

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de L'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique*  
*Université Abderrahmane Mira –Bejaia-*  
*Faculté de technologie*  
**Département de génie électrique**

---

# Mémoire de fin de cycle

**En vu d'obtention du diplôme Master II en électronique**  
**Option : Automatique**

## *Thème*

*Commande floue d'un moteur à  
courant continu à excitation séparée*

**Réalisé par :**

M<sup>elle</sup> BENZENATI Siham

M<sup>elle</sup> RABIAI Meriem

**Encadré par :**

M<sup>me</sup> BELLAHSENE. N

*Année Universitaire : 2012 / 2013*

## REMERCIEMENTS

*Le plus grand merci s'adresse au bon Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé le courage et la volonté pour accomplir ce travail.*

*Nous remercions nos familles qui nous ont toujours encouragé et soutenu durant toutes nos études.*

*On tient à exprimer nos profondes reconnaissances et remerciements à notre promotrice madame **BELLAHSENE. N**, Maitre assistante, Enseignante chercheur pour sa présence, sa disponibilité à tout instant et surtout ses orientations, qu'elles trouvent ici le témoignage de notre haute considération et de notre profond respect.*

*Mr **ADLI** nous a beaucoup aidées lui aussi par ses conseils, sa patience et ses utiles critiques, nous lui en sommes très reconnaissantes.*

*Nos remerciements s'adressent également, aux membres de jury, qui nous font l'honneur d'évaluer notre modeste travail.*

*Nous remercions également l'ensemble des enseignants du département de **GENIE ELECTRIQUE** qui ont contribué à notre formation dans les meilleures conditions.*

*Comme nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce modeste travail nous espérons qu'il sera un guide pour les futurs étudiants.*

## Dédicaces

*A toi seigneur DIEU tout puissant créateur du ciel et de la terre. Je te remercie pour m'avoir donnée la volonté et surtout le courage de mener dans de bonnes conditions ce travail.*

*A celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde dans son vaste paradis, A toi mon père.*

*A la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore.*

*Une pensée pour ma grand-mère qui es aurai été c' fière de moi que dieu ouvre les portes de Son Firdaws.*

*Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à mon frère Hakim et mes sœurs Rahima, Houa, Wissam, sons Oublier la petite ange Sarah. A mes oncles et mes tantes sans exception, A ma chère sœur et binôme Siham et tout sa famille.*

*Au collègues d'étude , mes aimables amis. Toi Souhila, Nazha.*

MERJEM

## Dédicaces

*Rien n'est aussi beau à offrir que le fruit d'un labeur qu'on dédie du fond du cœur à ceux qu'on aime et qu'on remercie en exprimant la gratitude et la reconnaissance durant toute notre existence.*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenue durant toute ma vie, mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci.*

*A mes frères Nourdine et Abed Anour*

*A mes sœurs Dalila, Kahina, Zoulikha et Khadidja*

*A mes oncles et mes tantes sans exception*

*A mon futur époux chaabane qui m'a soutenue depuis mes premiers pas universitaires*

*A mes beaux parents Mr et Mme Haderbache*

*A mes belles sœurs radia et sahra*

*A mes beaux frères Adel et sa fiancé Hana ainsi que djahide*

➤ *A ma binôme Meriem et sa famille*

➤ *A tous mes amis (es) : Souhila , nazha ,*

*SIHAM*

---

<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I</b>	
<b>Fondements théoriques de la commande floue</b>	
<b>Introduction.....</b>	<b>2</b>
<b>I-1-Historique de la logique floue .....</b>	<b>2</b>
<b>I-2-Avantages et inconvénients de la logique floue.....</b>	<b>3</b>
<b>I-3-Pourquoi utiliser la logique floue ?.....</b>	<b>4</b>
<b>I-4-Théorie de sous ensemble flou.....</b>	<b>4</b>
<b>I-4-1-Concept de sous-ensemble flou.....</b>	<b>4</b>
<b>I-4-2-Définition d'un sous-ensemble flou .....</b>	<b>4</b>
<b>I-4-3-Fonction d'appartenance.....</b>	<b>5</b>
<b>I-4-4-Opérations sur les sous ensembles flous.....</b>	<b>6</b>
<b>I-4-5-Relations floues.....</b>	<b>8</b>
<b>I-5-Variable linguistique.....</b>	<b>10</b>
<b>I-5-1-Définition des variables linguistiques.....</b>	<b>10</b>
<b>I-5-2-Univers de discours.....</b>	<b>10</b>
<b>I-5-3-Propositions floues.....</b>	<b>11</b>
<b>I-6-Le contrôleur flou .....</b>	<b>12</b>
<b>I-6-1-Structure d'un contrôleur flou.....</b>	<b>13</b>
<b>I-6-1-1-Base de connaissance.....</b>	<b>13</b>
<b>I-6-1-2-La fuzzification.....</b>	<b>14</b>
<b>I-6-1-3-Mécanisme d'inférence.....</b>	<b>14</b>
<b>I-6-1-4-La défuzzification.....</b>	<b>17</b>
<b>I-7-Domain d'applications.....</b>	<b>19</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>20</b>

## Chapitre II

### Modélisation et choix du MCC

<b>Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>II-1-Définition.....</b>	<b>21</b>
<b>II-1-1-Symbole.....</b>	<b>21</b>
<b>II-2-Construction d'une machine à courant continu .....</b>	<b>22</b>
<b>II-3- Principe de fonctionnement.....</b>	<b>23</b>
<b>II-4- Différents Modes d'excitation d'un moteur à courant continu.....</b>	<b>24</b>
<b>II-4-1- Moteur à excitation série.....</b>	<b>25</b>
<b>II-4-2- Moteur à excitation shunt.....</b>	<b>26</b>
<b>II-4-3- Moteur à excitation compound (Composée).....</b>	<b>26</b>
<b>II-4-4- Moteur à excitation séparée .....</b>	<b>27</b>
<b>II-5-Le bilan de puissance .....</b>	<b>32</b>
<b>II-6-Le rendement .....</b>	<b>33</b>
<b>II-7-Avantages et inconvénients.....</b>	<b>33</b>
<b>II-8- Modélisation d'un moteur à courant continu.....</b>	<b>34</b>
<b>II-8-1-Fonction de transfert du moteur .....</b>	<b>35</b>
<b>II-8-2-Plaque Signalétique.....</b>	<b>37</b>
<b>II-8-3- Modèle mathématique de la réponse en vitesse .....</b>	<b>37</b>
<b>II-8-4- Modèle mathématique de la réponse en position.....</b>	<b>38</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>39</b>

## Chapitre III

### Application et interprétation des résultats

<b>Introduction.....</b>	<b>40</b>
<b>III-1-Application de la commande floue sur le moteur .....</b>	<b>40</b>
<b>III-1-1-Conception du régulateur.....</b>	<b>41</b>
<b>III-2-Résultats de simulation et discussion .....</b>	<b>43</b>
<b>III-2-1-Régulation en vitesse .....</b>	<b>43</b>
<b>III-2-2-Régulation en vitesse avec perturbation.....</b>	<b>45</b>
<b>III-2-3- Régulation en position.....</b>	<b>45</b>
<b>III-2-4- Régulation en position avec perturbation.....</b>	<b>47</b>
<b>Conclusion.....</b>	<b>48</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>49</b>

**Annexes**

**Annexes A.....50**  
**Annexes B.....51**  
**Annexes C .....53**

**Chapitre I**

**Figure(I-1)** : Représentations des différents types.....5

**Figure (I-2)** : Représentations de La hauteur, Le noyau, Le support.....6

**Figure (I-3)** : Fonction d'appartenance A .....6

**Figure (I-4)** : Fonction d'appartenance B .....6

**Figure(I-5)** : Fonctin d'appartenance de l' union.....7

**Figure (I-6)** : Fonction d'appartenance d'intersection.....8

**Figure (I-7)** : Opération de complémentation de la fonction d'appartenance A.....8

**Figure (I-8)** : Exemple de variation d'une variable linguistique.....10

**Figure (I-9)** : Système à commande floue.....12

**Figure (I-10)** : Structure interne d'un système flou.....13

**Figure (I-11)** : Définition de Alors dans la méthode d'inférence max-min.....15

**Figure (I-12)** : Définition de OU dans la méthode d'inférence max-min.....15

**Figure (I-13)** : Fonction d'appartenance résultante.....16

**Figure (I-14)** : Définition de ALORS dans la méthode d'inférence max-prod.....16

**Figure (I-15)** : Définition de OU dans la méthode d'inférence .....17

**Figure (I-16)** : Méthode par centre de gravité.....18

**Figure (I-17)** : Méthode par centre de gravité simplifiée.....18

**Figure (I-18)** : Méthode du maximum.....19

**Chapitre II**

**Figure (II.1)** : Symbole normalisé du moteur à courant continu .....21

**Figure(II.2)** : Constitution d'un moteur à courant continu .....22

**Figure (II.3.a)** : Aiment .....22

**Figure (II.3.b)** : Bobines .....22

**Figure (II.4)** : induit .....23

**Figure(II.5)** : Principe de fonctionnement d'un MCC .....24

**Figure (II.6)** : Différents modes d'excitations .....24

**Figure (II.7)** : Schéma de MCC à excitation série .....25

**Figure (II.8)** : Schéma équivalent de MCC à excitation série .....25

**Figure (II.9)** : Schéma de MCC à excitation shunt .....26

**Figure (II.10)** : Schéma de MCC à excitation compound .....26

**Figure (II.11)** : Schéma équivalent du moteur à excitation séparée .....27

**Figure (II.12)** : caractéristique électromécanique de couple .....29

**Figure (II.13)** : Caractéristique mécanique d'un MCC .....30



**Figure (II.14) :** Variation de la vitesse de rotation à vide en fonction de La tension d'induit .....31

**Figure(II.15) :** Variation de la vitesse de rotation en charge .....32

**Figure (II.16) :** Bilan de puissance d'un moteur .....33

**Figure (II.17) :** Schéma équivalent d'un moteur à courant continu .....34

**Figure (II-18) :** Schéma bloc du modèle de moteur électrique en vitesse .....37

**Figure (II-19) :** Modélisation sous Matlab de la réponse vitesse .....38

**Figure (II-20) :** Schéma bloc Modèle de moteur électrique en position .....38

**Figure (II-21) :** Modélisation sous Matlab de la réponse de position .....39

### Chapitre III

**Figure(III.1) :** Définition de la structure globale (entrée, sortie, type d'opérateurs) .....41

**Figure (III-2) :** Définition des fonctions d'appartenances pour 'e', 'de/dt' et 'C' .....42

**Figure (III-3) :** Écran de saisie des règles.....43

**Figure (III-4) :** Schéma bloc d'un asservissement de vitesse par RLF.....44

**Figure(III.5) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de vitesse.....44

**Figure(III-6) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de vitesse avec perturbation.....45

**Figure (III-7) :** Schéma bloc d'un asservissement de position par RLF.....46

**Figure(III.8) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de position .....46

**Figure (III-9) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de position avec perturbation.....47

### Annexe

**Figure (I) :** Méthodologie de la synthèse d'une commande floue.....50

**Figure (II) :** Schéma bloc d'un asservissement de vitesse par RLF avec perturbation .....53

**Figure(III) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de position avec perturbation.....53

**Chapitre II**

**Tableau (II-1) : Domaine d'application du MCC à excitation série.....25**

**Tableau (II-2) : Domaine d'application du MCC à excitation shunt.....26**

**Tableau (II-3) : Domaine d'application du MCC à excitation compound.....27**

**Tableau (II-4) : Domaine d'application du MCC à excitation séparée.....32**

**Tableau (II-5) : Valeurs numériques d'un moteur à courant continu.....37**

**Chapitre III**

**Tableau (III-1) : règles d'inférences.....40**

**Annexe**

**Tableau (I) : Table de transformée en p et Z .....51**

**Symboles**

Symbole	Signification
U(t)	La sortie du contrôleur.
A	Gain statique
$\Phi$	flux utile par pôle
$\varepsilon$	Le coefficient d'amortissement du système 2 <sup>ème</sup> ordre
$\omega_0$	La pulsation propre du système 2 <sup>ème</sup> ordre
t, $\tau$ , $\theta$	Temps
G, F	Fonction de transfert du système 2 <sup>ème</sup> ordre
D	Dépassement
$t_r$	Temps de réponse
$t_m$	Temps de monte
$\mu_A(x)$	Degré d'appartenance de l'élément x au sous-ensemble flou A
$\mu_A$	La fonction d'appartenance
A, B	Sous-ensemble flous
$U_1, U_2$	Univers de discours
U(t)	Tension appliquée au moteur
I(t)	Intensité traversant le moteur
$C_u$	Couple moteur généré
$C_m$	Couple électromagnétique
f	Coefficient de frottement visqueux
$K_e$	Constant de vitesse
$C_p$	Couple de pertes
e (t)	Force contre électromotrice
$\Omega$ (t)	Vitesse de rotation du rotor
$C_r$	Couple résistant
J	Moment d'inertie de l'axe du rotor
$K_c$	Constante de couple

**Abréviations**

MCC : Moteur à courant continu

RLF : Régulateur à logique floue

La régulation est l'un des volets de l'automatique qui connaît un essor considérable vu son importance dans l'industrie.

Au tout début, on faisait appel à la régulation classique à cause de ses avantages comme sa simplicité à utiliser, sa fiabilité et son efficacité, les méthodes classiques de régulation basées sur le dimensionnement du régulateur en utilisant le modèle mathématique du système, mais souvent les qualités d'un régulateur classique restent limitées à cause de la complexité réelle des systèmes à commander (non linéarité) et plus d'inconvénients dans le milieu industriel.

Plusieurs applications industrielles nécessitent l'utilisation des méthodes modernes de contrôle, permettant d'avoir une réponse rapide et des performances dynamiques élevées.

Parmi ces méthodes, on cite le réglage par logique floue (RLF) laquelle est caractérisée par sa robustesse et son insensibilité à la variation des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités.

Dans le cadre de notre travail, nous allons étudier un moteur à courant continu commandé par la logique floue. Ce mémoire est donc constitué d'une introduction générale, de trois chapitres et d'une conclusion générale.

Nous allons tout d'abord dans le chapitre 1 définir formellement ce qu'est la logique floue. Comme nous le verrons, la logique floue repose sur des fondements mathématiques solides, notamment sur la théorie mathématique des ensembles flous, il faudra par conséquent définir des opérateurs pour la logique Floue.

Dans le deuxième chapitre on s'intéressera à la description du moteur à courant continu tout en expliquant son principe de fonctionnement, ses éléments principaux, les différents types de moteurs, la modélisation de MCC, et le modèle mathématique d'une réponse en vitesse et en position.

Le troisième et dernier chapitre on entamera l'application de la commande floue en vitesse et en position.

Enfin, nous terminerons ce présent travail par une conclusion générale résumant les différents résultats obtenus.

La simulation du régulateur conçu sera effectuée dans l'environnement MATLAB SIMULINK.

**Introduction**

La logique floue constitue aujourd'hui une approche alternative intéressante. Elle présente plusieurs avantages tels que le raisonnement proche de celui de l'homme, sa capacité à contrôler des performances dynamiques et ses qualités intéressantes de robustesse. La logique floue inspire ses caractéristiques du raisonnement humain. Elle est basée sur la constatation que la plupart des phénomènes ne peuvent être représentés à l'aide de variables booléennes qui ne peuvent prendre que deux valeurs 0 ou 1.

La logique floue est donc un outil pour la manipulation et la représentation des connaissances imparfaitement décrites, ses objets sont modélisés par des ensembles flous support de base des notions vagues.

Enfin, elle présente aussi l'intérêt d'être plus facile à implémenter qu'une logique probabiliste.

**I-1-Historique de la logique floue [1]****I-1-1-Apparition de la logique floue**

Le terme d'ensemble flou apparaît pour la première fois en 1965 lorsque le professeur Lotfi Zadeh, de l'université de Berkeley aux USA, publie un article intitulé « Ensembles flous » (Fuzzy sets). Il a réalisé depuis de nombreuses avancées théoriques majeures dans le domaine et a été rapidement accompagné par de nombreux chercheurs développant des travaux théoriques.

**I-1-2-Premières applications**

Parallèlement, certains chercheurs se sont penchés sur la résolution par logique floue de problèmes réputés difficiles. Ainsi en 1975, le professeur Mamdani à Londres développe une stratégie pour le contrôle des procédés et présente les résultats très encourageants qu'il a obtenus sur la conduite d'un moteur à vapeur. En 1978, la société danoise F.L.Smidth réalise le contrôle d'un four à ciment. C'est là la première véritable application industrielle de la logique floue.

**I-1-3-Développement**

C'est au Japon où la recherche n'est pas seulement théorique mais également très applicative, que la logique floue connaît son véritable essor. Dans l'industrie, le traitement des eaux, les grues portuaires, les métros, les systèmes de ventilation et de climatisation sont touchés. Enfin, des applications existent dans des domaines très différents tels que la finance ou le diagnostic médical. A partir de 1990, c'est en Allemagne que des applications apparaissent en grand nombre ainsi qu'à une moindre échelle aux USA.

Aujourd'hui, une vaste gamme de nouveaux produits ont une étiquette « produit flou (Fuzzy) ».

**I-2-Avantages et inconvénients de la logique floue**

Évidemment, le réglage par la logique floue réunit un certain nombre d'avantages et inconvénients. Les avantages essentiels sont :

- La théorie est simple et s'applique à des systèmes complexes.
- Robustesse de la commande floue vis-à-vis des incertitudes.
- Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe.
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire).

Par contre les inconvénients sont :

- Technique de réglage essentiellement empirique.
- Performances dépendent de l'expertise.
- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances de l'opérateur, est souvent difficile).

### I-3-Pourquoi utiliser la logique floue ?

Il convient d'utiliser la logique floue lorsque des imperfections entachent la connaissance dont nous disposons sur le système, lorsqu'une modélisation rigoureuse de celui-ci est difficile, lorsqu'il est très complexe, lorsque notre façon naturelle de l'aborder passe par une vue globale de certains de ses aspects.

Si elle impose une standardisation de la signification des descriptions du système exprimées linguistiquement, ce qui peut sembler rédacteur par rapport à une utilisation purement symbolique des descriptions linguistiques, la logique floue présente l'avantage de permettre le passage d'une telle description d'un expert ou d'un observateur à l'autre.

### I-4-Théorie de sous ensemble flou

#### I-4-1-Concept de sous-ensemble flou

Le concept de sous-ensemble flou a été introduit pour éviter les passages brusques d'une classe à une autre (dans la classe noir à la classe blanche par exemple) et autoriser des éléments à n'appartenir complètement ni à l'une ni à l'autre, ou encore à appartenir partiellement à chacune (avec un fort degré à la classe noire et un faible degré à la classe blanche dans le cas du degré foncé).

La notion de sous-ensemble flou permet de traiter :

- Des catégories aux limites mal définies (comme "centre ville "ou "ancien").
- Des situations intermédiaires entre le tout et le rien ("presque noir").

Le concept de sous-ensemble flou constitue un assouplissement de celui de sous-ensemble flou d'un ensemble donné, il n'existe pas d'ensemble flou sens propre, tous les ensembles considérés étant classique et bien définis.

#### I-4-2-Définition d'un sous-ensemble flou

Les sous-ensembles flous constituent une extension des ensembles classiques. Contrairement à l'algèbre booléenne qui associe à chacun des éléments la valeur 0 ou 1, La théorie des sous-ensembles flous attribue un degré de confiance compris dans l'intervalle  $[0, 1]$  à chacun de ses éléments. De par cette représentation, cette approche, qualifiée d'ensembliste, permet donc de modéliser une imprécision sur la connaissance des bornes d'un paramètre. [5]

Un sous-ensemble flou  $A$  d'un référentiel  $X$  est caractérisé par une fonction d'appartenance  $\mu_A$  :

Si  $\mu_A$  est la fonction d'appartenance de l'ensemble flou  $A$

$$\forall x \in X, \mu_A \in [0,1]$$

$$\text{L'ensemble } A \text{ est défini par : } A = \{(X, \mu_A(x)) / x \in X\}$$

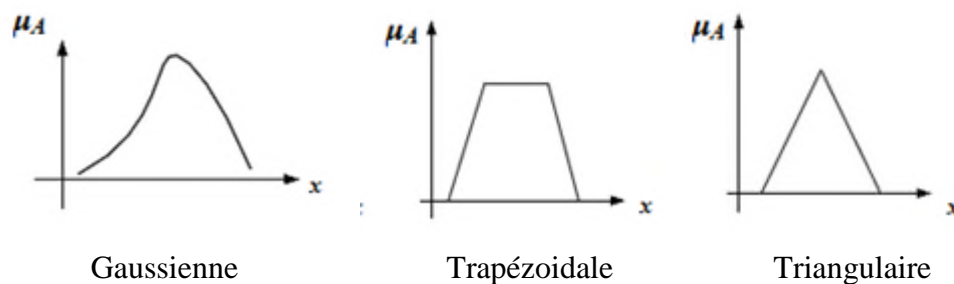
### I-4-3-Fonction d'appartenance

Au lieu d'appartenir à l'ensemble « vrai » ou à l'ensemble « faux » de la logique binaire traditionnelle, la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné.

Le degré d'appartenance à un ensemble flou est matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée  $\mu$  et appelée « facteur d'appartenance ». La fonction d'appartenance décrivant un sous-ensemble flou est caractérisée par quatre propriétés :

- **Le type** : La forme du nombre flou qui peut être triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ou sigmoïdale.
- **La hauteur** :  $H(A) = \text{Sup}_{x \in X} (\mu_A(x))$  de la fonction d'appartenance, un sous-ensemble flou est dit normalisé s'il est de hauteur 1.
- **Le noyau** :  $N(A) = \{x \mid \mu_A(x) = 1\}$  est l'ensemble des éléments qui appartiennent totalement à  $A$ , pour les fonctions de type triangulaire, le noyau est un singleton qui est appelé aussi valeur modale.
- **Le support** :  $S(A) = \{x \mid \mu_A(x) \neq 0\}$ , cet ensemble décrit l'ensemble des éléments qui sont partiellement dans  $A$ .

#### ➤ Le type



**Figure(I-1) :** Représentations des différents types



➤ La hauteur, Le noyau, Le support

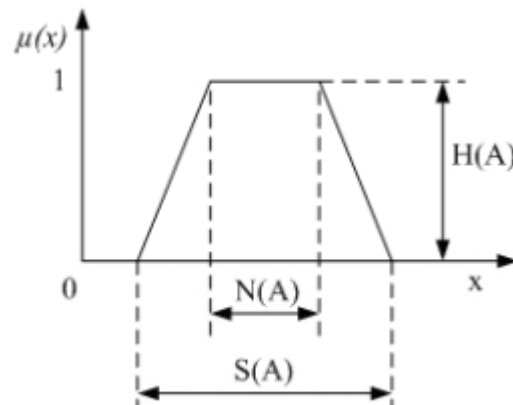


Figure (I-2) : Représentations de La hauteur, Le noyau, Le support

#### I-4-4-Opérations sur les sous ensembles flous

Supposons que A et B sont deux sous-ensembles flous définis dans un univers du discours X par les fonctions d'appartenance  $\mu_A$  et  $\mu_B$ . [3]

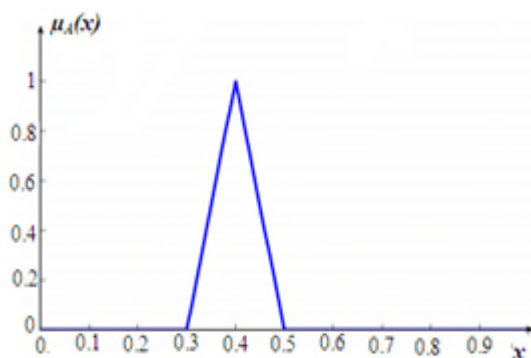


Figure (I-3) : Fonction d'appartenance A

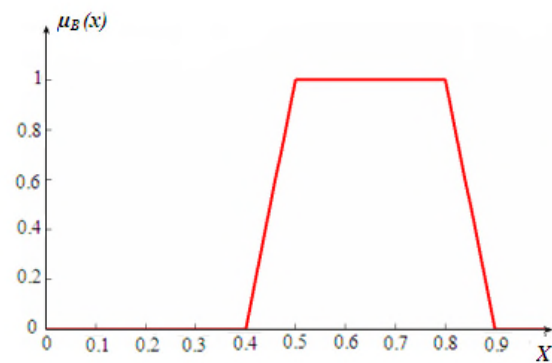


Figure (I-4) : Fonction d'appartenance B

On peut définir des opérations ensemblistes telles que l'égalité, l'inclusion, l'intersection, l'union et le complément grâce à des opérations sur les fonctions d'appartenance.

- **Égalité** : A et B sont dits égaux, propriété que l'on note  $A = B$ .  
si leurs fonctions d'appartenance prennent la même valeur en tout point de X :

$$\forall x \in X \quad \mu_A(x) = \mu_B(x)$$

- **Inclusion** : A est dit inclus dans B, propriété que l'on note  $A \subset B$ ,  
si tout élément x de X qui appartient :

$$\forall x \in X \quad \mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

- **La conjonction floue 'ET' ou Intersection** : L'intersection de A et B, que l'on note  $A \cap B$ , est le sous-ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus petit des deux degrés d'appartenance  $\mu_A$  et  $\mu_B$

$$\forall x \in X \quad \mu_{(A \cap B)}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$$

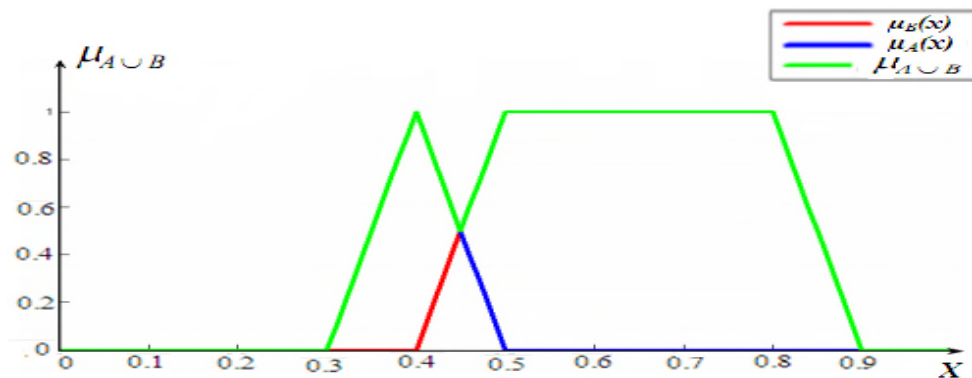
- **La disjonction floue 'OU' ou Union** : L'union de A et B, que l'on note  $A \cup B$ , est le sous-ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus grand des deux degrés d'appartenance  $\mu_A$  et  $\mu_B$  :

$$\forall x \in X \quad \mu_{(A \cup B)}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$$

- **La Complémentation, négation ou inverse** : Le complément de A, que l'on note  $A^c$ , est le sous-ensemble flou de X constitué des éléments x lui appartenant d'autant plus qu'ils appartiennent peu à A :

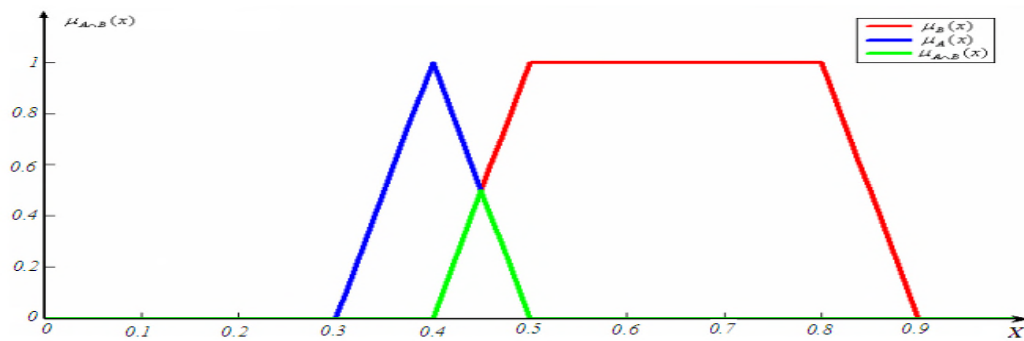
$$\forall x \in X \quad \mu_{(A^c)}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

La fonction d'appartenance (**Figure I-5**) «  $\mu_A \cup \mu_B$  » est définie, pour tout  $u \in U$ , par :



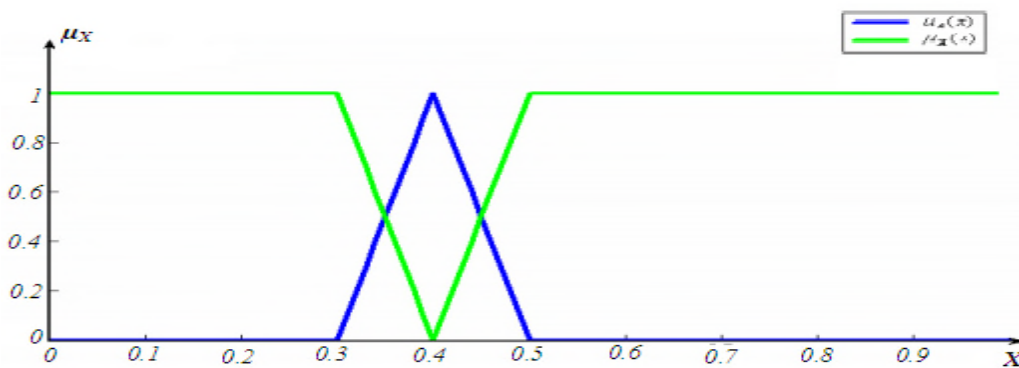
**Figure(I-5):** Fonctin d'appartenance de l' union

La fonction d'appartenance (**Figure I-6**) «  $\mu_A \cap \mu_B$  » est définie, pour tout  $u \in U$ , par :



**Figure (I-6) :** Fonction d'appartenance d'intersection

La fonction d'appartenance (**Figure I-7**) «  $\mu_{\bar{A}}$  » du complément d'un ensemble A est définie, pour tout  $u \in U$ , dans les deux cas par :



**Figure (I-7) :** Opération de complémentation de la fonction d'appartenance A

## I-4-5-Relations floues

### I-4-5-1-Définition d'une relation floue [3]

Une relation floue est un concept qui permet de définir un sous-ensemble flou sur un univers du discours, tout en tenant compte des relations qui relient les univers du discours initiaux.

La fonction d'appartenance définissant ce sous-ensemble flou ne se résume pas forcément à une simple combinaison des fonctions d'appartenance définissant des sous-ensembles flous dans les univers du discours initiaux.

**I-4-5-2-Les différentes relations floues [6]****a. Le produit cartésien**

Soient  $n$  ensembles flous  $A_1, A_2, \dots, A_n$  de référentiels  $U_1, U_2, \dots, U_n$  le produit cartésien des ensembles flous est l'ensemble flou noté  $A_1 * A_2 * \dots * A_n$

Dont la fonction d'appartenance est

$$\mu_{A_1 * A_2 * \dots * A_n}(X_1, X_2, \dots, X_n) = \text{Min}(\mu_{A_1}(X_1), \mu_{A_2}(X_2), \dots, \mu_{A_n}(X_n))$$

**b. Projection d'un ensemble flou**

Soit un sous ensemble flou  $A$  défini sur univers  $U_1 * U_2$  produit cartésien de deux ensembles de référence  $U_1$  et  $U_2$ . La projection sur  $U_1$  du sous ensemble flou  $A$  de  $U_1 * U_2$  est le sous ensemble flou  $\text{proj}_{U_1}(A)$  de  $U_1$  dont la fonction d'appartenance est définie par :

$$\forall x_1 \in U_1, \mu_{\text{proj}_{x_1}(U_1)} = \sup_{x_2 \in U_2} \mu(x_1, x_2)$$

**c. Composition des relations floues**

Il existe différents types d'opérations permettant la composition de deux ou plusieurs relations floues. Nous proposons ici uniquement les opérations de types max-min et max-prod pour la compositions de deux relations floues  $R$  entre  $U_1$  et  $U_2$  et  $S$  entre  $U_2$  et  $U_3$ .

**➤ Composition max-min**

La relation floue composée de  $R$  et de  $S$  est une relation floue entre  $U_1$  et  $U_3$  et notée  $RoS$  et dont la fonction d'appartenance est défini par :

$$\mu_{Ros}(X, Z) = \text{Max}_{y \in U_2} [\text{Min}(\mu_R(X, Y), \mu_S(Y, Z))]$$

**➤ Composition Max-prod**

On désigne par «\*» une opération de type produit, on a :

$$\mu_{Ros}(X, Z) = \text{Max}_{y \in U_2} [\text{Min}(\mu_R(X, Y) * \mu_S(Y, Z))]$$

## I-5-Variable linguistique

### I-5-1-Définition des variables linguistiques

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme :

- Quelque, beaucoup, souvent.
- Chaud, froid, rapide, lent.
- Grand, petit, etc.

Les variables linguistiques est représentée par un triplet  $(V, X, T_V)$ , dans lequel  $V$  est une variable (la vitesse, la température...) définie sur un ensemble de référence  $X$ , sa valeur peut être n'importe quel élément de  $X$ , nous désignons par  $T_V(A_1, A_2, A_3, \dots)$  un ensemble, fini ou infini, des sous ensembles flous de  $X$ , qui son utilisés pour caractériser  $V$ , afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de variable linguistique, Les termes sont des mots ou des expressions vagues du langage naturel comme (lente, moyenne, rapide) plus où chaque terme est caractérisé par un ensemble flou.

### I-5-2-Univers de discours

Soit  $X$  est la variable linguistique qui désigne la température de l'eau, on peut la décrire par un certain nombre de mots par exemple: «Chaud», «Froid», «Tiède», chaque terme est modélisé par un ensemble flou et donc par une fonction d'appartenance. L'univers de discours est défini comme le domaine de variable linguistique, il couvrira par conséquent l'ensemble des valeurs prises par cette variable. [6]

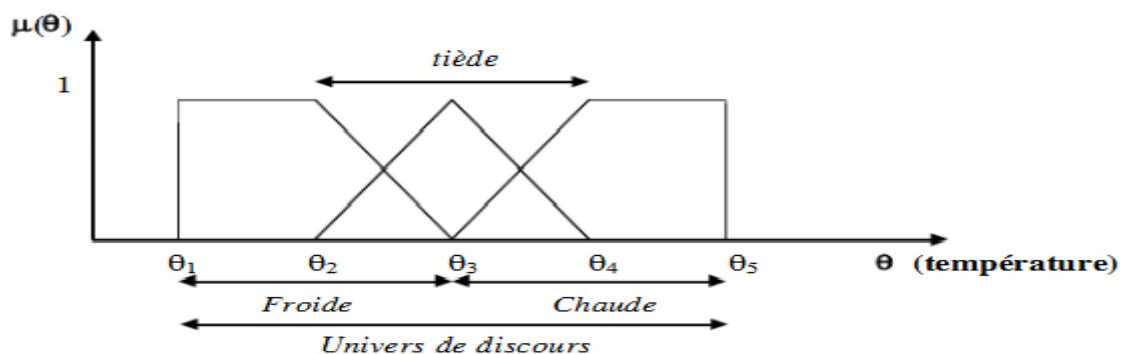


Figure (I-8) : Exemple de variation d'une variable linguistique

### I-5-3-Propositions floues

Une proposition floue est un énoncé contenant un ou plusieurs prédicats flous selon qu'elle est simple ou composée.

#### I-5-3-1-Proposition floue simple

Soit une variable linguistique  $(X, U, T_x)$ , une proposition floue simple est de la forme « X est A » où A est un élément de  $T_x$ , associé à un prédicat flou tel que « jeune », « chaude »...etc.

#### I-5-3-2-Proposition floue composée

Une proposition floue générale est obtenue par la composition de propositions élémentaires «X est A», «Y est B»,... pour des variables  $x, y, \dots$ . Supposées non indépendantes. Habituellement les propositions floues générales sont classées en quatre types :

➤ **La conjonction de propositions floues élémentaires**

$$p : (x_1 \text{ est } A_1) \text{ et } \dots \text{ et } (x_n \text{ est } A_n)$$

Dans ce cas, la conjonction est associée au produit cartésien  $A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n$  caractérisant la variable conjointe  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  sur les univers de discours  $X_1 * X_2 * \dots * X_n$ . Sa valeur de vérité est alors définie par :

$$V(p) = \min \{ \mu_{A_1}(X_1), \dots, \mu_{A_n}(X_n) \}$$

➤ **La disjonction de propositions floues élémentaires**

$$p : (X_1 \text{ est } A_1) \text{ ou } \dots \text{ ou } (X_n \text{ est } A_n)$$

La valeur de vérité de la disjonction sur les univers du discours  $X_1 * X_2 * \dots * X_n$  est définie par :

$$V(p) = \max \{ \mu_{A_1}(X_1), \dots, \mu_{A_n}(X_n) \}$$

➤ **Les implications entre propositions floues**

Une implication floue associe à toute règle floue de la forme si « V est A alors W est B », construite à partir des variables linguistiques  $(V, X, T_V)$  et  $(W, Y, T_W)$  une relation floue R entre X et Y, de fonction d'appartenance : La fonction d'appartenance  $\mu_R$  de cette relation dépend des fonctions d'appartenance  $\mu_A$  et  $\mu_B$  de A et B.

$$\forall x \in X, \forall y \in Y, \mu_R(x, y) = F(\mu_A(x), \mu_B(y))$$

Où  $F$  est une fonction particulière appelée fonction d'implication floue, de  $[0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ . En logique floue, de nombreuses implications floues ont été développées, correspondant chacune à une interprétation différente des règles floues. Les plus utilisées sont sans aucun doute les implications de MAMDANI (minimum) et LARSEN (produit).

- **MAMDANI**

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

- **LARSEN**

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(x)$$

➤ **Les combinaisons**

De conjonction, disjonction et implication de propositions floues élémentaires. Par exemple, «si (X1 est A11) **et** (X2 est A12) **alors** (Y est B1)», etc

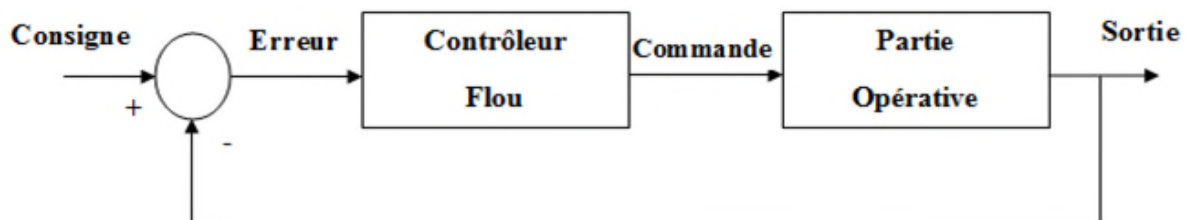
#### I-6-Le contrôleur flou [4]

Lorsque le nouveau concept de la logique floue a été proposé, ses premières applications étaient dans le domaine du contrôle des systèmes fait des experts humains.

Le contrôle de ces systèmes fait apparaître deux types d'information :

- Des informations numériques obtenues par les mesures des capteurs
- Des informations linguistiques obtenues par les experts humains

Le contrôle flou utilise la logique floue comme une démarche qui peut couvrir la stratégie du contrôle linguistique. Il est intégré dans la partie qui gère les données de commande et de contrôle de la partie opérative du système, appelée contrôleur flou **Figure (I-9)** :



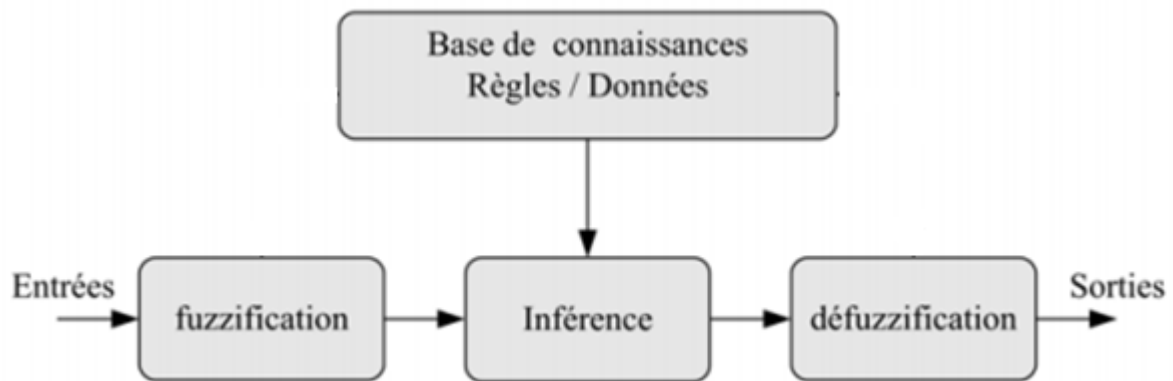
**Figure (I-9) :** Système à commande floue

### I-6-1-Structure d'un contrôleur flou [7]

La logique floue est souvent associée à la notion de régulateur et plus particulièrement de régulateur flou (en anglais Fuzzy Logic Controller ou FLC). Le modèle flou permet de relier à la fois les observations scientifiques et l'expérience de l'opérateur à des représentations symboliques et qualitatives.

Un contrôleur flou est composé de quatre blocs principaux :

- Base de connaissance.
- Interface de fuzzification.
- Mécanisme d'inférence.
- Interface de défuzzification.



**Figure (I-10) :** Structure interne d'un système flou

#### I-6-1-1-Base de connaissance

Elle contient les définitions des fonctions d'appartenance (formes et paramètres) associées aux variables d'entrée/sortie ainsi que l'ensemble des règles floues.

Le problème initial est alors décomposé en un ensemble de règles, de la forme :

“SI variable EST propriété, ALORS action”

Qui définit la réponse désirée du système en sortie pour les conditions d'entrée du système.

Le nombre et la complexité des règles dépendent du nombre de paramètres d'entrée qui doivent être utilisés et du nombre de variables floues associées à chaque paramètre.

Dans le cas où plusieurs données d'entrée sont retenues, les règles vont s'exprimer par exemple comme suit :

Si  $x_1$  est A1 ET  $x_2$  est A2 alors  $y$  est B

Si  $x_1$  est A1 OU  $x_2$  est A2 alors  $y$  est B



Où  $x_1$ ,  $x_2$  et  $y$  sont les grandeurs physiques caractéristiques du système,  $A_1$ ,  $A_2$  et  $B$  sont les termes linguistiques, « OU » et « ET » les opérateurs de liaison des fonctions d'entrée.

### I-6-1-2-La fuzzification [3]

La fuzzification est le premier traitement qui entre en compte dans la structure d'un contrôle régi par logique floue, durant cette phase les informations issues du système sont tout d'abord normalisées. Ensuite, les données normalisées sont transformées en qualifications linguistiques.

Les entrées dans un système flou sont en général mesurées à l'aide d'organes de mesures qui sont le plus souvent de type analogique. Étant donné que, l'implémentation du système flou se fait toujours en numérique, il faut d'abord convertir les entrées analogiques en digital, puis on procède à la fuzzification. L'adaptation des entrées permet de garantir l'appartenance de celles-ci à l'univers de discours choisi. La dernière étape de fuzzification est la génération des degrés d'appartenance à chaque valeur linguistique définie par sa fonction d'appartenance.

### I-6-1-3-Mécanisme d'inférence [2] [5]

Considéré comme le « cerveau » du contrôleur, il permet de lier les degrés d'appartenance des fonctions d'appartenance d'entrée aux fonctions d'appartenance de sortie. Le degré d'appartenance de la fonction de sortie peut être calculé par différentes méthodes :

- La méthode d'inférence min-max.
- La méthode d'inférence max-prod.
- La méthode d'inférence somme-prod

#### I-6-1-3-1-La méthode Min-Max

C'est la méthode la plus universelle mais qui n'est guère applicable en raison du temps de calcul très long. Cette méthode réalise, au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation maximum et l'opérateur ET par la formation du minimum.

La conclusion dans chaque règle, introduite par ALORS, lie le facteur d'appartenance de la condition avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie  $X_r$  par l'opérateur ET, réalisé dans le cas présent par la formation du minimum.

Enfin l'opérateur OU qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum.

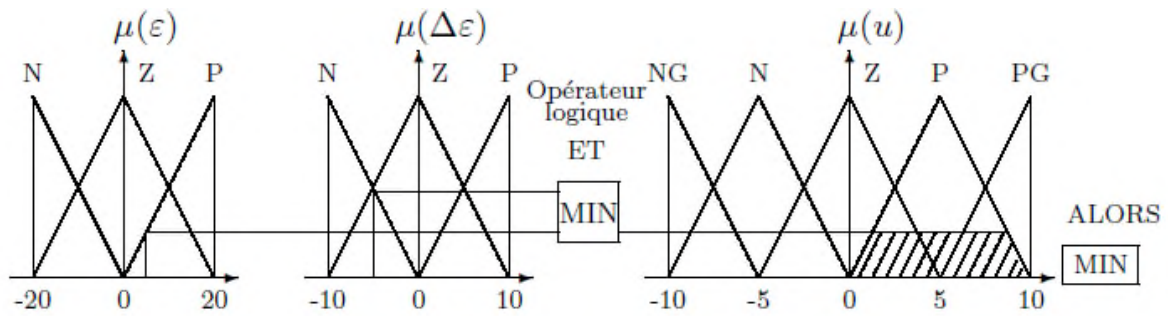


Figure (I-11) : Définition de Alors dans la méthode d'inférence max-min

Par ailleurs l'interaction entre les règles sera nommée OU ainsi, on considère que les deux règles suivantes :

- Si  $\epsilon$  est Z et  $\Delta\epsilon$  est N ALORS u est N
  - Si  $\epsilon$  est P et  $\Delta\epsilon$  est N ALORS u est P
- Se lisent
- Si  $\epsilon$  est Z et  $\Delta\epsilon$  est N ALORS u est N OU
  - Si  $\epsilon$  est P et  $\Delta\epsilon$  est N ALORS u est P

Et ce OU se traduit par l'opération max, Nous obtenons ainsi la fonction d'appartenance résultante.

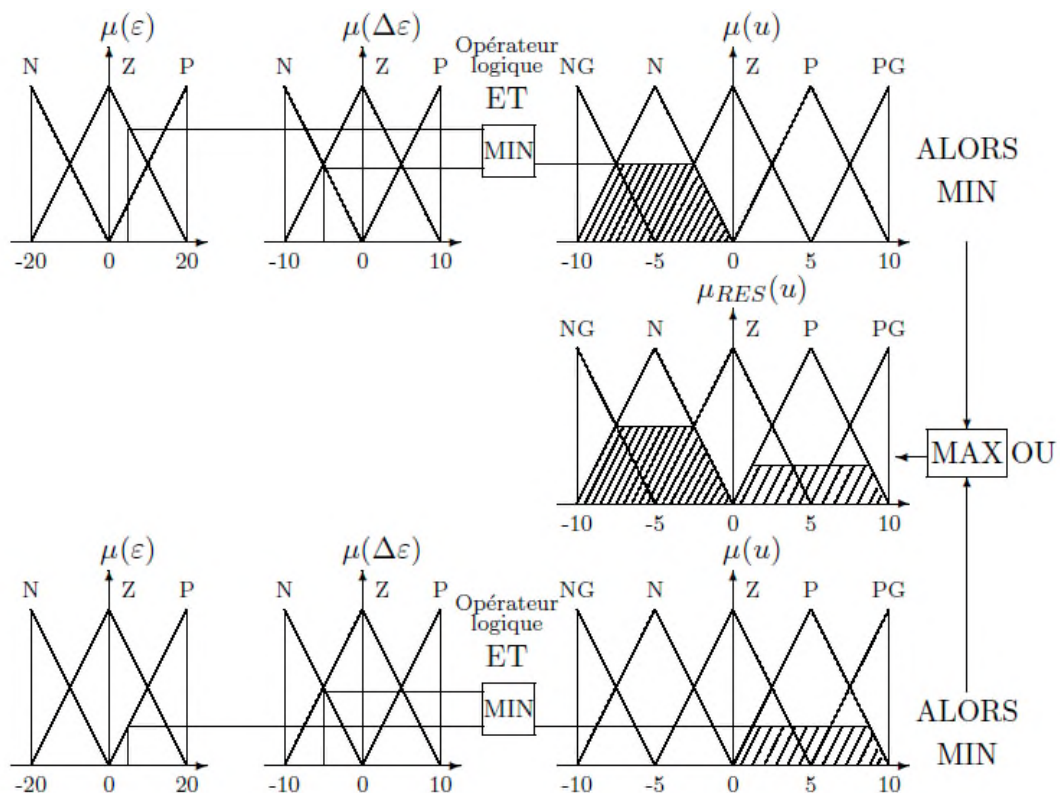
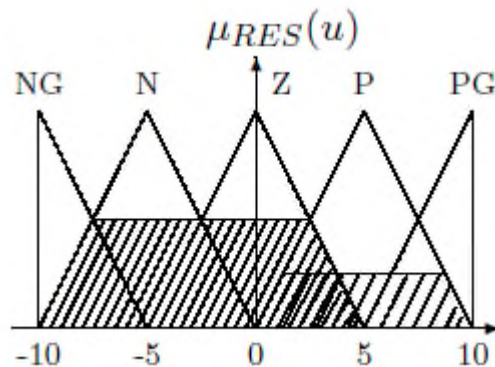


Figure (I-12) : Définition de OU dans la méthode d'inférence max-min

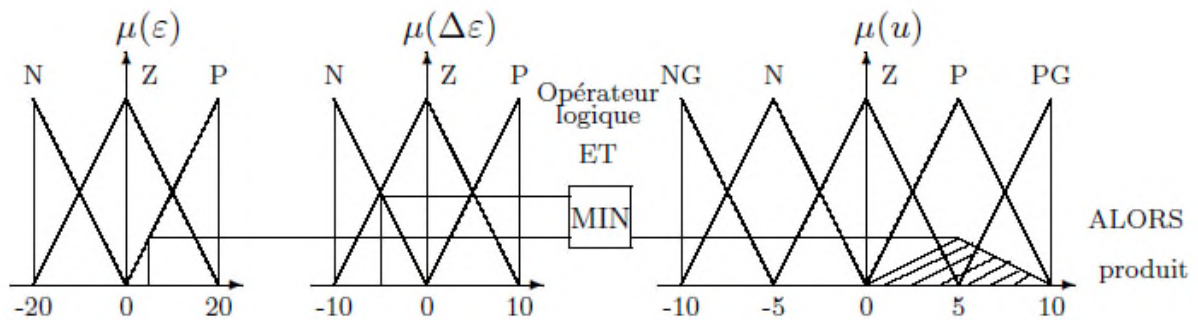
L'application de l'ensemble des règles donne la fonction d'appartenance partielle représentée sur la **Figure (I-13)**.



**Figure (I-13)** : Fonction d'appartenance résultante

**I-6-1-3-2-La méthode d'inférence max-prod**

La différence avec la méthode précédente est la réalisation de ALORS qui se traduit par la multiplication de la fonction d'appartenance considérée par la valeur de la règle. Ce résultat est illustré sur la **figure (I-14)**.



**Figure (I-14)** : Définition de ALORS dans la méthode d'inférence max-prod.

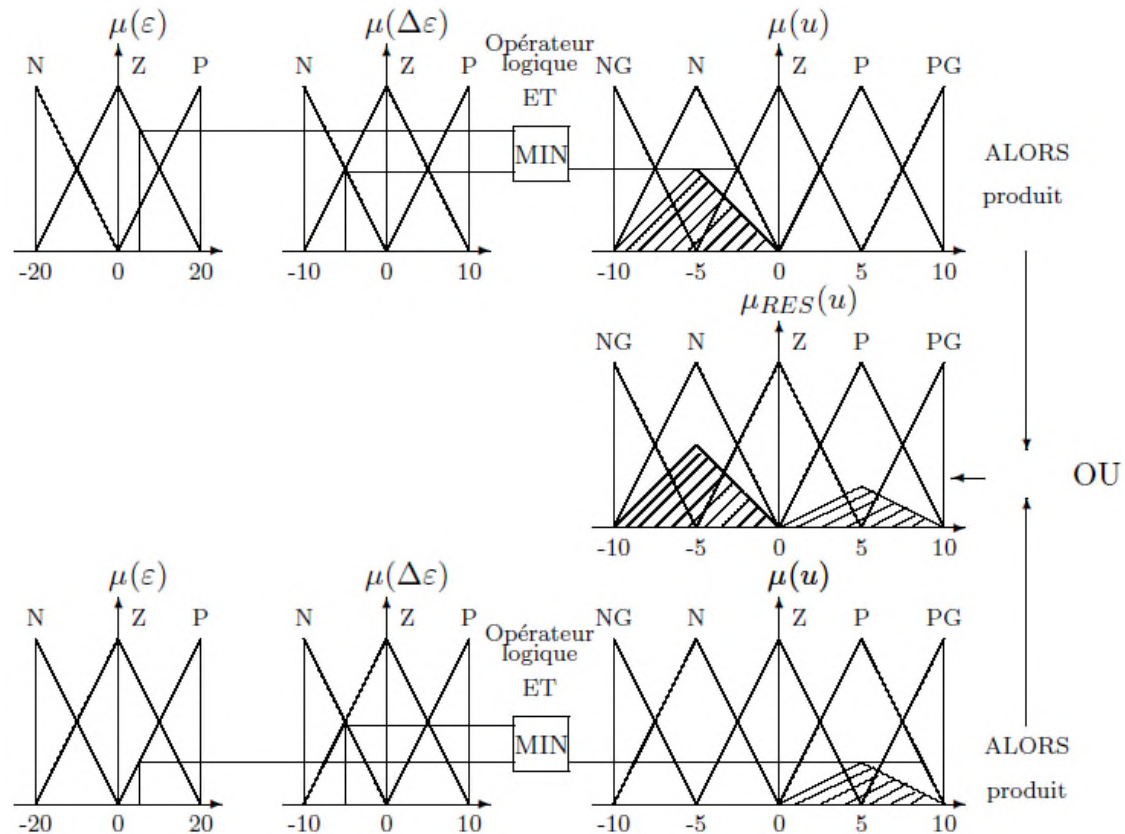


Figure (I-15) : Définition de OU dans la méthode d'inférence

### I-6-1-3-3-La Méthode d'inférence somme-prod

Proche de la méthode précédente, il suffit de remplacer la traduction de ALORS par la somme des fonctions d'appartenance partielles.

### I-6-1-4-La défuzzification

Consiste à transformer l'ensemble flou de sortie résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande déterministe et précise à appliquer au processus. Dans la littérature, il existe plusieurs stratégies pour réaliser cette opération telles que :

- Défuzzification par calcul du centre de gravité (barycentre).
- Défuzzification par calcul du maximum.

La méthode de défuzzification par le centre de gravité, est la méthode la plus utilisée en commande floue du fait qu'elle fournit intuitivement la valeur la plus représentative de l'ensemble flou issu de l'agrégation des règles. [5]

### I-6-1-4-1-Méthode par centre de gravité

Cette méthode est la plus coûteuse en temps de calcul mais la plus utilisée, elle consiste à prendre comme valeur de sortie l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance résultante. [6]

$$X_r = \frac{\int_U X_r \mu(X_r) dX_r}{\int_U \mu(X_r) dX_r}$$

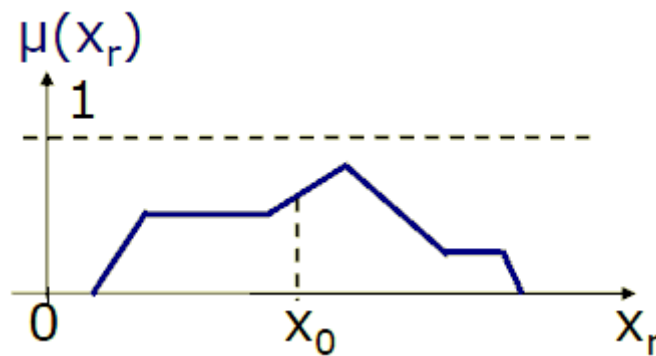


Figure (I-16) : Méthode par centre de gravité

U : domaine d'intégration

- Si les sous ensembles flous sont des singletons, la formule précédente devient :

$$X_r = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} X_{ri} \mu(X_{ri})}{\sum_{i=1}^{n_i} \mu(X_{ri})}$$

$n_i$  : Nombre de sous ensemble flous

- Cette méthode peut être simplifiée en prenant chaque sous ensemble séparément et en calculant sa propre moyenne de tous les barycentres.

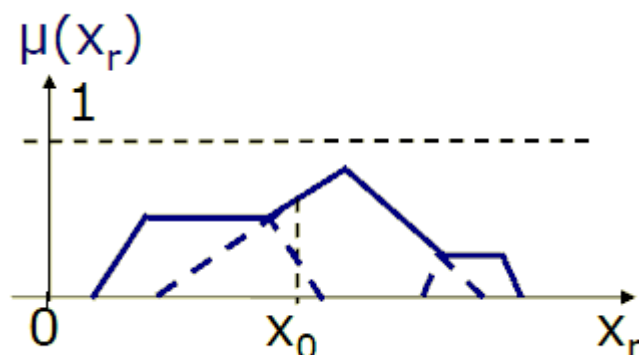


Figure (I-17) : Méthode par centre de gravité simplifiée

#### I-6-1-4-2-Méthode du maximum

Cette méthode consiste à choisir comme valeur de sortie correspondant à l'abscisse le maximum de la fonction d'appartenance.

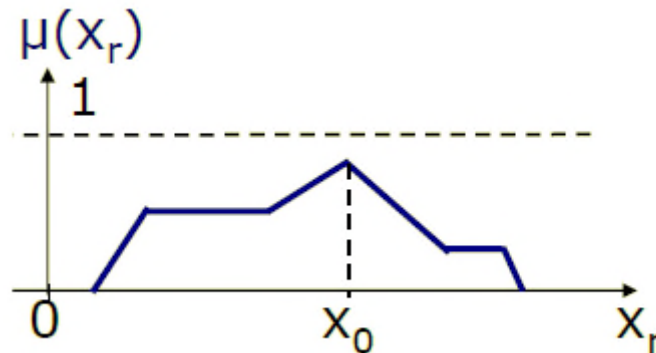


Figure (I-18) : Méthode du maximum.

Cette méthode est simple, rapide et facile à réaliser mais introduit des ambiguïtés dans certains cas.

#### I-7-Domain d'application

La logique floue est intéressante dans tous les domaines, ou un flou persiste. La liste proposée reste limitée, car les domaines d'applications sont multiples :

##### 1. Automatismes

Les automatismes ont constitué le domaine d'application par excellence de la logique floue car c'est là où existe le grand nombre d'applications. On peut classer ses applications par domaines d'utilisation. [6]

- Automatismes industriels
- Automatismes d'entreprise et de transport
- Automatismes dans les appareils grand public

##### 2. Informatique

De nombreuses disciplines informatiques utilisent également la logique floue.

- Intelligence artificielle et systèmes experts
- Programmation et développement

##### 3. Mathématiques appliquée

- Statistiques
- Recherche opérationnelle
- Reconnaissance des formes

**Conclusion :**

Nous avons vu en première partie que la logique floue est née d'un besoin de formaliser les imprécisions, malgré ses règles simples, elle est mathématiquement apte à modéliser des systèmes d'inférence beaucoup plus complexes que ne le permet la logique classique et les modèles linéaires, sa matrice de décision qui rassemble les règles floues d'un système ressemble à la fois sur la forme(structure du type Si X et Y alors Z) et dans le fond (concept de variables linguistiques) au type de règles énoncées oralement par les êtres humains.

## Introduction

L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines nécessitant des vitesses de rotation précises et variables pour l'entraînement d'engins de manutention par exemple.

Les machines à courant continu sont comme les alternateurs des machines réversibles c'est-à-dire qu'elles peuvent fonctionner indifféremment soit comme réceptrices (ou moteur), soit comme génératrices.

- En fonctionnement moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique
- En fonctionnement générateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique. Dans ce cas elle est aussi appelée dynamo

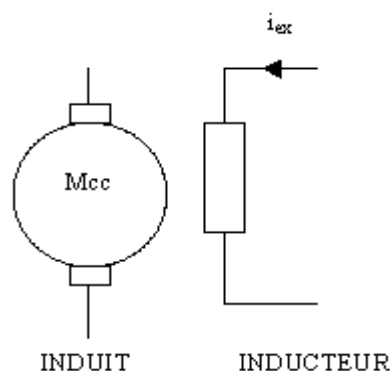
L'utilisation en moteur de la machine à courant continu est très répandue surtout pour le fonctionnement à vitesse réglable, pour les asservissements et en traction électrique

### II-1-Définition [9]

Un moteur à courant continu est une machine destinée à transformer de l'énergie électrique disponible sous forme de tension et de courant continus, ou tout au moins unidirectionnels, en énergie mécanique. Il comporte un induit, un collecteur et des pôles magnétiques excités par une source de courant continu ou constitués d'aimants permanents.

#### II-1-1-Symbole

Le moteur à courant continu est représenté par son symbole normalisé

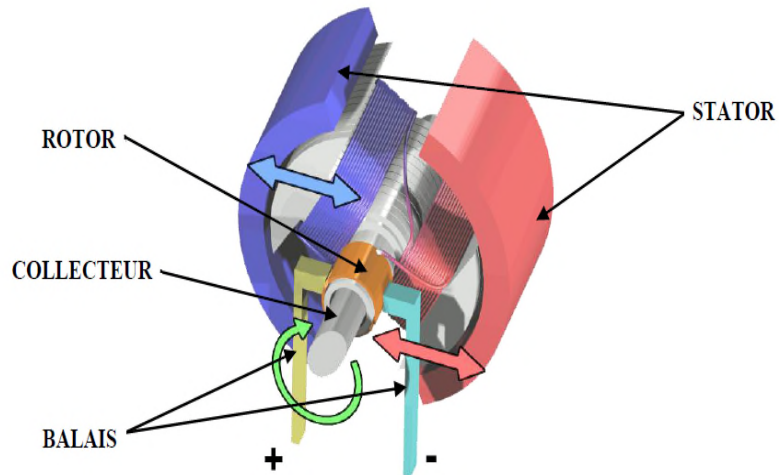


**Figure (II-1) :** Symbole normalisé du moteur à courant continu



## II-2-Construction d'une machine à courant continu [9]

Comme toute machine tournante, le moteur à courant continu comporte un stator et un rotor séparés par un entrefer, mais un dispositif particulier est nécessaire à son fonctionnement, le collecteur et les balais.



Figure(II-2) : Constitution d'un moteur à courant continu.

### II-2-1- L'inducteur « stator »

Il s'agit de la partie fixe de la machine, constituée par un aimant ou un électroaimant appelé également inducteur qui crée un champ magnétique, il est formé d'aimant **Figure (II.3.a)** pour les petits moteurs et des bobines **Figure (II.4.b)** parcourues par un courant continu. Les aimants ou bobines permettent la création d'un flux magnétique.



Figure (II-3.a) : Aimant



Figure (II-3.b) : Bobines

### II-2-2- L'induit « le rotor »

Partie mobile, appelée également induit, constituée par un cylindre d'acier doux à la périphérie duquel sont disposés des conducteurs reliés aux lames du collecteur sur lesquelles frottent deux charbons, ou balais, qui assurent la liaison avec les bornes du moteur.



Figure (II-4) : Induit

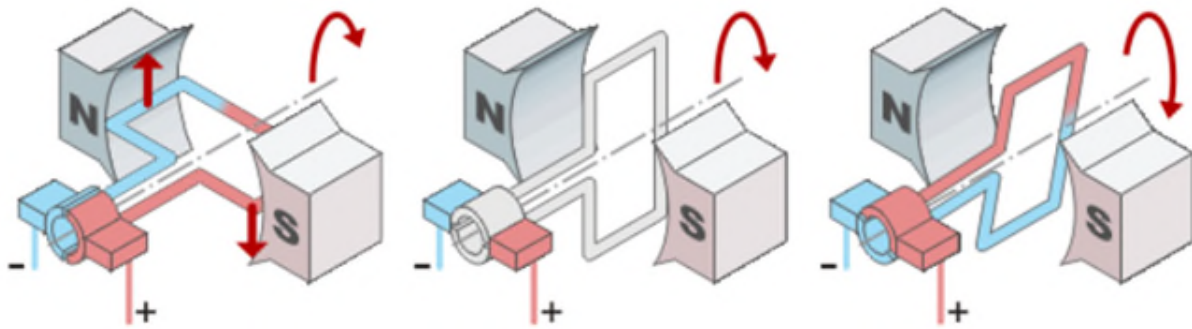
### II-2-3- Le collecteur et les balais

Le collecteur est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit. Les balais (ou charbons) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation. Le collecteur joue le rôle d'un redresseur et les balais permet d'accéder au circuit électrique rotorique. Le dispositif collecteur/balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.

### II-3- Principe de fonctionnement [10]

Lorsque le bobinage d'un inducteur de moteur est alimenté par un courant continu, sur le même principe qu'un moteur à aimant permanent (comme la figure ci-dessous), il crée un champ magnétique (flux d'excitation) de direction Nord-Sud. Une spire capable de tourner sur un axe de rotation est placée dans le champ magnétique. De plus, les deux conducteurs formant la spire sont chacun raccordés électriquement à un demi collecteur et alimentés en courant continu via deux balais frotteurs.

D'après la loi de Laplace (tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force), les conducteurs de l'induit placés de part et d'autre de l'axe des balais (ligne neutre) sont soumis à des forces  $F_1$  et  $F_2$  égales mais de sens opposé en créant un couple moteur, l'induit se met à tourner.

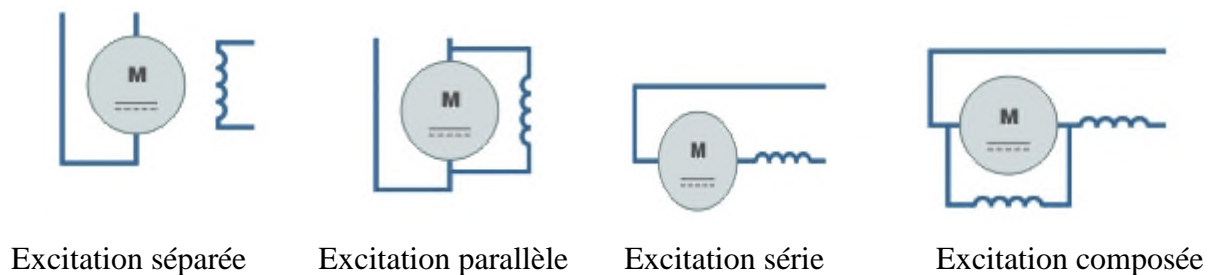


**Figure(II-5) :** Principe de fonctionnement d'un MCC

#### II-4- Différents modes d'excitation d'un moteur à courant continu [11]

L'inducteur d'un moteur à courant continu peut être branché de diverses façons. La machine est à excitation séparée (ou indépendante) quand l'inducteur et l'induit sont reliés à des sources différentes. La machine est à excitation liée, lorsque l'inducteur et l'induit sont alimentés à partir de la même source. Trois possibilités existent alors.

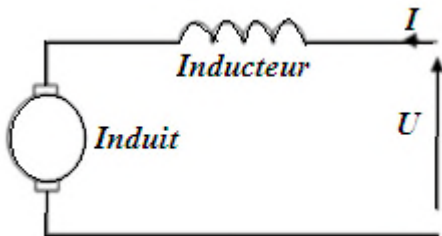
- L'excitation parallèle (ou shunt).
- L'excitation série.
- L'excitation composée (ou compound).



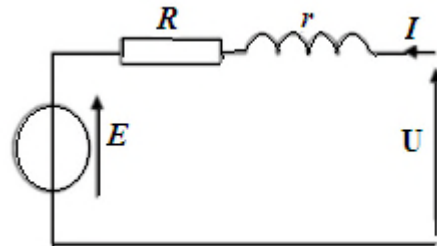
**Figure (II-6) :** Différents modes d'excitations

**II-4-1- Moteur à excitation série**

Pour le moteur à courant continu à excitation série, l'induit et l'inducteur sont branchés en série, ce qui donne le schéma suivant **Figure (II.7)**, et donc le schéma équivalent suivant (modèle de Thévenin) **Figure (II.8)**.



**Figure (II-7) :** Schéma du MCC à excitation à série



**Figure (II-8) :** Schéma équivalent du MCC à excitation série

$R_t$  est la résistance totale du moteur, elle est égale à la somme des résistances d'induit R et d'inducteur r :

$$R_t = R + r \tag{II-1}$$

$R_t$  Se mesure en mesurant r et R indépendamment l'une de l'autre.

**Remarque :**

Le moteur à excitation série ne doit jamais fonctionner à vide car si  $I \rightarrow 0, \Omega \rightarrow \infty$ , la machine risque l'emballement.

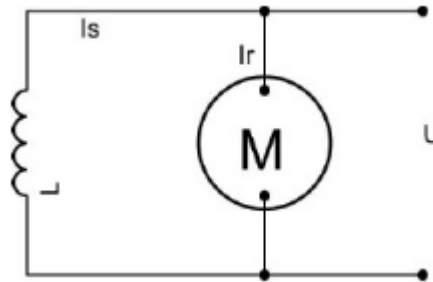
➤ **Domaine d'application**

Particularités	Emplois
Moteur autorégulateur de puissance. Possède un très grand couple de démarrage mais risque l'emballement à vide. La vitesse décroît quand la charge augmente	Le moteur qui convie le mieux en traction électrique En petite puissance il est employé comme démarreur des moteurs à explosion.

**Tableau (II-1) :** Domaine d'application du MCC à excitation série

**II-4-2- Moteur à excitation shunt**

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est représenté par la **Figure (II-9)**:



**Figure (II-9) :** Schéma de MCC à excitation shunt

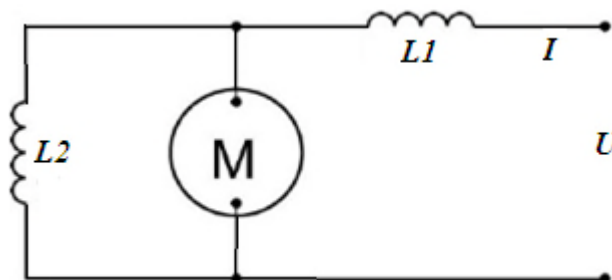
➤ **Domaine d'application**

Particularités	Emplois
Ne s'emballe pas. Couple de démarrage meilleur qu'en excitation compound.	Appareils de levage et de manutention. Utilisé aussi en excitation indépendante

**Tableau (II-2) :** Domaine d'application du MCC à excitation shunt

**II-4-3- Moteur à excitation compound (Composée)**

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



**Figure (II-10) :** Schéma de MCC à excitation compound

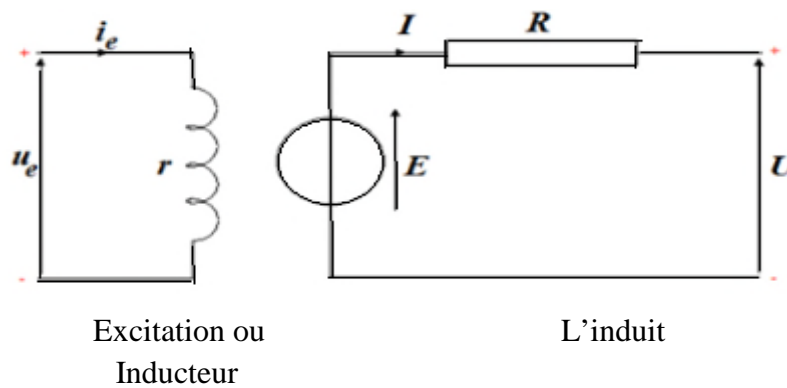
➤ **Domaine d'application**

Particularités	Emplois
Risque d'emballement du fait de l'annulation du flux résultant des enroulements	Petit moteur à démarrage direct, ventilateur, pompe, machines de laminoirs, volants d'inertie.

**Tableau (II-3) :** Domaine d'application du MCC à excitation compound

**II-4-4- Moteur à excitation séparée**

L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source de l'induit comme l'indique la **Figure (II-11)**.



**Figure (II-11) :** Schéma équivalent du moteur à excitation séparée.

I : courant d'induit.

$i_e$  : Courant d'excitation.

U : tension d'induit.

$u_e$  : Tension d'excitation.

R : résistance d'induit.

r : Résistance de l'inducteur.

E : force contre électromotrice du moteur

$$\text{Équation électrique à l'inducteur : } u_e = r \cdot i_e \tag{II-2}$$

$$\text{Équation électrique à l'induit : } U = E + R \cdot I \tag{II-3}$$

#### II-4-4-1- Principales caractéristique du moteur à excitation séparée [12]

##### a) Calcul de la force contre électromotrice (f.c.e.m)

La force contre électromotrice est due aux variations du flux magnétique interne, provoquées par la rotation du moteur et à une constante K qui dépend des caractéristiques de la conception du moteur. Elle s'exprime par la relation suivante :

$$E = k \cdot \phi \cdot \Omega \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$$K = \frac{P}{a} \cdot \frac{n}{2\pi} \quad (\text{II-5})$$

P : nombre de paire de pôles.

a : nombre de paires voies.

n : nombre de brins actifs.

$\Omega$  : vitesse de rotation en (rad/s).

$\Phi$  : flux utile par pôle

##### b) Expression du couple électromagnétique [13]

Le sens du couple de forces électromagnétiques qui produit la rotation dépend de celui :

- Du champ magnétique, donc du courant d'excitation  $i_e$ .
- la polarité de l'induit obtenue par le sens du courant d'induit I.

Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser, soit les polarités de l'induit, soit celles de l'inducteur

Nous avons pour un moteur à courant continu, les relations suivantes :

$$U = R \cdot I + E$$

Multiplions par I les deux membres de la relation il vient :

$$U \cdot I = R \cdot I^2 + E \cdot I \quad (\text{II-6})$$

- $U \cdot I$  : représente la puissance absorbée par l'induit ( $P_a$ )
- $R \cdot I^2$  : est les pertes joules correspondantes ( $P_j$ )
- $E \cdot I$  : est la puissance électrique intégralement transformé en puissance mécanique que l'on appelle puissance électromagnétique ( $P_e$ ) qui donne naissance au couple électromagnétique ( $C_e$ ) soit :

$$C_e = \frac{P_e}{2\pi n} = \frac{k \cdot \phi \cdot \Omega \cdot I}{\Omega} = k \cdot \phi \cdot I \quad (\text{II-7})$$

En réalité le couple utile du moteur est très légèrement inférieur au couple électromagnétique : on a

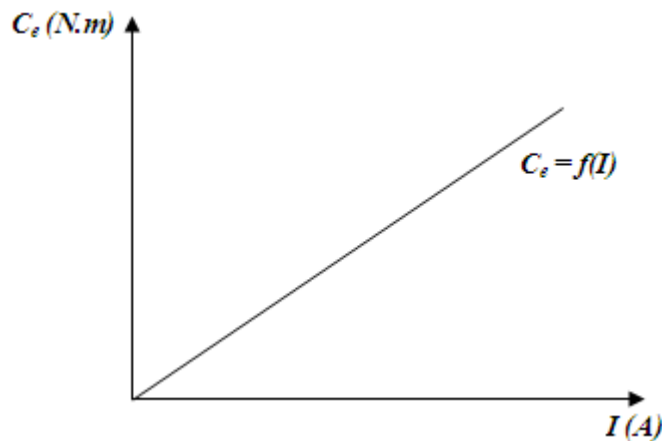
$$C_U = C_e - C_p \quad (\text{II-8})$$

$C_p$  : couple de pertes, qui comporte, les pertes fer et les pertes mécaniques.

Dans la pratique :

$$C_U \approx C_e = k \cdot \phi \cdot I \quad (\text{II-9})$$

Le couple utile d'un moteur à courant continu est proportionnel au courant d'induit et au flux de l'inducteur. Sa caractéristique est représentée sur la **Figure (II-12)** qui est une droite passant par l'origine, lorsque le courant  $I$  augmente le couple électromagnétique augmente.



**Figure (II-12) :** Caractéristique électromécanique de couple

### Remarque

Si on coupe accidentellement le courant d'excitation ( $i_e = 0$ ), la vitesse augmente très rapidement (le moteur s'emballe).

### c) Caractéristique mécanique

La Caractéristique mécanique nous donne, les variations du moment du couple électromagnétique  $C_m$  en fonction de celle de la vitesse de rotation  $\Omega$ .

$$C_m = f(\Omega).$$

Pour un moteur à courant continu à excitation séparée, on a :

$$C_m = k \cdot \phi \cdot I \quad (\text{II-10})$$

$$U = R \cdot I + E \quad \text{Avec} \quad E = k \cdot \phi \cdot \Omega$$



$$U = R \cdot I + k \cdot \phi \cdot \Omega \quad (\text{II-11})$$

On obtient: 
$$I = \frac{U - k \cdot \phi \cdot \Omega}{R} \quad (\text{II-12})$$

On remplace (II.12) dans (II.10), on trouve :

$$C_m = \frac{k \cdot \phi}{R} \cdot U - \frac{(k \cdot \phi)^2}{R} \cdot \Omega \quad (\text{II-13})$$

La figure ci-dessous nous donne les variations du moment du couple mécanique  $C_m$  en fonction de celle de la vitesse de rotation  $\Omega$ .

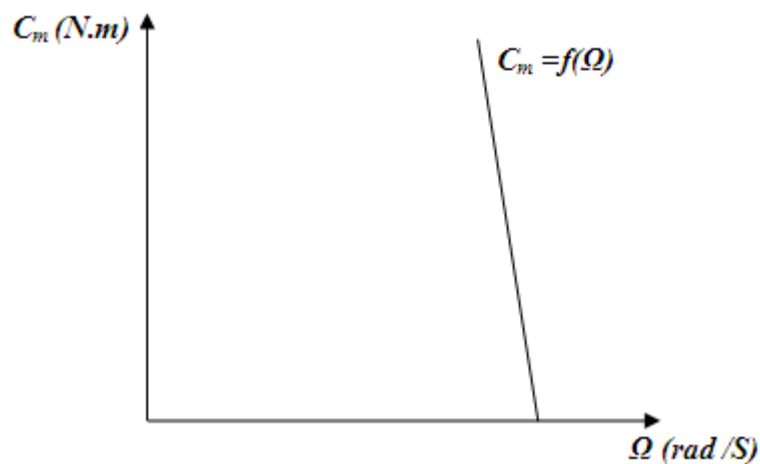


Figure (II-13) : Caractéristique mécanique d'un MCC

### Remarque

A tension d'alimentation constante, le couple utile est une fonction affine décroissante de la vitesse de rotation. Cependant la vitesse diminue peu avec l'augmentation de la charge, la droite est raide, la vitesse chute légèrement entre le fonctionnement à vide et le fonctionnement en charge.

#### d) Caractéristique de la vitesse

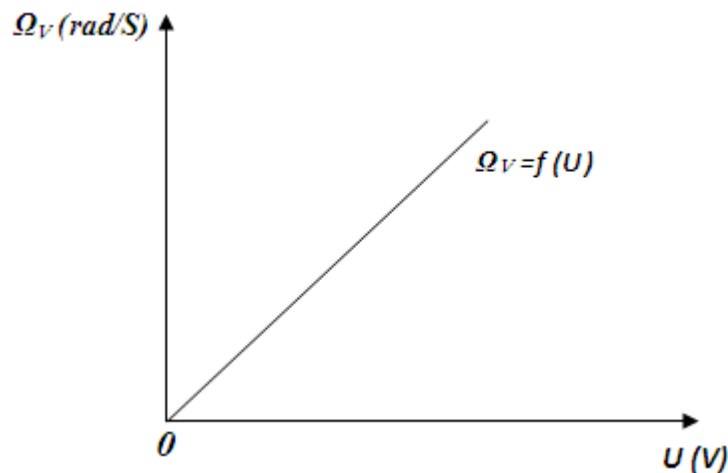
- **Fonctionnement à vide**

A vide, le couple électromagnétique est faible car le moteur n'effectue pas d'effort pour tourner. Donc le courant à vide  $I_v$  est négligeable devant le courant nominal  $I_N$  :

$I_v \ll I_N$  et donc  $R \cdot I_v$  est négligeable devant  $U$ .

$$\Rightarrow \Omega_v = \frac{U}{k \cdot \phi} \quad (\text{II-14})$$

La vitesse de rotation dépend de la tension d'induit  $U$  et du flux magnétique  $\Phi$  qui est constant  
**Figure (II-14).**



**Figure (II-14) :** Variation de la vitesse de rotation à vide en fonction de La tension d'induit.

### Remarque

Pour régler la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu à excitation indépendante, il est plus intéressant d'agir sur la tension d'induit que sur le flux inducteur. Ainsi, généralement un tel moteur fonctionnera à flux magnétique constant et tension d'induit réglable.

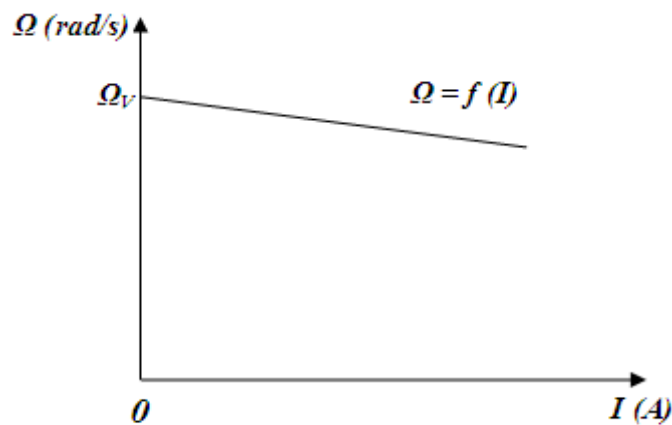
- **Fonctionnement en charge**

Le moteur fonctionne à flux constant.

$$\Omega = \frac{U - R \cdot I}{K \cdot \Phi} = K'(U - R \cdot I) \quad \text{(II-15)}$$

Avec  $K' = \frac{1}{K \cdot \Phi}$

C'est l'équation d'une droite qui dépend de l'intensité du courant d'induit  $I$  et de la valeur de la tension d'alimentation de l'induit  $U$ . Nous allons analyser tour à tour l'influence de ces deux paramètres **Figure (II-15).**



**Figure (II-15):** Variation de la vitesse de rotation en charge.

### Remarque

Lorsque la charge augmente, le courant augmente et la vitesse de rotation diminue, mais elle diminue peu.

### ➤ Domaine d'application

Particularités	Emplois
<p>Grande souplesse de commande.</p> <p>Large gamme de vitesse.</p> <p>Utilisé en milieu industriel, associé avec un variateur électronique de vitesse et surtout sous la forme moteur d'asservissement.</p>	<p>Il est souvent utilisé en asservissement avec une régulation de vitesse.</p>

**Tableau (II-4) :** Domaine d'application du MCC à excitation séparée

### II-5-Le bilan de puissance [9]

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 à la puissance mécanique.

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

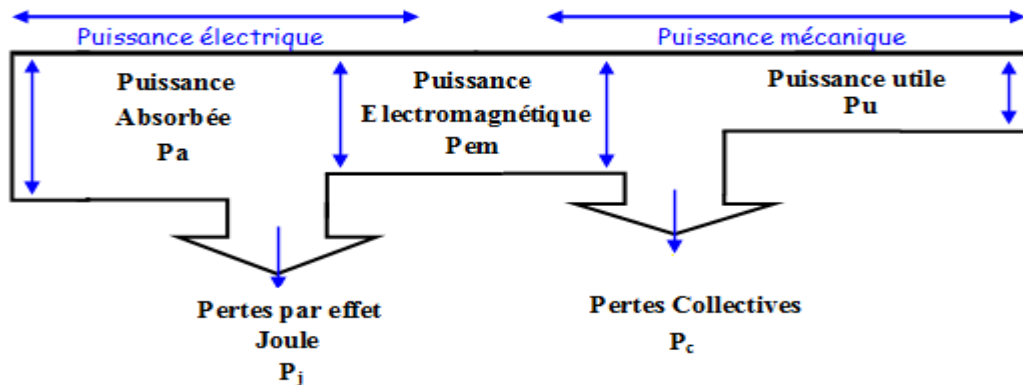


Figure (II-16) : Bilan de puissance d'un moteur.

## II-6-Le rendement

Le rendement est le rapport entre la puissance mécanique utile et la puissance électrique absorbée par l'induit, il s'exprime en % et il est donné par la relation : [9]

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (\text{II-16})$$

$\eta$  : Rendement de l'induit du moteur [sans unités].

$P_u$  : La puissance utile en Watts [W].

$P_a$  : La puissance absorbée en Watts [W].

## II-7-Avantages et inconvénients

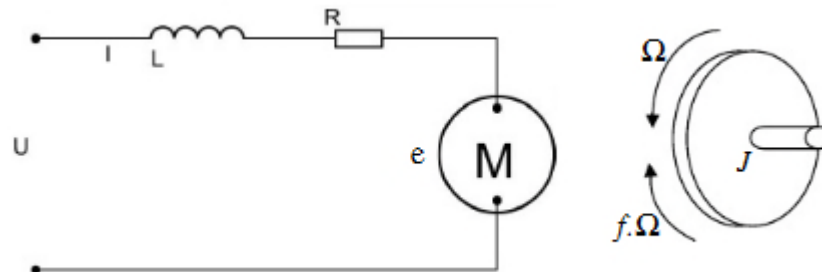
L'avantage principal, qui a fait le succès du moteur à courant continu réside dans son adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation 'les variateurs de vitesse', voir leur raccordement direct à la source d'énergie 'batteries d'accumulateur,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

Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou « charbons » et le collecteur rotatif. De plus il faut signaler que :

- Plus la vitesse de rotation est élevée, plus la pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur donc plus le frottement est important.
- Aux vitesses élevées les balais doivent donc être remplacés très régulièrement.

- Le collecteur imposant des ruptures de contact provoque des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique.

### II-8- Modélisation d'un moteur à courant continu



**Figure (II-17)** :Schéma équivalent d'un moteur à courant continu

Selon le schéma ci-dessus un moteur électrique à courant continu est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques.

D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, on peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes

$$U(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (\text{II-17})$$

Pour un fonctionnement stable, la commande est effectuée à couple moteur constant, donc à flux constant, la f.c.é.m. développée par la machine s'écrit :

$$e(t) = K_e \phi \Omega(t) = K_e \Omega(t) \quad (\text{II-18})$$

L'équation de mouvement appliqué au système d'ensemble "moteur + charge mécanique" définit les limites de stabilité de l'entraînement on a :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_u - C_r \quad (\text{II-19})$$

$$C_u = K_c \cdot i(t) - C_p \quad (\text{II-20})$$

$$C_r = f \cdot \Omega(t) \quad (\text{II-21})$$

$U(t)$ : Tension appliquée au moteur	$f$ : Coefficient de frottement visqueux
$e(t)$ : Force contre électromotrice	$J$ : Moment d'inertie de l'axe du rotor
$i(t)$ : Intensité traversant le moteur	$K_e$ : Constante de vitesse
$\Omega(t)$ : Vitesse de rotation du rotor	$K_c$ : Constante de couple
$C_r$ : Couple résistant	$K_p$ : Couple de pertes
$C_u$ : Couple moteur généré	

### II-8-1-Fonction de transfert du moteur

Pour manipuler aisément la relation (II-7) on utilise l'outil mathématique « transforme de Laplace » qui présente l'intérêt de transformer une équation différentielle en équation algébrique

$$U(p) = Ri(p) + Lpi(p) + E \quad (\text{II-22})$$

$$E = K_e\Omega(p) \quad (\text{II-23})$$

$$Jp\Omega(p) = C_u - C_r$$

#### (II-24)

En combinant (II-22) et (II-23) on obtient :

$$U(p) = Ri(p) + Lpi(p) + K_e\Omega(p) \quad (\text{II-25})$$

On remplace la valeur de  $C_u$  et  $C_r$

$$Jp\Omega(p) = K_c \cdot i(p) - C_p - f\Omega(p) \quad (\text{II-26})$$

On déduit l'expression de  $\Omega(p)$

$$\Omega(p) = \frac{K_c \cdot i(p) - C_p}{f + Jp} \quad (\text{II-27})$$

On peut sortir l'expression de  $i(p)$  :

$$i(p) = \frac{f + Jp}{K_c} \left( \Omega(p) + \frac{C_p}{f + Jp} \right) \quad (\text{II-28})$$

On l'injectera dans (II-25)

$$U(p) = \Omega(p) \left[ \frac{(R+Lp)(f+Jp)}{K_c} + K_e \right] + \frac{(R+Lp)}{K_c} C_p \quad (\text{II-29})$$

On suppose que le moment du couple de pertes (qui est vu comme une perturbation) est négligeable devant le moment du couple électromagnétique ( $K_c, i(t)$ ) on peut alors prendre  $C_p$  nul pour simplifier le système. On a donc :

$$U(p) = \Omega(p) \left( \frac{(R+Lp)(f+Jp)}{K_c} + K_e \right) \quad (\text{II-30})$$

La fonction de transfert cherchée  $H(p)$  est entre la tension entrant dans le moteur  $U(p)$  et la vitesse de sortie  $\Omega(p)$ .

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{(R+Lp)(f+Jp)+K_cK_e} \quad (\text{II-31})$$

On écrit la fonction  $H(p)$  sous forme canonique pour identifier le gain statique « A », la pulsation propre «  $W_0$  » et le facteur d'amortissement «  $\varepsilon$  » :

$$H(p) = \frac{K_c/(Rf+K_cK_e)}{\left[ \frac{JL}{(Rf+K_cK_e)} \right] p^2 + \left[ \frac{(Rj+fL)}{(Rf+K_cK_e)} \right] p + 1} \quad (\text{II-32})$$

A partir de la fonction (II-32) on déduit :

Gain statique

$$A = \frac{K_c}{(Rf+K_cK_e)} \quad (\text{II-33})$$

Pulsation propre

$$W_0 = \sqrt{\frac{(Rf+K_cK_e)}{Lf}} \cdot \frac{2\pi}{360} \quad \left[ \frac{\text{Rad}}{\text{s}} \right] \quad (\text{II-34})$$

Facteur d'amortissement

$$\varepsilon = W_0 \frac{Rj+fL}{2*(Rf+K_cK_e)} \quad (\text{II-35})$$

**II-8-2-La plaque signalétique**

Les moteurs sont accompagnés d’une plaque signalétique qui comporte des renseignements sur leur fonctionnement et les conditions d’utilisation.

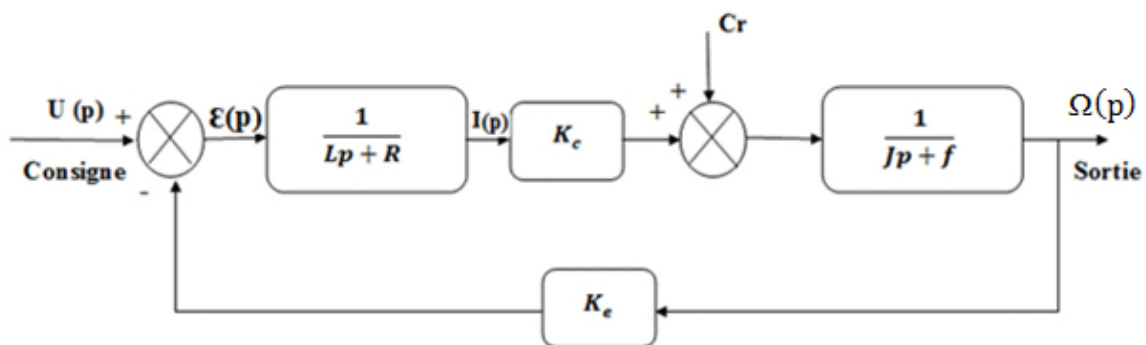
Les valeurs numérique du MCC choisi (Maxon : Référence F2260/813) données par le constructeur **Tableau (II-5)**

Tension nominale	$U_{nom}=24\text{ V}$
Tension maximale	$U_{max}=32\text{ V}$
Courant permanent maximal	$I_{max} = 2.2\text{ A}$
Résistance aux bornes	$R=1.91\ \Omega$
Constante de couple	$K_c = 60.3\text{ mNm}\cdot\text{A}^{-1}$
Constanta de vitesse	$K_e =60.3\text{ mNm}\cdot\text{A}^{-1}$
Inductance	$L= 0.63\text{ mH}$
Moment d’inertie rapporté au rotor	$J= 10^{-4}\text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
Coefficient de frottement visqueux	$F=2.5 * 10^{-6}$

**Tableau (II-5) :** Valeurs numériques d’un moteur à courant continu

**II-8-3- Modèle mathématique de la réponse en vitesse**

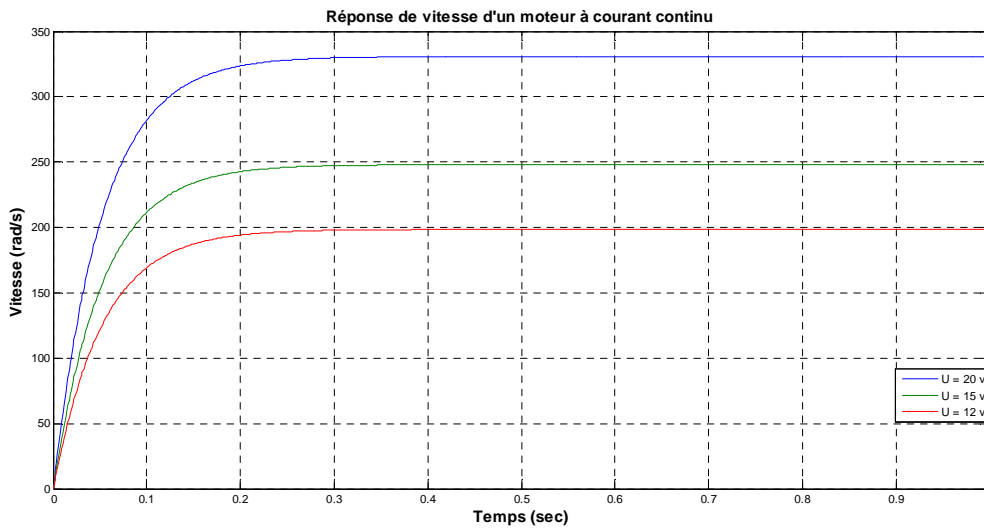
Les transformées de Laplace obtenues nous permettent de modéliser le moteur sous forme de schéma bloc ou schéma fonctionnel. Ces schémas présentent les fonctions de transfert suivant les paramètres d’entrée et de sortie considérés. Si on considère comme grandeur d’entrée la tension appliquée aux bornes de l’induit et comme grandeur de sortie la vitesse du moteur, nous obtenons le schéma bloc tension\_vitesse. Ce dernier nous permet de voir l’évolution de la vitesse avec la tension, qui est donné par la **Figure (II-18)**.



**Figure (II-18) :** Schéma bloc du modèle de moteur électrique en vitesse



Les résultats obtenus sont illustrés par la **Figure (II-19)**

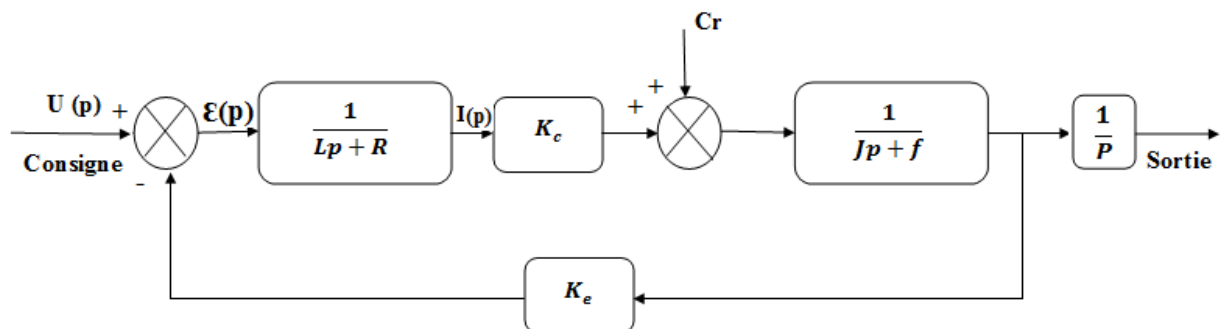


**Figure (II-19) :** Modélisation sous MATLAB de la réponse vitesse

D’après l’équation (II-32), le système modélisé est du second ordre, lorsque l’inductance interne est négligeable devant la résistance interne (ce qui est généralement le cas) il s’apparente à un système du premier ordre. Le moteur change de vitesse de rotation pour chaque valeur de la tension d’entrée, d’où la vitesse de rotation est proportionnelle à la tension d’entrée.

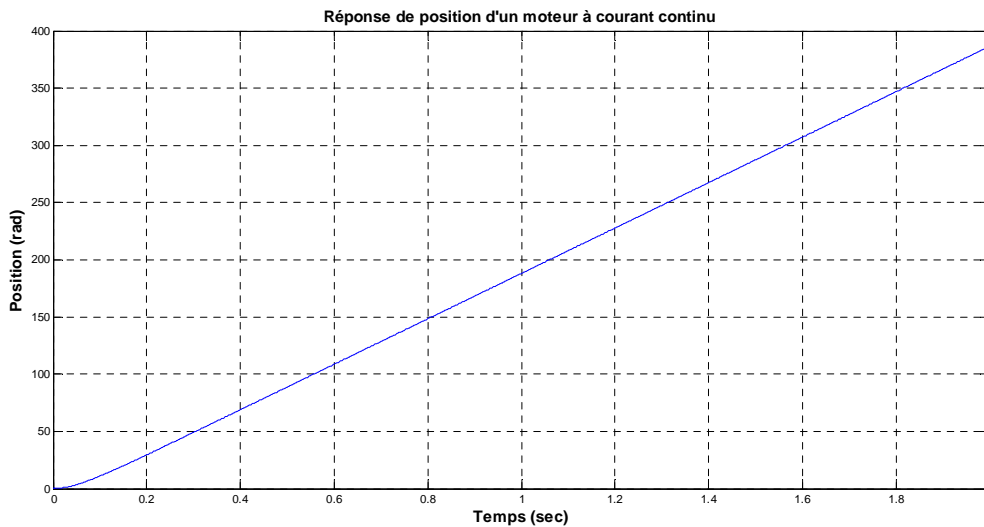
**II-8-4- Modèle mathématique de la réponse en position**

On peut établir le modèle mathématique de la réponse en position du moteur électrique qui est donné par la figure suivante **Figure (II-20) :**



**Figure (II-20) :** Schéma bloc Modèle de moteur électrique en position

Le résultat obtenus sont illustrés par la **Figure (II-21)** :



**Figure (II-21)** : Modélisation sous MATLAB de la réponse de position

D'après la **figure (II-21)**, on voit bien que la réponse en position est une rampe, ce qui signifie que le système dans un asservissement en position est instable, d'où il nécessite une régulation pour stabiliser la réponse en position et améliorer les performances en vitesse.

### Conclusion

Pour un moteur électrique à courant continu, on a constaté que la réponse en position est instable, alors que la réponse en vitesse converge vers la stabilité, d'où, la nécessité d'une commande pour stabiliser le système et améliorer ses performances.

Concernant le choix du moteur, on a choisi un moteur à courant continu à excitation indépendante, car il est le plus utilisé dans l'automatique et la robotique, pour ces dimensions et sa non-influence de la charge sur la vitesse (vitesse est relativement constante quelque soit la charge), ainsi que la simplicité de polarisation.

## Introduction

Après avoir énoncé et défini les concepts de base, les termes linguistiques utilisés en logique floue et la structure d'un régulateur flou. Nous nous intéressons dans cette partie à implémenter la commande floue pour un moteur à courant continu à excitation séparée, pour un seul objectif est d'annuler l'erreur statique, diminuer le dépassement, diminuer le temps de réponse et le temps de montée afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation et d'avoir un système précis, rapide, stable et robuste.

### III-1-Application de la commande floue sur le moteur

La première étape pour la réalisation d'un régulateur flou est de choisir ses variables d'entrées et de sorties, de savoir avec quels paramètres on peut obtenir la commande, et définir les univers de discours de ses variables. Les entrées de notre système sont l'erreur de la position « e » et sa dérivée «  $\frac{de}{dt}$  ».

Nous avons synthétisé le régulateur à logique Floue du type MAMDANI pour le réglage de vitesse et de position. Le signal de sortie est déterminé en fonction des signaux d'entrée par l'intermédiaire des règles, celle-ci regroupée dans ce cas 9 règles comme le montre le

**Tableau (III-1):**

e de/dt	N	Z	P
N	NG	N	Z
Z	N	Z	P
P	Z	P	PG

**Tableau (III-1) :** Règles d'inférences.

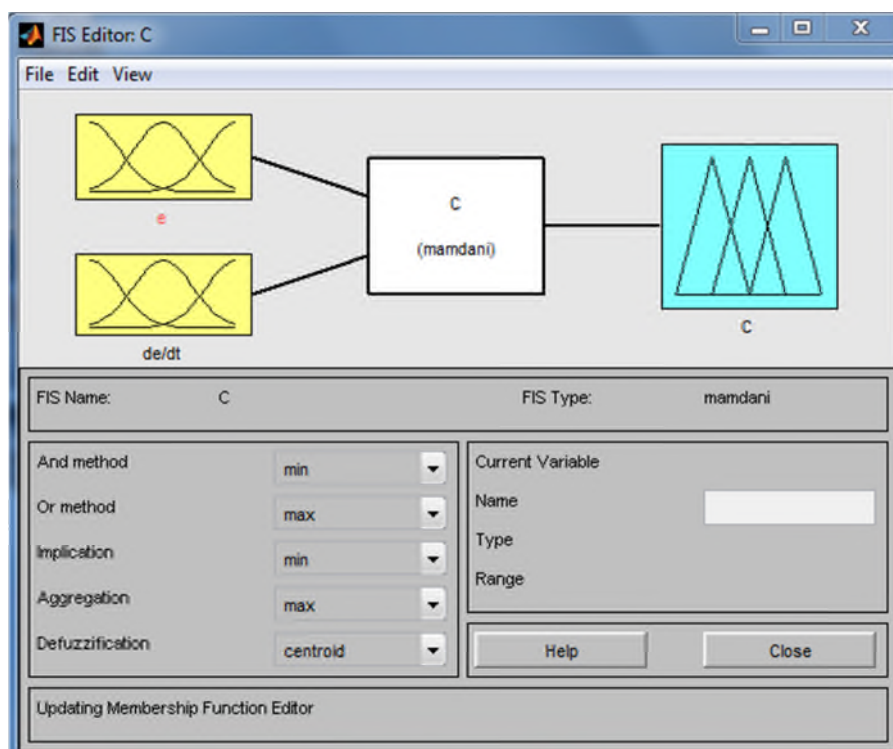
Les sous ensembles d'appartenance floue ont été notées comme suit:

- NG : négatif grand
- N : négatif
- Z : Zéro
- P : environ zéro
- PG : positif Grand

### III-1-1-Conception du régulateur

Le toolbox fuzzy logic de MATLAB possède un éditeur qui permet de créer des systèmes d'inférences floues : des FIS (pour fuzzy inference system). Cette boîte à outils permet de générer des fichiers « .fis », qui correspondent à des systèmes d'inférences floues et dont font partie les RLF. Cette boîte à outils possède 3 éditeurs (de fis, de règles et de fonctions d'appartenance) qui permettent de saisir l'ensemble des données du FIS ainsi que 2 interfaces graphiques qui permettent de visualiser les inférences directement sur la base de règles, ainsi que des surfaces de contrôle.

Les fonctions d'appartenances sont du type triangulaire et trapézoïdal sur les limites. L'intervalle d'intérêt des variables d'entrées est subdivisé en trois classes pour l'erreur «  $e$  » et en trois classes pour sa dérivée «  $de/dt$  », alors que celui de la variable de sortie «  $C$  » est subdivisé en cinq classes.



**Figure (III-1)** : Définition de la structure globale (entrée, sortie, type d'opérateurs)

Grâce à cette interface, on définit les plages d'entrées et de sorties de façon à contraindre le comportement du bloc Fuzzy, illustré par la **figure (III-2)**, pour définir ces fonctions :

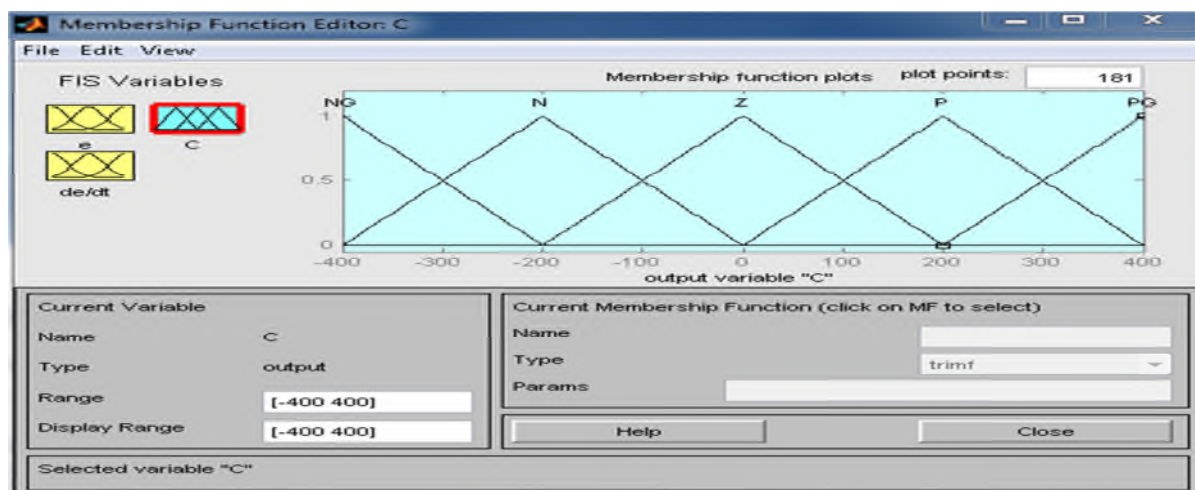
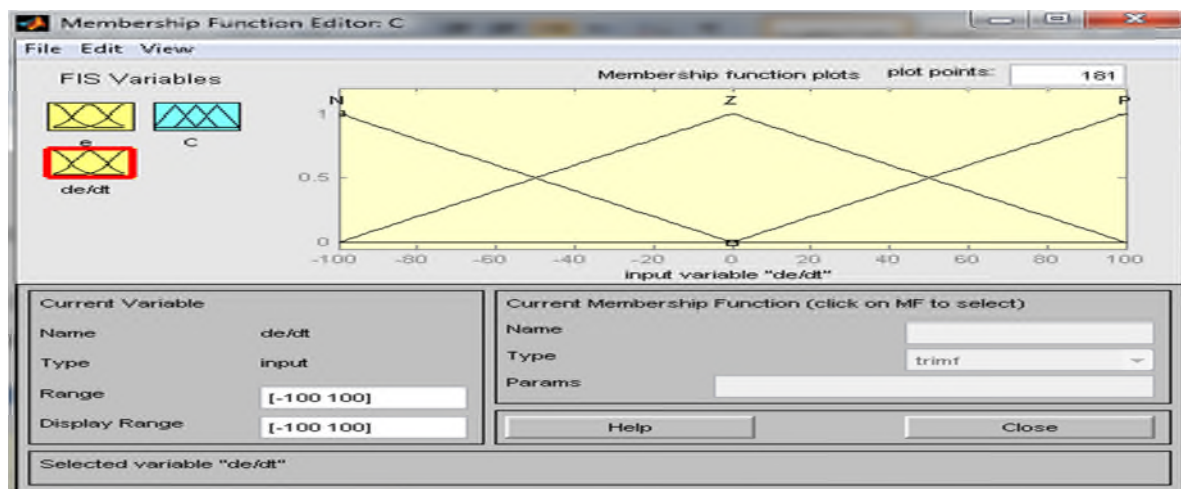
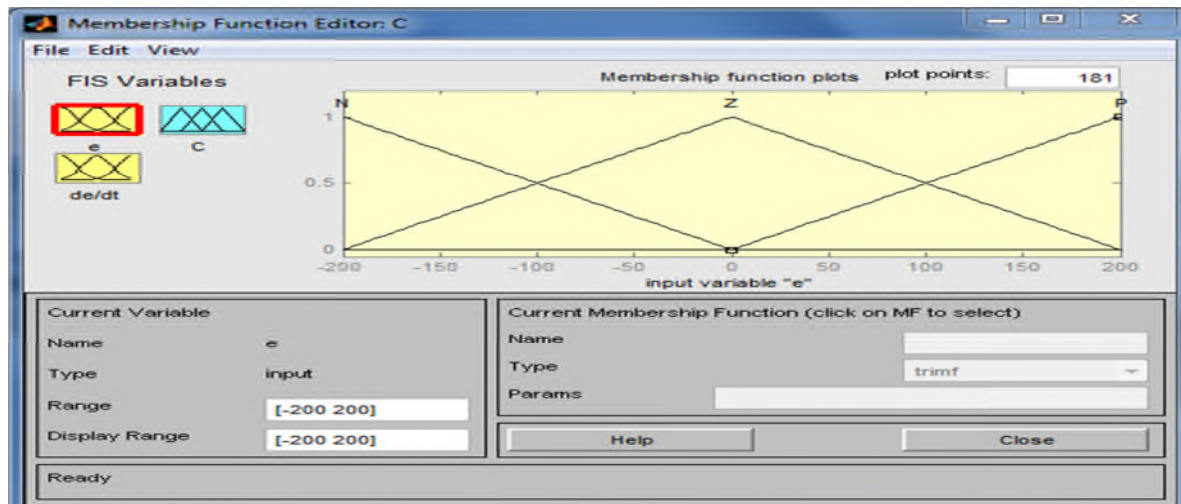
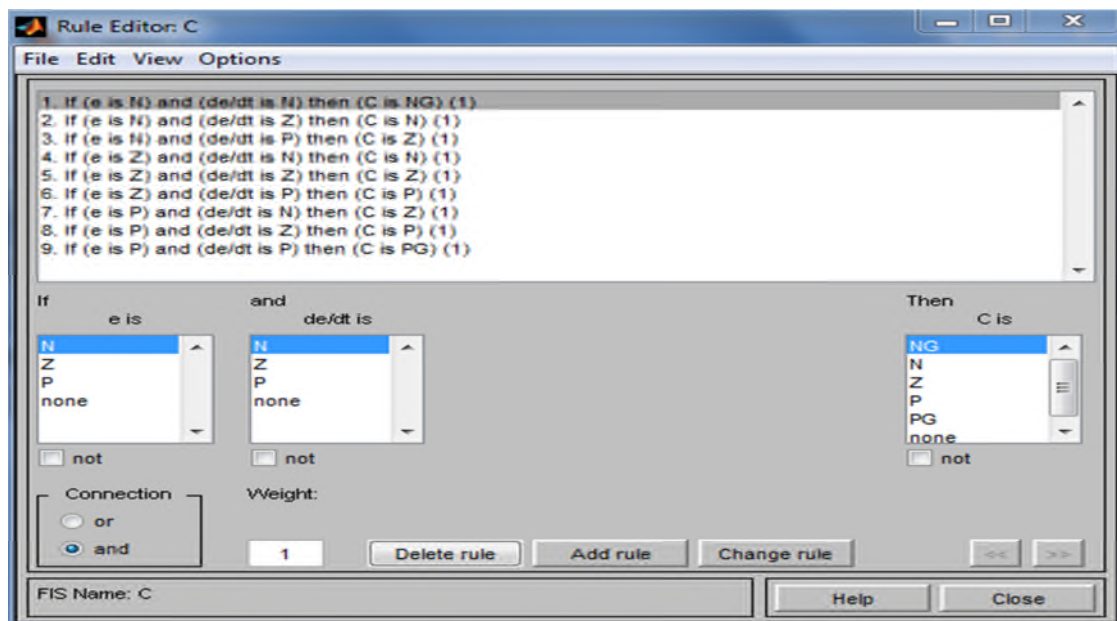


Figure (III-2) : Définition des fonctions d'appartenances pour 'e', 'de/dt' et 'C'

Il est également possible de configurer les lois du bloc flou, le principe celui d'actions conditionnelles « if » représenté sur la **figure (III-3)**.



**Figure (III-3)** : Écran de saisie des règles

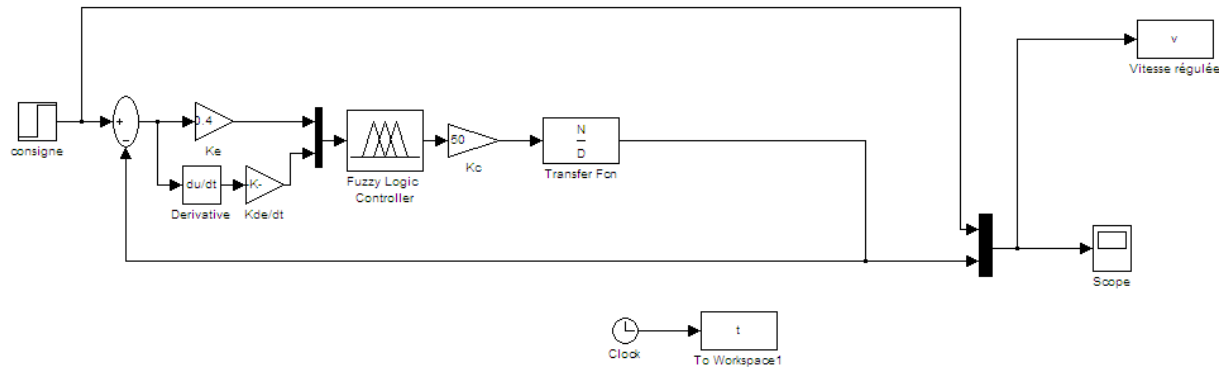
La sortie est ensuite déterminée suivant les poids respectifs des différentes lois d'entrées. En effet les lois se chevauchent, et donc une valeur de sortie est fonction de plusieurs lois d'entrées sur une même grandeur.

## III-2-Résultats de simulation et discussion

### III-2-1-Régulation en vitesse

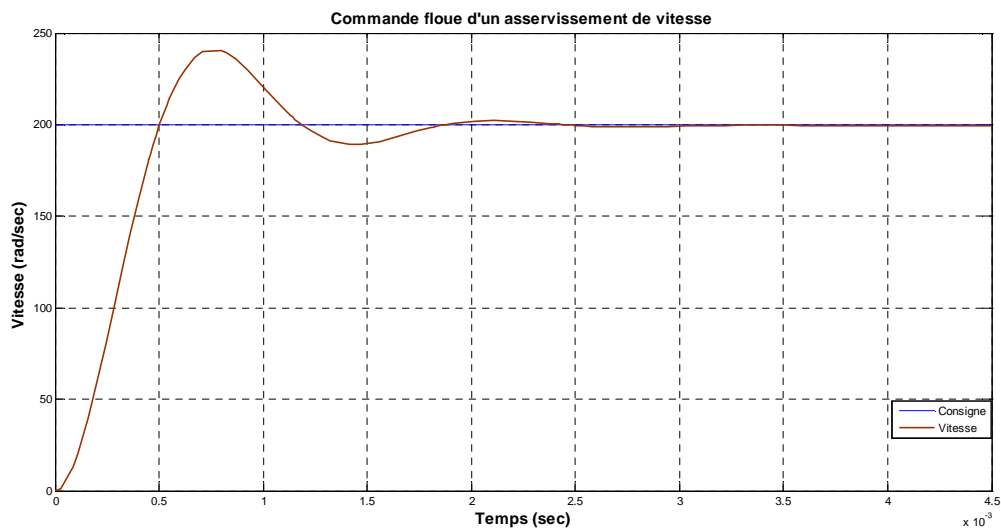
Pour illustrer les performances de réglage par la logique floue, nous avons simulé le schéma bloc de la commande en vitesse d'un moteur à courant continu qui est représenté par la **figure (III-4)**.

Les valeurs des gains du régulateur sont choisis après plusieurs tests d'ajustement  $K_e = 0.4$   
 $K_{de} = 10^{-5}$ ,  $K_c = 50$ .



**Figure (III-4) :** Schéma bloc d'un asservissement de vitesse par RLF

Une fois le régulateur est chargé dans le bloc fuzzy du simulink, on simule le système et on obtient la réponse suivante **Figure (III-5)**.



**Figure (III-5) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de vitesse.

On remarque qu'à chaque fois on intervient sur les gains d'entrées de notre RLF on agit sur la rapidité du système et à chaque fois qu'on intervient sur le gain de la sortie du système on agit sur la précision.

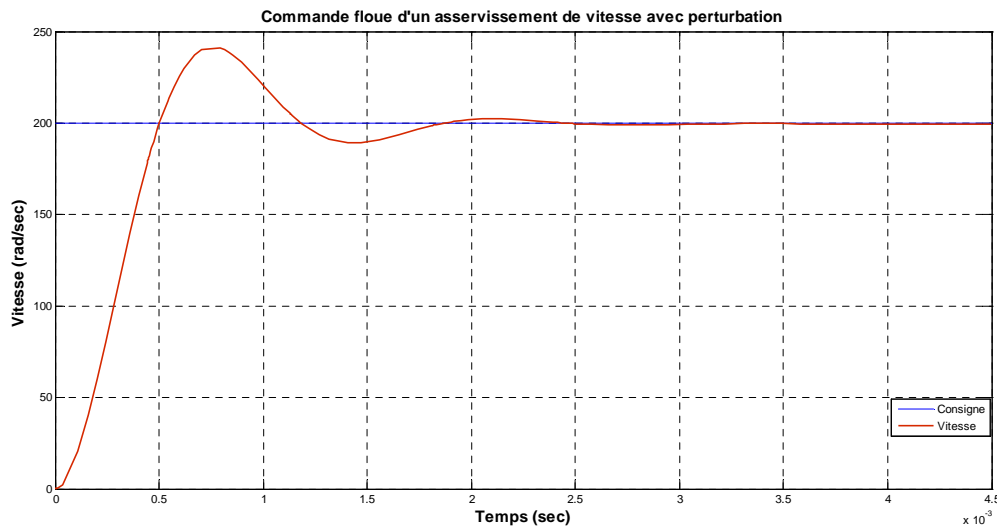
### III-2-1-1-Interprétation

Pendant le démarrage, la vitesse atteint la valeur imposée à un temps de réponse  $t_r = 1.2 \cdot 10^{-3}$  secondes et un temps de montée  $t_m = 0.3 \cdot 10^{-3}$  secondes, avec un dépassement de 20%.

### III-2-2-Régulation en vitesse avec perturbation

On ajoute une perturbation au schéma bloc (voir annexe C) de la commande en vitesse d'un moteur à courant continu qui est représenté par la **figure (III-6)**.

Les valeurs des gains du régulateur sont choisis après plusieurs tests d'ajustement  $K_e = 0.4$   
 $K_{de} = 10^{-5}$ ,  $K_c = 50$ .



**Figure (III-6) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de vitesse avec perturbation

#### III-2-2-1- Interprétation

Pendant le démarrage, la vitesse atteint la valeur imposée, avec un dépassement de 20.32% .

#### III-2-3- Régulation en position

Le schéma bloc de la commande en position d'un moteur à courant continu qui est orienté par régulateur floue, est représenté par la **Figure (III-7)**.

Pour les valeurs des gains  $K_e = 0.3$ ,  $K_{de} = 10^{-3}$ ,  $K_c = 12$ , associés au régulateur .



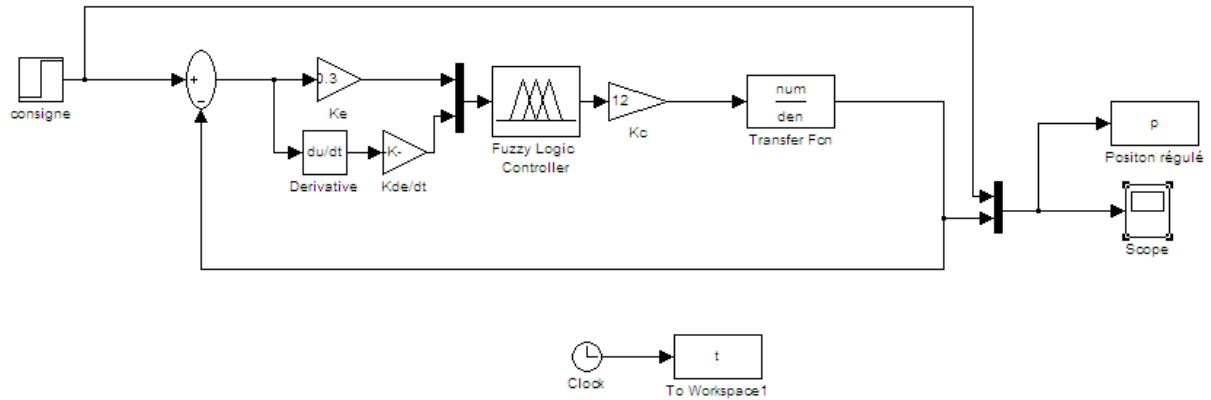
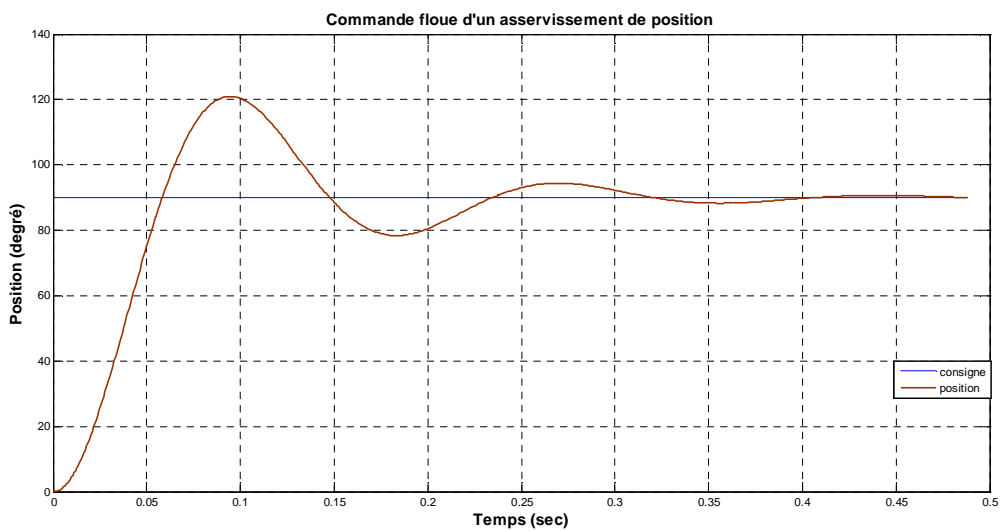


Figure (III-7) : Schéma bloc d'un asservissement de position par RLF.

La réponse pour l'asservissement en position représentée par la figure (III-8) :



Figure(III-8) : Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de position.

### III-2-3-1-Interprétation

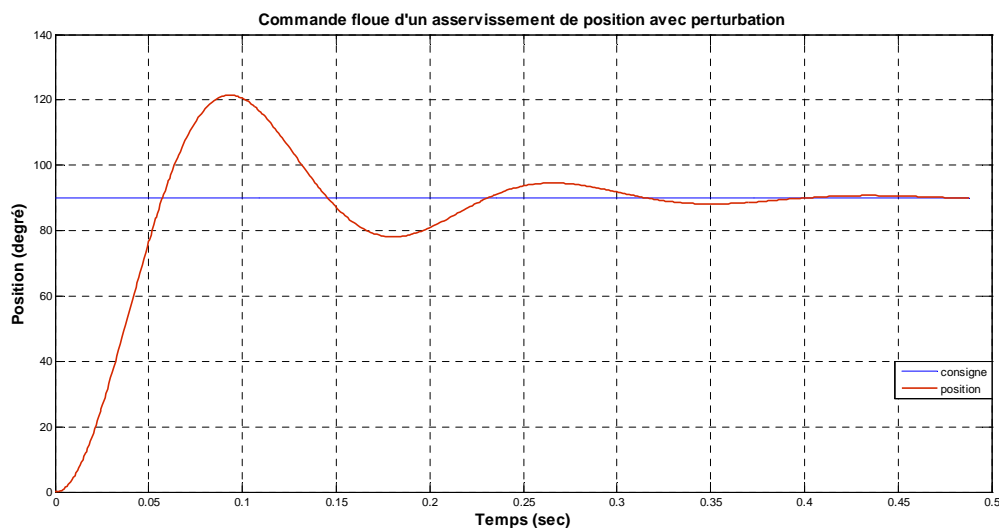
D'après la figure précédente on constate que :

La réponse atteint la consigne (position désirée) en un temps de réponse  $t_r = 0.23s$ , et un temps de montée  $t_m = 0.05s$ , avec un dépassement  $D = 33.33\%$ .

### III-2-4-Régulation en position avec perturbation

Le schéma bloc de la commande en position (voir Annexe C) avec perturbation d'un moteur à courant continu qui est orienté par régulateur flou, est représenté par la **Figure (III-9)**.

Pour les valeurs des gains  $K_e = 0.3$ ,  $K_{de} = 10^{-3}$ ,  $K_c = 12$ , associés au régulateur.



**Figure (III-9) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de position avec perturbation.

### III-2-4-1-Interprétation

D'après la figure précédente on constate que la réponse atteint la consigne (position désirée), avec un dépassement  $D = 34.44\%$ .

## Conclusion

Afin d'évaluer les performances de cette technique, nous avons simulé notre schéma bloc d'un asservissement de vitesse et de position par RLF représenté par la Figure (III-4), Figure (III-7). Après simulation, on a obtenu les résultats illustrés par la Figure (III-5) et Figure (III-8), on constate que pendant le démarrage, la vitesse atteint la valeur imposée, avec un dépassement de 20%. Et pour la position, avec un dépassement  $D = 33.33\%$ .

Par la suite on a appliqué une perturbation pour ces derniers, ses résultats sont représentés par la Figure (III-6) et Figure (III-9). Avec un dépassement de 20.32%, et 34.44%.

Les résultats de la simulation nous ont permis de juger les qualités de la commande à base du régulateur flou. A travers les caractéristiques de la réponse, on observe de bonnes performances même en présence des perturbations grâce à la robustesse du régulateur flou, Ce qui nous a permis de conclure que la logique floue est un moyen très performant pour l'amélioration de la stabilité du moteur à courant continu.

Le régulateur Flou présente un net avantage. Un meilleur temps de montée, une réponse rapide avec un petit dépassement, l'effet de perturbations est moins important.

Le travail exposé dans ce mémoire donne comme but l'étude de la simulation de commande d'un moteur à courant continu à excitation séparée par la logique floue, Nous avons synthétisé le régulateur à logique Floue du type MAMDANI pour le réglage de vitesse et de position.

Après avoir donné quelques rappels théoriques de base de la logique floue et la représentation d'un régulateur flou et de ses différents constituants, ainsi la description du moteur à courant continu tout en expliquant son principe de fonctionnement, sa modélisation et le modèle mathématique d'une réponse en vitesse et en position.

Les résultats de simulation expérimentaux ont montré l'efficacité de la commande, à base du régulateur flou. A travers les caractéristiques de la réponse, on observe des bonnes performances même en présence des perturbations externes. L'avantage de ce type de régulateur, possède un meilleur temps de montée, une réponse rapide avec un petit dépassement, l'effet de perturbations est moins important. Les différents résultats obtenus de simulation montrent la robustesse du régulateur utilisé.

D'après les résultats obtenus, nous avons montré qu'il est possible d'obtenir de très bonnes performances.

En dernier et durant ce travail qui nous a été très fructueux, nous avons mis en œuvre les connaissances acquises durant notre formation que ce soit sur le plan théorique que pratique comme il nous a appris à travailler en équipe pour une meilleure maîtrise et un aboutissement certain du sujet.

## Annexe A

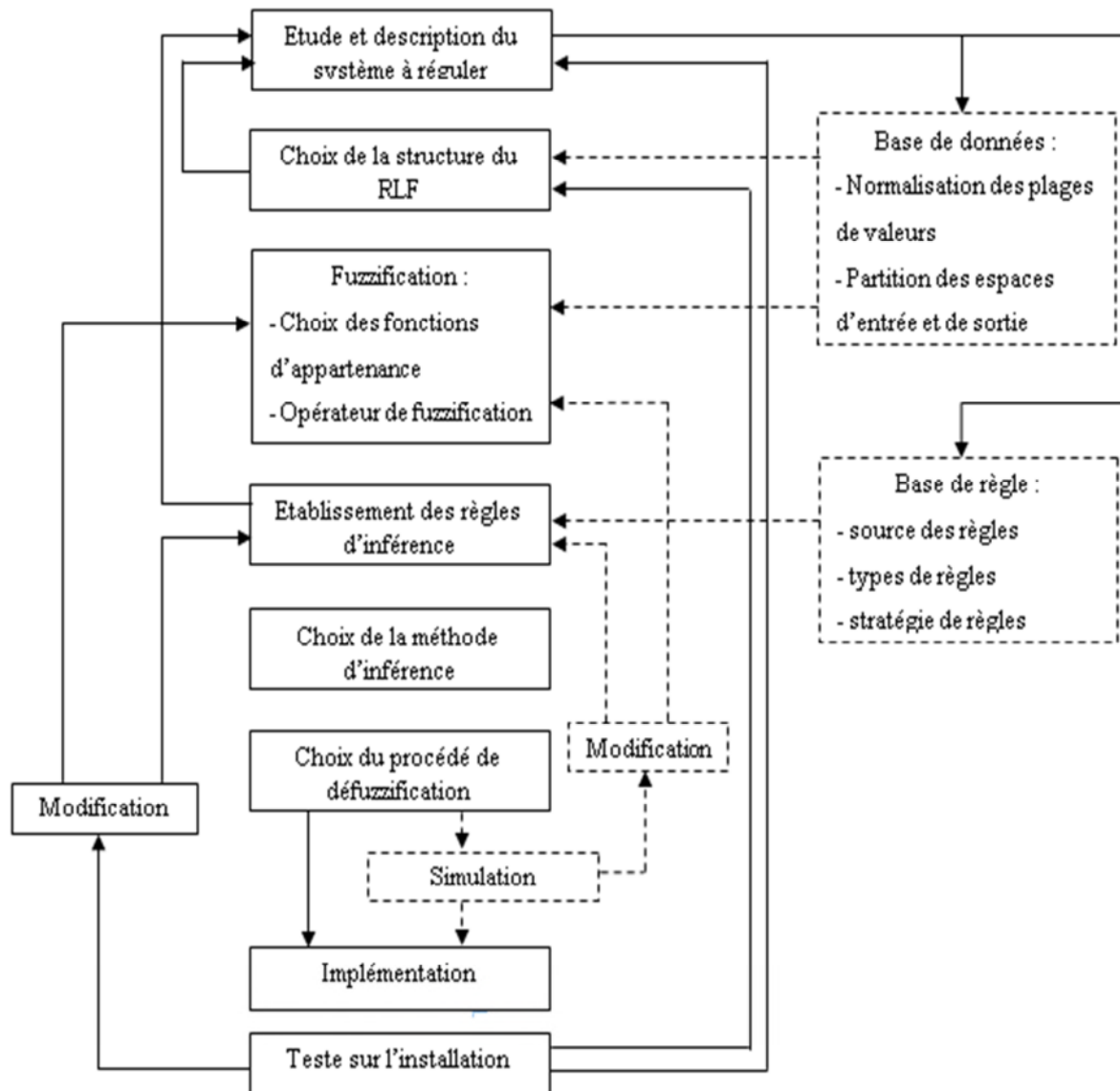


Figure (I) : Méthodologie de la synthèse d'une commande floue

**Annexe B****Table de transformées en p et Z**

Cette table donne les transformées de Laplace et en Z de fonction souvent rencontrées. La période d'échantillonnage est  $T_e$ .

F(t), t>0	F(p)	F(Z)
$\delta(t)$	1	1
$\delta(t-K*T_e)$	$e^{-K*T_e p}$	$Z^{-k}$
1	$\frac{1}{p}$	$\frac{Z}{Z-1}$
t	$\frac{2}{p^2}$	$\frac{T_e Z}{(Z-1)^2}$
$t^2$	$\frac{2}{p^3}$	$\frac{T_e^2 Z(Z+1)}{(Z-1)^3}$
$t^3$	$\frac{6}{p^4}$	$\frac{T_e^3 Z(Z^2+4Z+1)}{(Z-1)^4}$
$t^n$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$	$(-1)^n \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\partial^n}{\partial \varepsilon^n} \left( \frac{Z}{Z - e^{-\varepsilon T_e}} \right)$
$e^{-at}$	$\frac{1}{(p+a)}$	$\frac{Z}{(Z - e^{-aT_e})}$
$t * e^{-at}$	$\frac{1}{(p+a)^2}$	$\frac{T_e Z e^{-aT_e}}{(Z - e^{-aT_e})^2}$
$t^2 * e^{-at}$	$\frac{1}{(p+a)^3}$	$\frac{T_e^2 Z(Z+1)}{(Z-1)^3}$
$t^n * e^{-at}$	$\frac{n!}{(p+a)^{n+1}}$	$(-1)^n \frac{\partial^n}{\partial \varepsilon^n} \left( \frac{Z}{Z - e^{-aT_e}} \right)$
$(1-at) * e^{-at}$	$\frac{p}{(p+a)^2}$	$\frac{Z^2 - (1+aT_e) Z e^{-aT_e}}{(Z - e^{-aT_e})^2}$

**Tableau (I) : Table de transformées en p et Z**

### Forme canonique d'une fonction de transfert

Forme canonique d'un premier ordre :  $H(p) = \frac{K}{1+\tau p}$

Forme canonique d'un second ordre :  $H(p) = \frac{K}{1+\frac{2\varepsilon}{w_0}p+\frac{p^2}{w_0^2}}$

Cette forme est fondamentale car elle permet de nombreuses analyses pratiques (analyse temporelle, fréquentielle, dimensionnelle).

### Temps de montée

Le temps de montée d'un système est le temps mis par sa sortie pour passer de 10% de sa valeur finale à 90% de sa valeur finale.

### Temps de réponse

Le temps de réponse d'un système est le temps mis par la sortie du système pour entrer dans la bande comprise entre  $\pm 5\%$  de sa valeur finale.

### Dépassement

Un critère important de la stabilité est le dépassement. Ce critère permet de définir la notion de stabilité relative.

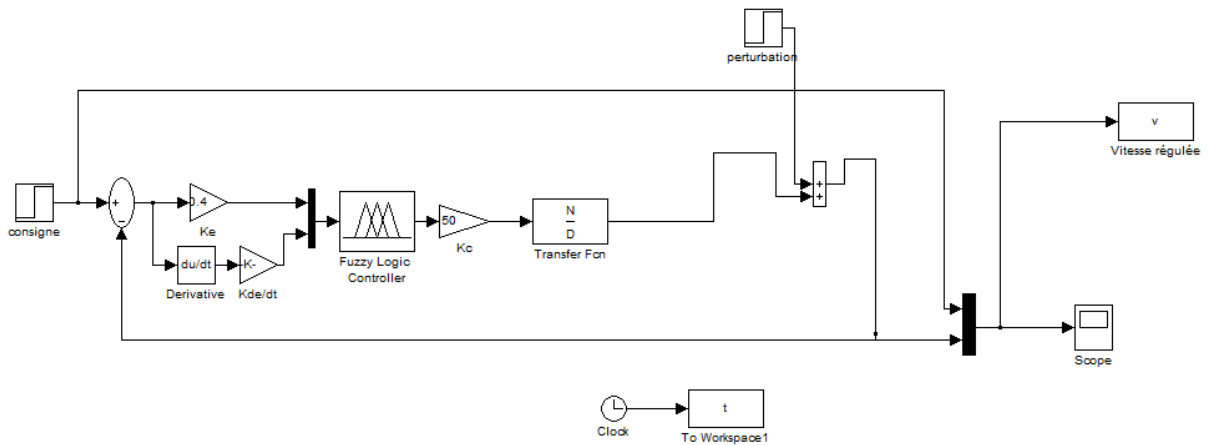
Le dépassement est mesuré par le taux de dépassement. On définit le premier dépassement par

$$D_1 \% = \frac{S(t_1) - S_\infty}{S_\infty} = \frac{\Delta_1}{S_\infty}$$

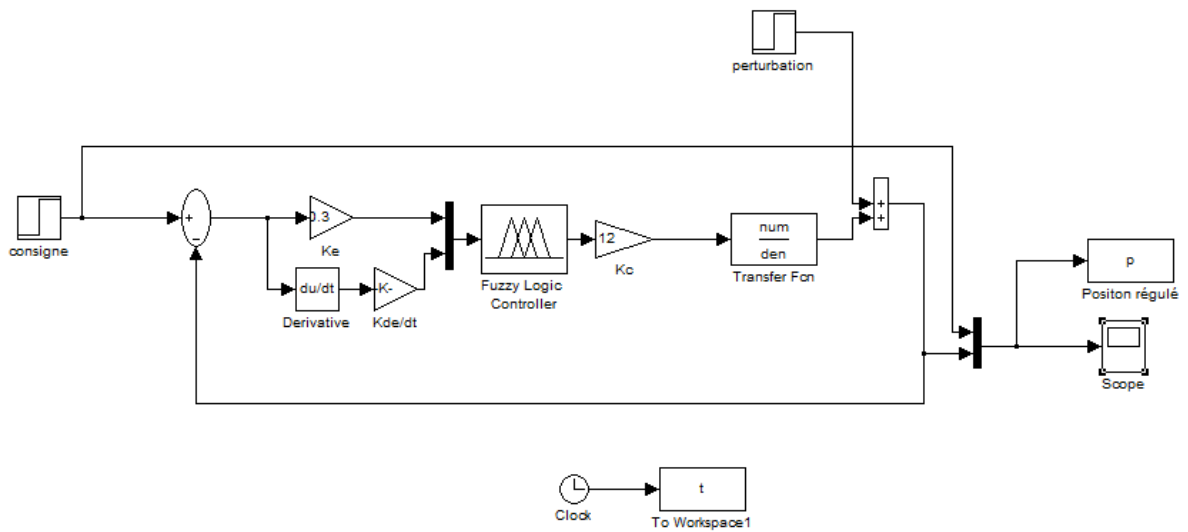
$S_\infty$ : La valeur finale de la sortie.

$S(t_1)$ : La valeur de la sortie à l'instant du premier dépassement.

## Annexe C



**Figure (II) :** Schéma bloc d'un asservissement de vitesse par RLF avec perturbation



**Figure (III) :** Modélisation sous MATLAB de la régulation floue de position avec perturbation.



- [1] **François CHEVRIE & François GUELY**, La logique floue Cahier Technique Schneider n°191 Edition mars 1998.
- [2] **Gonzalo Cabodevila**, Commande et identification Floue. Ecole Nationale Supérieure de Microtechnique.1993.
- [3] **DJAABOUB Salim**, Logique floue et SMA : Aide à la décision floue dans les systèmes multi- agents, Mémoire Magister en informatique. Universitaire Mentouri de Constantine 2009.
- [4] **S.KHELKHAL**, La logique floue et le contrôle avancé en milieu industriel, Mémoire de fin d'étude. Casablanca / Maroc .2004.
- [5] **Olivier CAZIER**, Instabilités dynamiques de systèmes frottants en présence de variabilités Paramétriques, Application au phénomène de crissement, Thèse de doctorat, l'université de VALENCIENNES.2012.
- [6] **LAOUFI Mourad, BABA Nawel, DJAMAI Hayet**, Planification de la trajectoire D'un robot mobile par la logique floue. Mémoire de fin d'étude, l'université de Bechar Promotion 2010.
- [7] **GUENOUNOU Ouahib**, Méthodologie De Conception De Controleurs Intelligents Par L'approche Génétique-application à un Bioprocédé, THESE De Doctorat De l'Université De Toulouse.2009.
- [8] **JEAN-Marie Flaus**, La régulation industrielle, régulateur PID, prédictifs et flous, HERMES.Octobre 1994.
- [9] **PIERRE MAYE**,Moteurs électrique industriels 2° édition. Dunod.2011.
- [10] **F.MILSANT**. « Machines électriques (tome II). ».Dunod.1980.
- [11] **R.CHAUPRADE**. « électronique de puissance : commande des moteur à courant continu. » 4<sup>eme</sup> édition eyrolles, paris. 1984.
- [12] **FERKANE Arezki et BENZEHER A Mohamed**,« Etude et réalisation de la régulation d'un moteur à courant continu alimenté par un hacheur». Projet de fin d'étude, (DEUA).Université A.Mira Béjaia, promotion 2004/2005.
- [13] **Mikhail Kostenko et Ludvik Piotrovski**, Machines électrique, machine à courant continu, transformateurs .Editions de Moscou 1979.

### Sites web :

<http://www.siteduzero.com/informatique/tutoriels/introduction-a-la-logiquefloue>

<http://fr.scribd.com/doc/57496281/Memoire-1>

<http://elap.montefiore.ulg.ac.be/fuzzy/>

<http://physique.vije.net/TSTI/index.php?page=mcc1,2,3,4,5>

<http://www.l'électronique-pour-tous.com>

<http://www.abcelectronique.com>