

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Centre Universitaire BOUSSOUF Abdelhafid -Mila**  
**Institut des Sciences et Technologie**  
**Département de Génie Mécanique et Électromécanique**



N°Ref :.....

**Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme**  
**de MASTER**  
**Spécialité : électromécanique**

**La commande sans capteur de vitesse d'un moteur à  
courant continu**

**Réalisé par :**

**- KERBAB Mohammed Lamine**

**- BOUDJADJA Houssam**

**Soutenu devant le jury :**

**M,Bella  
S,Bazi  
M,Tiar**

**Président  
Examineur  
Promoteur**

**Année universitaire : 2022/2023**



*A mes très chers parents **Yacine, Leila**, source de  
Vie, d'amour et d'affection*

*A mes chers frères et leurs enfants, sources de  
Joie et de bonheur **Aya, Younes**  
**Chouaib, Israa***

*A mon cher grand-père, que Dieu lui fasse  
Miséricorde **Saleh***

*A toute ma famille, source d'espoir et de  
Motivation*

*A tous mes amis tout particulièrement **Omar,**  
**Mohammed, Akrem et Islam** mes amis  
Sont comme mes frères  
A vous cher lecteur.*

***Boudjadja Houssam***



*Je me fais le plaisir de dédier affectueusement  
ce modeste travail à toutes les personnes qui sont le plus  
proches à mon cœur et qui m'ont offert tous leur effort pour  
que je réussisse dans ma vie :*

*\* Mes chers parents pour leurs sacrifices et encouragements  
et qu'ils trouvent ici toute ma gratitude et considération.*

*\* Mon adorable frère **Zakaria** et ma sœur **Ghada**  
\* Toute la famille **Kerbab** et **Hannani**.*

*\* Une très spéciale dédicace à mes amis: **Ahmed**, **Houssam**,  
**Seyf El Islem**, **Islem**, **Abdessemed**.*

*\* Toutes personnes qui ont participé de près ou de loin pour  
l'accomplissement de ce modeste travail.*

*A vous cher lecteur.*

***Kerbab Mohammed Lamine***



*Toute notre parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions nos encadreurs Dr TIAR Mourad pour leurs soutiens, leurs conseils judicieux et leurs grandes bienveillances durant l'élaboration de ce projet. Ainsi j'exprime ma reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme. Nos chers et profonds mercis à nos parents pour leur contribution, leur soutien et leur patience pendant toute cette période scolaire et qui sans leurs aide n'aurait jamais existé. Enfin, à tous ceux qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.*



- V Tensions appliquée au moteur [v]
- E Force électromotrice [v]
- I Le courant d'induit [a]
- C<sub>m</sub> Couple moteur généré [N.m]
- C<sub>r</sub> Couple résistant [N.m]
- $\Omega$  Vitesse de rotation de moteur [rad/min]



Introduction générale .....1

**Chapitre 1 : Généralités sur le Système.**

1-1.Introduction.....3

1-2. Les Moteurs à courant continu.....3

1- 3. Conversion d'énergie.....4

1-4. Description d'un moteur à courant continu.....5

    1-4-1. L'induit.....5

    1-4-2.Inducteur (Stator).....6

    1- 4-3. Collecteur et ballais.....6

1-5. Symbole d'un moteur à courant continu.....7

1-6. Principe fonctionnement et modèle équivalent de l'induit.....7

    1-6-1. Fonctionnement en moteur .....7

1-7. Les différents types de moteur à courant continu..... 8

    1-7-1. Les moteur à inducteur à aimant permanant.....8

    1-7-2. Les moteurs à inducteur bobiné.....9

        1-7-2-1. Le moteur à excitation séparée..... 9

        1-7-2-2. Le moteur à excitation série.....10

        1-7-2-3. Le moteur à excitation shunt.....11

        1-7-2-4. Le moteur à excitation composée.....11

1-8. Choix d'un moteur à vitesse variable.....11

1-9. Avantages et inconvénients.....12

1-10. Les hacheurs.....13

1-11. Les types des hacheurs.....14

    1-11-1. Hacheur dévolteur.....14

    1-11-2. Hacheur survolteur.....14

    1-11-3. Hacheur dévolteur-survolteur.....15

1-12. Les avantages des hacheurs.....16

1-13. Tachymètre.....17

1-14. Les différentes types des tachymètres.....18

1-14-1. Les tachymètres mécaniques.....	18
1-14-2. Les tachymètres électromagnétiques.....	18
1-14-3. Les tachymètres électriques.....	18
1-15. Les utilisations d'un tachymètre.....	19
1-16. Fonctionnement d'un tachymètre.....	19
1-17. Estimateur.....	20
1-18. Observateur des systèmes linéaires.....	21
1-19. Observateur de Luenberger.....	21
1-20. Filtre de Kalman.....	22
1-21. Observateur à entrées inconnues.....	22
1-22. Les avantages et les inconvénients des observateurs.....	23
1-22-1. Les avantages.....	23
1-22-2. Les inconvénients .....	23
1-23. La régulation automatique.....	23
1-24. Eléments constitutifs d'une boucle de régulation.....	24
1-24-1. Le système commander.....	24
1-24-2. L'actionneur.....	24
1-24-3. Le correcteur.....	24
1-24-4. Le capteur.....	24
1-25. Les problèmes communs des capteurs.....	25
1-26. Qu'est-ce qu'un observateur ?.....	25
1-27. Notions sur l'espace d'état.....	25
1-27-1. L'état d'un système.....	25
1-27-2. Variable d'état.....	25
1-27-3. Vecteur d'état.....	26
1-27-4. Espace d'état.....	26
1-27-5. Commandabilité.....	26
1-27-6. Observabilité.....	26
1-28. Conclusion.....	26
 <b>Chapitre 2 : Modélisation d'un moteur à courant continu.</b>	
2-1. Modélisation d'un moteur à courant continu.....	27
2-1-1. Description des équations de base.....	27
2-2. Modélisation des hacheurs.....	30

2-2-1. Hacheur série.....	30
2-2-2. Principe de fonctionnement d'un hacheur.....	31
2-3. Génératrice tachymétrique (GT).....	32
2-3-1. Modélisation du capteur de vitesse.....	32
2-4. L'estimateur.....	33
2-4-1. Structure d'un observateur.....	35
2-5. Conclusion.....	37

### **Chapitre 3 : Description des approches de commande.**

3-1. Simulation du moteur .....	38
3-1-1. Boucle ouverte.....	38
3-1-2. Boucle fermée .....	38
3-2. La régulation PI.....	39
3-3. Représentation du système dans l'espace d'état.....	42
3-4. Commande par retour d'état.....	42
3-5. Commande par retour d'état avec pré-compensateur.....	44
3-6. Commande par retour d'état et bouclage intégral.....	45
3-7. Commande par retour d'état observé.....	46
3-8. Régulation PI avec estimation de la mesure.....	48
3-9. Commande par modélisation de largeur d'impulsion.....	48
3-9-1. Principe de MLI.....	49
3-9-2. Caractéristique de la modulation.....	49
3-10. Conclusion.....	50

### **Chapitre 4 : Interprétation des résultats.**

4-1. Introduction.....	51
4-2. Boucle ouverte.....	52
Remarque.....	52
4-3. Boucle fermée.....	53
Remarque.....	53
4-4. Commande par retour d'état.....	54
Remarque.....	54
4-5. Commande par retour d'état et avec pré-compensateur.....	55
Remarque.....	55
4-6. Commande par retour d'état et bouclage intégral.....	56

Remarque .....	56
4-7. Commande par retour d'état observé.....	57
Remarque.....	57
4-8. Régulation PI avec estimation de la mesure .....	58
Remarque.....	58
4-9. Conclusion.....	59



## Chapitre 01

<b>Figure (1-1) :</b> Vue en coupe d'un moteur à courant continu .....	4
<b>Figure (1-2) :</b> Moteur à courant continu comme générateur ou moteur.....	4
<b>Figure (1-3) :</b> constitution d'un moteur à courant continu.....	5
<b>Figure (1-4) :</b> induit (rotor) de moteur à courant continu.....	5
<b>Figure (1-5) :</b> inducteur de moteur à court continu.....	6
<b>Figure (1-6) :</b> collecteur et balais d'une machine à courant continu.....	6
<b>Figure (1-7) :</b> schéma d'une machine à courant continu.....	8
<b>Figure (1-8) :</b> Moteur à aimant permanent.....	8
<b>Figure (1-9) :</b> type d'excitation d'un moteur à courant continu.....	9
<b>Figure (1-10) :</b> Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée.....	10
<b>Figure (1-11) :</b> Caractéristique de vitesse d'un moteur série.....	11
<b>Figure (1-12) :</b> Caractéristique de couple d'un moteur série.....	11
<b>Figure (1-13) :</b> Schéma symbolique d'un convertisseur DC /DC.....	13
<b>Figure (1-14) :</b> Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur.....	14
<b>Figure (1-15) :</b> Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	15
<b>Figure (1-16) :</b> Schéma de principe du convertisseur dévolteur-survolteur.....	15
<b>Figure (1-17) :</b> PLT-5000 Tachymètre laser avec et sans contact.....	17
<b>Figure (1-18) :</b> produits associés.....	20
<b>Figure (1-19) :</b> structure d'un système de régulation automatique.....	24

## Chapitre 02

<b>Figure (2-1) :</b> Schéma fonctionnel du MCC.....	29
<b>Figure (2-2) :</b> Exemple de modélisation sous Matlab de la réponse de position .....	29
<b>Figure (2-3) :</b> Convertisseur continu-continu.....	30
<b>Figure (2-4) :</b> hacheur série.....	30
<b>Figure (2-5) :</b> chronogramme de la fermeture et de l'ouverture.....	31
<b>Figure (2-6) :</b> schéma général d'asservissement en utilisant une génératrice tachymétrique..	32
<b>Figure (2-7) :</b> capteur de vitesse.....	32
<b>Figure (2-8) :</b> Diagramme structurel d'un observateur.....	34
<b>Figure (2-9) :</b> Diagramme structurel d'un observateur d'ordre plein.....	36

## Chapitre 03

<b>Figure (3-1) :</b> schéma bloc de la boucle ouverte.....	38
<b>Figure (3-2) :</b> schéma bloc de la boucle fermé.....	38
<b>Figure (3-3) :</b> représentation des pôles.....	40
<b>Figure (3-4) :</b> schéma bloc de la régulation PI.....	41
<b>Figure (3-5) :</b> schéma bloc du retour d'état.....	43
<b>Figure (3-6) :</b> retour d'état avec pré-compensateur.....	44
<b>Figure (3-7) :</b> schéma du retour d'état intégral (PI).....	45
<b>Figure (3-8) :</b> retour d'état avec observateur.....	47
<b>Figure (3-9) :</b> schéma du correcteur PI avec estimateur de vitesse.....	48
<b>Figure (3-10) :</b> Schéma synoptique de la M.L.I.....	49

## Chapitre 04

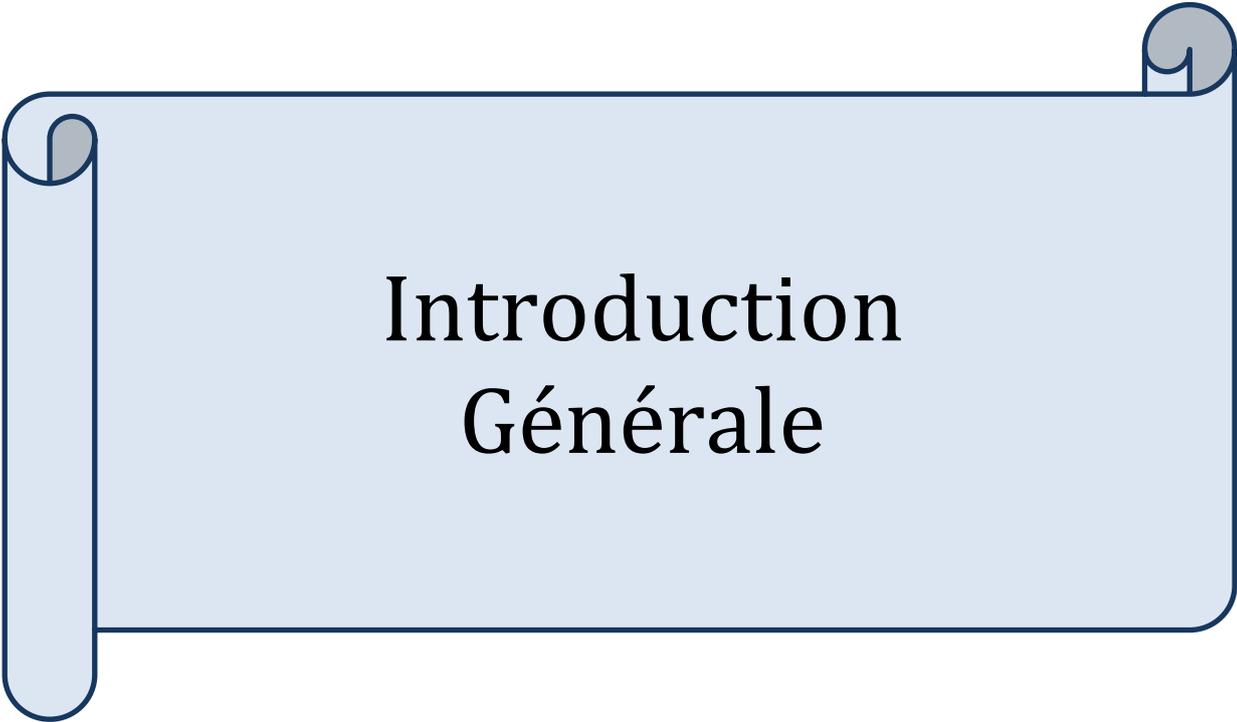
<b>Figure (4-1) : réponse en boucle ouverte pour un échelon <math>\alpha=50\%</math>.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure (4-2) : réponse du moteur en boucle fermé.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure (4-3) : réponse avec retour d'état.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure (4-4) : réponse avec pré-compensateur.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure (4-5): réponse avec retour d'état intégral PI.....</b>	<b>56</b>
<b>Figure (4-6) : réponse avec retour d'état observé.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure (4-7) : réponse du PI avec vitesse estimé.....</b>	<b>58</b>

### ملخص:

يتمثل هذا العمل في التحكم في السرعة بدون مستشعر وهي نوع من التقنيات المستخدمة في أنظمة التحكم لضبط سرعة المحركات أو الآلات بدون الحاجة إلى استخدام مستشعر خارجي لقياس السرعة. هذه التقنية تعتمد على طرق تحليل الإشارات الكهربائية أو الميكانيكية الناتجة عن عمل المحرك أو الجهاز لتقدير السرعة وضبطها بشكل دقيق باستخدام خوارزميات مخصصة.

### Summary :

This work is sensorless speed control which is a type of technique used in control systems to adjust the speed of motors or machines without the need to use an external sensor to measure the speed. This technology relies on methods of analyzing electrical or mechanical signals resulting from the operation of the motor or device to estimate the speed and adjust it precisely using specialized algorithms.



# Introduction Générale

## **Introduction générale :**

Le moteur à courant continu inventée par Zénobie Gramme et présentée à l'Académie des Sciences, à Paris, en 1871, c'était au départ un simple générateur de courant continu (pour applications galvanoplastiques).

Une machine à courant continu est une machine électrique. Il s'agit d'un convertisseur électromécanique permettant la conversion bidirectionnelle d'énergie entre une installation électrique parcourue par un courant continu et un dispositif mécanique ; selon la source d'énergie. En fonctionnement moteur, l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique et ainsi en fonctionnement générateur, l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (elle peut se comporter comme un frein). Dans ce cas elle est aussi appelée dynamo.

Les moteurs à courant continu (DC) jouent un rôle important dans l'industrie en raison de leurs performances élevées et de leur polyvalence. Ils sont utilisés dans de nombreux équipements industriels, tels que les machines-outils, les robots, les systèmes de convoyage, les pompes et les ventilateurs. Les moteurs à courant continu offrent un contrôle précis de la vitesse et du couple, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant un mouvement précis et stable. Ils sont également efficaces sur une large plage de vitesses et de charges, ce qui leur permet de s'adapter à différentes situations de travail. De plus, les moteurs à courant continu sont relativement compacts et peuvent être facilement intégrés dans des équipements industriels

Cependant, la machine à courant continu étant réversible et susceptible de se comporter soit en « moteur » soit en « générateur » dans les quatre quadrants du plan couple-vitesse, la distinction moteur/générateur se fait « communément » par rapport à l'usage final de la machine. On peut mesurer la vitesse de ce moteur avec un composant dédié appelé tachymètre.

Le tachymètre est un appareil de mesure permettant de déterminer la vitesse de déplacement d'un objet en mouvement, il indiquant en continu la vitesse angulaire d'une machine tournante, par exemple l'arbre de sortie d'un moteur. On retrouve la fonction de tachymètre sur certains modèles de montre chronographe.

Les moteurs à courant continu (DC) sont couramment utilisés dans de nombreuses applications industrielles et domestiques. Traditionnellement, la commande de ces moteurs repose sur des capteurs de vitesse tels que les encodeurs ou les tachymètres pour mesurer la vitesse de rotation. Cependant, l'utilisation de capteurs ajoute de la complexité et des coûts supplémentaires au système. Une alternative prometteuse consiste à développer des techniques de commande sans capteur de

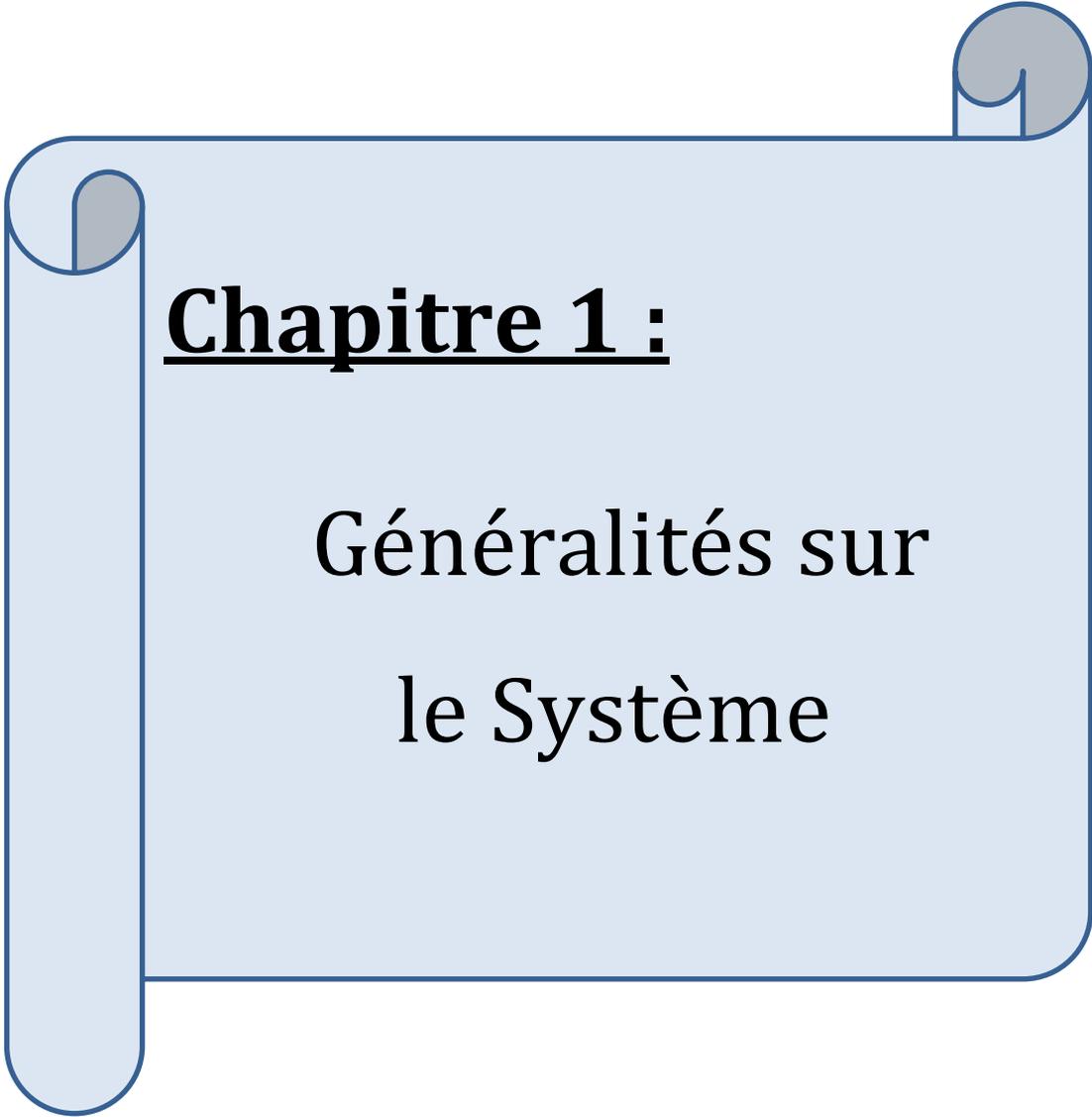
vitesse pour les moteurs à courant continu, ce qui permettrait de simplifier les systèmes de commande et de réduire les coûts.

Comment peut-on estimer la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu en l'absence de capteur dédié ?

- Le travail cible pour objectifs :
- ✓ développer des techniques de contrôle efficaces pour les applications où la mesure de la vitesse du moteur n'est pas disponible ou n'est pas fiable.
- ✓ Découvrez l'efficacité de l'estimation par une comparaison entre le résultat estimé et le résultat mesurer

Ainsi ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

-  Généralités sur le système à étudié.
-  Modélisation du système à étudié.
-  Description des approches de commande.
-  Interprétation des résultats.



# **Chapitre 1 :**

## Généralités sur le Système

### **1-1 Introduction :**

Un système sans capteur de vitesse pour un moteur à courant continu est un système de contrôle de moteur qui ne nécessite pas de capteur physique pour mesurer la vitesse du moteur.

Dans un système classique avec capteur de vitesse, un capteur est utilisé pour mesurer la vitesse du moteur et fournir un retour d'information au contrôleur pour ajuster la puissance fournie au moteur. Cependant, dans un système sans capteur de vitesse.

Le contrôleur utilise des algorithmes de contrôle pour estimer la vitesse du moteur à partir d'autres mesures telles que le courant et la tension du moteur.

Les systèmes sans capteur de vitesse sont souvent utilisés dans des applications où l'utilisation d'un capteur de vitesse est coûteuse ou impossible en raison de contraintes d'espace ou de température. Ils sont également souvent utilisés dans des applications où une réponse rapide est nécessaire, car les systèmes sans capteur de vitesse peuvent fournir une réponse plus rapide que les systèmes avec capteur de vitesse.

Dans ce chapitre, nous parlerons des généralités sur les composants du système que nous étudions.

### **1-2 Les moteurs à courant continu :**

La machine à courant continu est un convertisseur d'énergie. Totalement réversible elle peut fonctionner soit en moteur. Convertisseur de l'énergie électrique en énergie mécanique soit en génératrice. Convertisseur de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Les moteurs à courant continu sont utilisés dans les asservissements où la facilité de réglage de la vitesse du moment. Du couple et du sens de rotation une mise en œuvre aisée. [1]

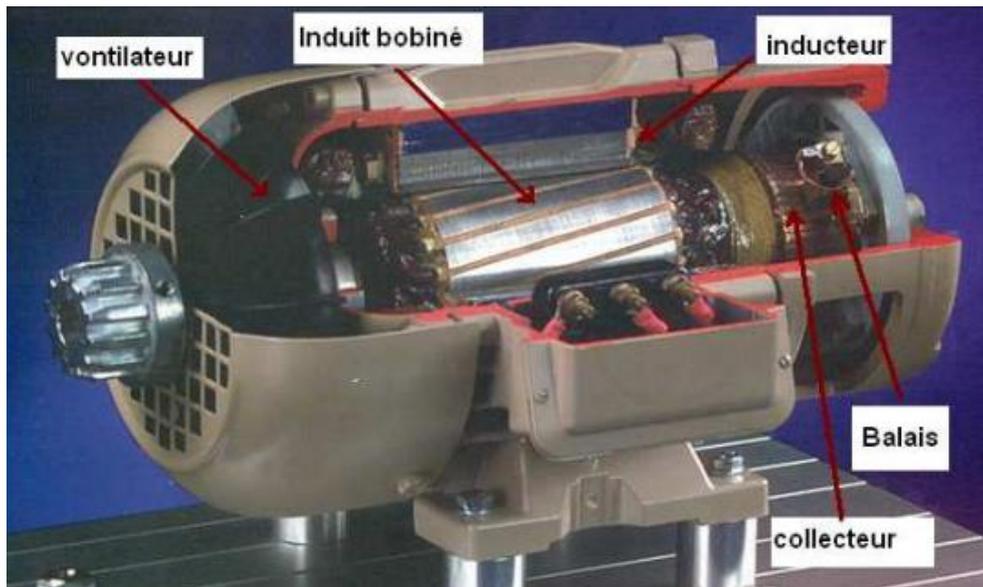


Figure (1-1) : Vue en coupe d'un moteur à courant continu. [10]

### 1-3 Conversion d'énergie :

Moteur : pour entrainer un système en rotation (c'est-à-dire fournir de la puissance mécanique) fournir. [1]

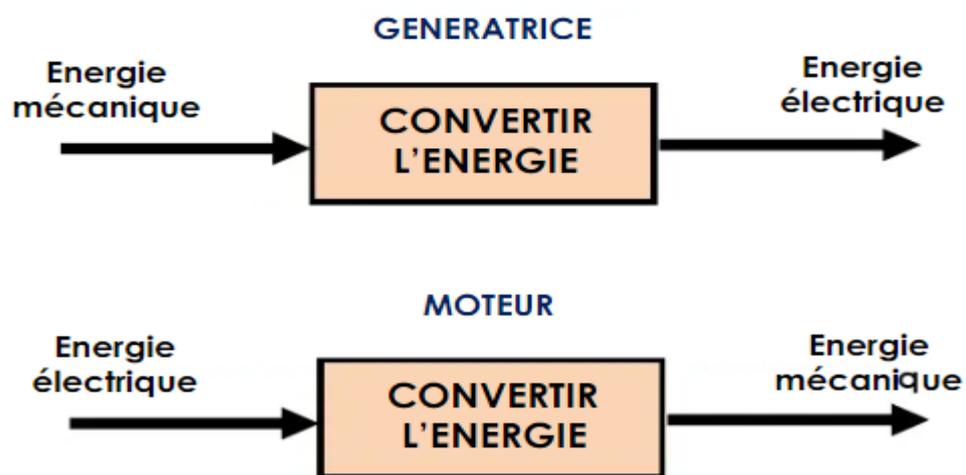
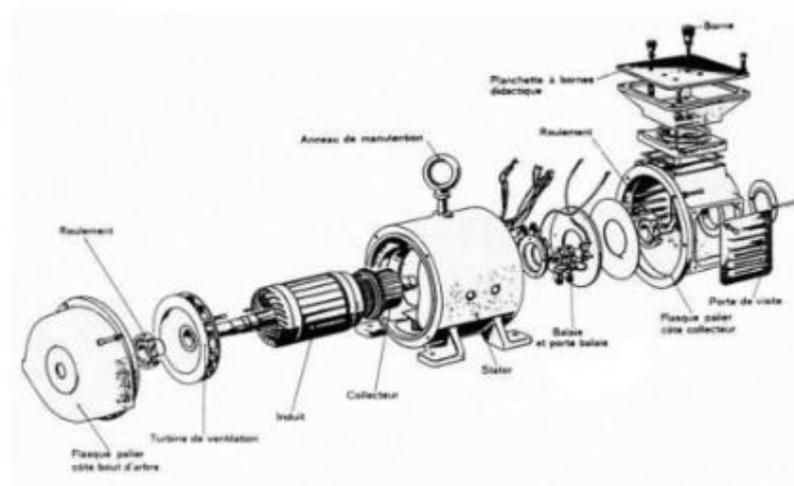


Figure (1-2) : Moteur à courant continu comme générateur ou moteur. [11]

### 1-4 Description d'un moteur à courant continu :

Les moteurs à courant continu sont constitués comme tous les moteurs de 2 parties principales:

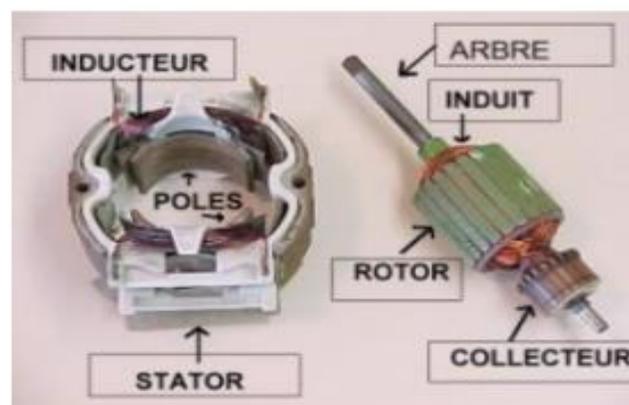
- **la partie fixe** : appelée stator que l'on appelle aussi inducteur.
- **la partie mobile** : appelée rotor que l'on appelle aussi induit. [1]



**Figure (1-3) :** constitution d'un moteur à courant continu. [1]

#### 1-4-1 L'induit (rotor) :

L'induit est la partie tournante de le moteur, le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.[1]



**Figure (1-4) :** induit (rotor) de moteur à courant continu. [1]

### 1-4-2 Inducteur (stator) :

C'est la partie fixe. Il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer. Espace séparant la partie fixe et la partie mobile. [1]

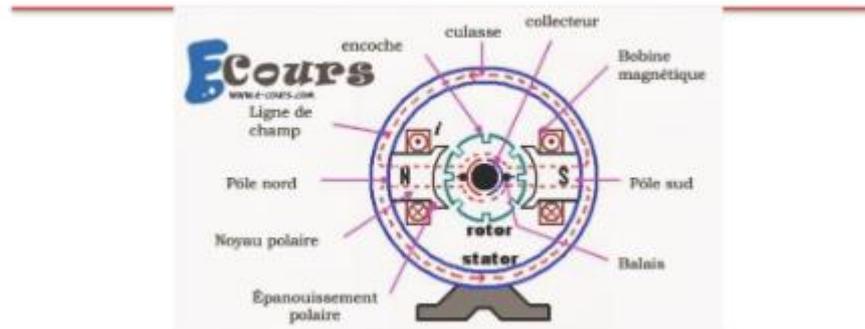


Figure (1-5) : inducteur de moteur à court continu. [1]

### 1-4-3 Collecteur et balais :

Le dispositif collecteur /balais permet de faire circuler un courant dans l'induit, le collecteur est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres par des feuilles de mica, et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit et transformeront le courant alternatif dans le bobinage en courant continu.

Les balais portés par le rotor frottent sur les lames du collecteur. Ces contacts glissants entre lames et balais permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit, qui tourne et l'extérieur de la machine. [1]

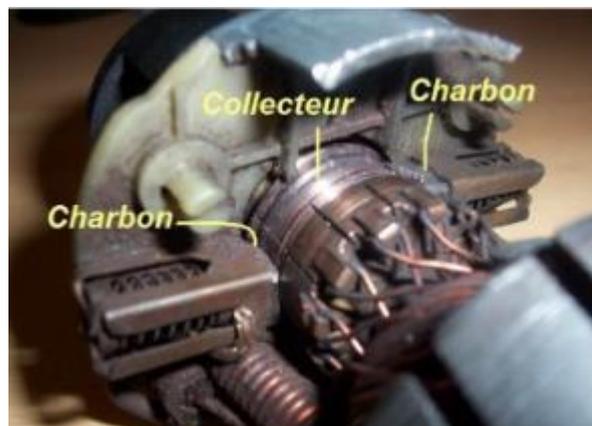
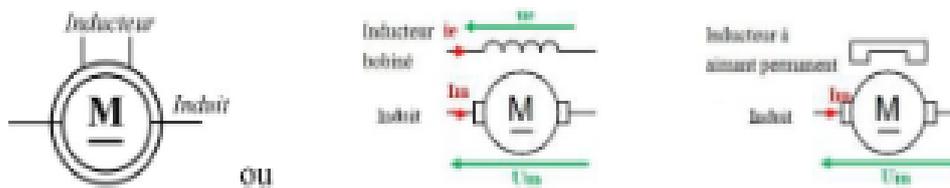


Figure (1-6) : collecteur et balais d'une machine à courant continu. [1]

Le collecteur est un commutateur mécanique qui inverse le sens du courant dans les conducteurs qui franchissent la ligne neutre les balais solidaires de la carcasse qui frottent sur le collecteur lorsque l'induit est soumis à une tension appliquée entre balais , le système balais –collecteur répartit le courant dans les conducteurs comme indiqué sur le schéma de la figure (1-6) le sens conventionnel est le même dans tous les conducteur situés un pôle , et le sens contraire dans tous les situés sous l'autre pôle. [1]

## 1-5 Symbole d'un moteur à courant continu : [1]



## 1-6 Principe de fonctionnement et modèle équivalent de l'induit :

### 1-6-1 Fonctionnement en moteur :

Les machines à courant continu fonctionnent aussi bien en moteur qu'en générateur. Elles sont réversibles.

Lorsque l'on place une spire parcourue par un courant dans un champ magnétique, il apparait un couple de forces. Ce couple de forces crée un couple de rotation qui fait tourner la spire.

Au cours de ce déplacement. Le couple de rotation diminue constamment jusqu'à s'annuler après rotation de 90 degrés (zone neutre. la spire se trouve à l'horizontale et perpendiculaire aux aimants naturels).

A fine d'obtenir une rotation sens à coup. L'enroulement d'induit doit être constitué d'un nombre élevé de spire similaires. Celles –ci seront réparties de façon régulière sur le pourtour du rotor (induit).

De manière à obtenir un couple indépendant de l'angle de rotation du courant de la partie fixe à la partie tournante du moteur. [1]

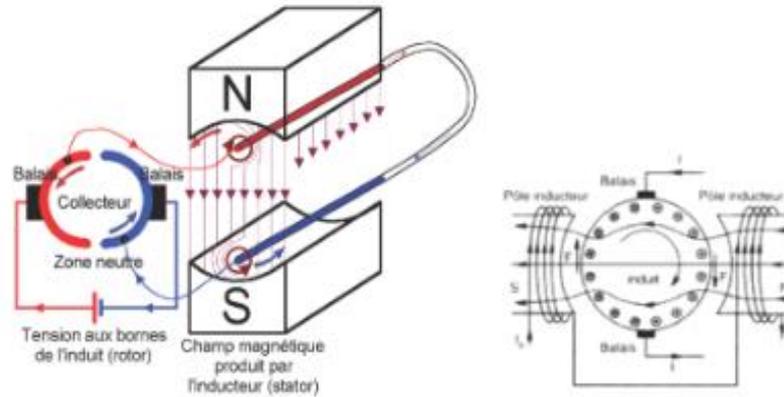


Figure (1-7) : schéma d'une machine à courant continu. [1]

### 1- 7 Les Différents type de moteur à courant continu:

On distingue deux types de moteurs à courant continu :

#### 1-7-1 Les moteurs à inducteur à aimant permanent :

Il n'y a pas de circuit inducteur, le flux inducteur est produit par un aimant permanent. Tous les moteurs à courant continu de faible puissance et les micromoteurs sont des moteurs à aimant permanent. Ils représentent maintenant la majorité des moteurs à courant continu. Ils sont très simples d'utilisation.[1]

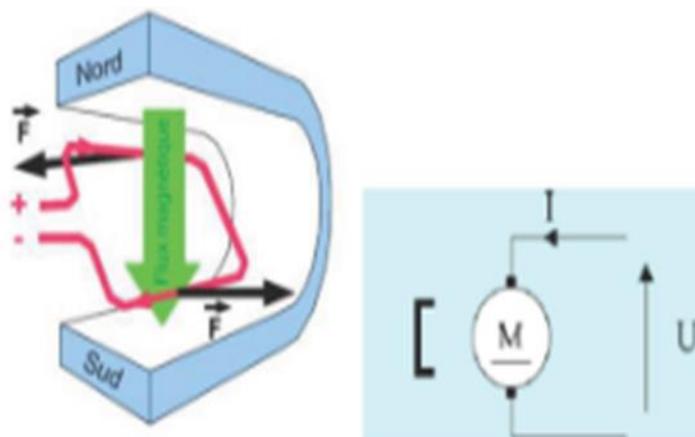
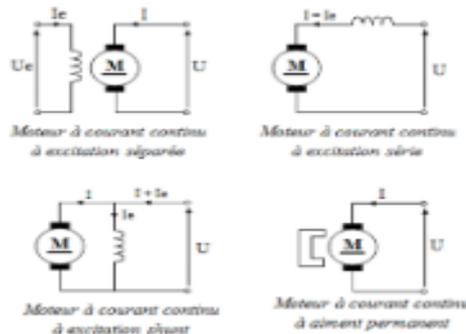


Figure (1-8) : Moteur à aimant permanent. [1]

**1-7-2 Les moteurs à inducteur bobiné :**

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

- ✚ le moteur à excitation séparée.
- ✚ le moteur à excitation shunt.
- ✚ le moteur à excitation série.
- ✚ le moteur à excitation composée. [1]



**Figure (1-9) :** type d'excitation d'un moteur à courant continu. [1]

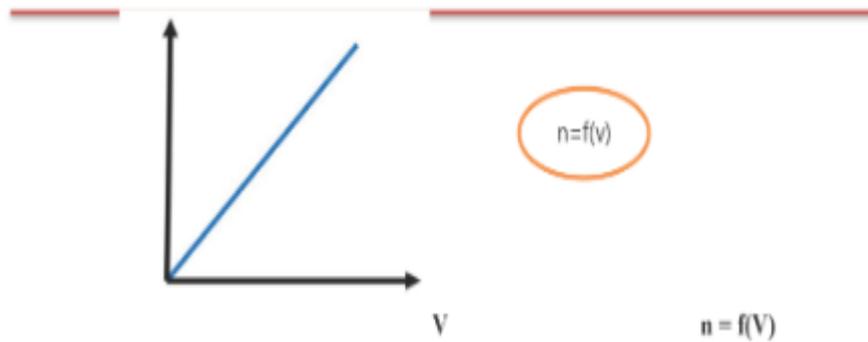
**1-7-2-1 Le moteur à excitation séparée :**

Dans un moteur à excitation séparée ou indépendante, le circuit d'excitation est séparé du circuit d'induit. Si l'inducteur est un aimant permanent, le flux ( $\Phi$ ) est constant. Si l'inducteur est un électroaimant alimenté par une source de tension continue réglable, le flux ( $\Phi$ ) ne dépend que du courant dans l'inducteur appelé courant d'excitation ( $I_e$ ).

Le courant crée un champ et une quantité de champ à travers une spire donne un flux. Si la tension ( $V_e$ ) est constante, le courant d'excitation ( $I_e$ ) est constant et le flux ( $\Phi$ ) est constant.

Dans ces conditions, la force contre électromotrice ( $E$ ) ne dépend que de la fréquence ( $n$ ) de rotation.

Donc la fréquence de rotation ( $n$ ) est proportionnelle à la tension ( $V$ ) d'alimentation du moteur. Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes). [1]



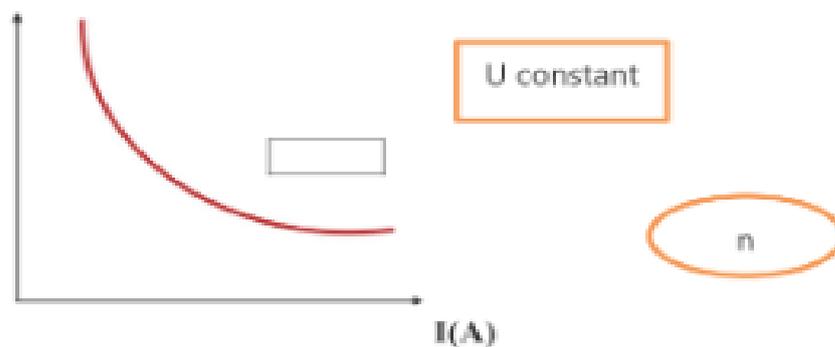
**Figure (1-10) :** Caractéristiques d'un moteur à excitation séparée. [1]

**1-7-2-2 Le moteur à excitation série :**

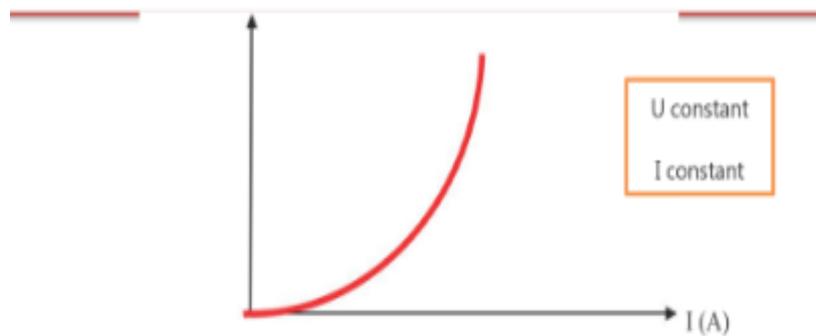
Dans un moteur à excitation série ou moteur série, le circuit d'excitation est en série avec le circuit d'induit. Le flux  $\Phi$  n'est plus constant mais proportionnelle à (I).

Dans ces conditions, la force contre électromotrice (E) dépend de la fréquence (n) de rotation et de l'intensité du courant (I).

Donc la fréquence de rotation (n) est proportionnelle à la tension (V) et au courant (I) d'alimentation du moteur. Compte tenu de la conservation de la puissance d'une machine (en négligeant les pertes). [1]



**Figure (1-11) :** Caractéristique de vitesse d'un moteur série. [1]



**Figure (1-12) :** Caractéristique de couple d'un moteur série. [1]

### 1-7-2-3 Le moteur à excitation shunt :

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

Les propriétés du moteur à excitation dérivation sont les mêmes que celle du moteur à excitation indépendante. [1]

### 1-7-2-4 Le moteur à excitation composée :

**Modes de branchement :** Courte dérivation : L'enroulement est shunté directement avec l'induit.

**Long dérivation :** L'enroulement est shunté en parallèle avec l'induit. [1]

## 1-8 Choix d'un moteur à vitesse variable :

Dans la commande électronique, nous disposons de deux moyens de réglage de la vitesse : soit par la variation de la tension ou bornes du moteur .soit par la variation d'excitation.

Il n'est pas indifférent d'employer l'un ou l'autre de ces procédés : celui qui convient le mieux dépend de la machine que le moteur entraîne et dans le cas ou le domaine de variation de la vitesse exige l'emploi des deux procédés il y a encore lieu de déterminer celui qu'il faut choisir. [1]

En résumé pour le choix d'un moteur on peut faire les remarques suivantes :

- Le courant nominal est défini par réchauffement du moteur .alors que le courant de surcharge est défini par la capacité de commutation du moteur.
- Pour une application donnée. Il faut choisir un moteur dont les caractéristiques Conviennent à celles de la charge régime nominal et en surcharge.

Il faut tenir compte :

- Du couple à transmettre.
- Du couple d'accélération calculé avec la somme des moments d'inertie sur l'arbre moteur.

Il en résulte alors une imperfection de la compensation du flux de commutation car les pôles auxiliaires sous compensent les montées de courant surcompensent ses di minutions.

Le choix de la vitesse de base et de la tension d'alimentation dépend essentiellement de la puissance considérée : ces grandeurs sont limitées pour des raisons technologiques telles que la tenue mécanique ou la commutation du collecteur. Il existe d'ailleurs une certaine normalisation dans ce domaine.

Selon l'application, on choisira une excitation séparée (c'est le cas le plus général) ou une excitation série (moteurs de traction essentiellement). [1]

## **1-9 Avantages et inconvénients :**

- **Les avantages :**
  - ✓ Une large gamme de variation de vitesse au-dessous de la vitesse de régime.
  - ✓ Un fonctionnement avec des couples constants ou variables.
  - ✓ Une vitesse de rotation qui peut être réglée par l'intermédiaire d'un système de rétroaction.
  - ✓ Une facilité de récupération d'énergie.
  - ✓ La variation de fréquence de rotation est simple à réaliser. [1]

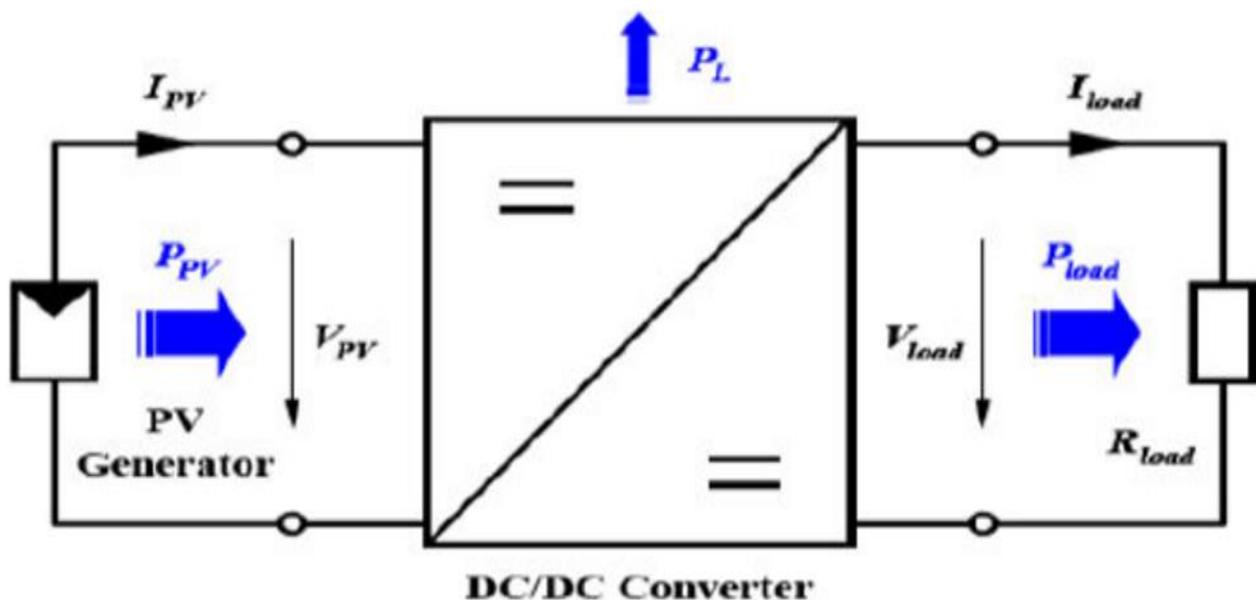
- **Les inconvénients :**

- ✓ Le principal problème de ces machines vient de la liaison entre les balais, ou charbons et le collecteur rotatif.
- ✓ Une alimentation statorique et rotorique par courant continu.
- ✓ Un mauvais facteur de puissance à basse vitesse. [1]

### 1-10 Les hacheurs :

Les hacheurs sont des convertisseurs de type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on obtient de bons rendements dans les hacheurs. [2]

La représentation symbolique la plus couramment utilisée est donnée par la figure (1-13).



**Figure (1-13) :** Schéma symbolique d'un convertisseur DC /DC. [2]

### 1-11 Les types des hacheurs :

Les hacheurs (ou convertisseurs DC-DC) sont des circuits électroniques utilisés pour convertir une tension continue (DC) d'un niveau à un autre, ou pour réguler la tension continue en fonction des besoins d'un système. Il existe plusieurs types de hacheurs, chacun ayant des caractéristiques et des applications différentes : [2]

#### 1-11-1 Hacheur dévolteur :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur Buck ou hacheur série. La figure (1-14) montre le schéma de principe d'un convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir la tension d'entrée  $V_i$  en une tension de sortie  $V_o$  inférieure. Le rapport de conversion  $M = V_o/V_i$  varie avec le rapport cyclique du commutateur. [2]

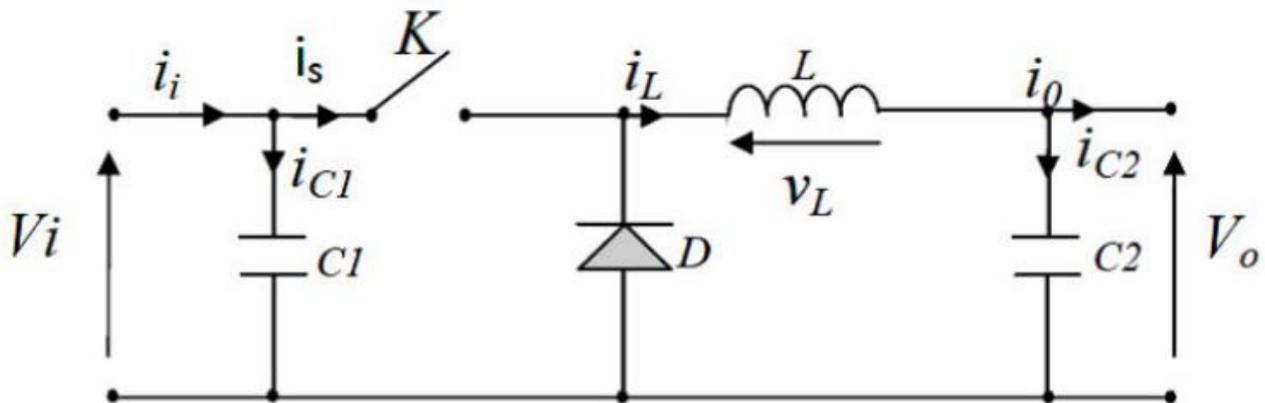


Figure (1-14) : Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur. [2]

#### 1-11-2 Hacheur survolteur :

C'est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe est celui de la figure (1-15). Son application typique est de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. [2]

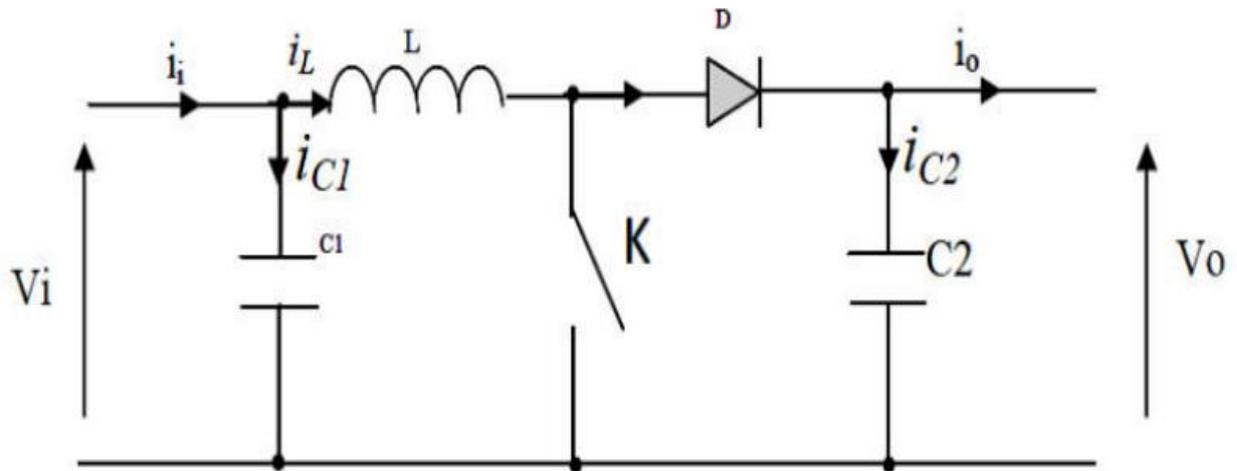


Figure (1-15) : Schéma de principe d'un convertisseur Boost. [2]

1-11-3 Hacheur dévolteur-survolteur :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé pour convertir la tension d'entrée imposée  $V_i$  en une tension de sortie désirée  $V_o$ , son schéma de principe est illustré par la figure (1-16). [2]

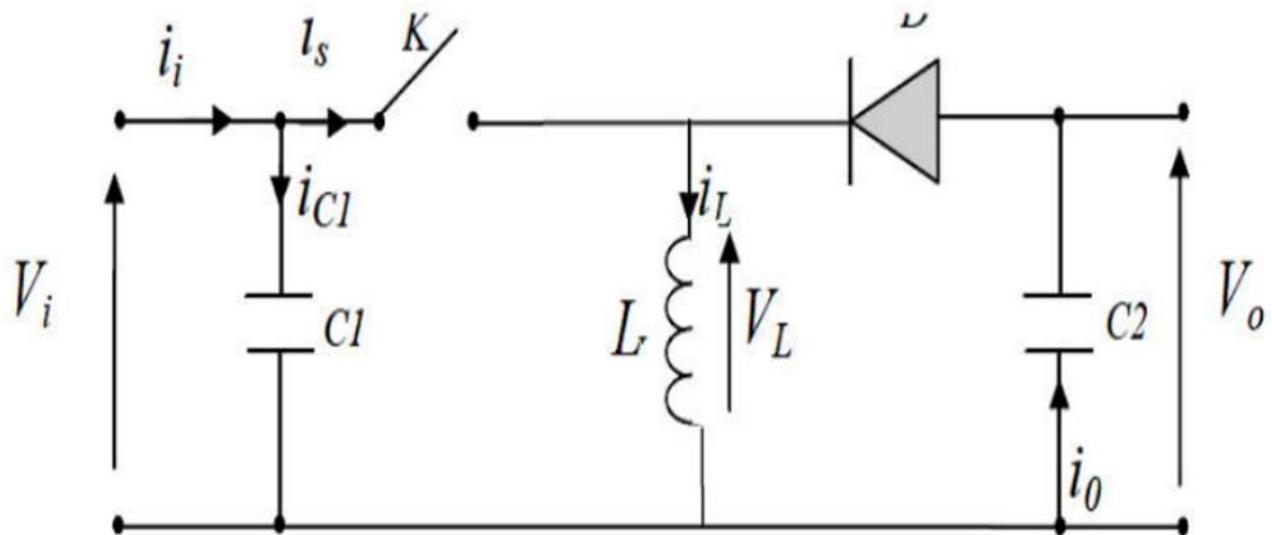


Figure (1-16) : Schéma de principe du convertisseur dévolteur-survolteur. [2]

## 1-12 Les avantages des hacheurs :

Les hacheurs (ou convertisseurs DC-DC) présentent plusieurs avantages, notamment :

- ✓ **Efficacité énergétique** : Les hacheurs sont conçus pour fonctionner à des fréquences élevées, ce qui permet de réduire les pertes d'énergie lors de la conversion de tension. Ils permettent ainsi d'améliorer l'efficacité énergétique globale du système.
- ✓ **Contrôle de tension** : Les hacheurs permettent de réguler la tension de sortie en ajustant le rapport cyclique. Cela permet de maintenir une tension de sortie stable malgré les variations de la tension d'entrée ou de la charge.
- ✓ **Compacité** : Les hacheurs sont souvent plus compacts et légers que les transformateurs nécessaires pour effectuer des conversions de tension AC-DC.
- ✓ **Polyvalence** : Les hacheurs peuvent être utilisés pour abaisser ou élever la tension, ou pour produire une tension de sortie inversée. Ils peuvent également être utilisés pour réguler la tension dans des applications telles que les alimentations à découpage, les systèmes de régulation de tension, les systèmes de propulsion de véhicules électriques, et bien plus encore.
- ✓ **Coût** : Les hacheurs sont souvent moins coûteux que les transformateurs nécessaires pour effectuer des conversions de tension AC-DC.
- ✓ **Durée de vie** : Les hacheurs ont tendance à avoir une durée de vie plus longue que les transformateurs nécessaires pour effectuer des conversions de tension AC-DC.

Dans l'ensemble, les hacheurs offrent une solution efficace, compacte, polyvalente et économique pour la conversion et la régulation de tension dans une grande variété d'applications. [2]

### 1-13 Tachymètre :

Le tachymètre est un instrument de mesure dont le nom vient du grec « takhys », qui signifie « rapide ». Comme son étymologie le laisse dès lors deviner, il vise à mesurer la vitesse d'un élément en mouvement. On l'utilise couramment pour déterminer la vitesse de rotation de moteurs de véhicules (voitures, d'avions, etc.), d'appareils rotatifs du quotidien (machine à laver) ou de machines rotatives du secteur industriel. On parle alors de tachymètre RMP (rotation par minute). Par extension, le tachymètre peut permettre de convertir le temps (chronomètre) et la distance parcourue (compteur de vitesse et tachymètre kilométrique). [3]



**Figure (1-17) :** PLT-5000 Tachymètre laser avec et sans contact. [3]

Il convient de noter que l'utilisation du tachymètre ne se limite pas à la mesure de la vitesse d'objets en rotation. Certains appareils permettent également de mesurer la vitesse linéaire (déplacement en ligne droite d'un point A vers un point B) et par conversion, la distance et la longueur. Les tachymètres peuvent être mobiles, utilisés comme des outils portatifs, ou fixes, intégrés à des machines rotatives ou des véhicules. C'est, par exemple, le cas des tachymètres de moteurs et des tachymètres kilométriques. [3]

## **1-14 Les différents types des tachymètres :**

Il existe différents types de tachymètres dont la précision et l'utilisation peuvent varier. On distingue surtout les outils mécaniques et électromagnétiques des appareils électriques, les deux premiers pouvant être intégrés à des engins (voitures, machines rotatives, etc.), tandis que les derniers sont le plus souvent portatifs. [3]

### **1-14-1 Les tachymètres mécaniques :**

Les tachymètres mécaniques fonctionnent sans besoin d'être alimentés par un courant électrique et donnent une information analogique (aiguille sur un cadran). Ce sont nécessairement des appareils de contact, qui peuvent être de deux types : à force centrifuge et chronométrique (moins utilisé, car délicat à calibrer). Les tachymètres mécaniques sont très précis et très fiables. Ils ont l'avantage de supporter des conditions d'utilisation extrêmes (températures et humidité), et se démarquent par leur robustesse et leur praticité. Ils sont, en outre, insensibles aux variations électromagnétiques. [3]

### **1-14-2 Les tachymètres électromagnétiques :**

Les tachymètres électromagnétiques contiennent un aimant qui suit la rotation du moteur ou de l'objet dont on cherche à mesurer la vitesse. On les nomme aussi tachymètres magnétiques, ou tachymètres à courant de Foucault. C'est le type de tachymètre que l'on rencontre le plus souvent dans l'industrie, car il résiste parfaitement aux températures extrêmes et à l'usure. [3]

### **1-14-3 Les tachymètres électriques :**

Les tachymètres électriques sont aujourd'hui fréquemment utilisés pour les opérations de contrôle, de surveillance, de diagnostic et de maintenance. Faciles d'utilisation, ils sont souvent compacts, mobiles, sûrs et précis. Cette catégorie comprend notamment les tachymètres optiques et lasers qui permettent d'effectuer des relevés sans contact. Les données sont typiquement affichées sur un écran numérique. [3]

### **1-15 Les utilisations d'un tachymètre :**

L'utilisation d'un tachymètre varie en fonction des unités qu'il mesure et de son caractère intégré ou portatif. Par exemple, les tachymètres de voitures permettent de connaître sa vitesse de déplacement et de compter les kilomètres parcourus, tandis que les tachymètres de montres permettent de mesurer le temps et/ou la distance parcourue en un temps donné. Ainsi, les tachymètres intégrés à des engins (avion, machine à laver, moto, machine industrielle, etc.) donnent une information précise sur le fonctionnement de l'engin en question à un moment donné.

Les tachymètres numériques portatifs, c'est-à-dire non intégrés à un engin, sont, quant à eux, utilisés par un vaste panel de professionnels (ingénieurs, techniciens, garagistes, etc.). Un seul outil permet ainsi de mesurer la vitesse de déplacement d'un vaste panel d'objets en mouvement, contrairement aux tachymètres intégrés. Dans le domaine de l'industrie et du transport, le tachymètre numérique est ainsi couramment utilisé lors de contrôles, diagnostics et opérations de maintenance. Il permet notamment de mesurer et d'ajuster la vitesse d'appareils en rotation (moteur, turbine, ventilateurs, rouleaux, etc.), la vitesse de la course de courroies ou convoyeurs, et la vitesse de déplacement de certains produits.

Enfin, le tachymètre permet également de mesurer la longueur de certains produits par un phénomène de conversion de la vitesse en distance. Ainsi, ces appareils sont couramment utilisés pour obtenir la longueur de fils, de fibres et de produits en rouleau (films, tôles, etc.). [3]

### **1-16 Fonctionnement d'un tachymètre :**

Le fonctionnement d'un tachymètre diffère selon le type d'appareil utilisé : tachymètre avec contact ou sans contact.

Les appareils sans contact mesurent la vitesse à l'aide d'un laser et d'un capteur optique. Ils nécessitent de placer un ruban adhésif réfléchissant sur la surface de l'objet en mouvement. Le laser identifie le ruban comme point de référence et envoie un signal à chaque fois que ce dernier effectue un tour. Ce type de tachymètre laser sans contact est extrêmement sécuritaire, car il permet de réaliser les relevés en restant à distance (proche) de machines en rotation, potentiellement dangereuses. En revanche, sa précision peut pâtir de la luminosité de l'environnement dans lequel est effectué le test.

Les tachymètres avec contact sont, quant à eux, dotés d'une roue de friction qui doit être placée directement sur l'axe de l'objet en mouvement. Il existe des tachymètres avec contact portatifs, pouvant être utilisés pour mesurer la vitesse de différents objets en mouvement, et des tachymètres avec contact fixes, comme les dynamos tachymétriques qui sont plus volontiers intégrées à des engins. Les dynamos tachymétriques produisent un courant électrique lorsqu'elles sont entraînées par la rotation de l'objet en mouvement auquel elles sont associées. C'est l'évaluation de ce courant qui permet de déterminer la vitesse de rotation. Ce type de tachymètre de contact a la particularité de mesurer avec une grande fiabilité les vitesses très basses.

Ce type de tachymètre est habituellement fourni avec différentes roues et cônes, ce qui permet à l'utilisateur d'équiper son appareil de l'accessoire le mieux adapté à la forme, la taille et la matière de l'objet mesuré.

À l'heure actuelle, bon nombre de tachymètres numériques portatifs sont équipés à la fois de roues et de capteurs optiques, ce qui permet de réaliser des mesures sans contact et avec contact. [3]



**Figure (1-18) :** produits associés. [3]

### 1-17 Estimateur :

L'estimation est une méthode statistique permettant de déduire les caractéristiques d'une population à partir d'un échantillon de données. C'est une technique fondamentale dans de nombreux domaines tels que la recherche en sciences sociales, la finance, l'économie, la biologie, l'industrie et bien d'autres.

L'estimation est utilisée pour estimer des quantités inconnues telles que la moyenne, la variance, la proportion, la médiane, la corrélation, etc. Les estimations sont généralement obtenues à partir d'un échantillon de données représentatif de la population.

Il existe différentes techniques d'estimation telle que l'estimation ponctuelle, qui consiste à obtenir une valeur unique pour la caractéristique estimée, et l'estimation par intervalle de confiance, qui fournit une plage de valeurs possibles pour la caractéristique estimée avec un certain niveau de confiance.

L'estimation est utilisée dans de nombreux domaines pour prendre des décisions éclairées et pour résoudre des problèmes. Il est important de comprendre les limites et les hypothèses de l'estimation pour interpréter correctement les résultats. Des erreurs d'estimation peuvent se produire si les hypothèses de base ne sont pas respectées ou si l'échantillon n'est pas représentatif de la population totale.

### 1-18 Observateurs de systèmes linéaires :

Une solution simple et optimale au problème de l'estimation de l'état des systèmes linéaires a été proposée par Luenberger dans le cadre déterministe, et par Kalman dans le cadre stochastique. Dans les deux cas, on considère le modèle dynamique d'un système linéaire défini comme suit :

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}\mathbf{w}(t) \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{v}(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

Où  $t \geq 0$ ,  $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}^p$ ,  $\mathbf{w}(t) \in \mathbb{R}^r$  et  $\mathbf{v}(t) \in \mathbb{R}^p$  sont deux bruits blancs gaussiens d'espérance nulle, de covariances respectives  $\mathbf{Q}$  et  $\mathbf{R}$ . Ces bruits sont supposés non corrélés. Les matrices du système sont de dimensions appropriées, et les conditions initiales sont définies par  $\mathbf{X}(0) = \mathbf{X}_0$ . [4]

### 1-19 Observateur de Luenberger :

La théorie de l'observation de Luenberger repose essentiellement sur des techniques de placement de pôles. On se place dans le cas déterministe, les bruits  $\mathbf{w}$  et  $\mathbf{v}$  sont nuls, et Luenberger propose l'observateur suivant : [4]

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{X}}}(t) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{K}(\mathbf{y}(t) - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t)) \\ \hat{\mathbf{y}}(t) = \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}(t) \end{cases} \quad (1.2)$$

La dynamique de l'erreur d'estimation  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$  a pour expression : [5]

$$\dot{e}(t) = (A - KC)e(t) \quad (1.3)$$

En utilisant une technique de placement de pôles, il suffit alors de choisir le gain  $K$  de l'observateur de telle sorte que les valeurs propres de la matrice  $A - KC$  soient dans le demi-plan complexe gauche. Pour une meilleure estimation de l'état, la dynamique de l'observateur est choisie plus rapide que celle du système. Pour cela, on fixe les valeurs propres de l'observateur dans le demi-plan gauche du plan complexe de sorte que leurs parties réelles soient plus grandes en valeur absolue que celles de la matrice d'état  $A$ . En général, les pôles seront 5 à 6 fois plus rapides, mais ils doivent rester lents par rapport aux bruits de mesures. [4]

### 1-20 Filtre de Kalman :

La théorie de l'observation de Kalman nécessite, quant à elle, la résolution d'une équation de Riccati. Kalman utilise les propriétés statistiques des bruits  $w$  et  $v$  et propose la structure d'observateur suivante :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(t)(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (1.4)$$

En minimisant la matrice de covariance de l'erreur d'estimation  $P(t) = E [e(t)e^t(t)]$ , on obtient l'expression du gain de l'observateur :

$$K(t) = P(t)C^tR^{-1} \quad (1.5)$$

Où  $P(t)$  est solution de l'équation de Riccati :

$$\dot{P}(t) = AP(t) + P(t)A^t + LQL^t - P(t)C^tR^{-1}CP(t) \quad (1.6)$$

Sous certaines conditions, on peut montrer que la matrice  $P(t)$  tend vers une limite et que le filtre est stable, ce qui permet éventuellement de conserver pour  $K$  sa valeur en régime permanent. [4]

### 1-21 Observateur à entrées inconnues :

Un processus physique est souvent soumis à des perturbations qui ont comme origine des bruits dus à l'environnement du processus, des incertitudes de mesures, des défauts de capteurs ou d'actionneurs, ces perturbations ont des effets néfastes sur le comportement normal du processus et leur estimation peut servir à concevoir un système de commande capable d'en minimiser les effets. La reconstruction de l'état d'un système dynamique linéaire dont une partie des entrées n'est pas mesurable a un grand intérêt dans la pratique.

Dans de telles circonstances, un observateur conventionnel, qui exige la connaissance de toutes les entrées, ne peut pas être utilisé directement.

L'observateur à entrées inconnues (UIO) a été développé pour estimer l'état d'un système, en dépit de l'existence des entrées inconnues ou des perturbations en les éliminant dans les équations d'état.

[4]

## **1-22 Les avantages et les inconvénients des Observateurs :**

Les observateurs de systèmes linéaires présentent des avantages et des inconvénients qui doivent être pris en compte lors de leur utilisation. [4]

### **1-22-1 Avantages :**

- Les observateurs permettent d'estimer les variables non mesurées d'un système, ce qui peut être utile dans de nombreuses applications, telles que le contrôle de la qualité, la surveillance des processus industriels, la navigation et le guidage de véhicules autonomes, entre autres.
- Les observateurs peuvent être conçus pour estimer des variables complexes qui ne sont pas directement mesurables, comme la vitesse, la position ou l'accélération.
- Les observateurs peuvent être conçus pour être robustes aux perturbations, ce qui permet d'assurer la stabilité et la performance du système. [4]

### **1-22-2 Inconvénients :**

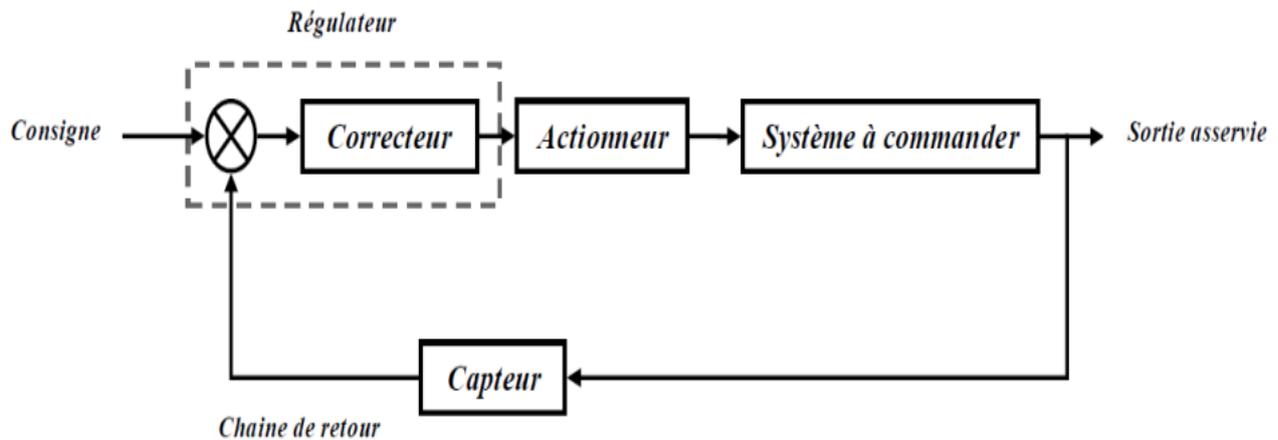
- La conception d'un observateur peut être complexe, car elle nécessite une bonne compréhension du système et de ses paramètres.
- Les observateurs peuvent être sensibles aux perturbations et aux erreurs de modélisation, ce qui peut entraîner des erreurs d'estimation.
- Les observateurs peuvent nécessiter des informations supplémentaires, telles que des mesures auxiliaires, pour améliorer la qualité de l'estimation.
- Les observateurs peuvent nécessiter un temps de calcul important, ce qui peut limiter leur utilisation en temps réel.

Il est important de comprendre les avantages et les inconvénients des observateurs de systèmes linéaires pour choisir la méthode d'observation appropriée et interpréter correctement les résultats.

[4]

## **1-23 La régulation automatique :**

La régulation automatique (automatique control, Figure 1.19) est la technique de l'ingénieur offrant les méthodes et les outils nécessaires à la prise de contrôle d'une ou plusieurs grandeurs physiques d'un système en vue d'en imposer le comportement. [5]



**Figure (1-19)** : structure d'un système de régulation automatique. [5]

Les grandeurs physiques (vitesse, température, pression, courant, etc) doivent être mesurées afin de vérifier leur état puis de déterminer à l'aide d'un traitement approprié l'action à entreprendre sur le système (installation de production, robot, etc.) pour qu'elles se comportent comme souhaité. [5]

## 1-24 Eléments constitutifs d'une boucle de régulation :

### 1-24-1 Le système à commander :

Ce système traduit en général un système physique possédant ses grandeurs d'entrées et ses grandeurs de sortie, il peut être décrit par diverse représentation.

### 1-24-2 L'actionneur :

Est un organe qui convertit de l'énergie d'une forme en une autre pour agir sur le système à commander, il peut être électrique hydraulique ou pneumatique.

### 1-24-3 Le correcteur :

Est en quelque sorte le cerveau du système asservi, c'est lui qui génère les décisions pour accomplir la tâche désirée. Le choix de ce correcteur dépend principalement de la structure du système à commander et des performances désirées. En général, ce correcteur se base sur l'erreur du système bouclé pour générer l'action appropriée.

### 1-24-4 Le capteur :

Pour que le correcteur utilisé puisse assurer le suivi de la consigne imposée, l'emploi d'un organe de mesure est d'une grande utilité. Un tel organe est appelé capteur, son rôle est de

renseigner le correcteur sur le comportement dynamique de la grandeur commandée.

Malheureusement les capteurs physiques ont des points faibles qui peuvent dégrader le control d'un système. [5]

### 1-25 Les problèmes communs des capteurs :

Il y a au moins quatre problèmes provoqués par les capteurs :

- Capteur trop cher ; le cout d'un capteur peut sensiblement augmenter tout le cout d'un système de contrôle.
- Le capteur et son câblage réduit la fiabilité d'un système de contrôle.
- La difficulté de mesurer quelque signaux pour raison d'environnement dure.
- Le capteur produit des erreurs significatives telles que le bruit stochastique, les erreurs cycliques et la réponse limitée.

On vue de l'importance et l'utilité des capteurs dans des systèmes de contrôle et de leurs problèmes indésirables il faut donc prévoir une solution.

Alors, pour augmenter ou remplacer les capteurs dans un système de contrôle des observateurs peuvent être utilisé. [5]

### 1-26 Qu'est-ce qu'un observateur ? :

Les observateurs sont des algorithmes qui combinent les signaux disponibles avec d'autres connaissances du système de contrôle pour produire les signaux observés.

Ces signaux observés peuvent être plus précis, moins cher de produire et plus fiables que les signaux mesurés.

Pour comprendre la théorie des observateurs il faut passer par le contrôle des systèmes dans l'espace d'état (control modern). [5]

### 1-27 Notions sur l'espace d'état :

#### 1-27-1 L'état d'un système :

Est le plus petit ensemble de variables, de grandeurs, tel que la connaissance de cet ensemble à un instant quelconque  $= t_0$ , ainsi que celle du signal d'entrée pour  $t \geq t_0$ , suffit pour la détermination complète de ce système pour  $t \geq t_0$ . [5]

#### 1-27-2 Variables d'état:

Ce sont les variables, grandeurs qui constituent l'état du système, on considère que ces variables sont notées  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , est l'ordre du model. L'ensemble  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  constitu l'état.

**1-27-3 Vecteur d'état :**

On représente l'état par une concaténation de l'ensemble des variables d'état en un vecteur, de dimension, que l'on note  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ .

**1-27-4 Espace d'état :**

Il s'agit de l'espace vectoriel dans lequel le vecteur d'état est susceptible d'évoluer, chaque instant de étant associé à un point de cet espace.

**1-27-5 Commandabilité :**

Un système est commandable si pour toute instance du vecteur d'état, il existe un signal d'entrée  $U(t)$  qui permet au système de passer de l'état  $x_0$  à l'état  $x_1$  en un temps fini.

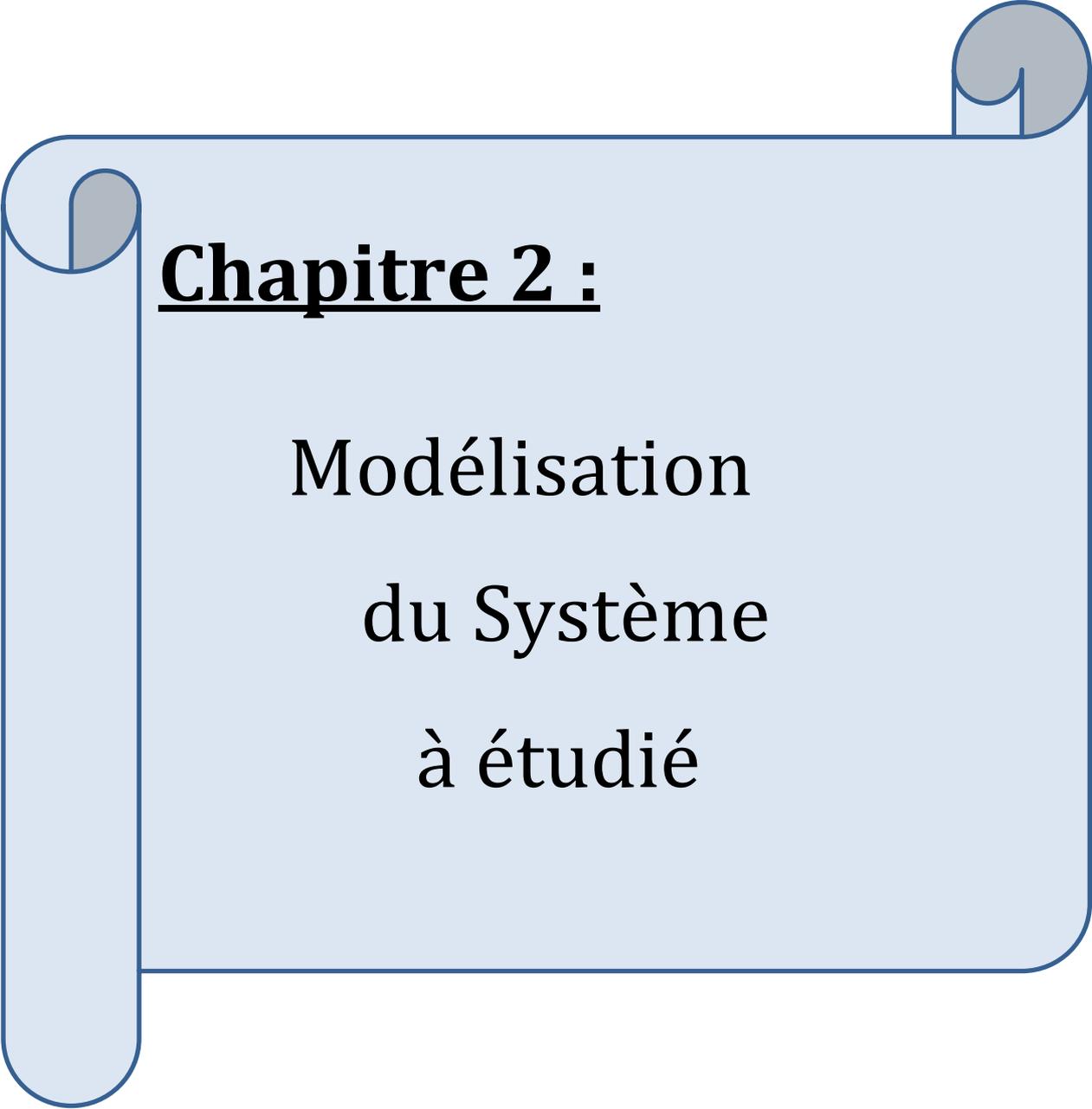
**1-27-6 Observabilité :**

Un système est observable si, quel que soit  $t_0$ , il existe un intervalle de temps fini  $[t_0, t_1]$  tel que la connaissance de l'entrée  $u(t)$  et de la sortie  $y(t)$  sur cet intervalle permet de reconstituer  $t_0$ . [5]

**1-28 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons donné une description générale du système composé d'un moteur à courant continu, d'un hacheur, d'un tachymètre et d'un estimateur.

Nous avons mentionné le principe de fonctionnement et on a cités les avantages et les inconvénients de chaque élément de notre système.



## **Chapitre 2 :**

Modélisation  
du Système  
à étudié

**2-1 Modélisation d'un moteur à courant continu :**

D'après la loi de Newton, combiné à des lois de Kirchhoff, on peut écrire les équations différentielles de premiers ordres suivantes : [6]

$$U(t) = Ri(t) + \frac{Ldi(t)}{dt} + e(t) \quad (2.1)$$

$$e(t) = K_e \cdot \Omega(t) \quad \text{Si :} \quad (\emptyset = \text{cte}) \quad (2.2)$$

D'après le principe fondamental de la dynamique on a :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C - C_r - f\Omega \quad (2.3)$$

$$C_u = K_c i(t) - C_p \quad (2.4)$$

$$C_p = f \Omega(t) \quad (2.5)$$

$U(t)$  : Tension appliquée au moteur

$i(t)$  : Intensité traversant le moteur

$C_u$  : Couple moteur généré

$f$  : Coefficient de frottement visqueux

$K_e$  : Constant de vitesse

$C_p$  : Couple de frottement

$e(t)$  : Force contre électromotrice

$\Omega(t)$  : Vitesse de rotation du rotor

$C_r$  : Couple r résistant

$J$  : Moment d'inertie de l'axe du rotor

$K_c$  : Constant de couple [6]

**2-1-1 Description des équations de base :**

Transformée de Laplace des équations (2.1) (2.2) donnent :

$$Ri(p) + pL I(p) + E(p) = U(p) \quad (2.6)$$

$$E = K_e \Omega(p) \quad (2.7)$$

$$Jp \Omega(p) = Cu - Cr \quad (2.8)$$

En combinant (2.6) et (2.7) on obtient :

$$U(p) = R i(p) + Lp i(p) + Ke \Omega(p) \quad (2.9)$$

En modifiant (2.8) on a :

$$Jp \Omega(p) = Kc i(p) - Cr - f \Omega(p) \quad (2.10)$$

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

$$\Omega(p) = \frac{Kc i(p) - Cr}{f + Jp} \quad (2.11)$$

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

$$I(p) = \frac{f + Jp}{Kc} \left( \Omega(p) + \frac{Cp}{f + Jp} \right) \quad (2.12)$$

On l'injecte à présent dans (2.6) :

$$U(p) = \Omega(p) \left( \frac{(R + Lp)(f + Jp)}{Kc} + Ke \right) + \frac{R + Lp}{f + Jp} Cp \quad (2.13)$$

• On suppose que le moment du couple de pertes (qui est vu comme une perturbation) est négligeable devant le moment du couple électromagnétique ( $Kc i(t)$ ) on peut alors prendre  $Cp$  nul pour simplifier le système. On a donc : [6]

$$U(p) = \Omega(p) \left( \frac{(R + Lp)(f + Jp)}{Kc} \right) + Ke \quad (2.14)$$

La fonction de transfert cherchée  $H(p)$  est entre la tension entrant dans le moteur  $U(p)$  et la vitesse de sortie  $\Omega(p)$ . [6]

$$H(p) = \frac{\Omega}{U(p)} = \frac{Kc}{(R + Lp)(f + Jp) + KcKe} \quad (2.15)$$

On peut établir le modèle mathématique de la réponse en vitesse du moteur électrique qui est donné par la figure suivante (figure 2-1) : [6]

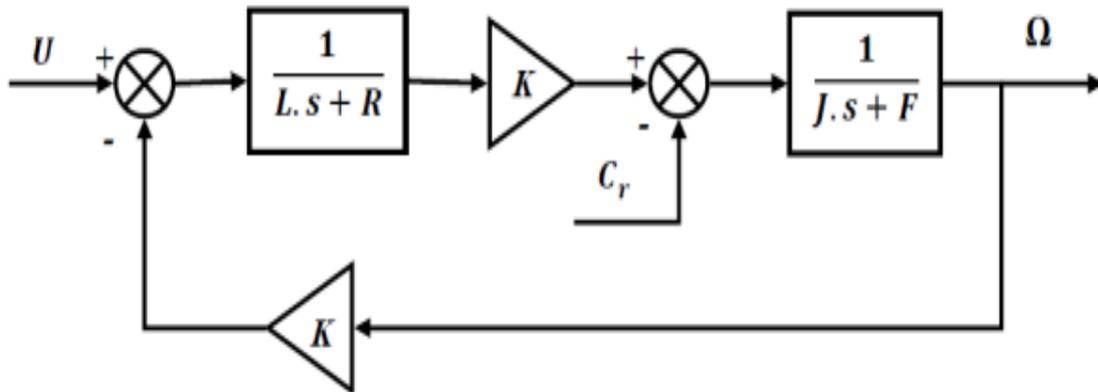


Figure (2-1) : Schéma fonctionnel du MCC. [6]

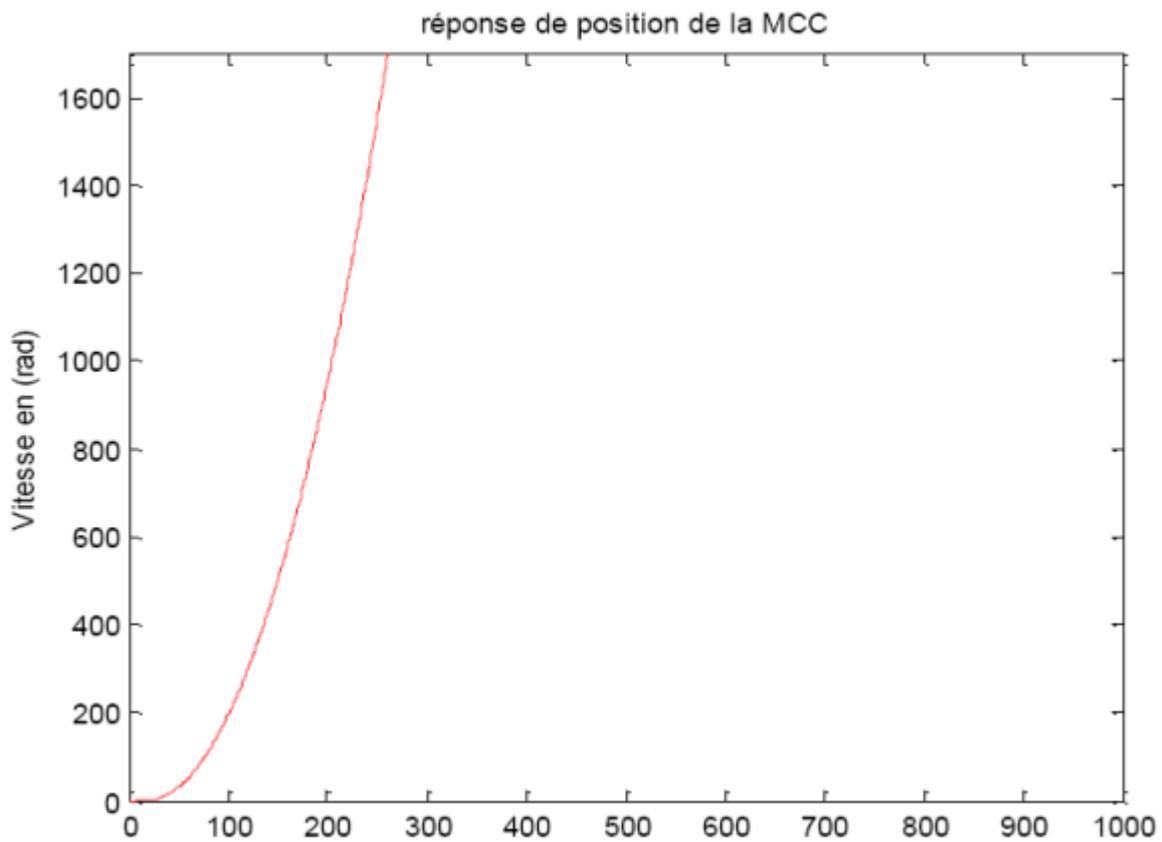


Figure (2-2) : Exemple de modélisation sous Matlab de la réponse de position. [12]

## 2-2 Modélisation des hacheurs :

Les hacheurs sont des convertisseurs continu-continu ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe et produisent aux bornes d'une charge une tension unidirectionnelle de valeur moyenne réglable. [5]

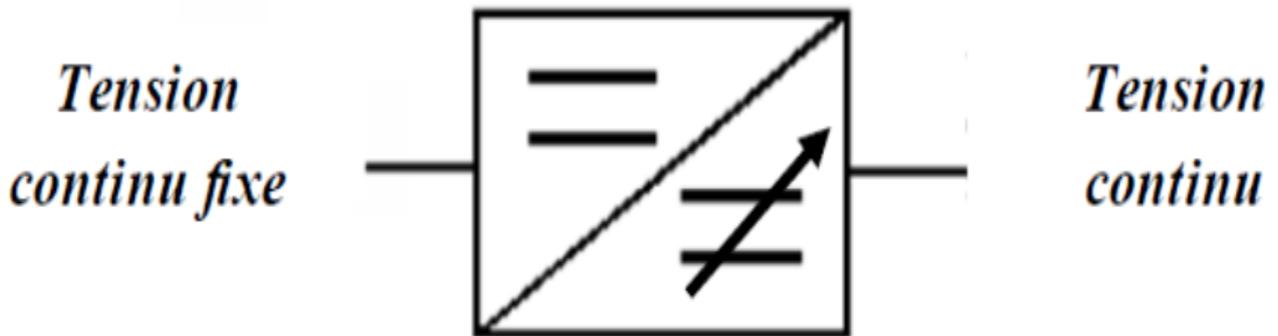


Figure (2-3) : Convertisseur continu-continu. [5]

### 2-2-1 Hacheur série :

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur H à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés (DRL). [5]

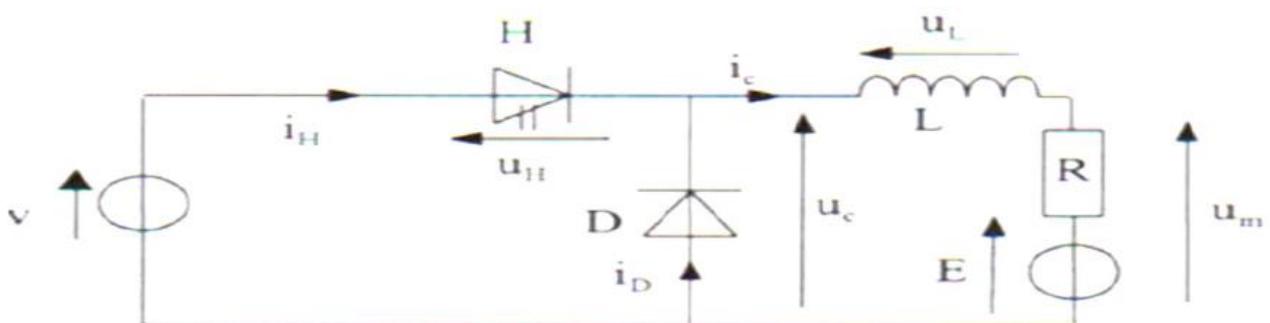
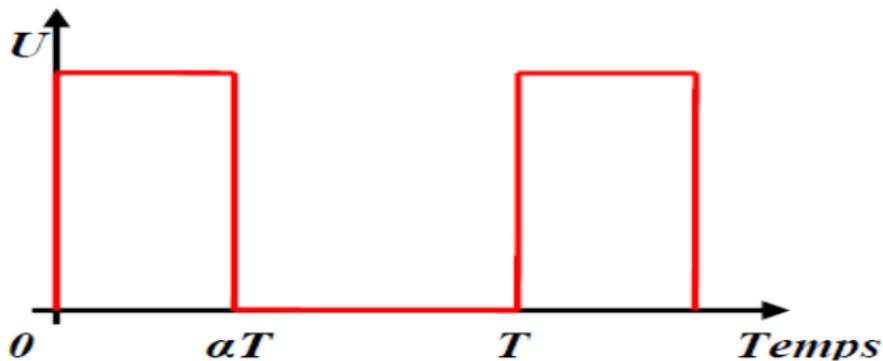


Figure (2-4) : hacheur série. [5]

### 2-2-2 Principe de fonctionnement d'un hacheur :

Le cycle de fonctionnement est de période de hachage  $T$  ( $T=1/f$ ), il comporte deux étapes :

- Lors de la première, l'interrupteur est fermé, la diode polarisée en inverse est bloquée. Cette phase dure de  $0$  à  $\alpha T$ . avec compris entre  $0$  et  $1$  est appelé rapport cyclique.
- Lors de la seconde, l'interrupteur est ouvert, la diode devient passante. Cette phase dure de  $\alpha T$  à  $T$ . [5]



**Figure (2-5)** : chronogramme de la fermeture et de l'ouverture. [5]

Le hacheur série est souvent employé pour commander un moteur à courant continu, on rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation.

Pour un rapport cyclique  $\alpha$  la tension moyenne appliquée au moteur est : [5]

$$V(t) = V_0 \cdot \alpha(t) \quad (2.16)$$

La fonction de transfert du hacheur est :

$$\frac{V(s)}{\alpha(s)} = V_0 \quad (2.17)$$

$V_0$  : Gain du hacheur (ou tension appliquée au hacheur).

**2-3 Génératrice tachymétrique (GT) :**

La génératrice tachymétrique délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation, sa fonction de transfert est comme celle d'un système du premier ordre caractérisé par une constante de temps mécanique  $\tau_m$  : [7]

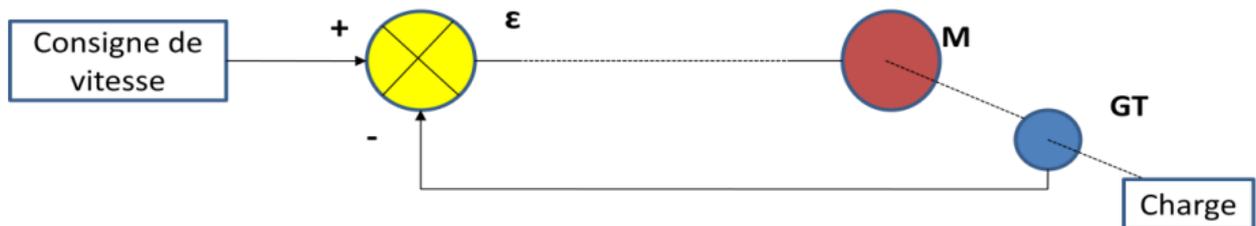
$$G(s) = \frac{K_w}{1 + \tau_m \cdot s} \tag{2.18}$$

Avec : gain de la tachymétrie  $K_w$

Généralement  $\tau_m$  est très petite, donc on peut la négliger on considérant l'approximation suivant :

$$1 + \tau_m \cdot s \approx 1 \tag{2.19}$$

GT délivre une tension proportionnelle à sa vitesse de rotation. Son principal domaine d'application se situe dans la régulation de vitesse d'un moteur électrique. [7]



**Figure (2-6) :** schéma général d'asservissement en utilisant une génératrice tachymétrique. [7]

**2-3-1 Modélisation du capteur de vitesse :**

Pour l'asservissement de vitesse nous avons besoin de l'information vitesse de la machine. On prend le cas d'une génératrice tachymétrique : [7]



**Figure (2-7) :** capteur de vitesse. [7]

$$e = -\frac{d\phi}{dt} \quad \Rightarrow \quad E = K \cdot \phi \cdot nm \quad (2.20)$$

Comme :

$$\phi = Cte \quad \Rightarrow \quad E = Kv \cdot nm \quad (2.21)$$

Avec  $k_v = Cte$  de la force électromotrice

Loi des mailles :

$$V_m = E - Ri - L \frac{di}{dt} \quad (2.22)$$

$i \simeq 0$  Car l'impédance du voltmètre tend vers  $(\infty)$

$$\text{Donc : } V_{nm} = E = Kv \cdot nm \Rightarrow F(P) = \frac{V_{nm}(P)}{nm(P)} = Kv \quad (2.23)$$

$K_v$  est donné par le constructeur sur la plaque signalétique de la FT. [7]

#### 2-4 L'estimateur :

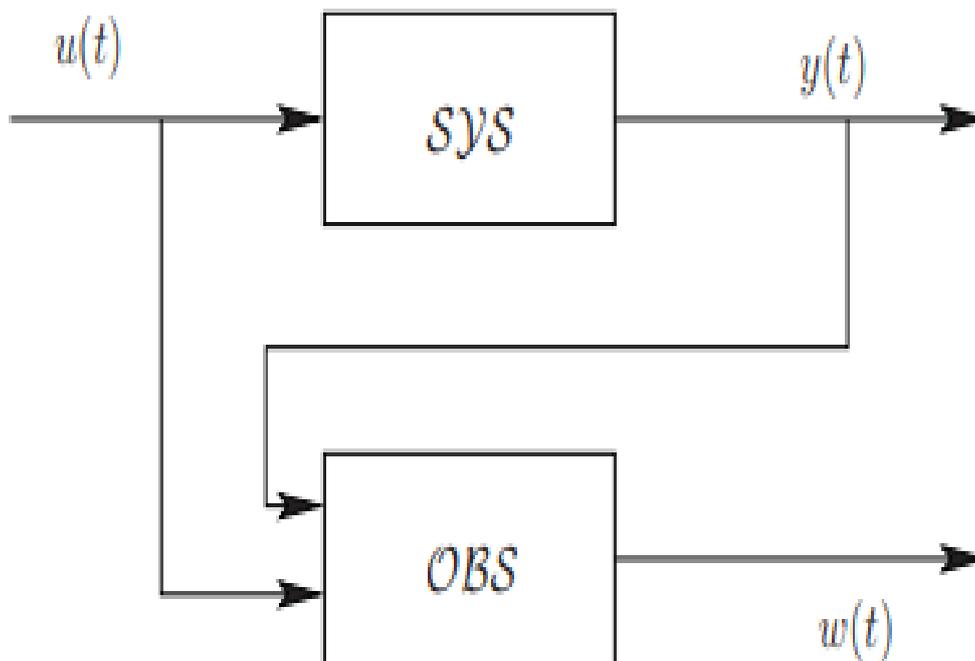
Soit, de façon plus générale, le système dynamique SYS défini par : [8]

$$\text{SYS : } \begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases} \quad (2.24)$$

Dont l'état  $\mathbf{x}(t)$  est estimé (ou reconstruit) par un système dynamique appelé observateur et noté OBS, dont la structure est donnée par : [8]

$$\text{OBS: } \begin{cases} \dot{\mathbf{z}}(t) = \mathbf{N} \mathbf{z}(t) + \mathbf{Q} \mathbf{u}(t) + \mathbf{L} \mathbf{y}(t) \\ \mathbf{w}(t) = \mathbf{F} \mathbf{z}(t) + \mathbf{E} \mathbf{y}(t) \end{cases} \quad (2.25)$$

Avec  $\mathbf{x}(t) \in \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{u}(t) \in \mathbf{R}^m$ , et  $\mathbf{y}(t) \in \mathbf{R}^l$  représentant respectivement l'état, l'entrée et la sortie du système.  $\mathbf{z}(t) \in \mathbf{R}^q$  le vecteur d'état de l'observateur, tel qu'il tende asymptotiquement vers  $\mathbf{T} \mathbf{x}(t)$  et  $\mathbf{w}(t)$  représente la sortie du système observateur. [8]



**Figure (2-8) :** Diagramme structurel d'un observateur. [8]

On peut aussi représenter sa structure par le schéma décrit sur la (figure 2-40). Le système dynamique constituant l'observateur doit assurer que l'erreur de reconstruction, définie par :  $e(t) = T x(t) - z(t)$  tende asymptotiquement vers  $\mathbf{0}$ , soit :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = T x(t) - z(t) = 0 \quad (2.26)$$

#### 2-4-1 Structure d'un observateur :

Afin d'expliquer la procédure générale de la conception d'un observateur, nous allons nous appuyer sur la construction d'un observateur d'ordre plein. Un observateur d'ordre plein permet de reconstruire entièrement le vecteur d'état  $\mathbf{x}(t)$ . On note par  $\mathbf{z}(t)$  la grandeur observée qui correspond à la sortie du système dynamique que constitue l'observateur. Ainsi, pour un ordre plein, on a directement  $\mathbf{z}(t) = \hat{\mathbf{x}}(t)$  avec  $\hat{\mathbf{x}}(t)$  étant l'estimation de  $\mathbf{x}(t)$ . [8]

La structure de l'observateur peut être représentée par la (figure 2-7) et exprimée sous la forme suivante :

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = A \hat{\mathbf{x}}(t) + B u(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \quad (2.27)$$

$$\hat{y}(t) = C \hat{\mathbf{x}}(t)$$

Le terme correctif  $L(y(t) - \hat{y}(t))$  fait apparaître le gain de correction  $\mathbf{L}$ , également appelé gain de l'observateur, relatif à l'erreur de la reconstruction de la sortie. On peut aussi écrire l'observateur sous la forme suivante : [8]

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = (A - LC)\hat{\mathbf{x}}(t) + B u(t) + L y(t) \quad (2.28)$$

La dynamique de l'erreur de reconstruction, définie par  $\hat{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{x}(t) - \hat{\mathbf{x}}(t)$ , peut s'écrire :

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}}(t) = (A - LC) \hat{\mathbf{x}}(t) \quad (2.29)$$

A partir de la condition initiale  $\hat{\mathbf{x}}(0) = \mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}(0)$ , l'évolution de cette erreur d'estimation est telle que :

$$\hat{\mathbf{x}}(t) = \exp[(A - LC)t] \hat{\mathbf{x}}(0) \quad (2.30)$$

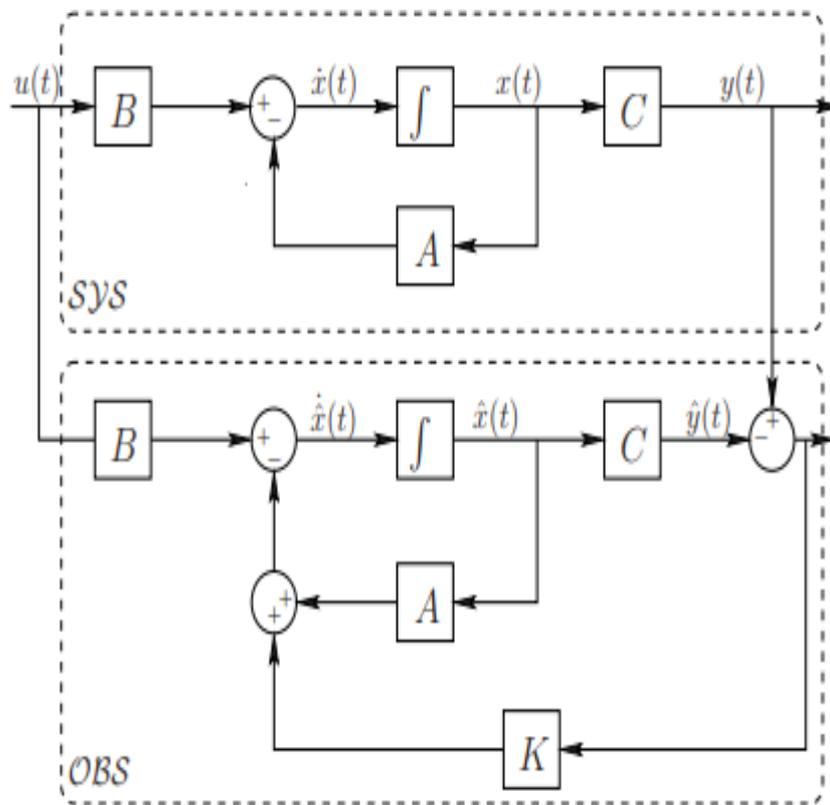


Figure (2-9) : Diagramme structurel d'un observateur d'ordre plein. [8]

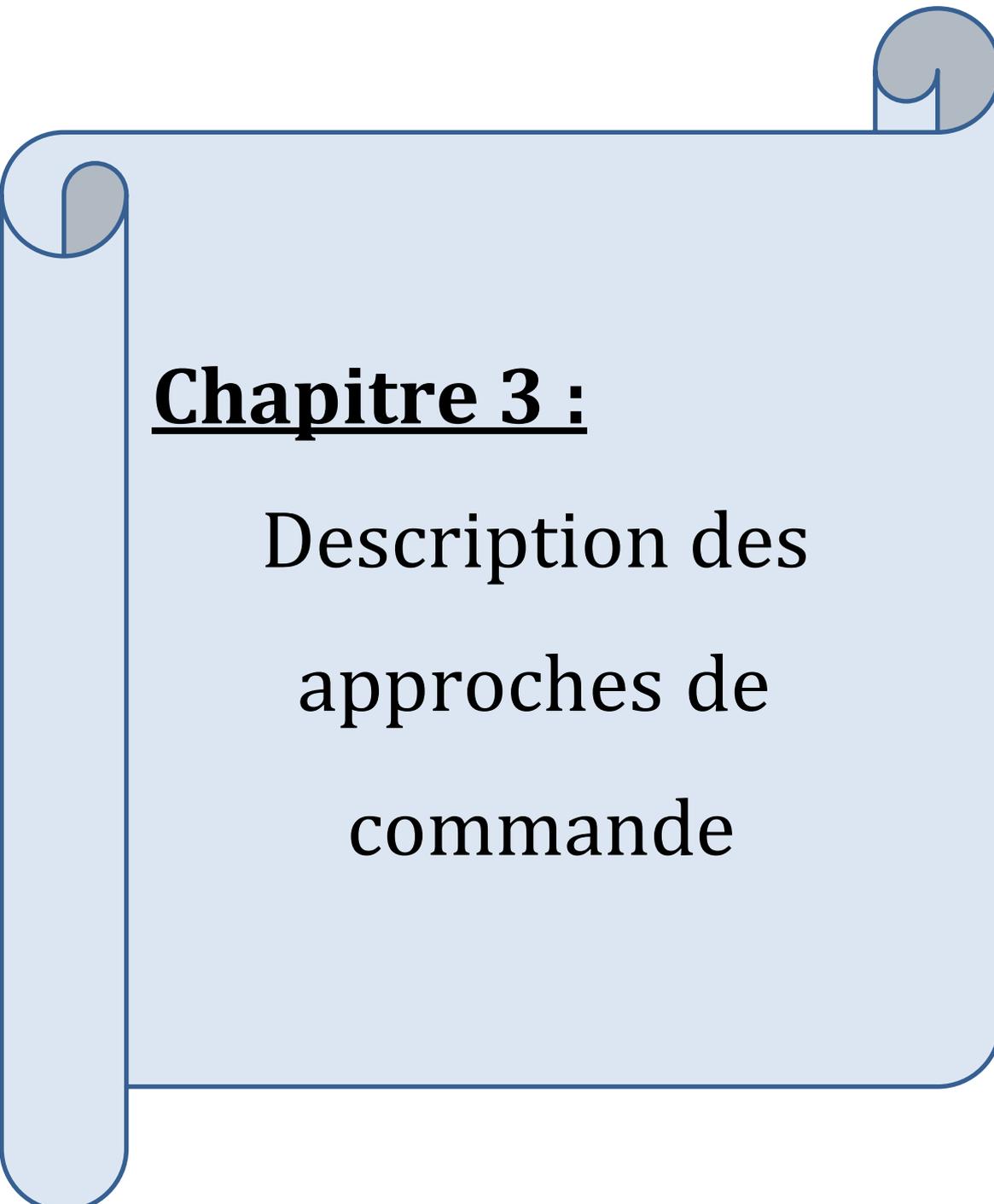
Afin que l'observateur soit asymptotique, il faut que l'erreur d'estimation tende vers  $\mathbf{0}$  lorsque  $\mathbf{t}$  augmente. En effet, à  $\mathbf{t} = \mathbf{0}$ ,  $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{0}) \neq \mathbf{0}$  car l'état étant inaccessible, on ne peut en général pas choisir  $\mathbf{x}(\mathbf{0}) = \hat{\mathbf{x}}(\mathbf{0})$ . [8]

Afin de garantir une convergence asymptotique de l'erreur d'estimation ( $\hat{\mathbf{x}}(\mathbf{t}) \rightarrow \mathbf{0}$  pour  $\mathbf{t} \rightarrow \infty$ ) et donc un bon fonctionnement de l'observateur, il faut choisir  $\mathbf{L}$  de façon judicieuse. [8]

### **2-5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons introduisons une modélisation du système à étudié de commande sans capteur de vitesse.

Cette modélisation nous permettra de prédire les performances de système suivait autrefois les approches de contrôle donné dans ce chapitre.



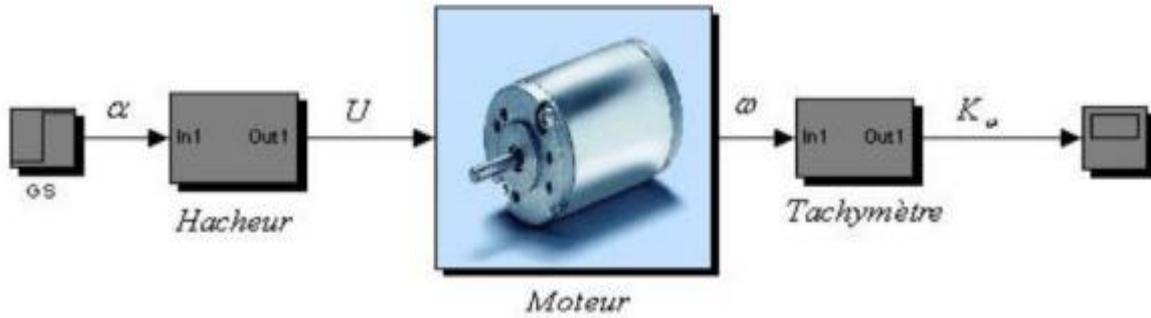
## **Chapitre 3 :**

Description des  
approches de  
commande

**3-1 Simulation du moteur :**

**3-1-1 Boucle ouverte :**

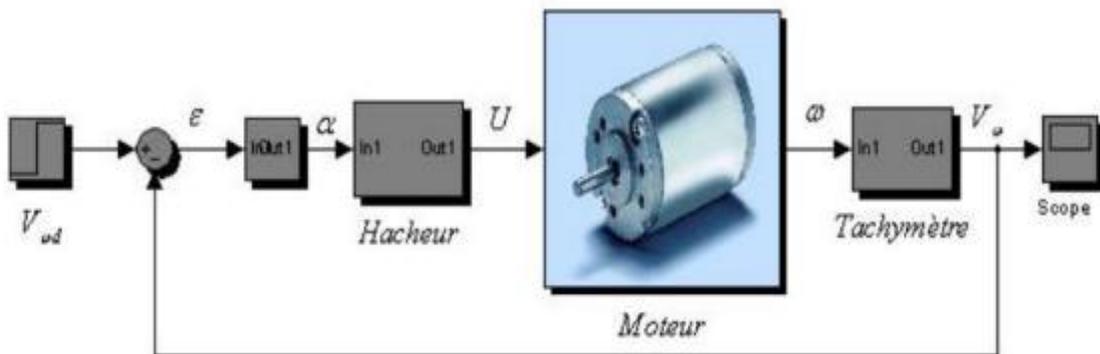
Pour qu'on puisse savoir le comportement dynamique du moteur on fait une simulation en boucle ouverte avec le simulink de MATLAB. [5]



**Figure (3-1) :** schéma bloc de la boucle ouverte. [5]

**3-1-2 Boucle fermée :**

La boucle fermée permet de commander le moteur avec une vitesse désirée non pas avec la tension d'induit. [5]



**Figure (3-2) :** schéma bloc de la boucle fermé. [5]

### 3-2 La régulation PI :

L'expression d'un tel correcteur est donnée par :

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = k_p \cdot \frac{(s+z)}{s} \quad (3.1)$$

Avec :

$$z = \frac{k_i}{k_p} \quad (3.2)$$

En général, le correcteur PI est utilisé pour assurer les spécifications suivantes :

- Une réponse apériodique.
- Un temps de réponse donné.
- Une erreur en régime permanent donnée.
- Un système stable.

Le choix des paramètres de réglage a besoin d'une méthode simple rapide et suffisamment précise, il est évident que le choix des réglages dépend aussi des performances souhaitées. [5]

Alors, pour cela on a décidé d'imposer un cahier de charges pour que le système réponde à ces conditions, notre cahier des charges est le suivant :

- Un dépassement  $MP \leq 5\% \Rightarrow \zeta = 0.707$ .
- Un temps d'établissement à 2%  $\leq 0.02s \Rightarrow \omega_n = 282.88 \text{ rad/s}$ .
- Une erreur statique nulle.

Le choix de la méthode de synthèse était de faire une synthèse dans le lieu des racines, la procédure à suivre est comme suite :

La fonction de transfert de notre système est :

$$G(s) = V_0 \frac{9807872}{(s+6172.8)(s+162.07)} k_w \quad (3.3)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système compensé est donnée par :

$$G(s) = \frac{k \cdot (s+z)}{s \cdot (s+6172.83)(s+162.07)} \quad (3.4)$$

Avec :

$$k = 9807872 \cdot k_p \cdot v_0 \cdot k_w \quad (3.5)$$

D'après les performances désirées, on déduit le pole dominant suivant : [5]

$$\begin{aligned} s_d &= -\zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{1-\zeta^2} \\ s_d &= -200 + j.200 \end{aligned} \quad (3.6)$$

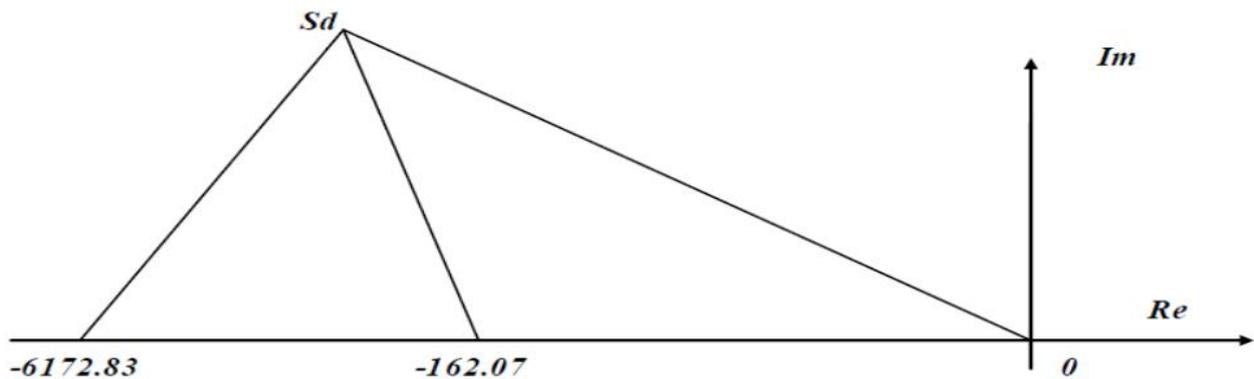


Figure (3-3) : représentation des pôles. [5]

L'emplacement du zéro du correcteur est déterminé à partir de la condition des angles :

$$\alpha = (1 + 2q)\pi - \sum \alpha_i + \sum \beta_i \quad (3.7)$$

Avec :  $q=0$

$$\alpha = \pi + \arg(s) + \arg(s_d + 162.07) + \arg(s_d + 6172.83) = 57.65 \quad (3.8)$$

Et de la notation :

$$|z| = |\sigma_{s_d}| + \frac{\text{Im}(s_d)}{\tan(\alpha)} = 200 + \frac{200}{1.57} = 326.67 \quad (3.9)$$

La valeur du gain  $k$  qui procure le pole dominant  $s_d$  est donnée par :

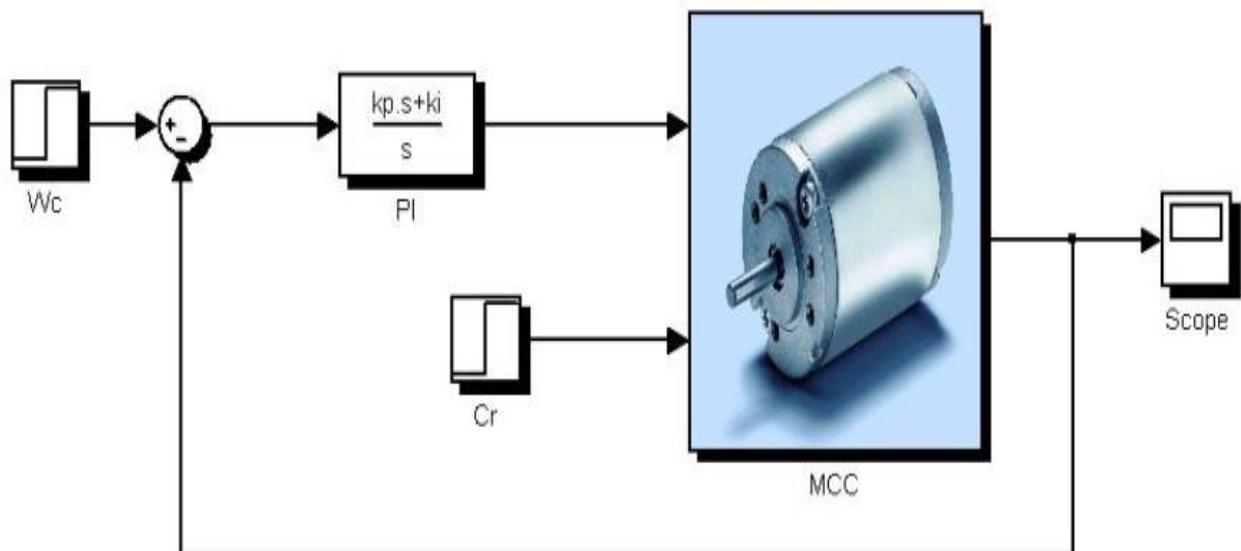
$$k = \frac{|s_d||s_d+162.07||s_d+6172.83|}{|s_d+z|} = \frac{(282.84)(203.56)(5976.16)}{236.73} \quad (3.10)$$

$$= 1453457$$

Les paramètres du correcteur PI sont alors donnés par :

$$k_p = \frac{k}{9807872.V_0.k_\omega} = 0.19 \quad (3.11)$$

$$k_i = k_p \cdot z = 62.58$$



**Figure (3-4) :** schéma bloc de la régulation PI. [5]

### 3-3 Représentation du système dans l'espace d'état :

Nous choisissons comme variables d'état le courant d'induit  $I$  et la vitesse  $\Omega$  notre vecteur d'état devient alors : [5]

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} I \\ \Omega \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

D'après les équations mécaniques et électriques du moteur on obtient la représentation interne suivante : [5]

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -R/L & -K/L \\ K/L & -F/J \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = [0 \ 1] \end{cases} \quad (3.13)$$

Application numérique des paramètres du système : [5]

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} -6100 & -1012 \\ 550 & -72.6 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 10000 \\ 0 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = [0 \ 1] \end{cases} \quad (3.14)$$

### 3-4 Commande par retour d'état :

On cherche à déterminer le vecteur de retour d'état .On gardent le même cahier de charges précédent alors le polynôme caractéristique désiré devient : [5]

$$\begin{aligned} \psi_d(s) &= s^2 + 2\zeta\omega_n \cdot s + \omega_n^2 \\ \psi_d(s) &= s^2 + 400s + 80021 \end{aligned} \quad (3.15)$$

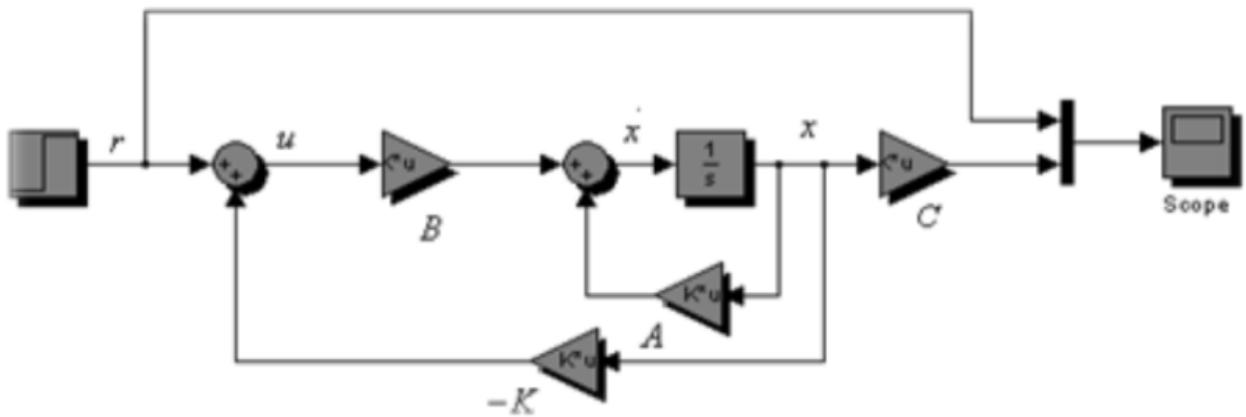
L'équation caractéristique du système est :

$$|sI - A + BK| = 0 \quad (3.16)$$

Pour le calcul de la matrice du correcteur d'état on a utilisé des commandes MATLAB, après calcul on obtient : [5]

$$k = [-0.5773 \quad -0.0911] \quad (3.17)$$

Le schéma de simulation est le suivant : [5]

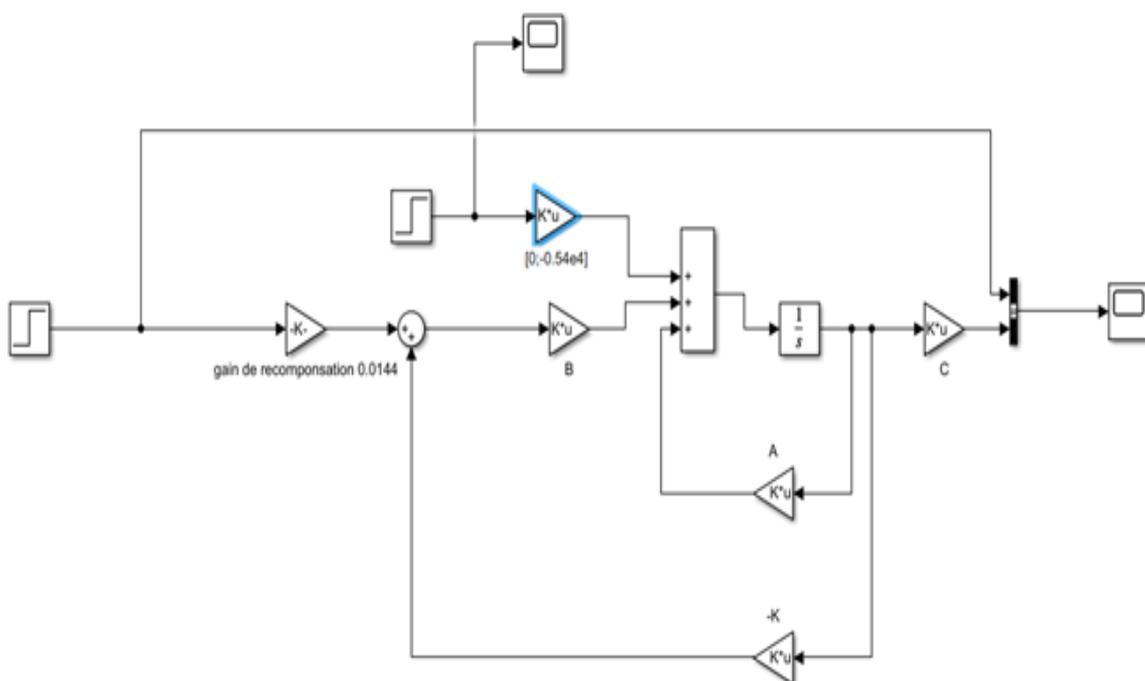


**Figure (3-5) :** schéma bloc du retour d'état. [5]

### 3-5 Commande par retour d'état avec pré-compensateur :

Le pré-compensateur ne change pas les pôles du système bouclé, il permet de mettre en correspondance la consigne avec les variables d'états. Sa méthode de calcul est comme suite : [5]

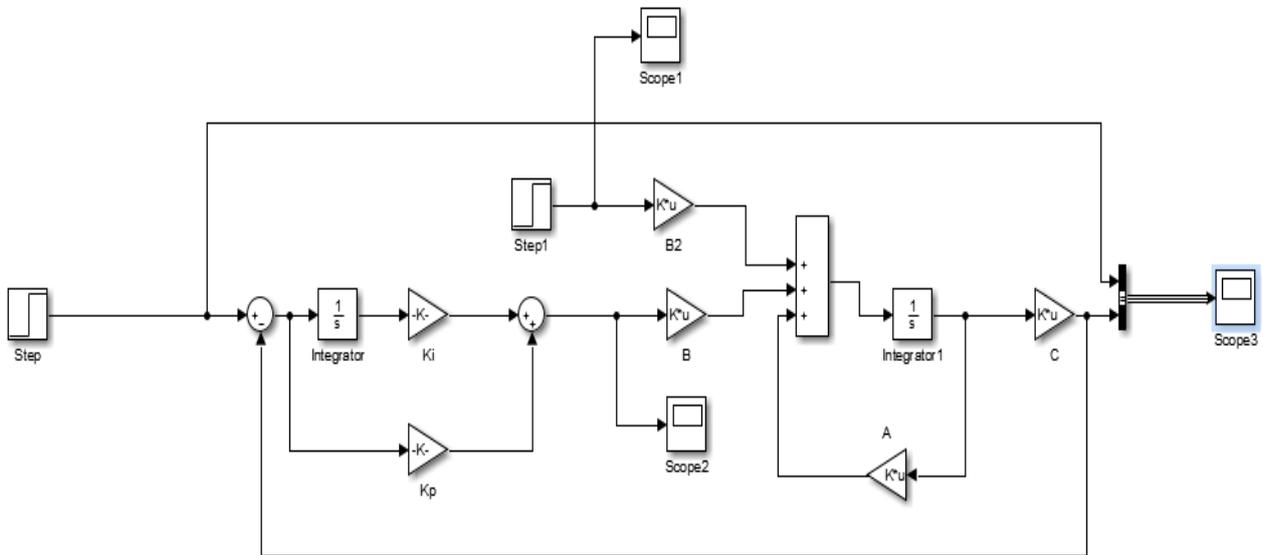
$$\begin{pmatrix} H = (A - (B * K)) \\ A_{inv} = \text{inv}(H) \\ H = \text{inv}(-C * A_{inv} * B) \end{pmatrix}$$



**Figure (3-6) :** retour d'état avec pré-compensateur

**3-6 Commande à retour d'état et bouclage intégral :**

La structure de commande par retour d'état et intégrale peut être représentée comme le montre la figure (3.7) suivante : [5]



**Figure (3-7) :** schéma du retour d'état intégral (PI).

Le système en boucle fermée est d'écrit de la manière suivante : [5]

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B.u \\ y = \Omega = C.x \end{cases} \tag{3.18}$$

$$\begin{aligned} u &= k_i.\varepsilon - k_p.x \\ \dot{\varepsilon} &= \Omega_c - \Omega = \Omega_c - c.x \end{aligned} \tag{3.19}$$

Ce qui amène à la représentation d'état : [5]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Omega_c \tag{3.20}$$

En remplaçant par on obtient : [5]

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A-B.k_p & B.k_i \\ -C & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ \varepsilon \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot \Omega_c \quad (3.21)$$

Notre système est devenu un système d'ordre 3, donc pour le calcul des paramètres et on doit imposer un 3<sup>ème</sup> pôle réel, stable et rapide. [5]

Après l'application de la méthode de placement des pôles on a obtenu les valeurs suivantes : [5]

$$k_i = 4.3648 \quad (3.22)$$

### 3-7 Commande par retour d'état observé : [5]

Dans ce cas-là il faut que la dynamique de l'observateur soit plus rapide de 2 à 5 fois que la dynamique du système en boucle fermée, alors l'équation caractéristique désirée de l'observateur devienne : [5]

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta = 0.707 \\ \omega_n = 1666 \text{rad} / \text{s} \\ \varphi_d = S^2 + 2\zeta\omega_n S + \omega^2 \\ \varphi_d = S^2 + 2352S + 2765952 \end{array} \right\} \quad (3.23)$$

On va choisir comme sortie du moteur le courant d'induit I la matrice de sortie devienne : [5]

$$C = [1 \ 0] \quad (3.24)$$

Notre estimateur est basé sur l'erreur de sortie du système donc de l'erreur de courant d'induit I, le calcul de l'estimateur a été fait par la méthode de placement des pôles et on a obtenu la matrice d'observation suivante : [5]

$$L = \begin{bmatrix} -3819.8 \\ -2019.3 \end{bmatrix} \tag{3.25}$$

La structure de cette boucle de régulation est sur la figure (3.8) suivante :

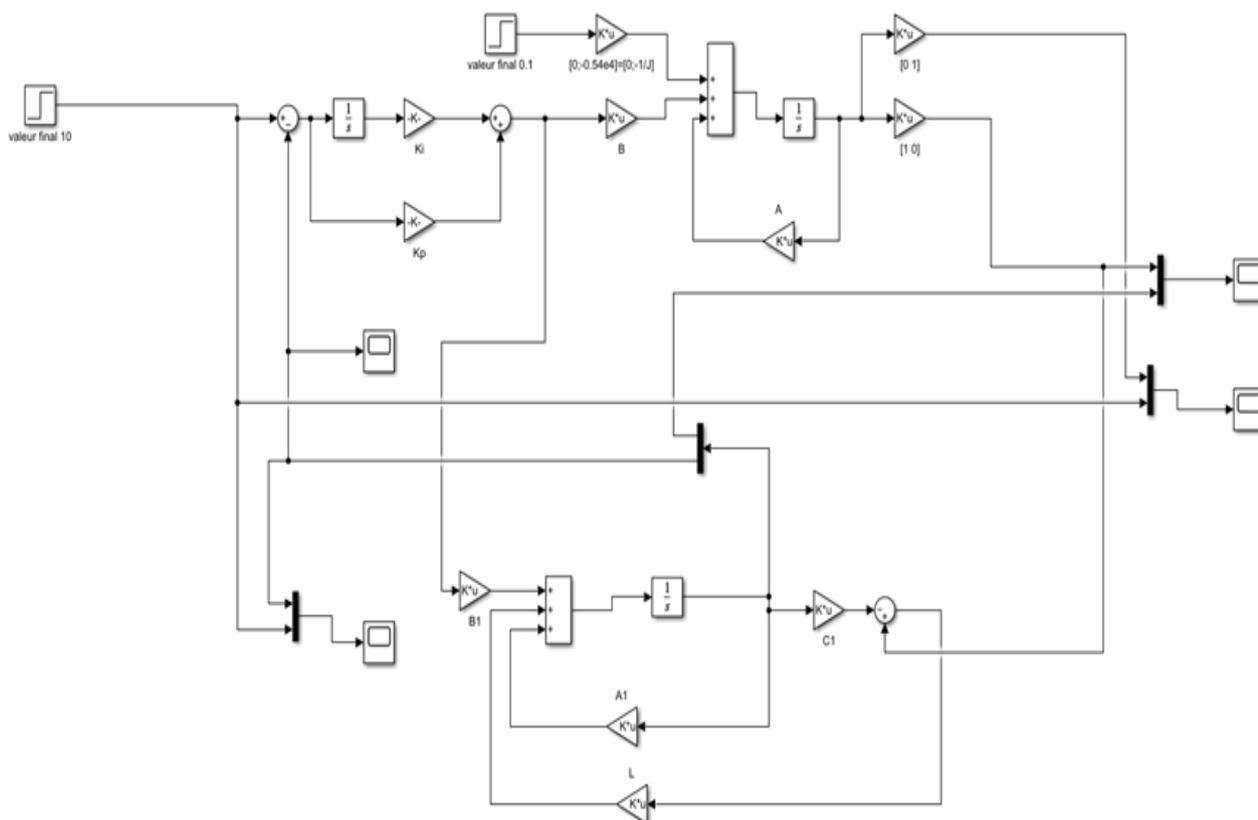


Figure (3-8) : retour d'état avec observateur



### 3-9-1 Principe de base de MLI :

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsion est sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence appelé modulatrice et qui constitue l'énergie du signal recueilli à la sortie de l'onduleur, figure (3.10). [9]

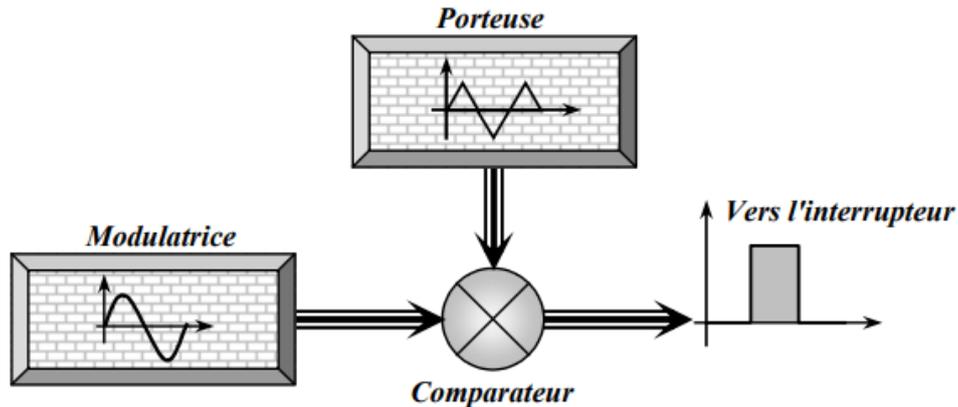


Figure (3-10) : Schéma synoptique de la M.L.I. [9]

### 3-9-2 Caractéristiques de la modulation :

La technique de la MLI se caractérise par deux grandeurs : [9]

- **Le coefficient de réglage** : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulante à celle de l'onde porteuse. Il permet de déterminer l'amplitude du fondamental de l'onde de modulation de largeur d'impulsion : [9]

$$M_R = \frac{V_m}{V_p} \quad (3.26)$$

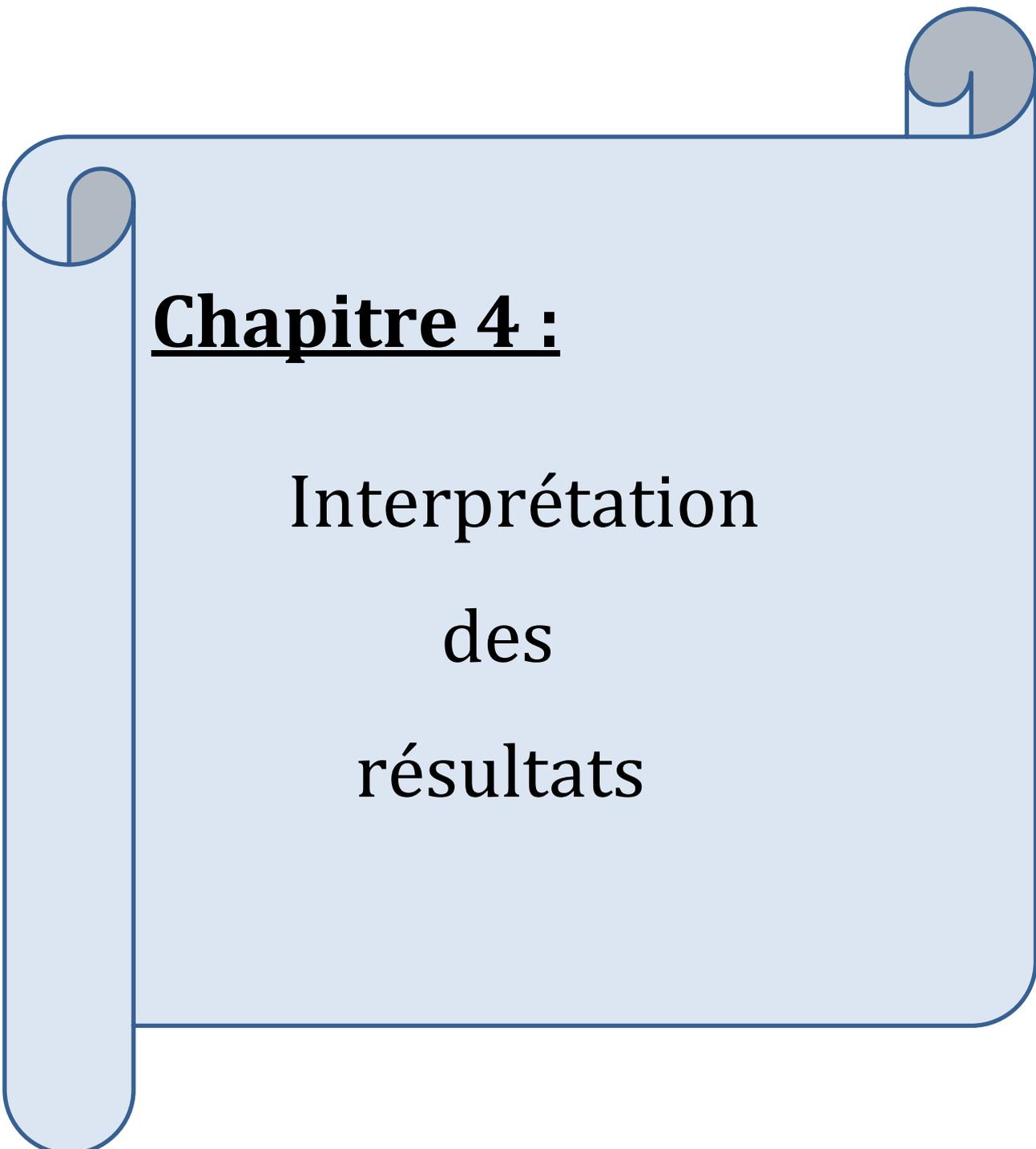
- **L'indice de modulation** : Il est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulante : [9]

$$M_I = \frac{f_p}{f_m} \quad (3.27)$$

**3-10 Conclusion :**

Ce chapitre a été consacré à description les différentes approches permettant de commander le système sans capteur de vitesse .

Nous avons présenté les valeurs de chaque commande utilisé dans ce système et présenté la simulation.



**Chapitre 4 :**

Interprétation  
des  
résultats

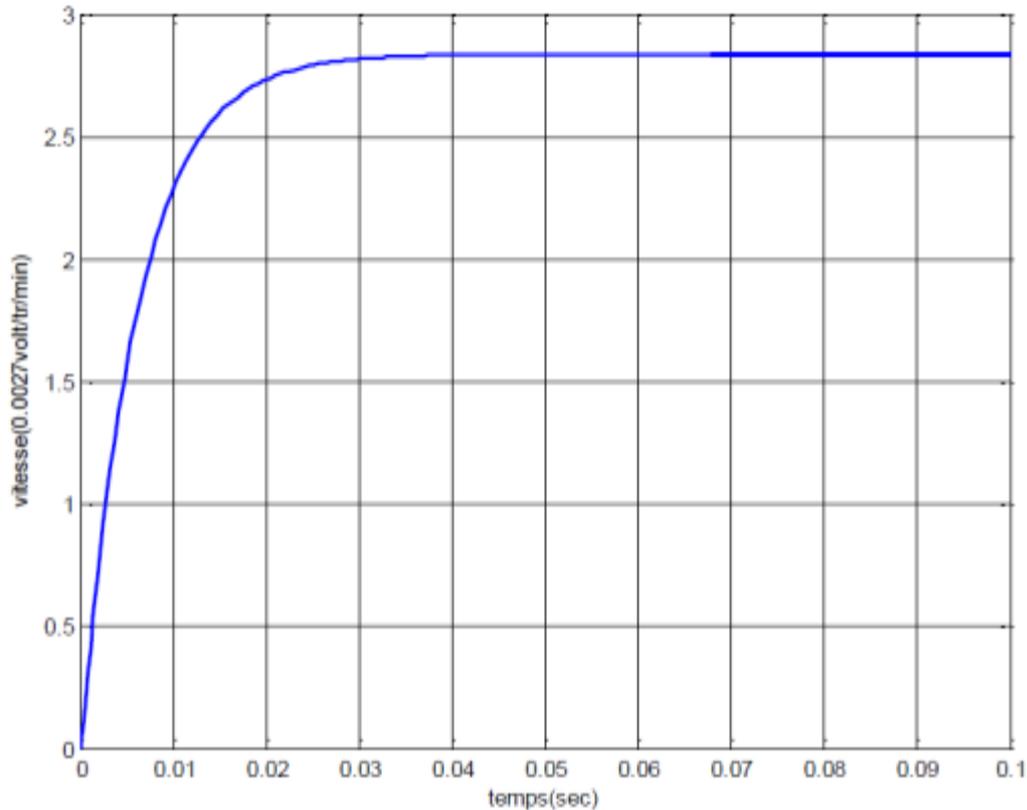
**4-1 Introduction :**

L'interprétation des résultats constitue un chapitre essentiel dans notre étude, car il nous permet d'analyser en profondeur les données recueillies et de donner un sens à nos découvertes. Dans ce chapitre, nous examinerons attentivement les résultats obtenus à partir de nos expériences, enquêtes ou analyses, et nous les interpréterons à la lumière de nos objectifs de recherche. Nous chercherons à comprendre les tendances, les relations et les significations cachées derrière les données brutes, afin de tirer des conclusions éclairées et d'éclairer notre sujet d'étude. À travers une approche méthodique et rigoureuse, nous explorerons les nuances, les exceptions et les implications de nos résultats, en offrant une vision approfondie de leur portée et de leur pertinence. Par le biais de cette interprétation minutieuse, nous espérons fournir des éclaircissements et des insights précieux, tout en ouvrant de nouvelles perspectives pour des études futures dans ce domaine passionnant.

#### 4-2 Boucle ouverte :

La figure (4-1) ci-dessus montre le comportement dynamique et statique de moteur avec un démarrage à vide et l'application d'un rapport cyclique de 50%.

Réponse en boucle ouverte pour un échelon  $\alpha=50\%$ .



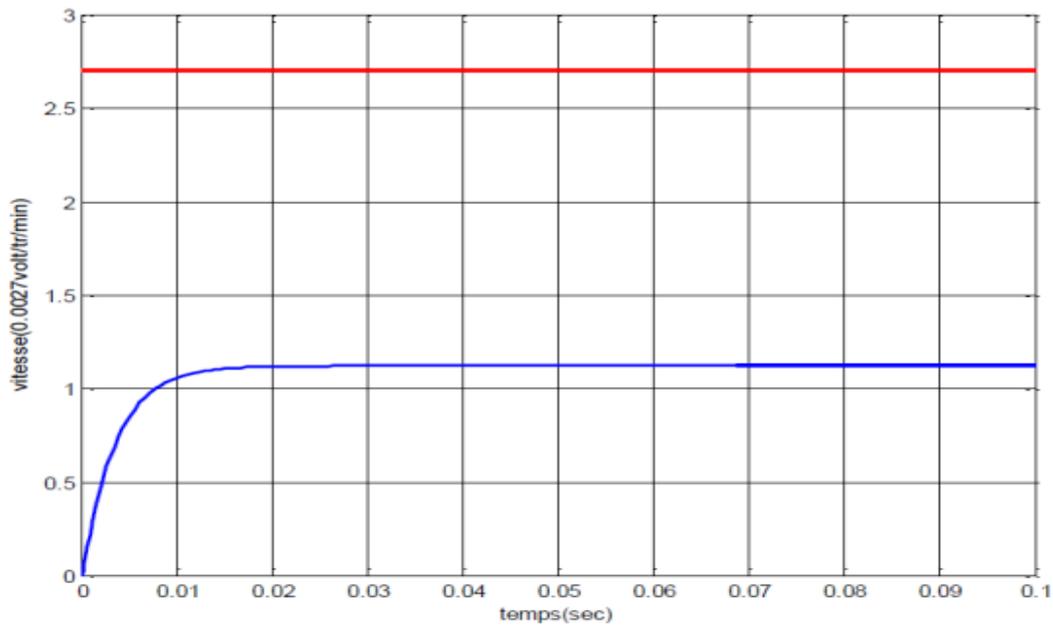
**Figure (4-1) :** réponse en boucle ouverte pour un échelon  $\alpha=50\%$ .

#### Remarque :

On remarque que le moteur atteint sa valeur finale au bout de 0.05s avec un temps d'établissement de 0.0236 s.

### 4-3 Boucle fermée :

La figure (4-2) ci-dessus montre la réponse du moteur en boucle fermée suite à une consigne de 2.7 volt



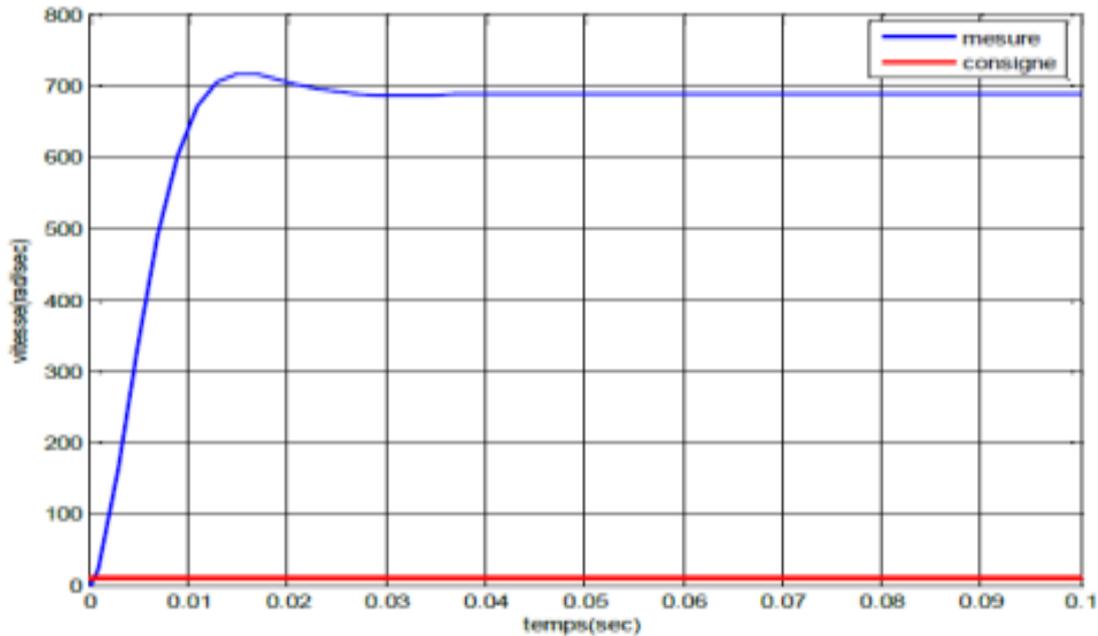
**Figure (4-2) :** réponse du moteur en boucle fermé.

#### Remarque :

Une erreur d'environ 1.5 volt qui correspond à 555tr/min est introduite en régime permanent.

#### 4-4 Commande par retour d'état :

La réponse du système Figure (3-3) est représentée sur la Figure (4-3) ci-dessus :



**Figure (4-3) :** réponse avec retour d'état.

#### Remarque :

D'après le résultat on voit bien qu'il y a une erreur très importante entre la mesure et la consigne dans le régime statique, pour annuler cette erreur on doit introduire un pré-compensateur (gain) juste après la consigne.

#### 4-5 Commande par retour d'état avec pré-compensateur :

La figure (4-4) ci-dessus montre la réponse du système par retour d'état avec pré-compensateur plus l'application d'une charge à  $t=0.05s$ .

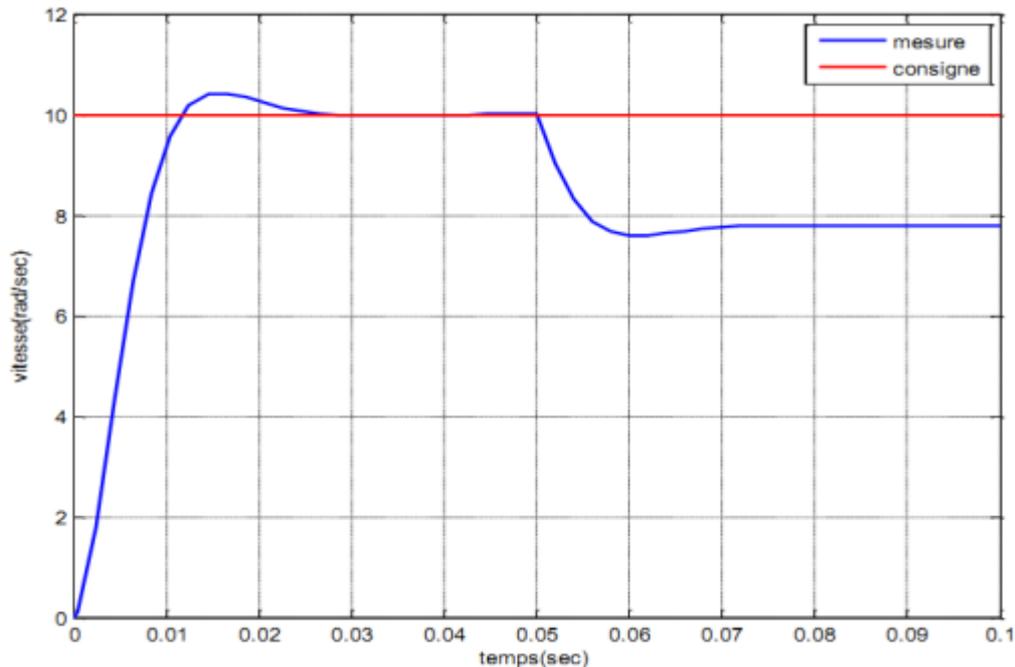


Figure (4-4) : réponse avec pré-compensateur.

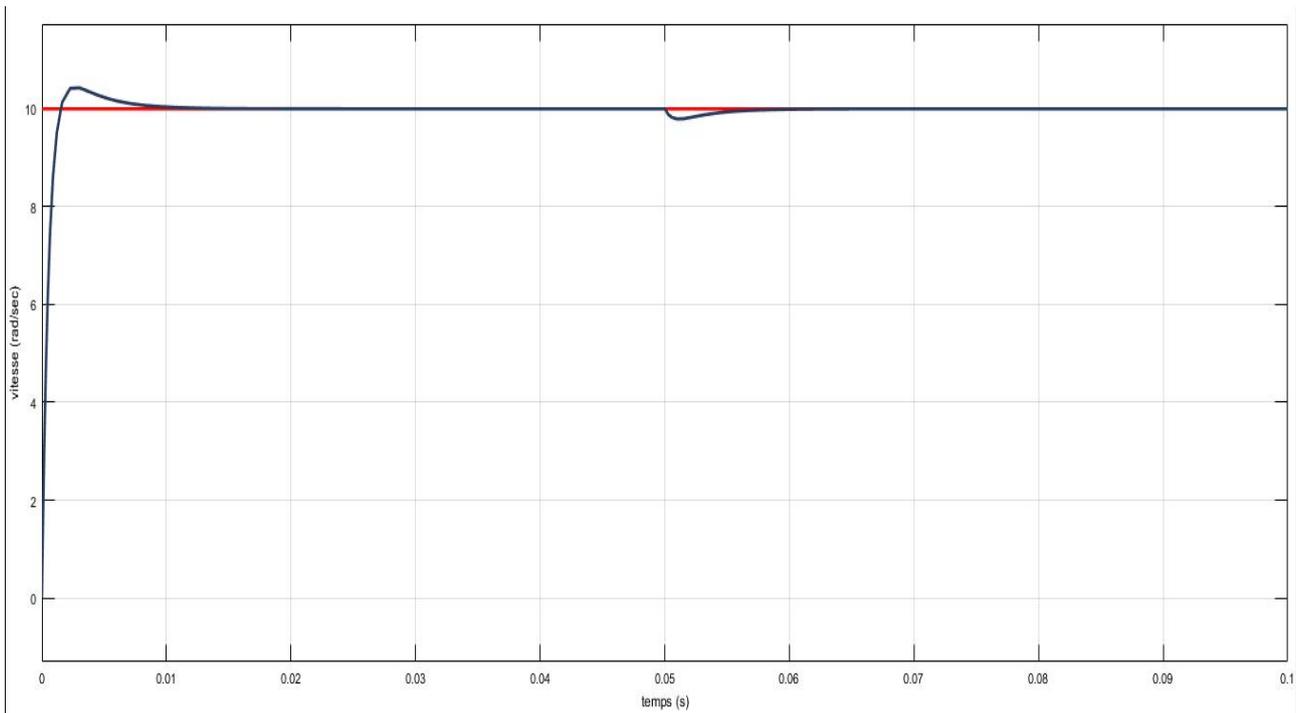
#### Remarque :

On remarque bien que l'erreur en régime statique est annulée, mais un autre problème est encore apparu, c'est que après l'application d'une charge le retour d'état est incapable de maintenir sa vitesse consigne.

Pour régler ce problème majeur le système peut être augmenté en utilisant un correcteur PI et retour d'état.

#### 4-6 Commande à retour d'état et bouclage intégral :

La réponse du système (3-5) est sur la Figure (4-5) suivante, avec l'application d'un échelon de 10rad/sec et un couple résistant de 0.1 à  $t=0.05$ .



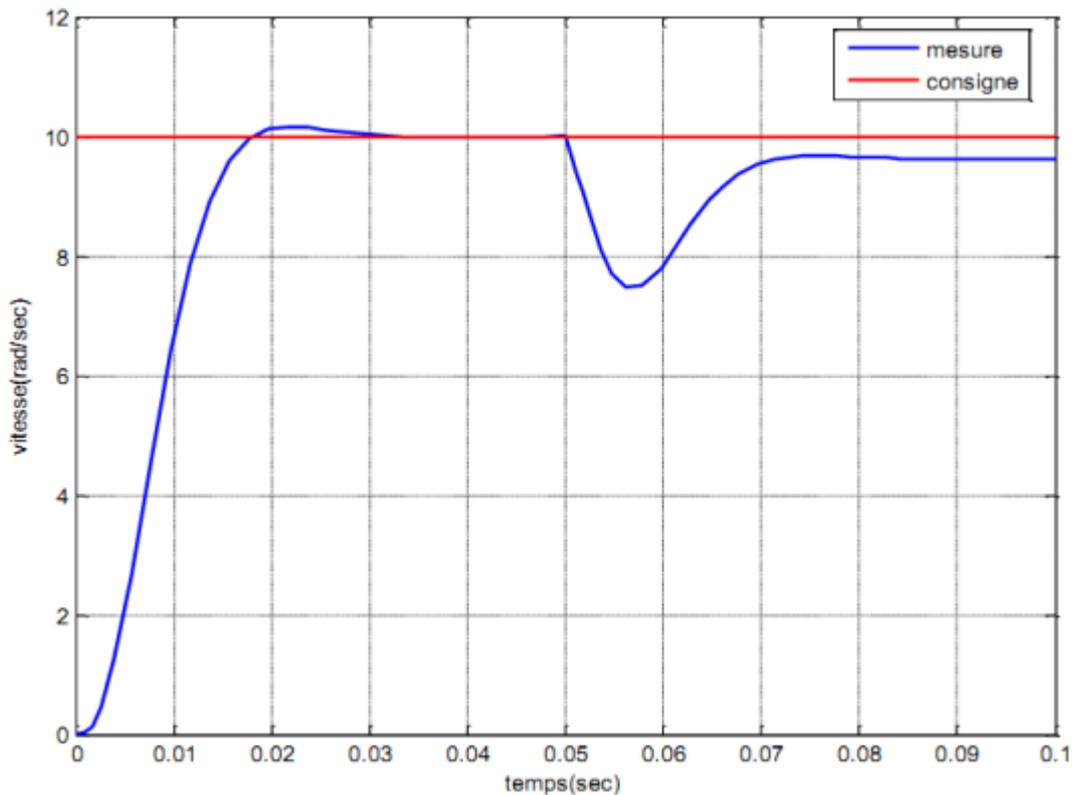
**Figure (4-5):** réponse avec retour d'état intégral PI.

#### Remarque :

On remarque bien que le système suit la consigne, et annule l'effet du couple résistant. A ce niveau-là on a amélioré la réponse du système avec le retour d'état, maintenant on va ignorer la mesure de vitesse et la remplacer par un estimateur qui joue le rôle d'un capteur de vitesse.

#### 4-7 Commande par retour d'état observé :

Les résultats suite à une simulation avec une consigne de 10rad/sec et un couple résistant de 0.1N.m à l'instant  $t=0.05s$  sont montrées sur la Figure (4-6) :



**Figure (4-6) :** réponse avec retour d'état observé.

#### Remarque :

On remarque bien qu'après l'application d'un couple résistant la mesure suit la consigne mais avec une erreur de 0.3rad/sec qui est une erreur tolérable.

#### 4-8 Régulation PI avec estimation de la mesure :

La figure (4-7) montre le résultat obtenu l'or d'une simulation avec une consigne de 10rad/sec et une charge de 0.8N.m à  $t = 0.01s$ .

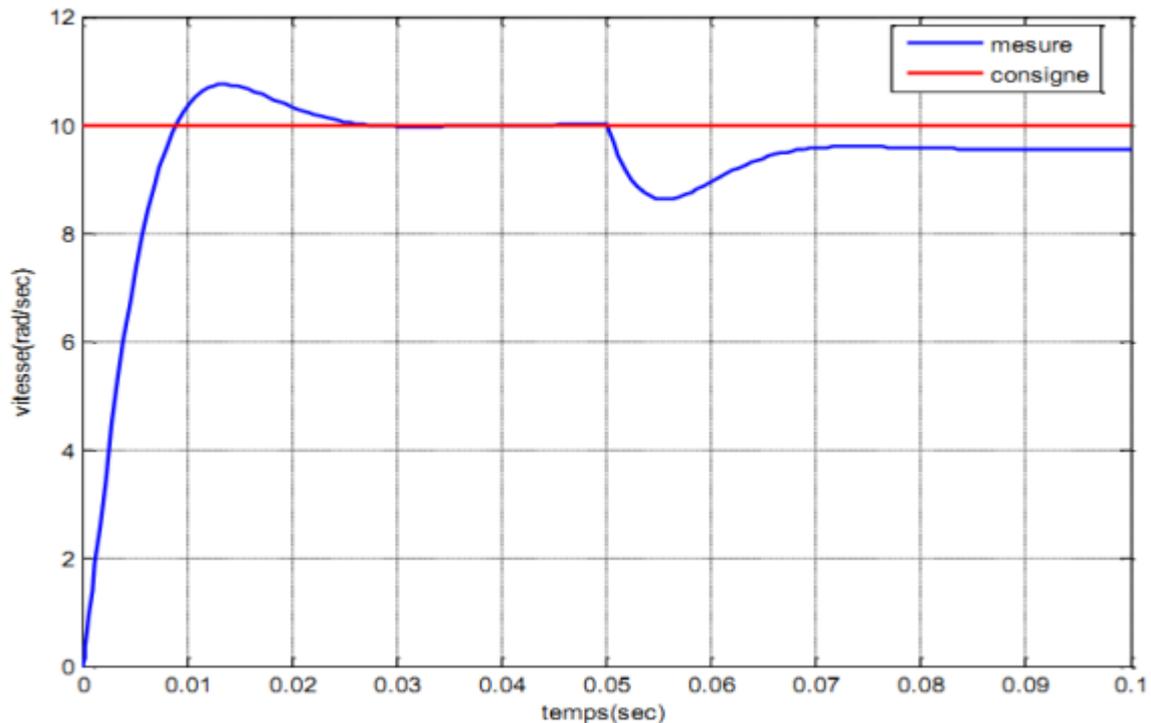


Figure (4-7) : réponse du PI avec vitesse estimé.

#### Remarque :

Le résultat obtenu est identique avec celui du retour d'état observé.

**4-9 Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de chaque commande. Ainsi, nous avons commenté les résultats de chaque simulation. La comparaison de l'erreur de vitesse dans le cas d'une régulation PI avec capteur et celle du PI avec estimateur est de 2%, donc on peut conclure que la régulation avec estimateur présente de bonne performance. Les résultats obtenus ont montré que la régulation sans capteur présente les mêmes performances que celle avec capteur mais elle reste sensible au bruit de mesure et à la précision de calcul.

## ANNEXE

---



### Les paramètres de moteur :

$U_n$	Tensions nominale du moteur [v]	40
$I_n$	Le courant nominal [a]	8.7
R	La résistance d'induit [ $\Omega$ ]	0.61
L	Inductance de l'induit [H]	100e-6
F	Le frottement [N.m]	1,4e-4
J	L'inertie du système [kg .m <sup>2</sup> ]	1,84e-4
$\Omega_n$	Vitesse nominale du moteur [rad/min]	3000
$K_t$	Constante du couple moteur	0,1013
$K_b$	Constante de force contre électromotrice	0,1012



### CONCLUSION GENERALE

L'objectif du projet que nous avons élaboré était de commander la vitesse d'un moteur à courant continu.

Nous avons commencé ce travail en modélisant le système à contrôler (hacheur, moteur, capteur), et le modèle obtenu a été utilisé pour étudier la dynamique du système en boucle ouverte.

Nous avons synthétisé plusieurs types de commandes basées sur un cahier des charges bien défini (régulateur PI classique, retour d'état, retour d'état avec pré-compensateur, retour d'état et bouclage intégral, retour d'état observé puis PI avec estimation de la mesure).

D'après les résultats obtenus avec les différents régulateurs, on peut conclure que les résultats obtenus avec le retour d'état et le bouclage intégral sont nettement supérieurs à ceux obtenus avec les autres régulateurs.

Dans le dernier chapitre, nous avons interprété les résultats sur les images et attribué une note à chaque résultat.

Les résultats obtenus ont montré que la régulation sans capteur présente les mêmes performances que celle avec capteur, mais elle reste sensible aux bruits de mesure et à la précision du calcul.

Nous proposons comme travail futur d'utiliser un observateur pour mettre en œuvre expérimentalement les commandes basées sur l'observateur.

Nous avons commencé à travailler sur la commande optimale LQR, mais en raison du manque de temps et des résultats insatisfaisants, nous avons décidé de ne pas l'inclure dans notre travail. De plus, nous espérons inclure la commande par logique Floue, mais pour les mêmes raisons précédentes, nous ne l'avons pas fait.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. Boubaker, Etude d'un Moteur à Courant continu et Simulation, mémoire de licence, 2017, 23p.
- [2] HAIK Ammar, Etude et simulation du diagnostic des défauts et anomalies d'un générateur photovoltaïque, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, thèse de Master, 2020, 90p.
- [3] <https://fr.rs-online.com/web/content/blog-discovery/maintenance/guide-tachymetre>
- [4] MERAHI Kamel, Estimation d'Etat et Diagnostic de Fonctionnement des Systèmes non Linéaires, University Badji Mokhtar Annaba, thèse de magister, 2010, 77p.
- [5] TERBAGOU Ramzi, Etude et Simulation d'une Commande de Vitesse d'un Moteur à Courant Continu, Université de Ghardaïa, thèse de Master, 2015, 56p.
- [6] Ayeb Fakhreddine, Conception et implémentation d'une commande PID numérique d'un moteur à courant continu, Université Larbi Ben M'hidi D'oum El Bouagui, thèse de Master, 2014, 28p.
- [7] <https://www.academia.edu/RegisterToDownload/UserTaggingSurvey>
- [8] Benoît LARROQUE, Observateurs de systèmes linéaires Application à la détection et localisation de fautes, Université de Toulouse, thèse de Doctorat, 2008, 131p.
- [9] ADJIMI Nadia Melle et BELAIDI Wahiba, Modélisation et commande d'un onduleur MLI, Universitaire Larbi Ben M'hidi Oum El-Bouaghi, thèse de Master, 2009, 46p.
- [10] HOCINI Lotfi et GHEMAM Scoura, Conception et réalisation d'un variateur de vitesse pour moteur à courant continu, Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, mémoire de Master, 2009,41p.
- [11] TOUAQI Iman, CONVERTIR L'ENERGIE MACHINES A COURANTCONTINU, article, 10p.
- [12] LAKEL Hamza, La régulation de vitesse d'un moteur à courant continu (MCC), Université de Badji Mokhtar, Annaba, Mémoire de Matser, 2016,55p.

## Résumé

Ce travail est un contrôle de vitesse sans capteur qui est un type de technique utilisée dans les systèmes de contrôle pour ajuster la vitesse des moteurs ou des machines sans avoir besoin d'utiliser un capteur externe pour mesurer la vitesse. Cette technologie s'appuie sur des méthodes d'analyse des signaux électriques ou mécaniques générés par le fonctionnement du moteur ou de l'appareil pour estimer la vitesse et l'ajuster avec précision à l'aide d'algorithmes spécialisés.

## Abstract

This work is sensorless speed control which is a type of technique used in control systems to adjust the speed of motors or machines without the need to use an external sensor to measure the speed. This technology relies on methods of analyzing electrical or mechanical signals resulting from the operation of the motor or device to estimate the speed and adjust it precisely using d'algorithmes spécialisés.

### ملخص

يتمثل هذا العمل في التحكم في السرعة بدون مستشعر وهي نوع من التقنيات المستخدمة في أنظمة التحكم لضبط سرعة المحركات أو الآلات بدون الحاجة إلى استخدام مستشعر خارجي لقياس السرعة. هذه التقنية تعتمد على طرق تحليل الإشارات الكهربائية أو الميكانيكية الناتجة عن عمل المحرك أو الجهاز لتقدير السرعة وضبطها بشكل دقيق باستخدام خوارزميات مخصصة