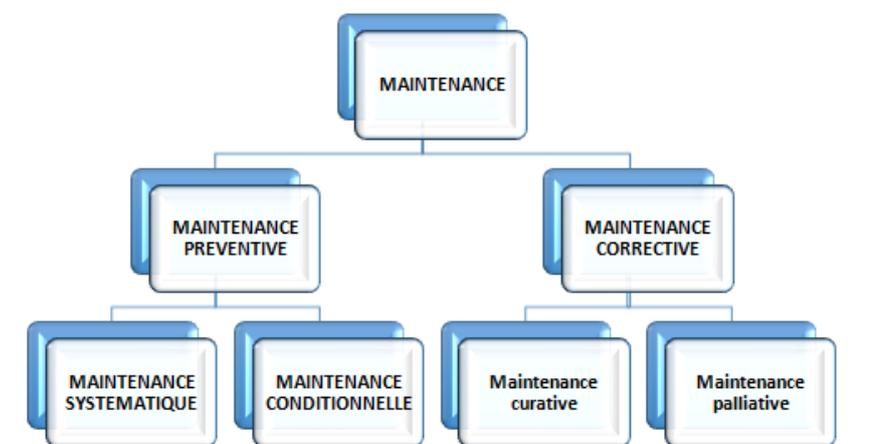


Figure IV.1.: Les méthodes de maintenance.

### IV.3.1 Maintenance préventive:

Définition AFNOR de la maintenance préventive: « Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien ».

La maintenance préventive est donc, comme son nom l'indique, de la prévention par l'entretien régulier d'une machine ou d'un bien. Elle consiste à faire des contrôles selon des normes établies et/ou conformément aux instructions du fabricant, mais également en fonction de l'expérience humaine et des historiques d'interventions réalisés sur le bien [26].

La maintenance préventive a pour but de:

- garantir la disponibilité du bien,
- augmenter sa durée de vie,
- diminuer la probabilité des pannes et donc d'actions de maintenance corrective,
- contrôler les consommations d'énergie ou de pièces détachées en contribuant à la maîtrise des stocks.

#### a. Maintenance systématique :

La maintenance préventive systématique est effectuée selon un échéancier, en fonction du temps ou du nombre d'unités d'usage, mais sans contrôle préalable du bien.

La fréquence des interventions est établie à compter de la mise en fonctionnement du bien ou à la suite d'une révision partielle ou complète de celui-ci [27].

#### b. Maintenance conditionnelle :

La maintenance préventive conditionnelle est basée sur une surveillance du bien en fonction d'un type d'évènement prédéfini (auto-diagnostique, information de capteurs...). Elle fait intervenir des informations recueillies en temps réel, au moyen de techniques comme la tribologie ou la thermographie par infra-rouge avec pour objectif d'intervenir au moment où le bien a franchi le seuil d'usure ou de dégradation fixé préalablement. Il s'agit d'effectuer la bonne opération au bon moment, pour une meilleure maîtrise des coûts [27].

**c. Maintenance prévisionnelle :**

La maintenance prévisionnelle (parfois appelée prédictive) est d'après la définition AFNOR « une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien ».

Elle consiste à anticiper les besoins de la maintenance en permettant de prévenir les pannes ou les défaillances. C'est la maintenance 4.0, avec une surveillance en continu des évolutions de certains paramètres, des seuils, des différentes data (logiciel GMAO, etc...), permettant une gestion précise pour déclencher la bonne intervention en fonction de l'ensemble des paramètres.

Un logiciel de gestion de la maintenance (GMAO) est une bonne solution informatique pour aider à un suivi efficace des interventions, récupérer des données fiables et élaborer son plan de maintenance ! Plus de prévisionnel et moins de correctif à la clé [26]!

**IV.3.2. La maintenance corrective :**

Définition AFNOR de la maintenance corrective : « Maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise ».

La maintenance corrective correspond à une opération engagée suite à une panne, un sinistre ou un aléa. Elle a pour objectif de remettre en fonctionnement les machines par un dépannage, une réparation ou le remplacement de pièces défectueuses [26].

On distingue deux types de maintenance corrective :

**a. Maintenance palliative :**

La maintenance palliative correspond au dépannage. Elle consiste à remettre provisoirement une machine ou un outil en état, dans l'attente de sa réparation. La maintenance palliative permet d'éviter l'arrêt totale de production, on parle alors de reprise de production en mode « dégradé » [28].

**Dépannage :** actions physiques exécutées pour permettre à un bien d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit exécutée.

### **b. Maintenance curative**

La maintenance curative répare les causes et conséquences de la panne. Contrairement à la maintenance palliative, il s'agit d'une action en profondeur qui agit sur le long terme, souvent en remplaçant la pièce défectueuse par une neuve. L'équipement reprend alors une production normale [28].

## **IV.4 .La maintenance de la machine à courant continu**

La maintenance d'une machine à courant continu est essentielle pour assurer son bon fonctionnement et prolonger sa durée de vie.

Voici quelques points clés à considérer dans le processus de maintenance :

- 1. Nettoyage régulier :** Éliminez la poussière, la saleté et les débris qui pourraient s'accumuler sur les composants de la machine, notamment les balais, les collecteurs et les enroulements
- 2. Vérification des balais:** Les balais doivent être inspectés régulièrement pour détecter l'usure. Remplacez-les si nécessaire pour éviter toute perte de contact avec le collecteur.
- 3. Inspection des collecteurs:** Contrôlez l'état des collecteurs pour détecter toute usure, rugosité ou formation de barres. Les collecteurs endommagés peuvent provoquer des problèmes de commutation et de performance
- 4. Vérification des enroulements :** Examinez les enroulements pour détecter les signes de surchauffe, d'isolement dégradé ou de courts-circuits. Des enroulements endommagés peuvent entraîner une défaillance de la machine
- 5. Lubrification :** Si la machine comporte des paliers, assurez-vous qu'ils sont correctement lubrifiés conformément aux recommandations du fabricant.
- 6. Contrôle des connexions :** Vérifiez régulièrement les connexions électriques pour vous assurer qu'elles sont propres, serrées et sécurisées
- 7. Test des performances :** Effectuez des tests périodiques pour évaluer les performances de la machine, notamment sa vitesse, son couple et son rendement

**8. Surveillance de la température :** Surveillez la température de fonctionnement de la machine pour détecter les signes de surchauffe, ce qui peut indiquer un problème de ventilation ou une charge excessive.

**9. Formation du personnel :** Assurez-vous que le personnel chargé de la maintenance est formé aux procédures appropriées et aux normes de sécurité.

**10. Tenue des registres :** Maintenez des registres détaillés de toutes les opérations de maintenance effectuées, y compris les inspections, les réparations et les remplacements de pièces.

En suivant ces pratiques de maintenance régulières, vous pouvez optimiser les performances de votre machine à courant continu et minimiser les temps d'arrêt imprévus. [29]

#### IV.5. Incidents de fonctionnement

Le tableau de la figure suivante vous présente:

- les principaux incidents de fonctionnement propres aux moteurs à courant continu ;
- la cause du défaut constaté ;
- les remèdes appropriés. [29]

##### Incidents de fonctionnement:

Constat	cause	Remède
Manque de courant d'excitation	-défaut d'alimentation. -inducteurs coupés. -inducteur en court-circuit.	-contrôler le variateur. -remplacement du stator bobiné.
collecteur : traces d'amorçage arrachement de métal rayures ,faux-rond	-défaut d'alimentation. -emplois hors spécifications. -vibration. -ambiance agressive. -calage d' induit .	-vérifier l'alimentation. -vérifie l'utilisatin. - contrôler l'ambiance. -réfection du collecteur. -dispositif anti-calage
Vitesse différente dans un sens par rapport à l'autre	lors du remontage mauvais indexage stators par rapports au flasque NDE et/ou calage porte-balais.	Recaler le moteur selon procédure indiqué dans la notice générale.
Déclenchement des sondes	-ventilation. -surcharge.	-contrôler le circuit de refroidissements, la ventilation forcée et son sens de rotation. -vérifier le fonctionnement de la machine entraînée.

Usure rapide des balais	-fonctionnement en sous-charge. -vibrations.	-possibilité de réduction de la ventilation par passage de la VF à l'avant. -Revoir équilibre des parties entraînées. -support moteur à contrôler.
-------------------------	---	--

**Tab.IV.1** : Incidents de fonctionnement de MCC[29]

#### IV.6.Conclusion :

Après avoir parcouru cette étude, assurez vous de retenir les points suivants :

- Les conditions de l'ambiance pour l'implantation d'un moteur à courant continu dépendant de son indice de protection.
- La ligne neutre d'une machine à courant continu est la ligne où la tension entre lames du collecteur est théoriquement nulle et sur laquelle les balais doivent être "calés".
- Toute consigne d'entretien préventif sans démontage de machine comporte normalement et dans l'ordre chronologique :
  - des vérifications au ralentissement et jusqu'à l'arrêt ;
  - des nettoyages ;
  - des mesures ou contrôles électriques et mécaniques ;
  - des vérifications à l'arrêt avant remise en route.
- En cas d'arrêt prolongé d'une machine à courant continu il est conseillé de prendre les précautions suivantes :
  - relever ou isoler les balais du collecteur ;
  - protéger le collecteur contre les chocs et les projections d'huile.

## **Conclusion générale :**

---

### **Conclusion générale :**

Dans ces chapitres, nous avons exploré en profondeur divers aspects des machines à courant continu, incluant leurs généralités, la modélisation et la simulation, la commande de la vitesse, ainsi que la maintenance.

Nous avons commencé par une introduction aux machines à courant continu, couvrant leurs principes de fonctionnement, leurs composants essentiels, et leurs applications courantes. Les machines à courant continu sont reconnues pour leur capacité à fournir un couple élevé à basse vitesse et pour leur simplicité de contrôle, ce qui les rend idéales pour des applications nécessitant une régulation précise de la vitesse.

La modélisation des machines à courant continu a été réalisée en développant des modèles électriques et mécaniques détaillés. Ces modèles ont été implémentés dans l'environnement MATLAB/Simulink, permettant une analyse dynamique des performances de la machine. Les simulations ont permis d'observer les comportements de la machine en conditions de marche à vide et en charge, mettant en évidence les caractéristiques de réponse en termes de vitesse et de courant.

Nous avons étudié différentes techniques de commande de la vitesse, notamment les contrôleurs PID et les contrôleurs basés sur la logique floue. En comparant les deux, il a été constaté que la commande par logique floue offre des avantages significatifs en termes de stabilité, rapidité, et précision. L'ajustement des paramètres des contrôleurs flous, utilisant des variables linguistiques, permet d'améliorer les performances de la machine en se rapprochant du raisonnement humain. Parmi les différentes configurations de règles floues étudiées, la méthode avec 7 règles s'est révélée être la plus précise.

La maintenance des machines à courant continu a été abordée en soulignant l'importance de la surveillance régulière et de l'entretien préventif. Les techniques de diagnostic, telles que l'analyse des vibrations et des courants, sont cruciales pour détecter les anomalies et éviter les pannes coûteuses. Une maintenance bien planifiée contribue à prolonger la durée de vie de la machine et à assurer un fonctionnement fiable et efficace.

En somme, la compréhension approfondie de la modélisation, de la simulation, de la commande, et de la maintenance des machines à courant continu est essentielle pour optimiser leur performance et leur fiabilité dans diverses applications industrielles.

## Références :

[1] BEKKOUCHE Charaf Eddine et TOUGGOURTI Abdel Kader, « Etude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu », Mémoire de Master en électrotechnique Industrielle, Université KASDI KERBAH OUARGLA ,2015-2016.

[2] M.L.SADEG, F.YAHIA TENE « Etude et réalisation de la commande par retour d'état adaptative d'un moteur à courant continu », Mémoire de Master électromécanique, Université DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES, 2015 -2016.

[3] BEN AMRANE HASSIBA ET BEN MOUSSA FADHILA <<modélisation et simulation d'un régulateur de la machine à courant continu>> ;mémoire de master en génie électrique instrumentation université Mouloud Mammeri de tizi-ouzou ;2017/2018

[4] N.BENNABI, S.CHERFA, O.MEZIANI « modélisation et simulation de la machine à courant continu sous logiciel Matlab» Mémoire DEUA en électrotechnique UMMTO, 2009-2010.

[5] <https://projet.eu.org/pedago/sin/1ere/9-mcc.pdf>.

[6][https://fr.wikipedia.org/wiki/Force de Laplace](https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_Laplace)

[7] :<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjp4JiF58mGAXV0VvEDHbGzGAgQFnoECEQQAQ&url=https%3A%2F%2Ffr.scribd.com%2Fdocument%2F737423427%2FChapitre-N-6-La-machine-a-courant-continu&usg=AOvVaw0OF1rq6H5fKzQstcjVoa8C&opi=89978449>

[8] [http://www.est-usmba.ac.ma/coursenligne/Chapitre7\\_MCC.pdf](http://www.est-usmba.ac.ma/coursenligne/Chapitre7_MCC.pdf)

[9][https://elearning.univeloued.dz/pluginfile.php/13628/mod\\_resource/content/1/cours\\_mcc%20-%20Touil%20Slimane.pdf](https://elearning.univeloued.dz/pluginfile.php/13628/mod_resource/content/1/cours_mcc%20-%20Touil%20Slimane.pdf)

[10]<https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/03/Lakehal-Memoire-L3B.pdf>

[11] Guy Segulier, Francis Notelet, «Electrotechnique Industrielle », Technique et documentation Lavoisier, 5e tirage revu, 1987.

[12] K.RAFIL, M.MEZIANI « Etude de la commande et de la régulation d'un moteur à courant continu », Mémoire d'ingénieur d'état en Machines électriques, UMMTO, 2006.

[13] Dr. Aggoune Lakhdar. Systèmes Asservis. Université Ferhat Abbas Sétif 1 .Licence Électrotechnique (troisième année).

[14] Régulation industrielle Auteurs: M.KSOURI et P.BORNE Editions Technip, Paris.

[15] Etude d'un laboratoire virtuel de simulation des machines à courant continu.

[16] Dr. BOUNADJA Elhadj ,cours «MODELISATION DES MACHINES ELECTRIQUES».

BOUGHERZA □ [17] ABDELMALEK MIMOUNE MEROUAN, «Etude □ ET Comparative en Simulation entre un Régulateur PID Classique et un Régulateur PID Intelligent». Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme de master en électromécanique ; Centre Universitaire BOUSSOOUF Abdelhafid – Mila ;2021/2022

[18] Mr. BOUDRIES Zoubir, cours «COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES» LICENCE ACADEMIQUE EN GENIE ELECTRIQUE.

[19] <https://actudactulaires.typepad.com> ...PDF principe-de-la-logique-floue-1.pdf - Actu d'actuares.

[20] Dr. Brahim BOULEBTATECHE , SUPPORT DE COURS«Commande Intelligente I. Logique Floue»

[21]ManuelaSechilariu, Fabrice Locment, dans Urban DC Microgrid, 2016

[22] S. Tamert, G. Torchiati, "Autopilotage Vectoriel d'une Machine Asynchrone par la Commande floue," Mémoire de master en électrotechnique, Université Abderrahmane Mira - Bejaia, 2013.

[23]HITOUM Houda etBELDI Rahma , «La commande floue : Application à la régulation de température» ; Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en ElectromécaniqueCentre Universitaire Abdelhafid Boussouf –Mila ;2019/2020

[24] I. Bouba, R. Ounis, "Commande de la température d'eau d'un bain par un contrôleur à Logique Floue," Mémoire de master en Informatique Industrielle, Université Larbi Ben Mhidi - Oum el Bouaghi, 2010.

[25]<http://www.ferdinandpiette.com/blog/2011/08/la-logique-floue-interets-et-limites/>, consulté le 20 Mai 2020

[26] <https://www.tribofilm.fr/les-differents-types-de-maintenance/>.

[27]<https://fr.rs-online.com/web/content/blog-discovery/maintenance/maintenance-systematique-vs-maintenance-conditionnelle>

[28][https://mobility-work.com/fr/blog/types-de-maintenance-strategie/#:~:text=La%20maintenance%](https://mobility-work.com/fr/blog/types-de-maintenance-strategie/#:~:text=La%20maintenance%20)

[29] <https://www.maxicours.com/se/cours/maintenance-des-moteurs-a-courant-continu/#:~:text=L%27entretien%20préventif%20d%27une,pas%20toujours%20au%20même%20endroit>