

# Table des matières

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Rappels sur les systèmes asservis.</b>	
I.1.Introduction .....	2
I.2.Définition .....	2
I.3.Schéma fonctionnel d'un système asservi .....	2
I.3.1.Comparateur .....	3
I.3.2.La chaine directe ou chaine d'action .....	3
I.3.2.1.Constitution de procédé .....	3
I.3.3.La chaine de retour ou chaine de réaction .....	3
I.3.4.Structure générale d'un système asservi .....	4
I.4.Classification des systèmes .....	4
I.4.1.Les système linéaires .....	4
I.4.1.1.Equation des systèmes linéaire .....	4
I.4.2.Les systèmes invariants .....	5
I.4.3.Les systèmes à modèles déterministes .....	5
I.4.4.Les systèmes asservis .....	5
I.4.4.1.Commande en boucle ouverte .....	6
I.4.4.2.Commande en boucle fermée.....	6
I.5.Performances des systèmes asservis .....	6
I.5.1.Notion de stabilité .....	6
I.5.2.Notion de rapidité .....	7
I.5.3.Notion de précision .....	8
I.6.Réponse particulière d'un système scalaire .....	9
I.6.1.Réponse impulsionnelle .....	9
I.6.2.Réponse indicielle .....	9
I.7.Réponse temporelle des systèmes .....	10
I.7.1.Réponse d'un système du premier ordre .....	10
I.7.1.1.Réponse à un échelon.....	10

I.7.1.2.Réponse à une rampe .....	11
I.7.1.3.Réponse à une impulsion .....	11
I.7.2.Réponse d'un système du second ordre .....	12
I.7.2.1.Réponse à un échelon .....	12
I.7.2.2.Réponse à une rampe .....	14
I.8.Conclusion .....	14

## **Chapitre II : Moteur à courant continu**

II.1.Introduction .....	15
II.2.Description générale .....	15
II.3.Type de moteur à courant continu .....	16
II.3.1.Des moteurs à excitation indépendante .....	16
II.3.2.Des moteurs à excitation parallèle .....	17
II.3.3.Des moteurs à excitation série .....	17
II.3.4.Des moteurs à excitation composé .....	18
II.4.Schéma équivalente de moteur à courant continu .....	18
II.4.1.Fonction de transfert du moteur à courant continu .....	19
II.4.2.Les équations caractéristiques du moteur à coutant continu .....	21
II.5.Principe de fonctionnement .....	21
II.6.Equation de fonctionnement .....	22
II.6.1.Force électromotrice .....	22
II.6.2.Puissance utile (sur l'arbre en sortie) .....	23
II.6.3.Puissance absorbée (en entrée).....	23
II.6.4.Pertes .....	23
II.7.Bilan de puissance pour un moteur .....	23
II.8.Conclusion.....	23

## **Chapitre III : Commande vitesse d'un MCC par la régulation PI**

III.1.Introduction .....	24
III.2.Commande proportionnelle(P) .....	24
III.2.1.Principe .....	24
III.2.2.Fonctionnement .....	24
III.2.3.Schéma fonctionnel de régulateur (P) .....	25

III.2.4.Réponse indicielle .....	25
III.2.5.Réponse harmonique .....	25
III.2.6.Schéma électronique de commande (P) .....	26
III.2.7.Effet de régulation proportionnel .....	26
III.3.Commande proportionnelle-intégral (PI) .....	26
III.3.1.Principe .....	26
III.3.2.Fonctionnement .....	27
III.3.3.Schéma fonctionnel de régulateur PI .....	27
III.3.4.Réponse indicielle .....	28
III.3.5.Réponse harmonique .....	28
III.3.6.Schéma électronique de régulateur (PI) .....	29
III.3.7.Effets de commande proportionnelle-intégral (PI) .....	30
III.4.La commande (PI) en régulation de vitesse .....	30
III.5.Conclusion .....	32

## **Chapitre IV : Commande vitesse d'un MCC par PLL**

IV.1.Introduction .....	33
IV.2.Principe de fonctionnement d'une PLL .....	33
IV.2.1.Les éléments d'une PLL .....	33
IV.2.1.1.L'oscillateur commandé en tension .....	34
IV.2.1.2.Le comparateur de phase .....	34
IV.2.1.3.Le filtre passe-bas .....	35
IV.2.1.3.1.Le filtre passe-bas passif(RC) .....	35
IV.2.1.3.2.Le filtre passe-bas actif .....	35
IV.2.2.Fonctionnement d'une PLL .....	36
IV.2.2.1.Plage de capture .....	37
IV.2.2.2.Plage de verrouillage .....	37
IV.2.2.3.Diagramme de changement d'état .....	37
IV.3.Les applications d'une PLL .....	38
IV.3.1.Synthétiseur de fréquence .....	38
IV.3.2.Modulation et démodulation de fréquence .....	39
IV.3.3.Contrôle de vitesse de rotation d'un MCC .....	40
IV.4.Simulation sur proteus et réalisation pratique .....	41

<b>IV.4.1.Fonctionnement .....</b>	<b>41</b>
<b>IV.5.Conclusion .....</b>	<b>43</b>
<b>Travaux pratique .....</b>	<b>44</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>47</b>
<b>Bibliographie</b>	
<b>Tapez le titre du chapitre (niveau 3) .....</b>	<b>6</b>

# Table des Figures

## CHAPITRE I

<b>Figure. I.1</b> : Structure système asservi. ....	2
<b>Figure. I.2</b> : Structure général d'un système asservi. ....	4
<b>Figure. I.3</b> : Réponse de système invariant. ....	5
<b>Figure. I.4</b> : Structure de boucle fermée. ....	6
<b>Figure. I.5</b> : Différentes réponse de stabilité. ....	7
<b>Figure. I.6</b> : Système lent, système rapide. ....	7
<b>Figure. I.7</b> : Temps de réponse d'un système. ....	8
<b>Figure. I.8</b> : Temps de réponse a 5% d'un système. ....	8
<b>Figure. I.9</b> : Précision d'un système asservi. ....	8
<b>Figure. I.10</b> : Réponse impulsionnelle d'un système asservi. ....	9
<b>Figure. I.11</b> : Réponse indicielle d'un système asservi. ....	9
<b>Figure. I.12</b> : Réponse échelon d'un système de 1 <sup>ier</sup> ordre. ....	10
<b>Figure. I.13</b> : Réponse rampe d'un système de 1 <sup>ier</sup> ordre. ....	11
<b>Figure. I.14</b> : Réponse impulsion d'un système de 1 <sup>ier</sup> ordre. ....	12
<b>Figure. I.15</b> : Réponse échelon d'un système de 2 <sup>ième</sup> ordre. ....	13
<b>Figure. I.16</b> : <b>Réponse</b> échelon d'un système de 2 <sup>ième</sup> ordre. ....	14

## CHAPITRE II

<b>Figure. II.1</b> : Type de machine existe. ....	15
<b>Figure. II.2</b> : Moteur à courant continu. ....	16
<b>Figure. II.3</b> : Modélisation électrique d'un moteur à excitation indépendante. ....	17
<b>Figure. II.4</b> : Modélisation électrique d'un moteur à excitation parallèle. ....	17
<b>Figure. II.5</b> : Modélisation électrique d'un moteur à excitation série. ....	17
<b>Figure. II.6</b> : Modélisation électrique d'un moteur à excitation composée. ....	18
<b>Figure. II.7</b> : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu. ....	18
<b>Figure. II.8</b> : Schéma bloc du Modèle de moteur électrique en vitesse. ....	21
<b>Figure. II.9</b> : Loi de Laplace. ....	22
<b>Figure. II.10</b> : Principe de fonctionnement d'un MCC. ....	22

### CHAPITRE III

<b>Figure. III.1</b> : Réponse indicielle de régulateur P. ....	25
<b>Figure. III.2</b> : Réponse harmonique du régulateur P. ....	25
<b>Figure. III.3</b> : Schéma électronique de régulateur P. ....	26
<b>Figure. III.4</b> : Réponse indicielle de régulateur PI. ....	28
<b>Figure. III.5</b> : Réponse harmonique de régulateur PI. ....	28
<b>Figure. III.6</b> : Schéma électronique de régulateur PI. ....	29
<b>Figure. III.7</b> : Schéma bloc de régulateur PI. ....	31
<b>Figure. III.8</b> : Modélisation sous Matlab du correcteur PI en régulation de vitesse. ....	31

### Chapitre IV

<b>Figure. IV.1</b> : Structure de base de la boucle à verrouillage à phase. ....	33
<b>Figure. IV.2</b> : Allure de caractéristique de VCO. ....	34
<b>Figure. IV.3</b> : Caractéristique de comparateur. ....	35
<b>Figure. IV.4</b> : Filtre RC. ....	35
<b>Figure. IV.5</b> : Filtre actif. ....	36
<b>Figure. IV.6</b> : Les plages de capture et de verrouillage. ....	37
<b>Figure. IV.7</b> : Diagramme de plage de capture et verrouillage. ....	38
<b>Figure. IV.8</b> : Synthétiseur de fréquence à PLL. ....	38
<b>Figure. IV.9</b> : Modulation de fréquence à PLL. ....	39
<b>Figure. IV.10</b> : Démodulation de fréquence à PLL. ....	40
<b>Figure. IV.11</b> : Contrôle de vitesse par PLL. ....	40
<b>Figure. IV.12</b> : Schéma électrique de contrôle de vitesse d'un moteur à CC. ....	41
<b>Figure. IV.13</b> : Schéma de diviseur de fréquence et le switch. ....	42
<b>Figure. IV.14</b> : Etage amplificateur. ....	43

# Introduction générale

Dans le monde industriel de nombreux systèmes sont en train de remplacer l'homme, mais l'autonomie du système dépendait de l'homme, d'où la nécessité de créer un système intelligent, le type des moteurs utilisés en contrôle industriel dépend de la nature de l'application envisagée.

- Moteur DC ou AC (moteur asynchrones ou synchrones) pour des applications de puissance élevée ou modérée :  
Appareils électroménagers, tramways, robotique de puissance....etc.
- Moteur pas à pas pour des applications de puissance moindre mais exigeant une précision meilleure :  
Moteur dont le disque dur ou la tête de lecteur d'un micro-ordinateur, robotique, machines-outils....

Parmi les techniques qui ont bénéficié des progrès technologiques et scientifiques décrits plus haut, on trouve la technique de verrouillage de phase (PLL) qui a connu un grand essor dans le domaine électronique et on peut l'utiliser dans plusieurs applications à cause de sa souplesse d'adaptation aux techniques numériques.

J'ai utilisé cette technique pour développer un circuit électrique permet de contrôler la vitesse d'un moteur à courant continu (moteur DC).

D'autre part nous avons profité de ce projet pour élaborer deux TP relatifs aux applications de la PLL :

1. Manipulation 1 : Multiplieur de fréquence :
2. Manipulation 2 : Démodulation de fréquence :

Nous espérons que ces deux TP seront destinés aux étudiants du département de Génie électrique de notre faculté.

# CHAPITRE I



### I.1 Introduction :

Le but de l'asservissement est d'être capable de contrôler avec précision un moteur, dont la vitesse de rotation est naturellement imprécise et instable.

Dans ce chapitre, on va introduire les principes de base sur les systèmes asservis ainsi que la régulation en boucle ouverte et en boucle fermée.

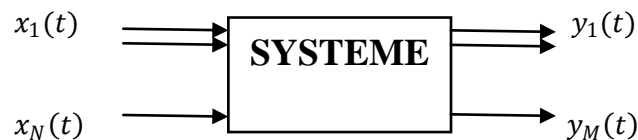
### I.2 Définition :

Un système peut être défini comme un ensemble d'éléments exerçant collectivement une fonction déterminée. Un système communique avec l'extérieur par l'intermédiaire de grandeurs, fonctions du temps, appelés signaux.

$x_1(t) \dots x_N(t)$  pour les signaux d'entrée de commande.

$y_1(t) \dots y_M(t)$  pour les signaux de sortie.

Les signaux de sortie d'un système sont aussi appelés réponse du système.



### I.3 Schéma fonctionnel d'un système asservi :

Il comporte :

- ❖ Un comparateur.
- ❖ Une chaîne directe ou chaîne d'action.
- ❖ Une chaîne de retour ou chaîne de réaction.

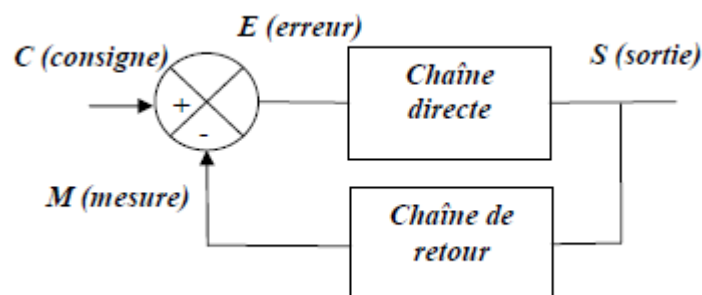


Figure I.1 : Structure système asservi.

### I.3.1. Le comparateur :

Le comparateur permet à tout instant de comparer la valeur de consigne à la valeur mesurée (image de la sortie), de façon à élaborer le signal d'erreur ( $E=C-M$ ).

### I.3.2. La chaîne directe ou chaîne d'action :

Elle est composée :

- ❖ D'un correcteur qui a pour rôle de modifier le signal d'erreur pour donner naissance au signal de commande ( $Y$ ) et améliorer ainsi les performances du système.
- ❖ D'un procédé qui a pour rôle de conférer à la matière d'œuvre la valeur ajoutée attendue.

#### I.3.2.1. Exemples de constitution de procédé :

La variation de vitesse d'un mobile : variateur de vitesse (pré-actionneur ou dans ce cas précis on parle de modulateur d'énergie), moteur (actionneur), réducteur+polie+courroie (effecteurs).

Le chauffage d'un volume d'eau : gradateur (pré-actionneur ou modulateur d'énergie), réchauffeur ou thermoplongeur (actionneur), récipient (effecteur).

Le pré-actionneur est le constituant de gestion d'énergie qui, sur ordre du régulateur, distribue une énergie disponible vers un actionneur.

L'actionneur est un le dispositif qui convertit une énergie d'entrée en une énergie de sortie utilisable pour obtenir une action définie.

L'effecteur est le constituant qui utilise l'énergie en provenance de l'actionneur pour conférer une valeur ajoutée à la matière d'œuvre.

### I.3.3. La chaîne de retour ou chaîne de réaction :

Elle est composée :

- ❖ D'un capteur : qui permet de donner une image fidèle de la grandeur de sortie ;
- ❖ D'un adaptateur : qui permet de transformer l'information en prévenance du capteur pour qu'elle soit compréhensible par le régulateur (signal -10V/+10V ou 4/20mA).

**I.3.4. Structure générale d'un système asservi :**

L'association des éléments cités précédemment forme la structure générale d'un système asservi et qui peut être représentée de la façon suivante:

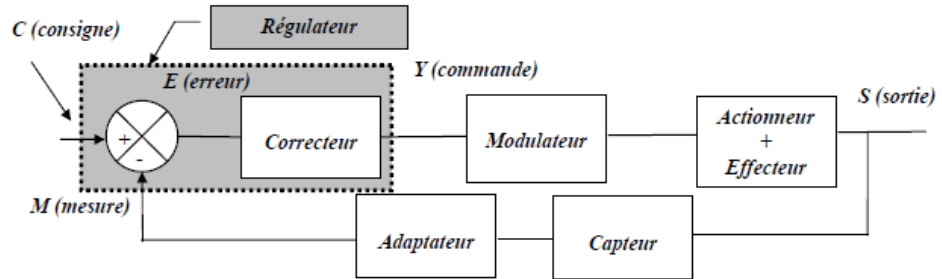
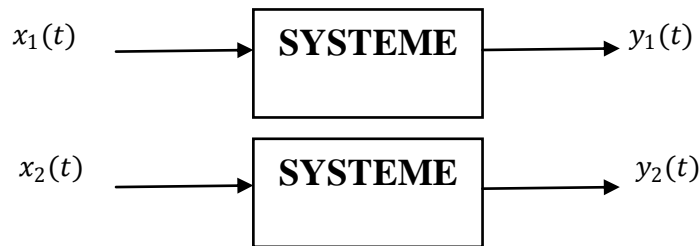


Figure .I.2 : Structure général d'un système asservi.

**I.4 Classification des systèmes :**

**I.4.1. Les systèmes linéaires :**

Un système est linéaire si la réponse de ce système à une combinaison linéaire de signaux d'entrée est égale à la combinaison linéaire des réponses.



Si on applique à l'entrée :  $x(t) = a \cdot x_1(t) + b \cdot x_2(t)$

On obtient en sortie :  $y(t) = a \cdot y_1(t) + b \cdot y_2(t)$ .

Cette propriété des systèmes linéaires est aussi appelée principe de superposition.

**I.4.1.1. Equations des systèmes linéaire :**

Un système est dit linéaire invariant si l'équation liant la sortie à l'entrée est une équation différentielle linéaire à coefficients constants. La forme générale de cette équation est :

$$a_0s(t) + a_1 \frac{ds(t)}{dt} + \dots + a_n \frac{d^n s}{dt^n} = b_0e(t) + b_1 \frac{de(t)}{dt} + \dots + b_m \frac{d^m e(t)}{dt^m}$$

D'où la fonction de transfert d'un système est :

$$G(p) = \frac{s(p)}{e(p)} = \frac{b_0 + b_1p + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1p + \dots + a_n p^n}$$

#### 1.4.2. Les systèmes invariants :

Un système est dit invariant (stationnaire) si la réponse du système à un signal  $x(t)$  différé d'un temps  $\tau$  est la même que la réponse  $y(t)$  du système mais différée de  $\tau$ .

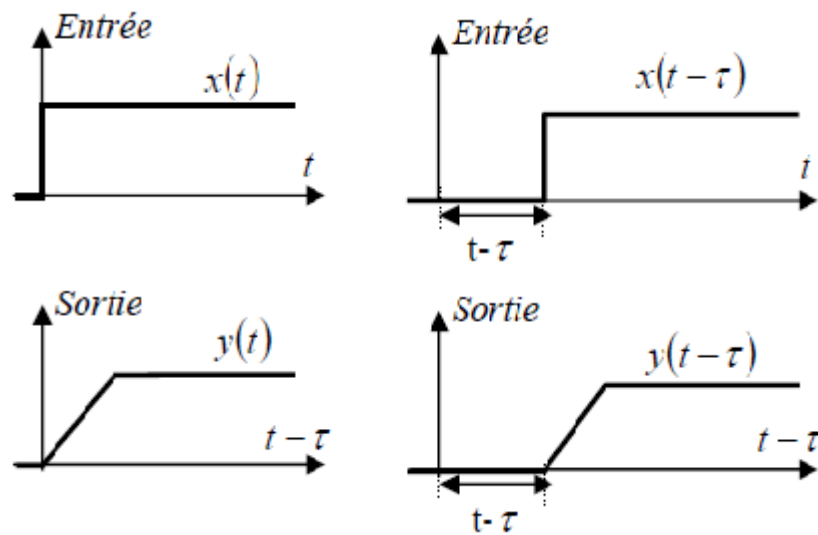


Figure .1.3 : Réponse de système invariant.

Un système invariant est aussi appelé système à paramètres constants localisés ou à constantes localisées. Cette propriété des systèmes invariants est aussi appelée principe de permanence.

#### 1.4.3. Les systèmes à modèles déterministes :

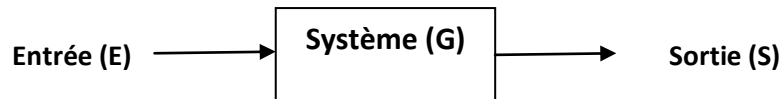
Un modèle déterministe possède des entrées et des paramètres non bruités de telle façon que son comportement soit parfaitement prévisible en avance.

#### 1.4.4. Les systèmes asservis :

L'étude des systèmes est destinée à commander au mieux les différents processus rencontrés. Il existe deux solutions pour commander un système :

#### I.4.4.1. Commande en boucle ouverte :

La commande est envoyée en entrée sans contrôle sur les sorties. Pour utiliser ce type de commande, il est nécessaire de connaître le système et les réponses aux commandes envoyées.



#### I.4.4.2. Commande en boucle fermée :

Pour améliorer les performances d'une commande, il est indispensable d'observer les sorties du système pour les comparer à ce que l'on désire obtenir. Dans ce deuxième type de commande, les sorties du système sont contrôlées. [1]

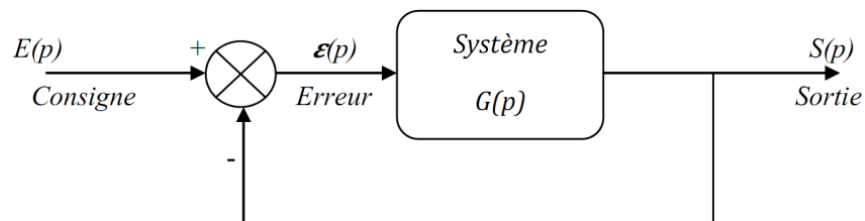


Figure .I.4 : Structure de boucle fermée.

### I.5 Performances des systèmes asservis :

#### I.5.1. Notion de stabilité :

On dit qu'un système est stable, lorsque tend à revenir à son état d'équilibre lorsqu'on lui applique une perturbation de courte durée.[2]

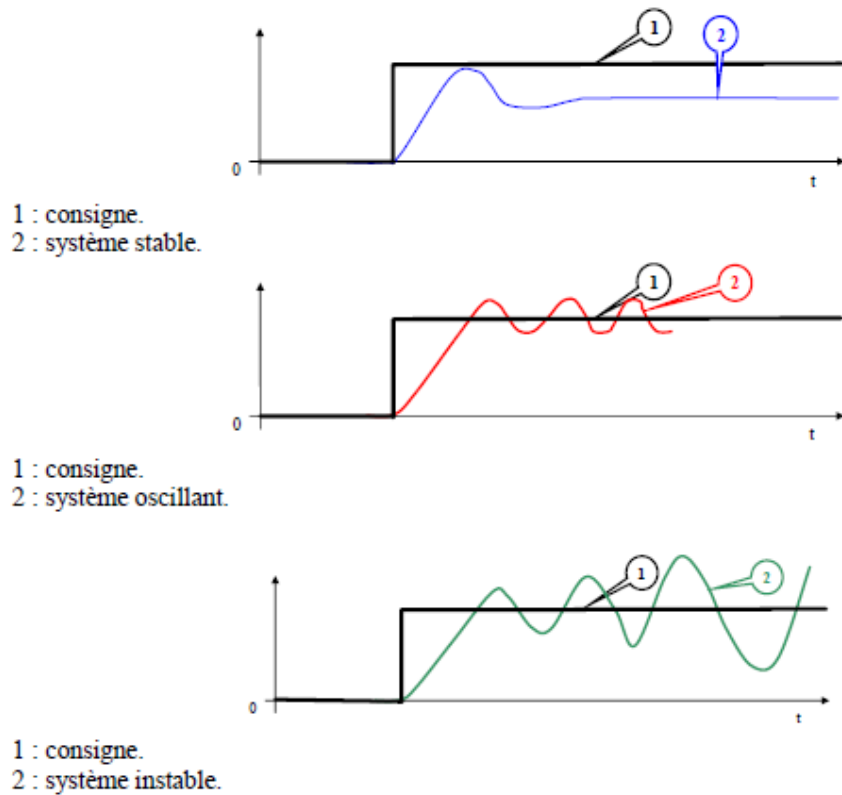


Figure .I.5 : Différentes réponse de stabilité.

### I.5.2. Notion de rapidité :

C'est la capacité du système à atteindre dans les meilleurs délais son régime stable (valeur finale qui peut être différente de la valeur de consigne si le système est mal réglé). La rapidité d'un système est défini par son temps de réponse  $t_r$  (plus  $t_r$  est petit plus le système est dit rapide).[2]

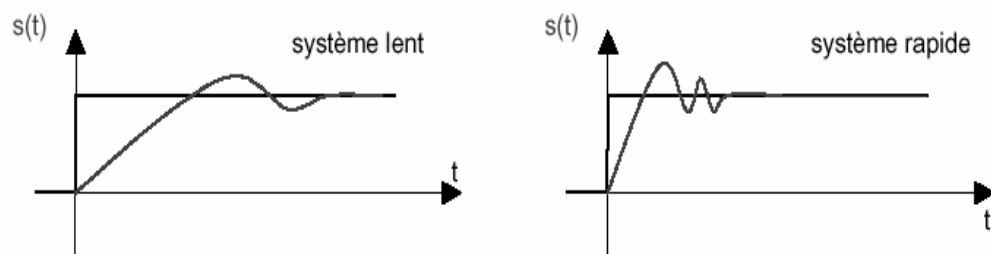


Figure .I.6 : Système lent, système rapide.

Pour déterminer le temps de réponse d'un système :

- on trace une droite à 95% de la valeur finale  $V_f$  (3);
- on trace ensuite une droite à 105% de la valeur finale  $V_f$  (4).

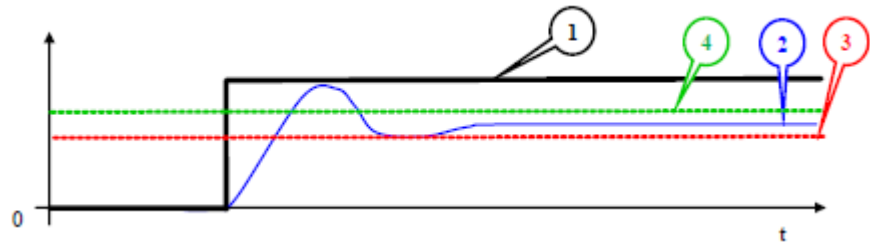


Figure .I.7 : Temps de réponse d'un système.

- 1 : consigne.
- 2 : valeur finale du système.
- 3 : droite à 95% de la valeur finale.
- 4 : droite à 105% de la valeur finale.

Le temps de réponse à 5 % correspond à la différence entre le temps  $t_2$  (temps à partir duquel la courbe entre dans l'intervalle 95% /105% sans en sortir) et le temps  $t_1$  (temps à partir duquel la consigne est active).

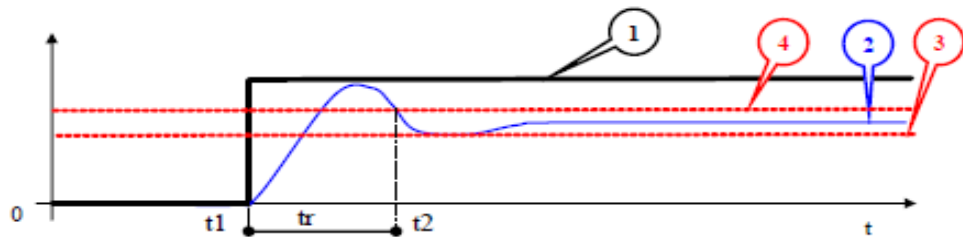


Figure .I.8 : Temps de réponse a 5% d'un système.

### I.5.3. Notion de précision :

La précision quantifie l'erreur lorsque l'équilibre est atteint.[2]

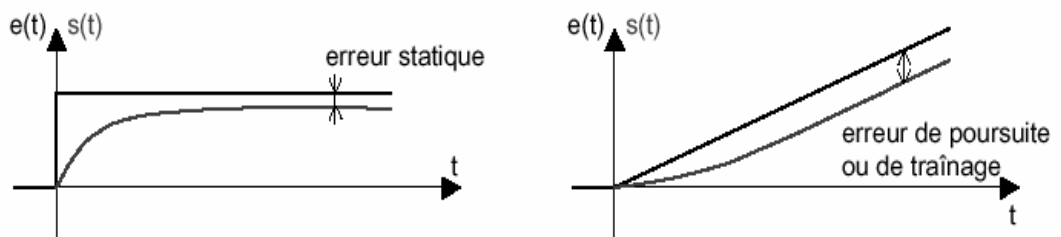


Figure .I.9 : Précision d'un système asservi.

Avec  $e(t)$  et  $s(t)$  de même nature. Autrement, l'erreur est mesurée à la sortie du comparateur.

## I.6 Réponse particulières d'un système scalaire :

Un système scalaire c'est-à-dire qui a une entrée et une sortie.[3]



Pour connaître le comportement du système et le comparer à d'autres systèmes, on étudie les réponses à quelques signaux particuliers.

### I.6.1. Réponse impulsionnelle :

On appelle réponse impulsionnelle, la réponse notée  $h(t)$ , obtenue par l'application d'une impulsion de Dirac  $\delta(t)$  à l'entrée du système, celui-ci étant initialement au repos.

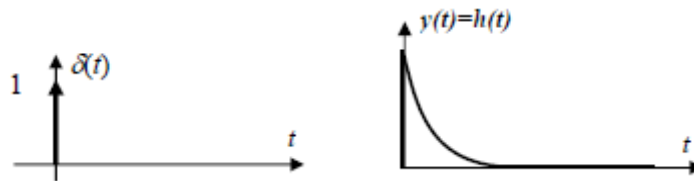


Figure .I.10 : Réponse impulsionnelle d'un système asservi.

### I.6.2. Réponse indicielle :

On appelle réponse indicielle, la réponse notée  $\omega(t)$ , obtenue par l'application d'un échelon unité  $U(t)$  à l'entrée du système.

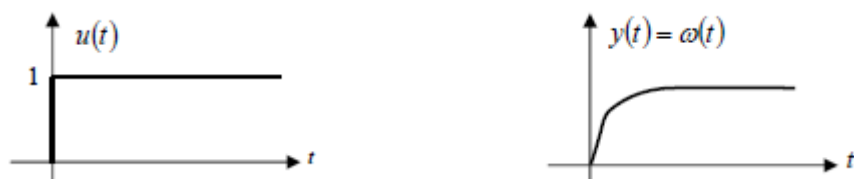


Figure .I.11 : Réponse indicielle d'un système asservi.



## I.7 Réponse temporelle des systèmes :

### I.7.1. Réponse d'un système du premier ordre :

Un système de premier ordre est décrit par la fonction suivante :

$$b_0 s(t) + b_1 \frac{ds}{dt} = a_0 e(t) + a_1 \frac{de}{dt}$$

Après la TL :

$$T(p) = \frac{K}{1 + \tau p}$$

K : Le gain statique.

T : La constante de temps du système.[3]

#### I.7.1.1. Réponse à un échelon :

On applique un échelon d'amplitude  $E_0$ .  $E(p)$  à l'entrée de système, la sortie du système est :

$$S(p) = E(p).T(p) = \frac{K.E_0}{p(1 + \tau p)}$$



$$s(t) = K.E_0(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

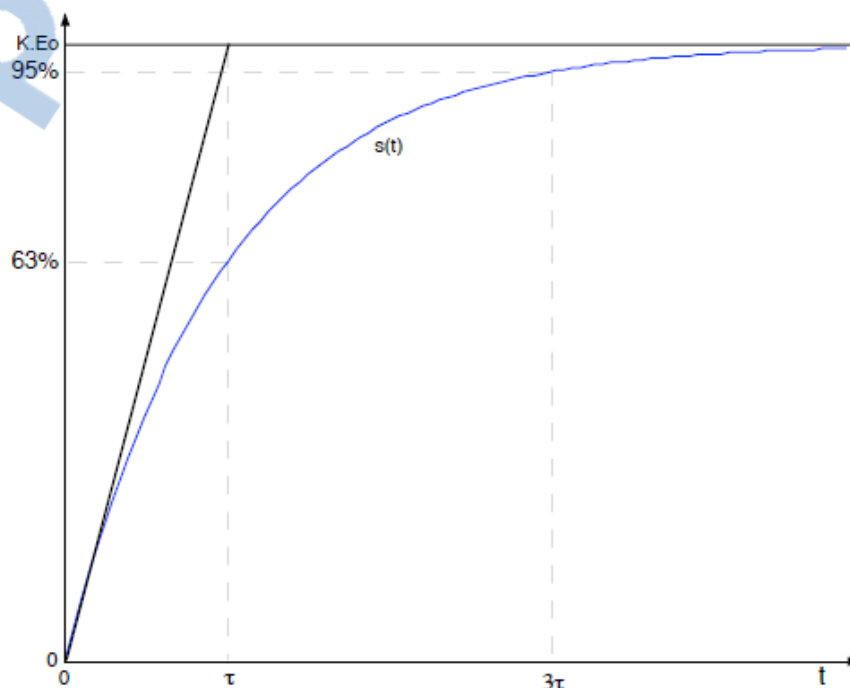


Figure .I.12 : Réponse échelon d'un système de 1<sup>er</sup> ordre.

### I.7.1.2. Réponse à une rampe :

La pente (a) est l'entrée sous forme :  $e(t)=atu(t)$ , sa TL est  $E(p) = \frac{a}{p^2}$  et la sortie donnée par l'équation suivante :

$$S(p) = \frac{K \cdot a}{\tau} \cdot \frac{1}{p^2(p + \frac{1}{\tau})}$$

$$\Rightarrow s(t) = k \cdot a \cdot (t - \tau) + k \cdot a \cdot \tau \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

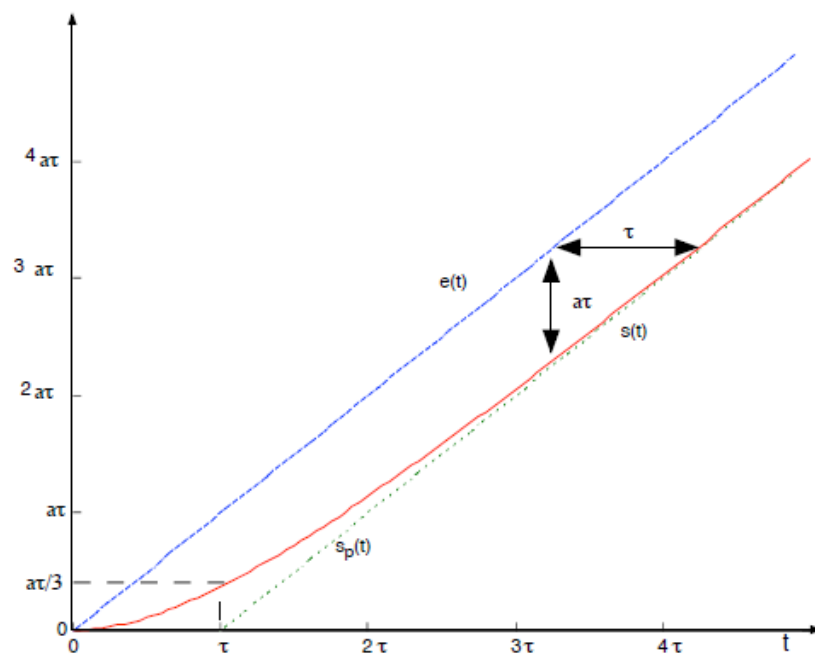


Figure .I.13 : Réponse rampe d'un système de 1<sup>ier</sup> ordre.

### I.7.1.3. Réponse à une impulsion :

L'entrée est donnée par  $e(t) = E_0 \cdot \delta(t)$ , sa TL  $E(p) = E_0$ . La sortie est :

$$S(p) = \frac{K \cdot E_0}{1 + \tau p}$$

$$\Rightarrow s(t) = \frac{K \cdot E_0}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

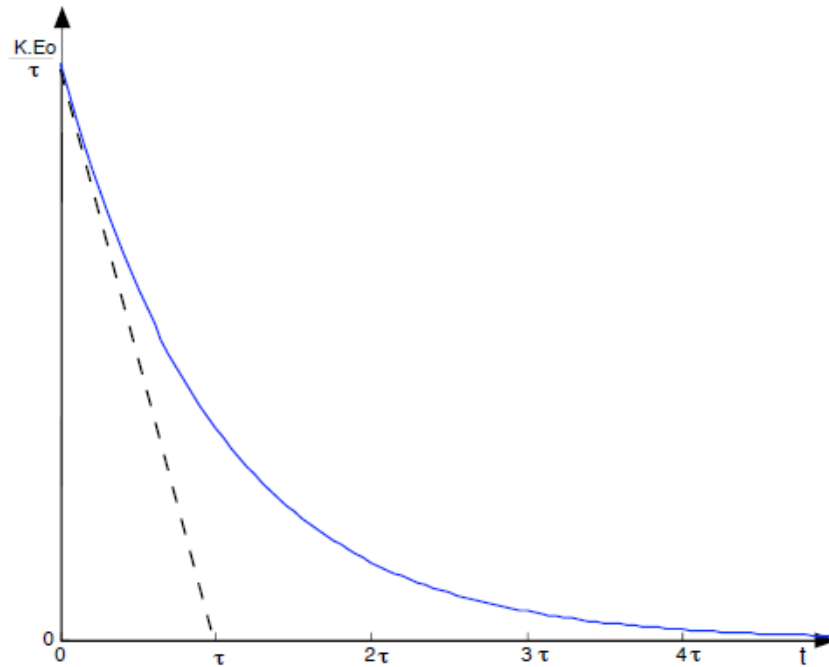


Figure .I.14 : Réponse impulsion d'un système de 1<sup>ier</sup> ordre.

### I.7.2. Réponse d'un système du second ordre :

L'équation générale d'un système du second ordre est :

$$b_2 \frac{d^2 s}{dt^2} + b_1 \frac{ds}{dt} + b_0 s(t) = a_2 \frac{d^2 e}{dt^2} + a_1 \frac{de}{dt} + a_0 e(t)$$

La fonction de transfert de ce système peut se mettre sous la forme :

$$T(p) = \frac{K}{1 + \frac{2zp}{w_n} + \frac{p^2}{w_n^2}}$$

K : Le gain statique de système.

$w_n$  : La pulsation naturelle (rd/s).

z : le coefficient d'amortissement.

#### I.7.2.1. Réponse à un échelon :

- $z > 1$  : Système à fort amortissement pour une entrée  $e(t) = E_0 u(t) \rightarrow E(p) = \frac{E_0}{p}$ , la sortie est donnée par :

LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



$$S(p) = \frac{K \cdot E_0 \cdot w_n^2}{p(p - p_1)(p - p_2)}$$

$$s(t) = K \cdot E_0 \left[ 1 - \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right] \cdot u(t)$$

Avec  $p_1 = -\frac{1}{\tau_1}$  et  $p_2 = -\frac{1}{\tau_2}$

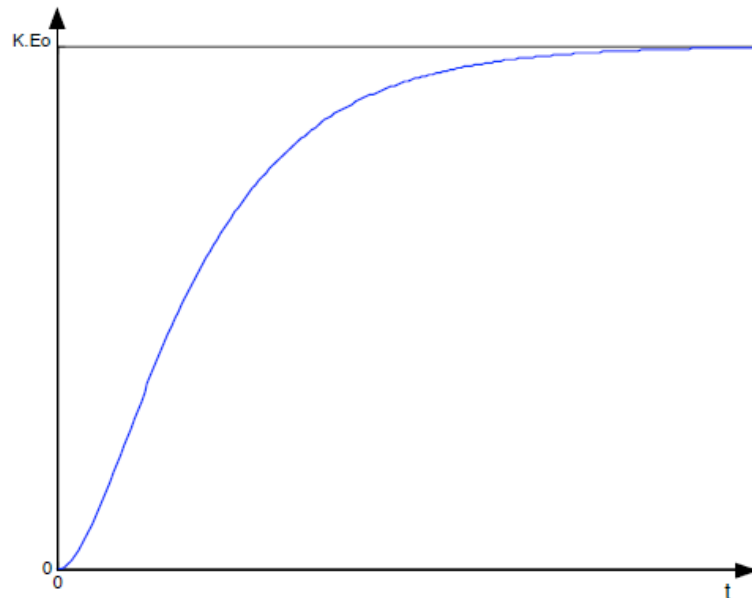


Figure .I.15 : Réponse échelon d'un système de 2<sup>ième</sup> ordre.

- $z=1$  : la fonction de la sortie est :

$$T(p) = \frac{K \cdot w_n^2}{(p + w_n)^2}$$

$$s(t) = K \cdot E_0 \left[ 1 - (1 + w_n t) e^{-\frac{t}{\tau_n}} \right] \cdot u(t)$$

- $z < 1$  : Système a faible amortissement, la réponse temporelle est :

$$s(t) = K \cdot E_0 \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - z^2}} e^{-z w_n t} \sin \left( w_n \sqrt{1 - z^2} t + \varphi \right) \right]$$

$$\text{Avec } \varphi = \frac{\sqrt{1 - z^2}}{z}$$

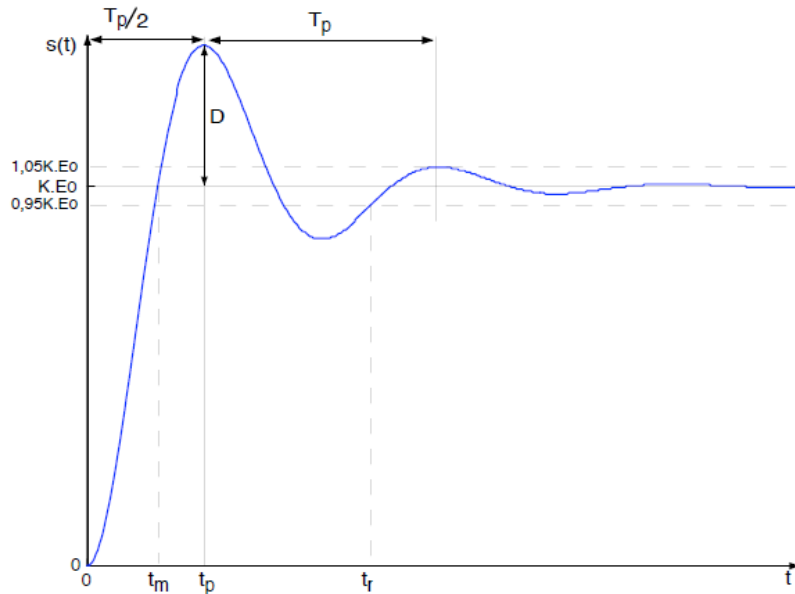


Figure .I.16 : Réponse échelon d'un système de 2<sup>ième</sup> ordre.

**I.7.2.2. Réponse à une rampe :**

L'entrée est une rampe de pente a.  $E(p) = \frac{a}{p^2}$ , on obtient a la sortie :

$$S(p) = \frac{Ka}{p^2(p^2 + 2zw_n p + w_n^2)}$$

- Pour  $z > 1$

$$s(t) = k.a \left[ t - \tau_1 - \tau_2 + \frac{\tau_1^2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} - \frac{\tau_2^2}{\tau_1 - \tau_2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right]$$

- Pour  $z < 1$

$$s(t) = k.a \left[ t - \frac{2z}{w_n} + \frac{e^{-\frac{zt}{\tau_n}}}{w_p} \cdot \sin(w_p t - \varphi) \right]$$

Avec  $\varphi = -2 \arctan \frac{\sqrt{1-z^2}}{z}$

Dans les deux cas :

- ✓ Le régime stationnaire est une droite de pente Ka.

Le régime transitoire est oscillant dans le cas de  $z < 1$ . [3]

**I.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre, j'ai présenté les principaux éléments des systèmes asservis en boucle ouverte et en boucle fermée.

# CHAPITRE II

## II.1 Introduction :

L'évolution des technologies conduit à utiliser des machines nécessitant des vitesses de rotation précises et variables pour l'entraînement d'engins industriels, systèmes robotique...etc.

Dans notre étude, on s'intéresse aux moteurs à courant continu, car ils offrent une introduction facile au fonctionnement de ses homologues, en donnant des repères clairs. Les moteurs à courant continu ont pendant longtemps été les seuls aptes à la vitesse variable à large bande passante, comme dans le domaine robotique. Ils ont donc fait l'objet de nombreuses améliorations, et beaucoup de produits commercialisés aujourd'hui.

## II.2 Description générale :

Le moteur à courant continu comporte trois parties principales :

- Le stator ("inducteur" 1) produit le champ magnétique ; on parle de flux d'excitation. Ce flux et ce champ sont orientés du pôle Nord vers le pôle Sud à l'extérieur de l'aimant.

Le champ magnétique est créé par un enroulement d'excitation alimenté en courant continu ("courant d'excitation") OU par des aimants permanents collés à l'intérieur du stator. Deux types de machines existent donc :

- La MCC à inducteur bobiné, et la MCC à aimants permanents.

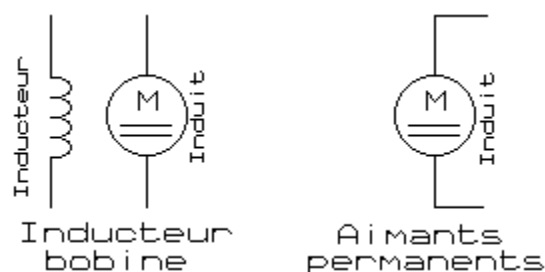


Figure .II.1 : Type de machine existe.

- Le rotor ("induit" 2) est formé d'un empilage de tôles magnétiques à faibles pertes et porte un bobinage solidaire de l'arbre. Ce bobinage est soumis au

couple moteur et entraîné en rotation dans le flux inducteur ; c'est donc la partie tournante du moteur.

- Le collecteur (3) est un ensemble de lames de cuivre où sont reliées les extrémités du bobinage de l'induit.
- Les balais (ou charbons 4) sont situés au stator et frottent sur le collecteur en rotation.
- Le dispositif collecteur / balais permet donc de faire circuler un courant dans l'induit.[4]

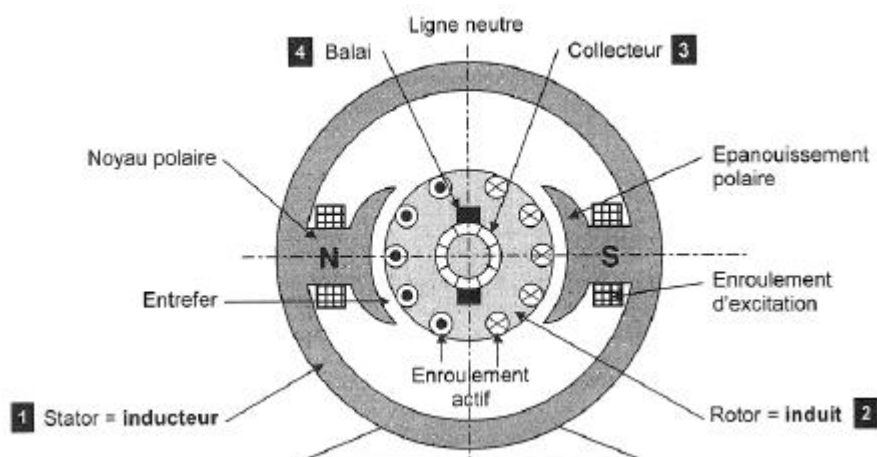


Figure .II.2 : Moteur à courant continu.

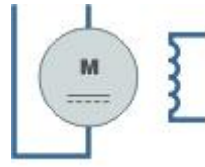
### II.3 Type de moteur à courant continu :

Suivant l'application, les bobinages du l'inducteur et de l'induit peuvent être connectés de manière différente. On retrouve en général : [5]

#### II.3.1. Des moteurs à excitation indépendante :

Ce mode d'excitation nécessite deux sources d'alimentations distinctes. L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale. On change le sens de rotation en permutant les bornes de l'induit ou de l'inducteur. Le circuit électrique est représenté par la suivante :

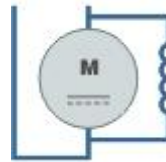




**Figure .II.3 :** Modélisation électrique d'un moteur à excitation indépendante.

### II.3.2. Des moteurs à excitation parallèle :

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



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

### II.3.3. Des moteurs à excitation série :

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



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

### II.3.4. Des moteurs à excitation 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).

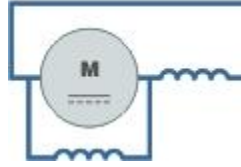


Figure .II.6 : Modélisation électrique d'un moteur à excitation composée.

### II.4 Schéma équivalent du moteur à courant continu :

Le moteur se comporte comme une résistance et une inductance en série avec un générateur de tension

**I** : Courant consommé par le moteur.

**U** : Tension d'alimentation du moteur.

**E** : Force électromotrice.

**R** : Résistance interne du bobinage.

**L** : L'inductance.

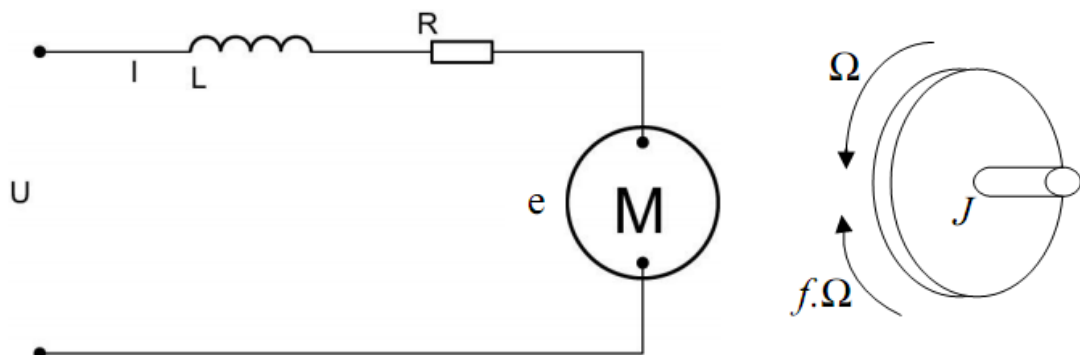


Figure .II.7 : Schéma équivalent d'un moteur à courant continu.

En réalité, l'inductance  $L$  dans le circuit que l'on peut négliger ici si le courant est en régime continu.

Un moteur électrique à courant continu est défini par les équations physiques concernant ces caractéristiques électriques, magnétiques et mécaniques.

D'après la loi de Newton et les lois Kirchhoff, on peut écrire les équations différentielles de premier ordre suivantes :

$$u(t) = Ri(t) + Li \frac{di(t)}{dt} + e(t) \quad (II.1)$$

$$e(t) = Ke\Omega(t) \quad (II.2)$$

D'après le principe fondamental de la dynamique :

$$C_u - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (II.3)$$

$$C_u = K_c i(t) - C_p$$

$$C_r = f\Omega(t)$$

$u(t)$  : Tension appliquée au moteur.

$C_u$  : Couple moteur généré.

$i(t)$  : Intensité traversant le moteur.

$C_r$  : Couple résistant.

$e(t)$  : Force contre électromotrice.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

$\Omega(t)$  : vitesse de rotation de moteur.

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

$K_e$  : Constante de vitesse.

$K_c$  : Constante de couple.

$C_p$  : Couple de pertes.

#### II.4.1. Fonction de transfert du moteur :

Après la transformée de Laplace :

$$U(p) = Ri(p) + Li(p) + E(p) \quad (II.4)$$

$$E(p) = K_e \Omega(p) \quad (II.5)$$

$$Jp\Omega(p) = C_u - C_r \quad (II.6)$$

En combinant (II.4) et (II.5) on obtient :

$$U(p) = Ri(p) + Lpi(p) + K_e \Omega(p)$$

En modifiant (II. 6) on a :

$$Jp\Omega(p) = K_c i(p) - C_p - f\Omega(p)$$

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

$$\Omega(p) = \frac{K_c i(p) - C_p}{f + Jp}$$

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

$$I(p) = \frac{f + Jp}{K_c} \left( \Omega(p) + \frac{C_p}{f + Jp} \right)$$

On l'injecte à présent dans (II. 4):

$$U(p) = \Omega(p) \left( \frac{(R+Lp)(f+Jp)}{K_c} + K_e \right) + \frac{R+Lp}{f+Jp} C_p$$

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 :

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

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] [7]

$$H(p) = \frac{\Omega(p)}{U(p)} = \frac{K_c}{(R + Lp)(f + Jp) + K_c K_e} \quad (II. 7)$$

Le modèle mathématique de la réponse en vitesse du moteur électrique qui est donné par la figure suivante :

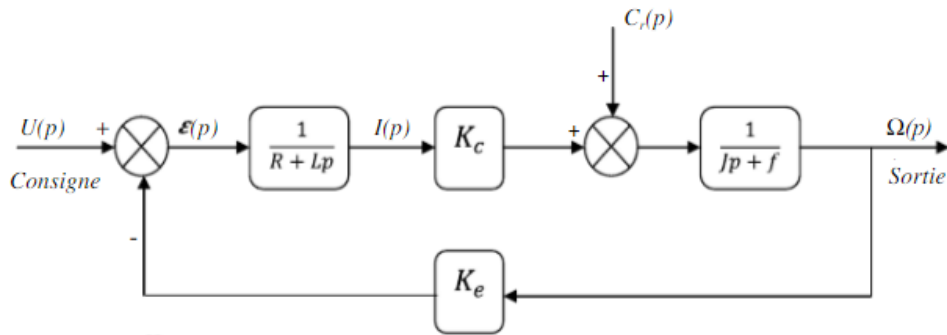


Figure .II.8 : Schéma bloc du Modèle de moteur électrique en vitesse.

#### II.4.2. Les équations caractéristiques du moteur à courant continu en régime statique :

D'après figure.II.7 :

$$U = E + RI$$

La tension fem est proportionnelle à la vitesse angulaire.

$$E = K \cdot \omega$$

**E** : fem(volts)

**K** : constante de moteur

**$\omega$**  : vitesse angulaire en **rad/s**

Le courant consommé par le moteur est directement lié au couple résistant sur l'arbre.

$$C = K \cdot I$$

**C** : couple en N.m

**K** : constante de moteur

**I** : courant (ampère)

#### II.5 Principe de fonctionnement :

Un conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force électromagnétique dont le sens est donné par règle des trois doigts de la main droite. ( $F = I * L / B$ ), F : Pouce, I: index et B: Majeur. Le rotor se met donc à tourner. Quand le conducteur arrive en Y (figure de gauche ci-dessus) il faut changer le sens de la force en inversant le courant dans le conducteur pour que le rotor continue à tourner : C'est le rôle du collecteur.



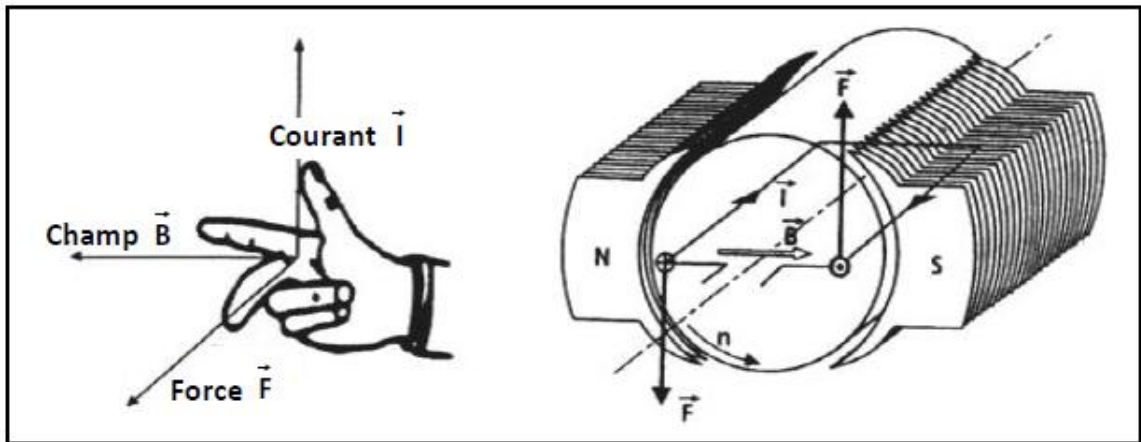


Figure .II.9 : Loi de Laplace.

Grâce au collecteur, bien que la tension appliquée soit continue, le courant dans une spire inversera sous l'axe de commutation et la rotation pourra être permanente. Schéma de droite : dans la position 1, le courant parcourt la spire dans le sens ABCD et dans le sens contraire pour la position 2, grâce au système de balai-collecteur. [8]

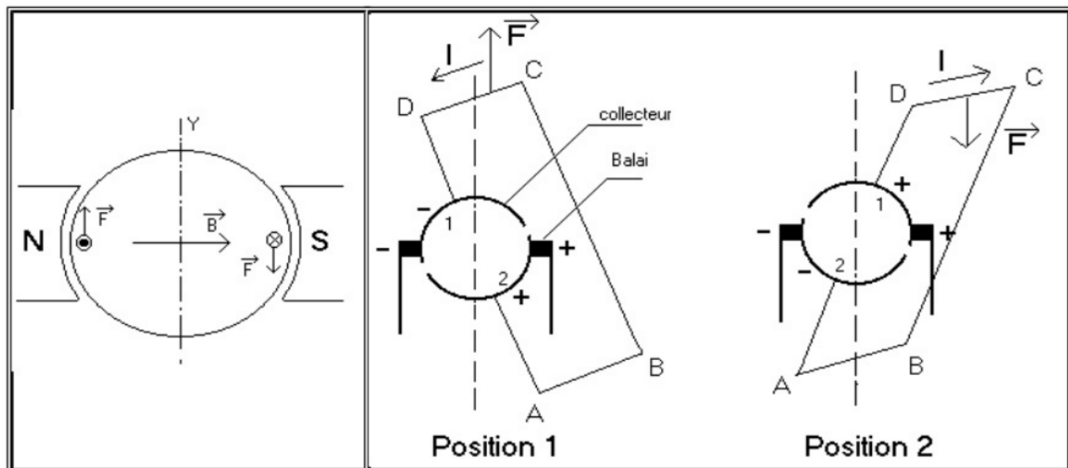


Figure .II.10 : Principe de fonctionnement d'un MCC

## II.6 Equations de fonctionnement :

### II.6.1. Force électromotrice :

Equation de la force électromotrice est : [8]

$$E = K.n.\phi$$

E : en volt(V).

K : constante de moteur.

n : vitesse de rotation en tours tr/s.

$\phi$  : flux magnétique.

✓ Si le flux d'excitation  $\phi = \text{cst}$ , on peut écrire :

$$E = K \cdot \omega$$

K : constante de moteur.

$\omega$  : vitesse angulaire rd/s

### II.6.2. Puissance utile (sur l'arbre en sortie) :

$$P_u = P_{em} - (\text{pertes mécaniques} + \text{pertes magnétiques}).$$

### II.6.3. Puissance absorbée (en entrée) :

$$P_{abs} = U \cdot I$$

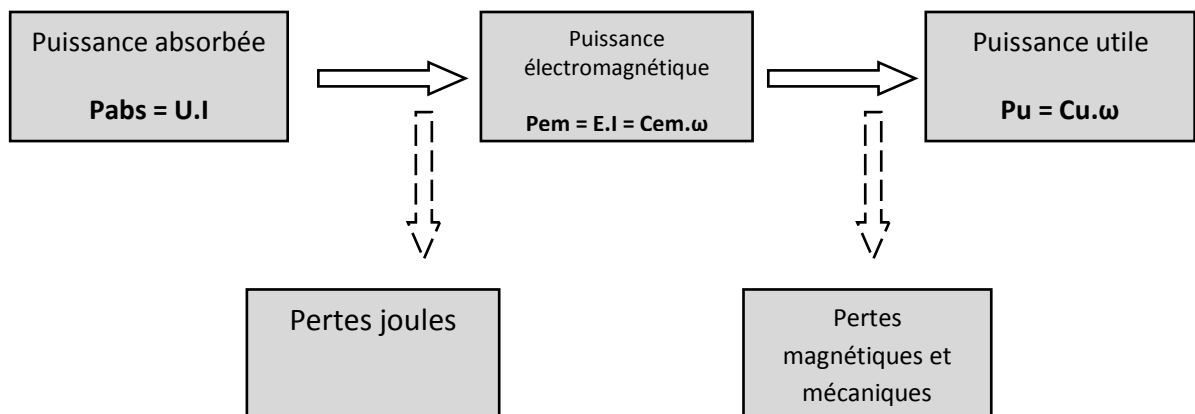
U : tension d'alimentation (V).

I : courant absorbé en ligne.

### II.6.4. Pertes :

Pertes par effet de joules ( $R \cdot I^2$ ), pertes magnétiques et pertes mécaniques. [8]

## II.7 Bilan des puissances pour un moteur :



## II.8 Conclusion :

Les moteurs à courant continu à excitation indépendante sont les plus utilisés dans l'automatique et la robotique, pour ces dimensions et sa non-influence de la charge sur la vitesse, ainsi que la simplicité de polarisation.

# CHAPITRE III



### III.1 Introduction :

La commande PI est dite aussi (correcteur, régulateur), se compose de deux termes P et D, d'où le 'P' correspond au terme proportionnel et 'I' pour terme intégral de la commande. Les régulateurs PI sont probablement les plus largement utilisés dans le contrôle industriel.

Le régulateur PI est une simple implémentation de retour d'information. Il a la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégrale.

### III.2 Commande proportionnelle (P) :

#### III.2.1. Principe :

La commande de type 'Proportionnelle' est la plus simple qui soit. Il s'agit d'appliquer une correction proportionnelle à l'erreur corrigeant de manière instantanée, c'est-à-dire, lorsque le signal de commande est proportionnel au signal d'erreur:

$$U(t) = K_p \cdot e(t) \quad \text{T.L.} \implies U(p) = K_p \cdot e(p)$$

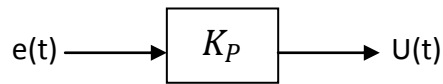
#### III.2.2. Fonctionnement :

Son rôle est d'amplifier l'erreur pour que le système réagisse plus vivement, comme si l'erreur était plus grande qu'elle ne l'est en réalité.

Il permet de vaincre les grandes inerties du système et diminue le temps de montée en donnant de la puissance au moteur (plus l'erreur est grande, plus on donne de puissance au moteur). Lorsque l'on augmente le gain ' $K_p$ ', le système réagit plus vite et l'erreur statique s'en trouve améliorée, mais en contrepartie le système perd la stabilité. Le dépassement se fait de plus en plus grand, et le système peut même diverger dans le cas d'un ' $K_p$ ' démesuré, sa fonction de transfert : [9]

$$G_C(S) = \frac{U(S)}{E(S)} = K_P$$

III.2.3. Schéma fonctionnel de régulateur P :



III.2.4. Réponse indicielle de régulateur P :

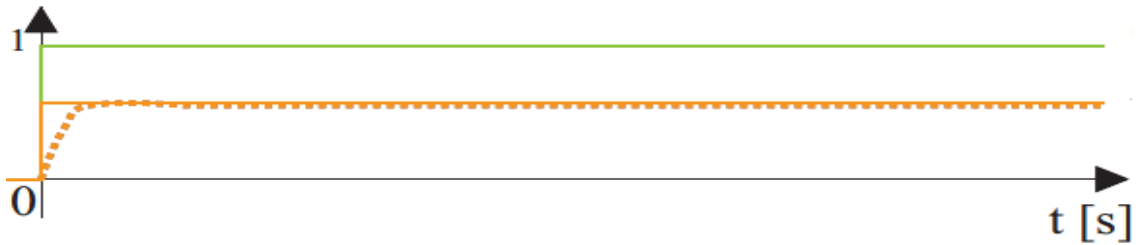


Figure .III.1 : Réponse indicielle de régulateur P.

$e(t)=\varepsilon(t)$

$U(t)=K_p \cdot e(t)$

III.2.5. Réponse harmonique du régulateur P :

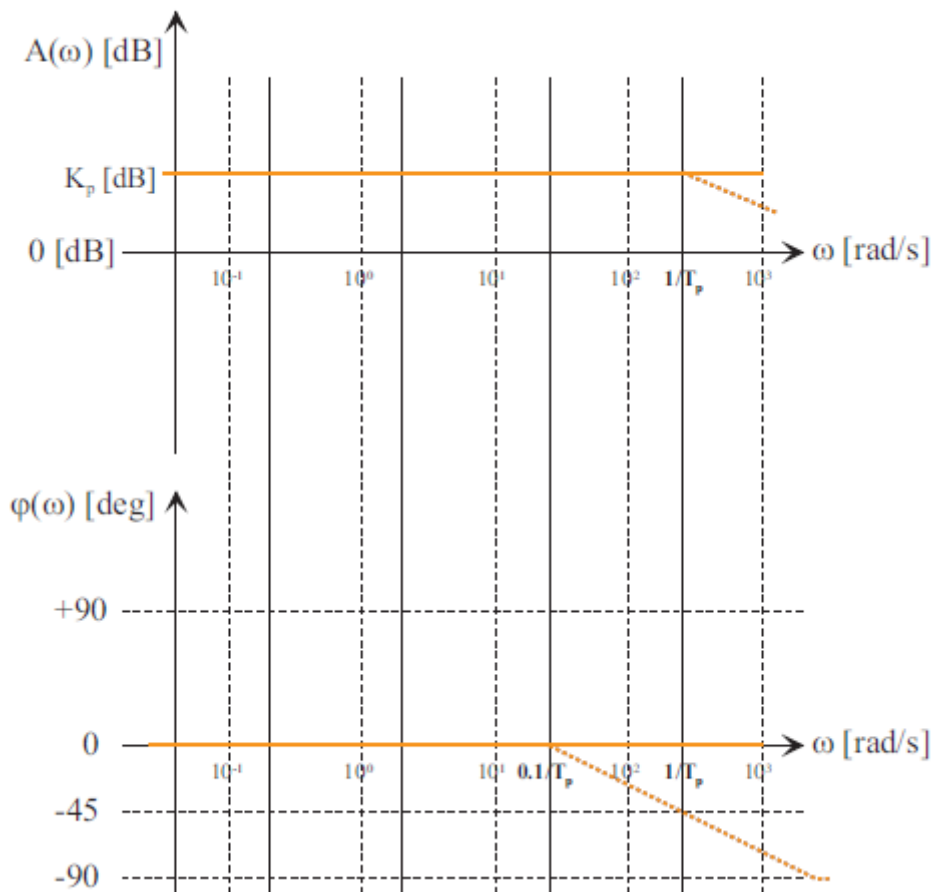


Figure .III.2 : Réponse harmonique du régulateur P.

### III.2.6. Schéma électronique de commande P :

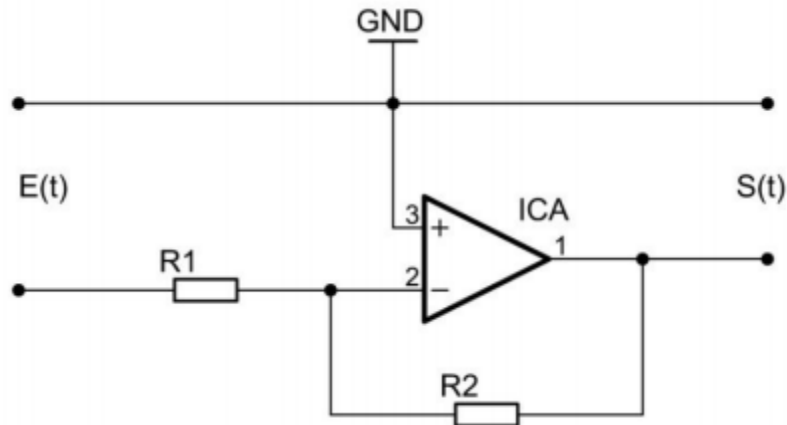


Figure .III.3 : Schéma électronique de régulateur P.

$$G_C(S) = \frac{U(s)}{E(s)} = -\frac{R_2}{R_1} = K_P$$

### III.2.7. Effet de régulateur proportionnel :

- Diminution du temps de montée.
- Diminution de l'erreur statique.
- Augmentation du temps de stabilisation.
- Augmentation du dépassement.

## III.3 Commande proportionnelle-intégrale (PI) :

### III.3.1. Principe :

Le correcteur de type PI est une régulation de type P auquel on a ajouté un terme intégral, il élabore alors une commande qui peut être donnée par la relation suivante:

$$U(t) = K_P \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_{-\infty}^t e(t) \cdot dt)$$

En appliquant le transformeur de Laplace, l'équation devient :

$$U(p) = K_p \cdot e(p) + K_i \cdot \frac{de(p)}{p}$$

### III.3.2. Fonctionnement :

Le terme intégral complète l'action proportionnelle puisqu'il permet de compenser l'erreur statique et d'augmenter la précision en régime permanent. L'idée est d'intégrer l'erreur depuis le début et d'ajouter cette erreur à la consigne, lorsque l'on se rapproche de la valeur demandée, l'erreur devient de plus en plus faible. Le terme proportionnel n'agit plus mais le terme intégral subsiste et reste stable, ce qui maintient le moteur à la valeur demandée.

L'intégrale agissant comme un filtre sur le signal intégré, elle permet de diminuer l'impact des perturbations (bruit, parasites), et il en résulte alors un système plus stable. [9]

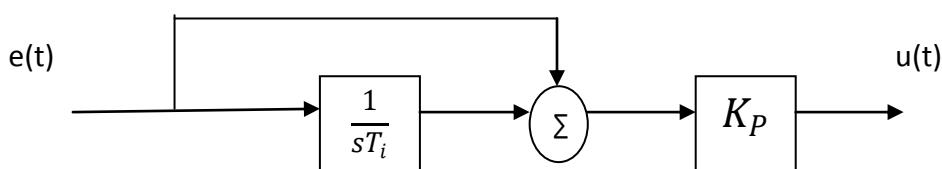
Avec sa fonction de transfert :

$$G_C = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \frac{1 + s \cdot T_i}{s \cdot T_i}$$

Il permet aussi d'un effet de :

- ✓ L'introduction d'un intégrateur.
- ✓ Gain en basse fréquences ( $\omega \ll \frac{1}{T_i}$ ) infini  $\iff$  erreur statique nulle :  $\frac{1}{T_i} \ll \omega_{c0}$ .
- ✓ Le gain du système corrigé ne sera pas modifié en hautes fréquences si :  $\frac{1}{T_i} \ll \omega_{c0}$ .
- ✓ La marge de phase n'est pas modifiée si :  $\frac{1}{T_i} \ll \omega_{c0}$ .

### III.3.3. Schéma fonctionnel de régulateur PI :



III.3.4. Réponse indicielle de régulateur PI :

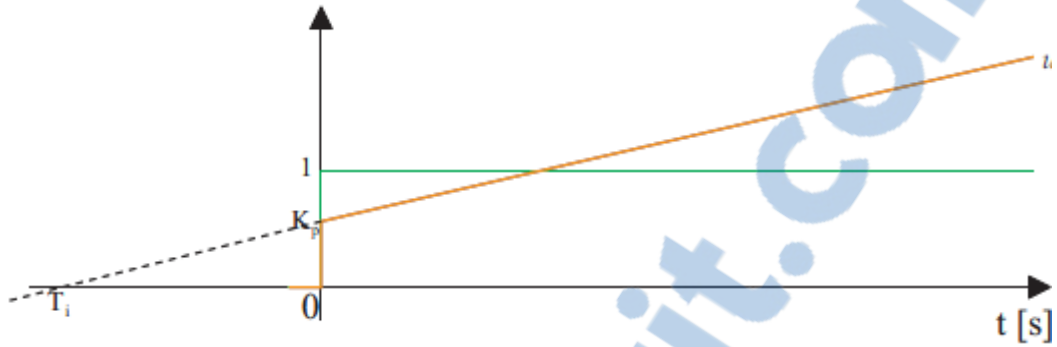


Figure .III.4 : Réponse indicielle de régulateur PI.

$$e(t) = \varepsilon(t)$$

$$U(t) = K_p \cdot (e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_{-\infty}^t e(t) \cdot dt)$$

III.3.5. Réponse harmonique de régulateur PI :

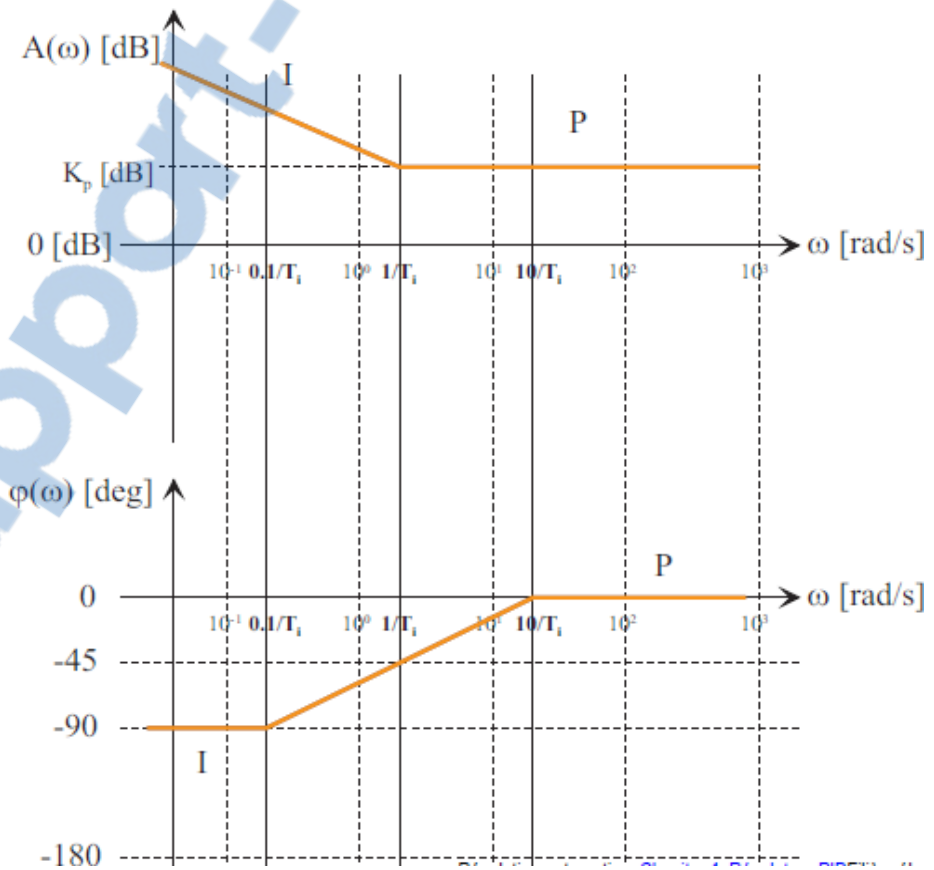


Figure .III.5 : Réponse harmonique de régulateur PI.

### III.3.6. Schéma électronique de commande PI :

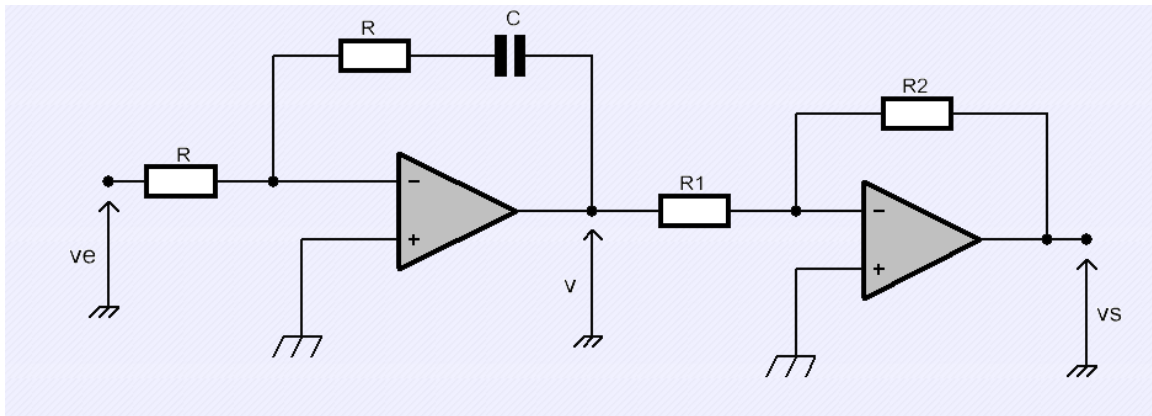


Figure .III.6 : Schéma électronique de régulateur PI.

Ce montage est une réalisation électrique possible d'un correcteur **PI** (proportionnel intégral) synthétisé par les méthodes de l'automatique. [10]

La forme dans l'espace de Laplace d'un tel correcteur est :

$$G_C = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \cdot \frac{1 + s \cdot T_i}{s \cdot T_i}$$

Déterminons la transmittance de tension de cette ensemble, ou autrement dit la fonction de transfert entre la sortie et l'entrée. Pour cela, remarquons que chaque AOP constitue un montage amplificateur inverseur et considérons les impédances complexes de chaque élément:

$$V = -V_e \cdot \frac{R + \frac{1}{jCw}}{R} = -V_e \frac{1 + jRCw}{jRCw}$$

$$V_s = -V_e \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + jRCw}{jRCw}$$

Si  $p=jw$

Alors

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + RCp}{RCp}$$

$$K_p = \frac{R_2}{R_1}$$

$$T_i = R \cdot C$$

La fonction de transfert finale est donc bien identique à la forme d'un correcteur **PI**. Les valeurs de **RC** et de **Kp** dépendent du système à corriger.

### III.3.7. Effets de commande Proportionnel-Intégral :

- Diminution du temps de montée.
- Elimination de l'erreur statique.
- Augmentation du temps de stabilisation.
- Augmentation du dépassement.

### III.4 La commande PI en régulation de vitesse :

La commande proportionnel-intégral (PI) est insérée dans la chaîne directe de l'asservissement, en série avec le processus. Ce régulateur élabore à partir du signal d'erreur  $e(t)$  une commande  $U(t)$  en fonction de trois actions proportionnelle, intégrale.

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^T e(t) \cdot dt$$

$$U(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^T e(t) \cdot dt$$

$$U(p) = K_p \cdot e(p) + K_i \cdot \frac{de(p)}{p}$$

$K_p$ : Gain d'action proportionnelle.

$K_i = \frac{1}{T_i}$ : Gain d'action intégrale.

$T_i$ : Constante de temps (temps d'action intégrale).

Le régulateur PI est donc conçu dans le domaine temporel comme la somme des deux actions. On obtient alors un asservissement composée d'un terme proportionnel et d'un terme intégral, mises en parallèle, on parle d'asservissement PI : [7] [9]

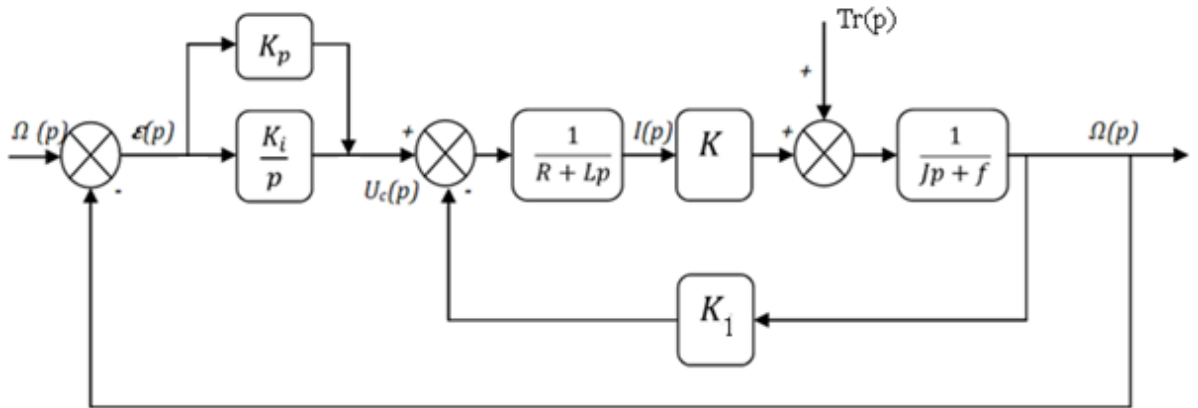


Figure .III.7 : Schéma bloc de régulateur PI.

Dans la figure suivante, il sera présenté le graphe d'une régulation en vitesse (figure .III.8).

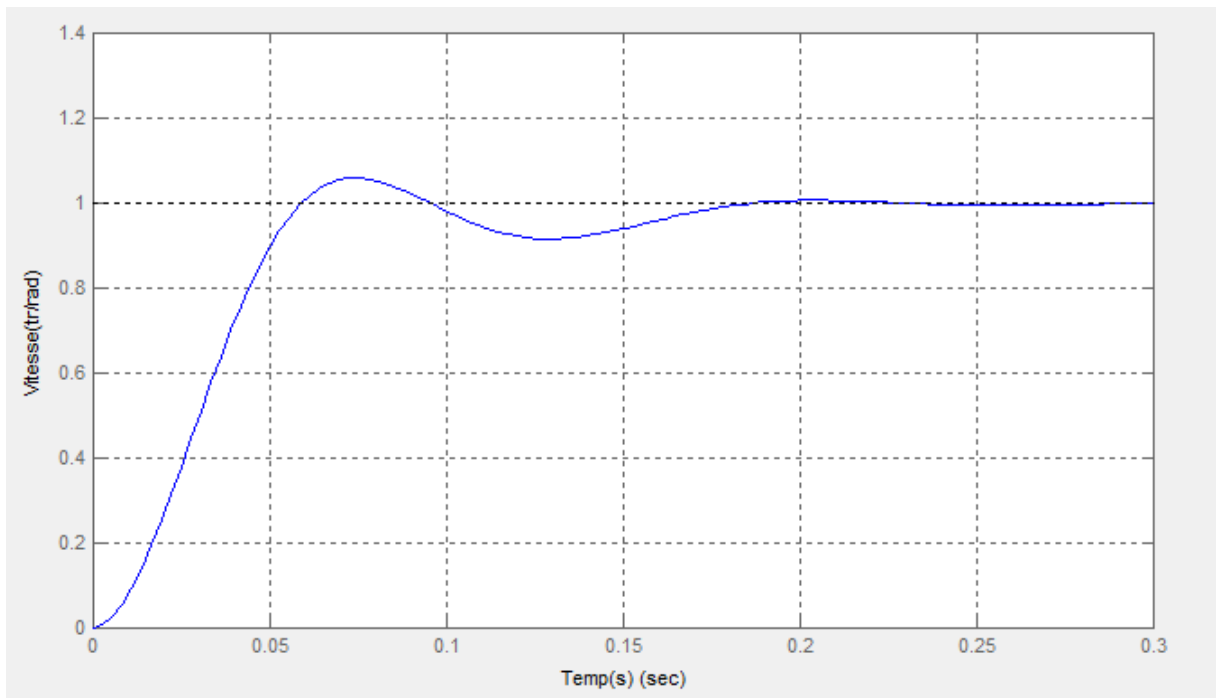


Figure .III.8 : Modélisation sous Matlab du correcteur PI en régulation de vitesse.



<b>Dépacement</b>	<b>1.05</b>
<b>Temps de réponse à 5%</b>	<b>0.18(s)</b>

**Tableau.III.1** : caractéristique de la réponse PI en régulation de vitesse.

### III.5.Conclusion :

Les deux actions du régulateur PI permettent de commander le moteur électrique à courant continu, tout en garantissant une annulation de l'erreur permanente de la sortie régulée, vis-à-vis d'échelons en entrée de consigne. Le correcteur PI réalise une action intégrale (augmentation du gain en basses fréquences) sans introduire d'intégrateur et réalise aussi une action proportionnelle (augmentation de rapidité). Un des intérêts du régulateur PI, qui explique sa popularité dans le milieu industriel, est sans conteste la possibilité de le régler sans connaissance approfondie du système.

# CHAPITRE IV

## IV.1 Introduction :

Les boucles à verrouillage de phase (**PLL** en anglais pour **Phase Locked Loop**) sont des circuits intégrés très utilisés en électronique. Le principe de la PLL a été étudié en 1932, par Henri De BELLISCISE un ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité (invention française). Il s'agit donc comme leur nom l'indique d'un asservissement de phase dont le rôle est d'asservir la phase d'un oscillateur local à celle d'un signal extérieur. Les boucles à verrouillage de phase sont au cœur de nombreux matériels électroniques : synthétiseurs de fréquence, récepteurs de télévision, téléphones cellulaires,...

## IV.2 Principe de fonctionnement de la PLL :

La boucle à verrouillage de phase est un asservissement de phase ou de fréquence qui asservit la fréquence d'un oscillateur commandé en tension VCO ou un signal injecté à l'entrée. [11]

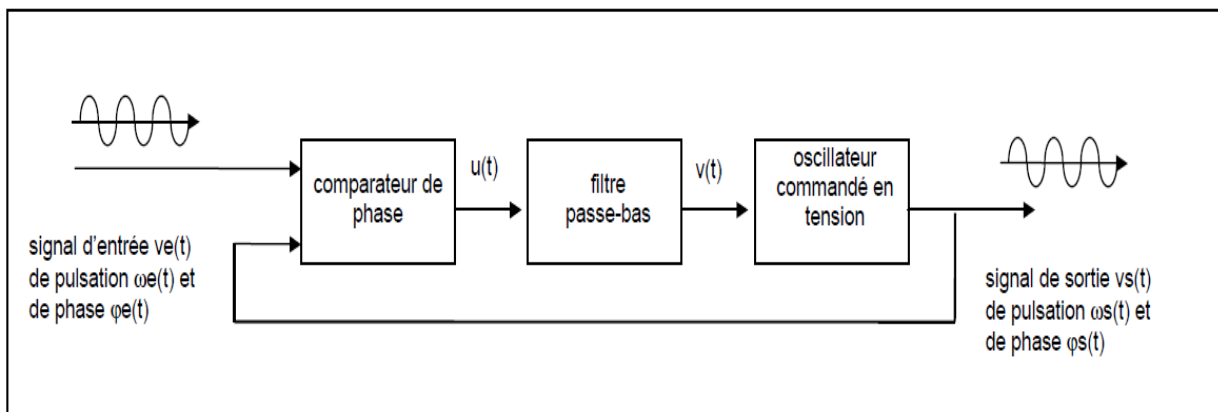


Figure. IV.1 : Structure de base de la boucle à verrouillage à phase

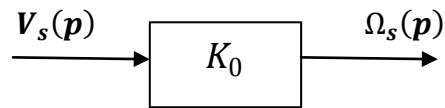
### IV.2.1. Éléments d'une PLL :

Une boucle à verrouillage de phase est constituée de 3 éléments fondamentaux :

- Un oscillateur contrôlé en tension VCO (voltage controlled oscillator).
- Un comparateur de phase.
- Un filtre passe-bas.

#### IV.2.1.1. L'oscillateur contrôlé en tension VCO :

C'est le cœur de PLL, il fournit un signal périodique ou carré dont la fréquence instantanée  $f_s(t)$  qui dépend à la tension appliquée sur son entrée  $v(t)$ .



$$\Delta\omega_s(t) = K_0\Delta V_s(t)$$

$$\Omega_s(p) = K_0V_s(p)$$

$K_0$  : Constante de VCO.

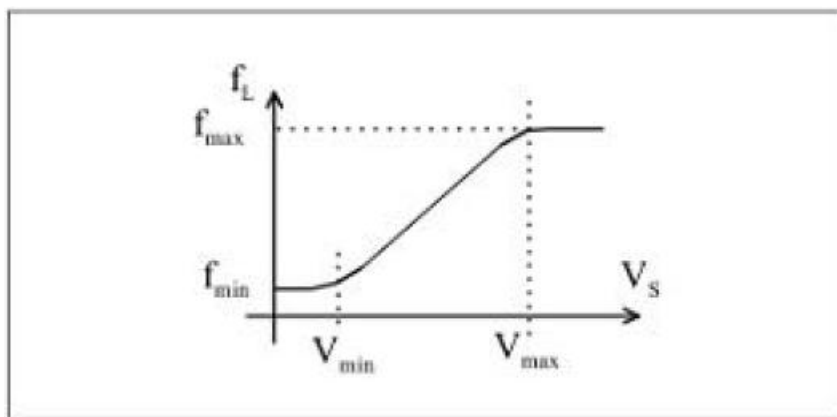
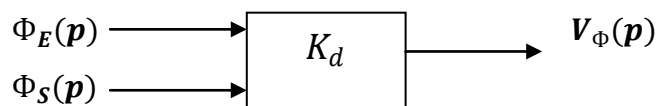


Figure .IV.2 : Allure de caractéristique de VCO

#### IV.2.1.2. Le comparateur de phase :

Il élabore une tension  $U(t)$  dépend à l'écart de phase entre les deux signaux d'entrée et de sortie, sa fonction de transfert est : [11]



$$V_\phi(p) = K_d[\Phi_E(p) - \Phi_S(p)]$$

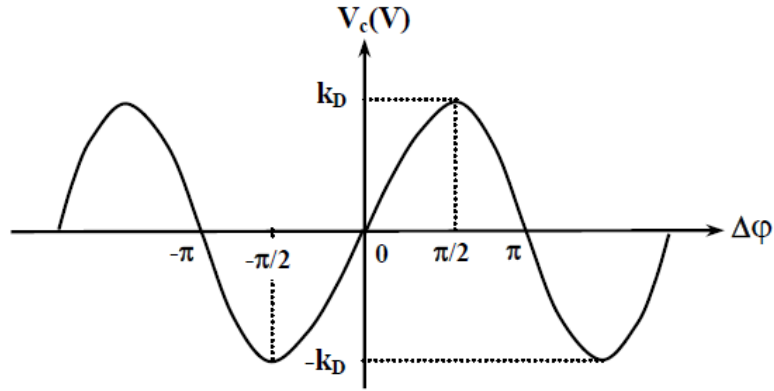


Figure .IV.3 : Caractéristique de comparateur

#### IV.2.1.3. Le filtre passe-bas :

Il assure le filtrage de signal et garde la valeur moyenne de la tension  $U(t)$  en supprimant les harmoniques.

##### IV.2.1.3.1. Filtre passe-bas passif (RC) :

Ce type de filtre est simple et utilisé lorsque le temps de réponse n'est pas critique.

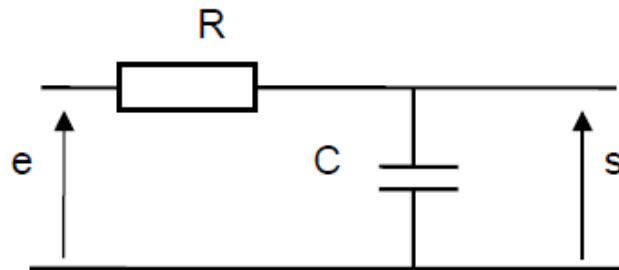


Figure .IV.4 : Filtre RC.

$$F(p) = \frac{1}{1 + \tau p}$$

Avec  $\tau = R.C$

##### IV.2.1.3.2. Filtre passe-bas actif :

On utilise souvent dans les PLL un filtre passe-bas actif particulier qui introduit une intégration supplémentaire, ce qui augmente la classe du système et améliore donc sa précision. [11]

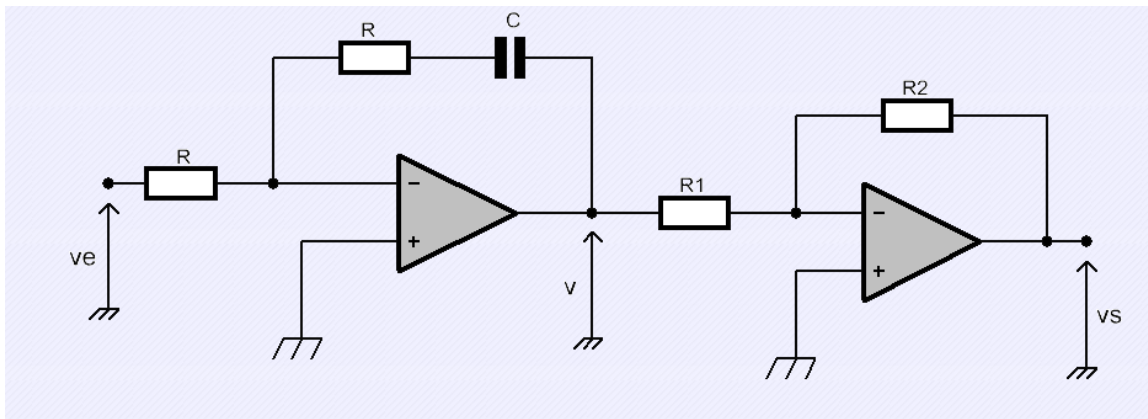


Figure .IV.5 : Filtre actif.

$$F(p) = \frac{1 + \tau_2 p}{\tau_1 p}$$

Avec  $\tau_1 = R_1 C$  et  $\tau_2 = R_2 C$

#### IV.2.2. Fonctionnement d'une PLL :

Une PLL fonctionne comme :

- ✓ La boucle est dite non verrouillée et  $f_0 = f_s$ , si la fréquence de signal injecté est en dehors de la plage de fonctionnement du VCO, ou en l'absence de signal injecté à l'entrée de la boucle.
- ✓ En présence d'un signal à l'entrée de la boucle de fréquence  $f_e$  voisin de  $f_0$ , la PLL se verrouille et on aboutit au bout d'un temps bref (quelques ms en général) à un état stable caractérisé par  $f_s = f_e$ .
- ✓ Une fois la boucle est verrouillée ou accrochée, la fréquence  $f_e$  d'entrée peut varier dans la plage de verrouillage sans que cette boucle ne décroche et on a toujours  $f_s = f_e$ . Il existe par contre un écart de phase permettant de générer la tension de commande du VCO afin que celui-ci puisse osciller à une fréquence différente de la fréquence libre  $f_0$ .
- ✓ Si la fréquence d'entrée sort de la plage de verrouillage, la boucle décroche et on revient à la situation d'une boucle non verrouillée. Pour raccrocher la boucle, il faut alors revenir au voisinage de  $f_0$  et pénétrer dans la plage de capture. [11] [12]

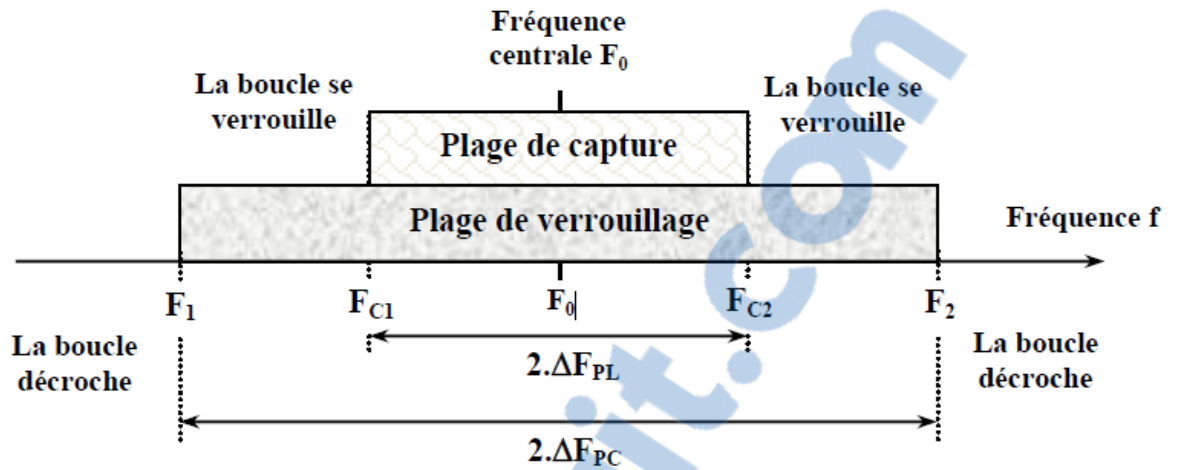


Figure .IV.6 : Les plages de capture et de verrouillage.

#### IV.2.2.1. Plage de capture :

Correspond à l'écart de fréquence entre la fréquence libre et la fréquence à partir de laquelle la PLL se verrouille. La plage de capture dépend de la fréquence de coupure du filtre passe bas.

#### IV.2.2.2. Plage de verrouillage :

Correspond à l'écart de fréquence entre la fréquence libre et la fréquence à partir de laquelle la PLL se déverrouille. La plage de verrouillage dépend de la caractéristique du VCO, en particulier de l'étendue du domaine linéaire, c'est-à-dire  $f_{max} - f_{min}$ . [13]

#### IV.2.2.3. Diagramme de changement d'état :

Lorsque la boucle n'est pas verrouillée, la fréquence  $f_s$  en sortie de VCO est la fréquence  $f_0$ , pour passer à l'état verrouiller en agissant sur la fréquence d'entrée  $f_e$ . Le verrouillage se produit à cause de l'écart  $|f_s - f_0|$ . Cet état est obtenu car la fréquence  $f_e$  se situe à l'intérieur de la plage de capture  $\Delta f_c$ .

Le diagramme ci-dessous présente le changement de  $f_s$  en fonction de  $f_e$ :

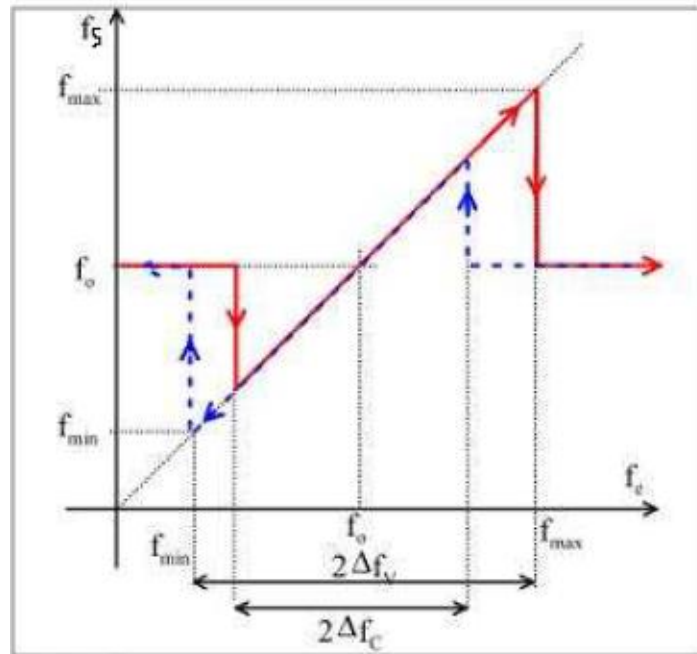


Figure .IV.7 : Diagramme de plage de capture et verrouillage.

Si on suppose que la boucle n'est pas verrouillée donc  $f_s = f_0 \neq f_e$  dans ce cas le VCO oscille sa fréquence  $f_0$ .

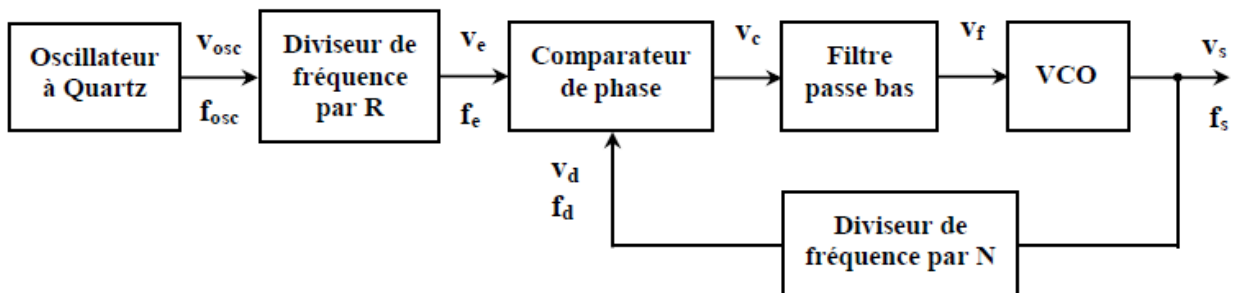
Lorsque on diminue la différence  $|f_s - f_0|$ , l'écart devient plus petit que la gamme de capture  $\Delta f_c$  et la boucle de verrouille.[13]

### IV.3 Les applications de PLL :

Une PLL peut avoir beaucoup d'utilités comme :

#### IV.3.1. Synthétiseur de fréquence :

Le schéma de principe d'un synthétiseur est donné sur la figure(...), il permet de produire, à partir d'un oscillateur à quartz de référence.



R Figure .IV.8 : Synthétiseur de fréquence à PLL.



Le second diviseur de fréquence par  $R$  en cascade avec l'oscillateur de référence, permet d'obtenir le "pas"  $f_e = \frac{f_{osc}}{R}$ , c'est à dire la variation élémentaire de fréquence que l'on pourra obtenir pour la sortie.

Lorsque la boucle verrouillée les fréquences  $f_e$  et  $f_d$  sont identiques, sachant que :

$$f_e = \frac{f_{osc}}{R} \quad \text{Et} \quad f_d = \frac{f_s}{N}$$

$$\text{On déduit : } f_s = \left(\frac{f_{osc}}{R}\right) \cdot N$$

On obtient une fréquence de sortie  $f_s$  qui est multiple du "pas" par un nombre entier  $N$ , et située dans la plage de travail du VCO. [12]

### IV.3.2. Modulation et démodulation de fréquence :

La modulation de fréquence peut être effectuée par une boucle à verrouillage de phase comme suit :

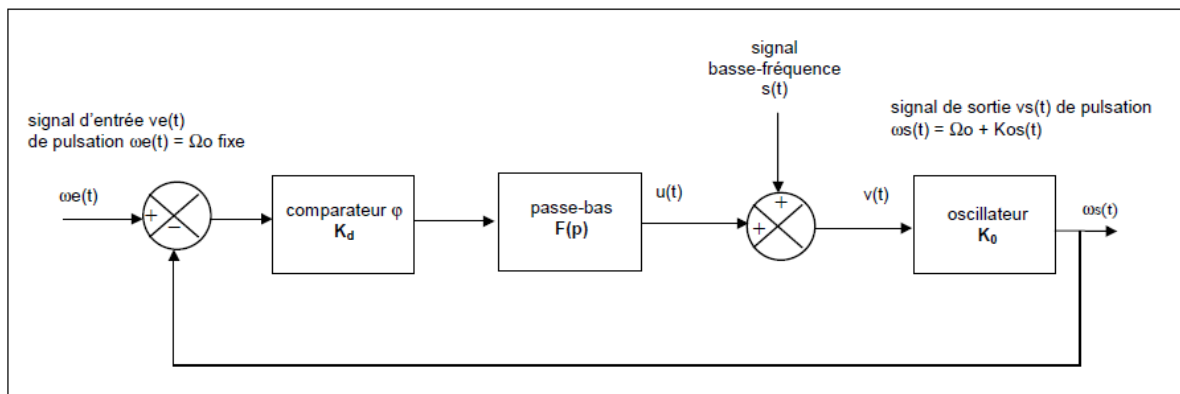


Figure. IV.9 : Modulation de fréquence à PLL.

La PLL est accrochée sur un oscillateur de quartz qui permet de fournir un signal de fréquence  $f_0$ , le signal modulant est superposé au signal de commande  $V$  à l'entrée de VCO.

La démodulation de fréquence peut aussi se réaliser à l'aide de PLL, la sortie de cette structure se trouve à l'entrée de VCO. [12]

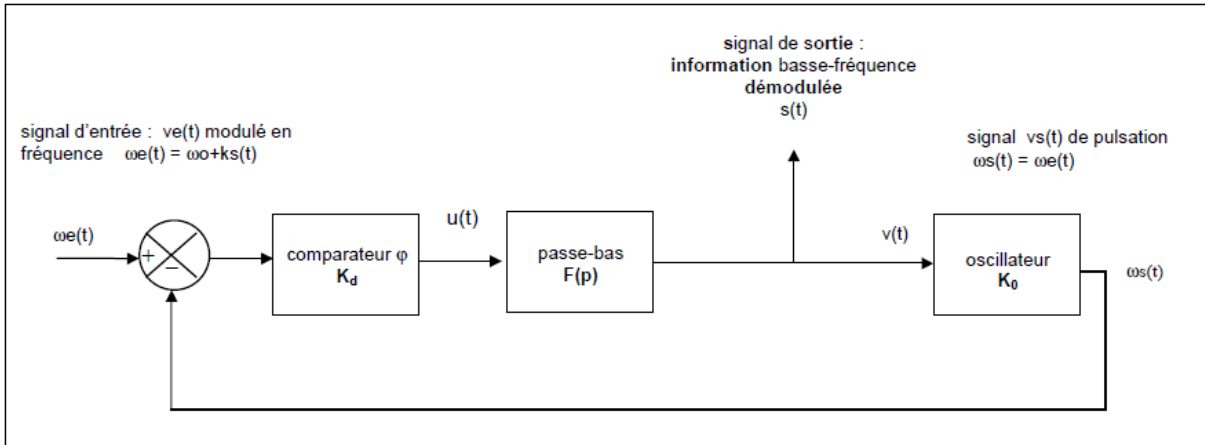


Figure .IV.10 : Démodulation de fréquence à PLL.

La fréquence de sortie suit donc d'assez près la fréquence d'entrée, et la tension à l'entrée du VCO variera donc comme la fréquence. On récupère donc à l'entrée du VCO une image assez fidèle du signal modulant.

**IV.3.3. Contrôle de la vitesse de rotation d'un moteur :**

La vitesse de rotation d'un moteur peut être contrôlée au moyen d'une boucle à verrouillage de phase, le schéma de principe est donné à la Figure .IV.12.

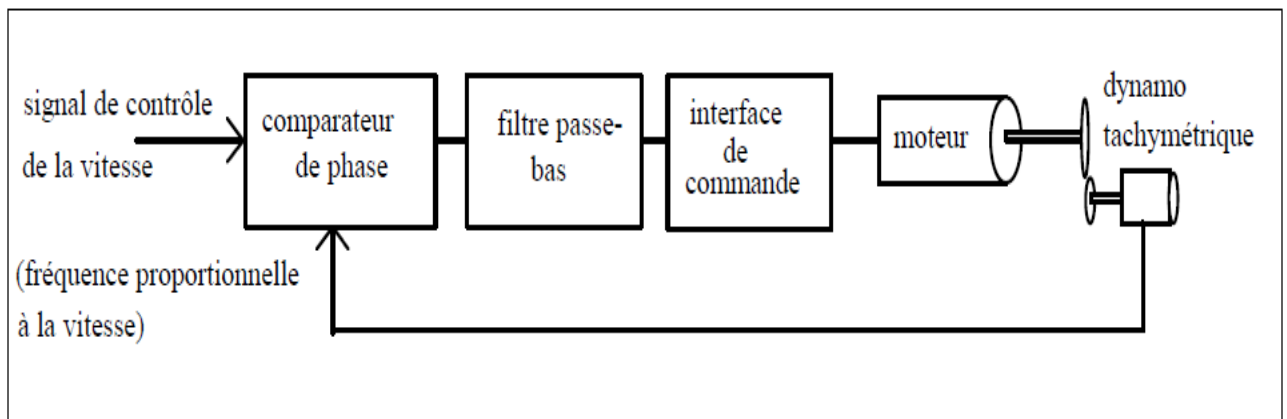


Figure IV.11 : Contrôle de vitesse par PLL.

La fréquence  $f_t$  du signal en sortie de la dynamo tachymétrique est proportionnelle à la vitesse de rotation  $V_m$  du moteur  $f_t = KV_m$ . En régime stationnaire, la fréquence  $f_t$  est égale à la fréquence  $f_e$  du signal de contrôle :  $f_t = f_e$  d'où  $V_m = \frac{f_e}{k}$ .

La vitesse de rotation du moteur est directement proportionnelle à la fréquence  $f_e$ . [12]

#### IV.4. Simulation sur Proteus et réalisation pratique :

Le schéma ci-dessous représente un circuit de contrôle de vitesse d'un moteur à courant continu à base de PLL(CD4046) :

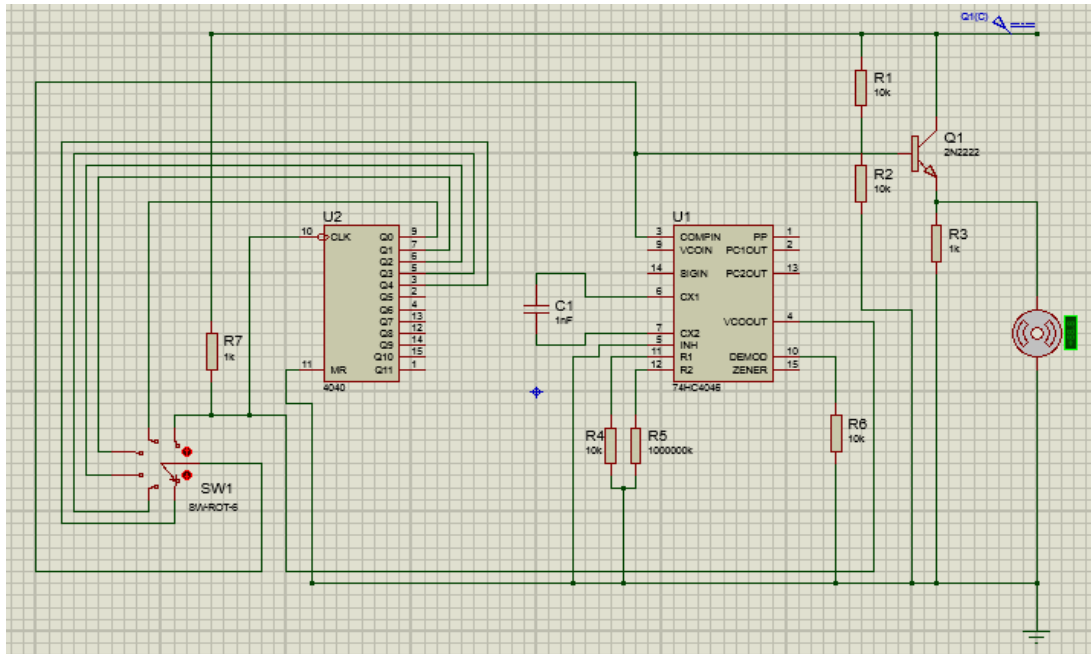


Figure .IV.12 : Schéma électrique de contrôle de vitesse d'un moteur à CC.

##### IV.4.1. Fonctionnement :

Dans cette configuration, la PLL(CD4046) délivre un signal carré modulé par le VCO à partir de broche 4.

Ce signal parvient au diviseur de fréquence CD4040, qui sert à diviser le signal. Cette opération est commandée à partir d'un switch de 6 positions (voir figure .IV.14).

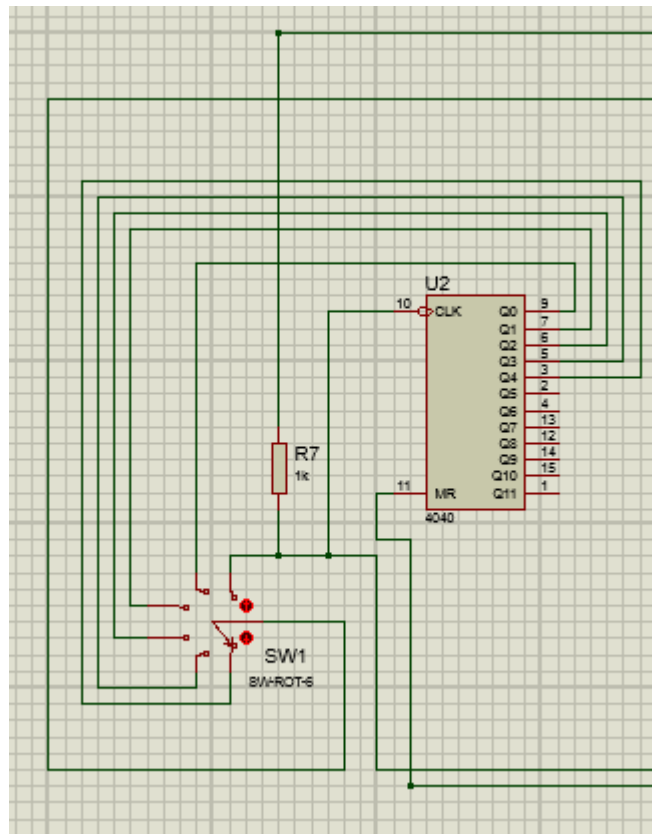


Figure .IV.13 : Schéma de diviseur de fréquence et le switch.

Voici ci-dessous un tableau qui montre les 6 positions :

Position	Division
1	1
2	2
3	4
4	8
5	16
6	32

Tableau .IV.1 : Six positions de switch.

Ce signal après être divisé atteint un étage amplificateur à base d'un transistor bipolaire NPN monté en collecteur commun qui sert à amplifier le courant qui fait tourner le moteur.

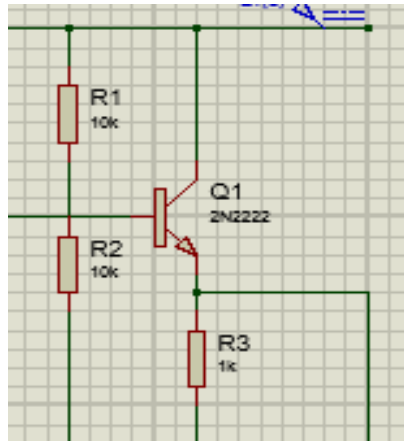


Figure .IV.14 : Etage amplificateur.

#### IV.5. Conclusion :

Dans ce chapitre j'ai donné d'abord le schéma fonctionnel et les applications de la boucle de verrouillage à phase(PLL), en suite la réalisation la pratique et fonctionnement de circuit de contrôle de vitesse d'un moteur à courant continu

# **TRAVAUX PRATIQUE**

**Objectif :**

Le but de ce TP est l'étude des principales caractéristiques d'un composant très utile :  
La boucle à verrouillage de phase.

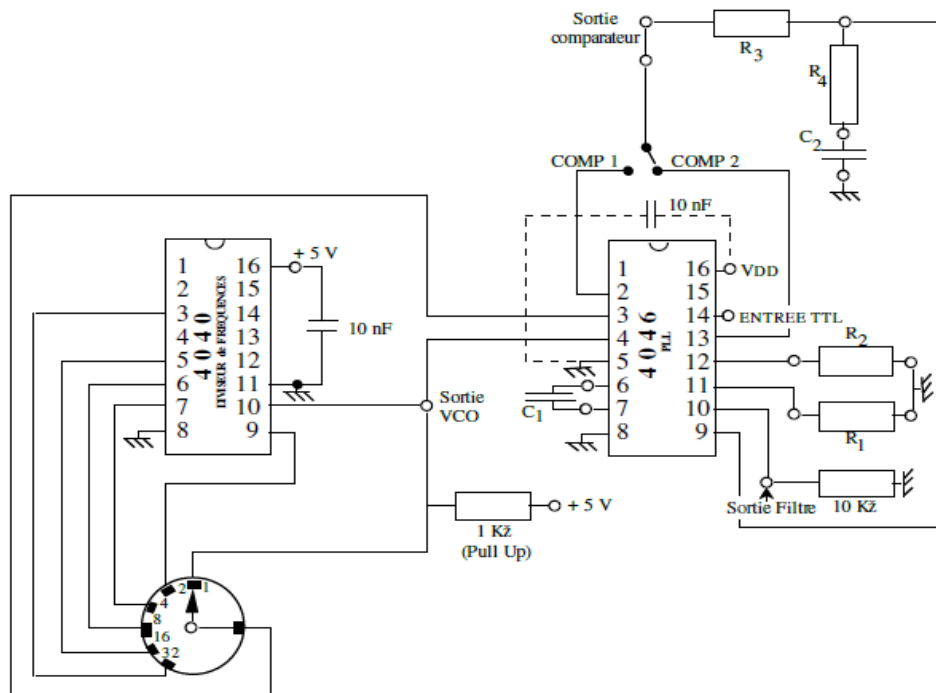
- Etude théorique d'une PLL.
- Etude expérimentale de PLL(4046).
- Des applications d'une PLL(4046).

**1. Manipulation 1 : Multiplieur de fréquence :****1<sup>er</sup> partie :**

Dans cette application, on réalise le circuit électronique ci-dessous :

**Matériel utilisée :**

- PLL(CD4046).
- Diviseur de fréquence(CD4040).
- $R_1=100K\Omega$ ,  $R_2=\infty$ ,  $R_3=100\Omega$ ,  $R_4=10K\Omega$ .
- $C_1=1nf$ ,  $C_2=1.5nf$
- $V_{DD}= 7V$



**Figure.1** : Circuit électrique.

Le rapport N de multiplication est réglé par le commutateur qui sélectionne une des sorties du compteur asynchrone 4040 (QA pour N=2, QB pour N=4,...).

- 1°) Définir les bandes de capture et de verrouillage.
- 2°) Pour  $f_e = 1\text{KHz}$ , visualiser VCO.
- 3°) Pour  $N=2, 4, 8, 16, 32$ , visualiser VCO et  $V_{TTL}$  à l'oscilloscope et interpréter. Qu'observe-t-on pour  $N=16$  et  $N=32$  ?

## 2<sup>ème</sup> partie :

La vitesse de rotation d'un moteur à courant continu peut contrôler au moyen d'une boucle à verrouillage de phase (PLL).

D'après le circuit de la figure.1, on place un moteur à courant continu à la sortie de la boucle à verrouillage de phase au broche 3.

- 1°) Que observez-vous à propos la vitesse de MCC ?
- 2°) Quelle la relation entre la vitesse de rotation de moteur et la fréquence d'entrée ?

## 2. Manipulation 2 : Démodulation de fréquence :

La démodulation de fréquence peut aussi réaliser simplement à l'aide d'une PLL, on réalise le circuit électronique ci-dessous :

### **Matériels utilisée :**

- PLL(CD4046)
- $R1=100\text{K}\Omega$ ,  $R2=47\text{K}\Omega$ ,  $R3=33\text{K}\Omega$ .
- $C1= 10\text{nF}$ ,  $C2=100\text{nf}$ .
- $V_{DD}= 5\text{V}$ .



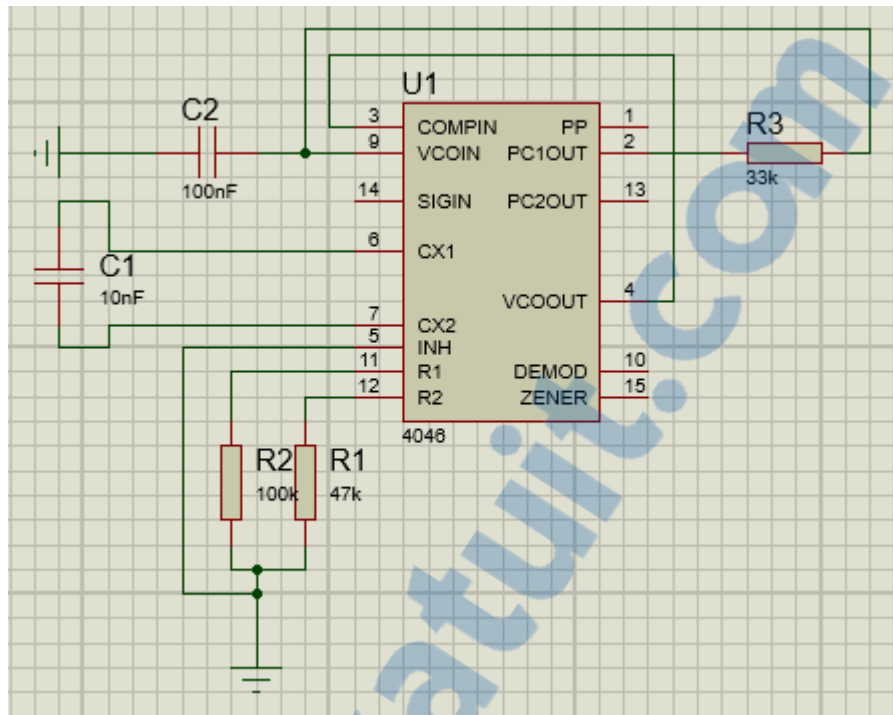


Figure.2 : circuit électrique.

Générer grâce aux GBF1 délivre un signal pour la basse fréquence et un autre GBF2 avec une sortie TTL pour la haute fréquence un signal TTL modulé en fréquence telle que  $F_{HF} = 105$  KHz,  $F_{BF} = 200$  Hz, l'amplitude du signal BF est  $V_{BF} = 30mV$ .

- 1°) Quelle est l'influence de signal de basse fréquence BF et le signal de haute fréquence HF ?
- 2°) On peut-on observer le signal démodulé ?
- 3°) Relevez ces caractéristiques (forme, fréquence, amplitude,...).

## Conclusion générale

Durant mon projet, j'ai vu que la boucle de verrouillage à phase était une solution qui pouvait offrir de bonnes performances au contrôle de vitesse d'un moteur à courant continu et je peux l'utilisée dans divers circuits électronique et plusieurs applications.

J'ai donné d'abord le schéma synoptique du la boucle de verrouillage à phase et son fonctionnement bloc, puis j'ai étudié trois applications avec réalisation pratique des circuits.

Sans aucun doute, mon montage est loin d'être parfait ; des améliorations seraient donc possibles pour réaliser un circuit plus performant. Des critiques et commentaires des lecteurs apporteraient un plus.

# Bibliographie

- [1] [http://www.maher.cmerp.net/doc/Cours%20 Automatique%20 Regulation.pdf](http://www.maher.cmerp.net/doc/Cours%20Automatique%20Regulation.pdf).
- [2] H.Egon, M.Marie, P.Porée «Traitement du signal et automatique», Hermann, Paris, 2000.
- [3] <http://auto.polytech.univ-tours.fr/telechargements/fichiers/SA.poly.pdf>.
- [4] P. Barret «Machines Electriques», Ellipses, Paris, 2002.
- [5] L. Couffignal «Le moteur à courant continu», cours, 2006.
- [6] B. Deforge & Q. David «Asservissement en position d'un axe linéaire», projet d'automatique, 2008.
- [7] C. le Lann «Le PID utilisé en régulation de position et/ou de vitesse de moteurs électriques», Projet de fin d'étude, 2007.
- [8] <http://fr.slideshare.net/wolfori/moteur-a-courant-continu>.
- [9] K. J. Astrom & T. Hagglund «Advanced PID Control», ISA, New York, 2006.
- [10] <http://get-couffignal.pagesperso-orange.fr/courselectro/regulationcours.pdf>.
- [11] <http://www.ta-formation.com/acrobat-modules/pll.pdf>
- [12] [http://repo.hackerzvoice.net/depot\\_madchat/coding/electro/PLL.pdf](http://repo.hackerzvoice.net/depot_madchat/coding/electro/PLL.pdf).
- [13] [http://repo.hackerzvoice.net/depot\\_madchat/coding/electro/PLL.pdf](http://repo.hackerzvoice.net/depot_madchat/coding/electro/PLL.pdf).



**Résumé :**

La boucle de verrouillage à phase (PLL) parmi les techniques qui ont bénéficié des progrès technologiques et scientifiques décrits plus haut, qui a connu un grand essor dans le domaine électronique et on peut l'utilisée dans plusieurs applications à cause de sa souplesse d'adaptation aux techniques numériques.

L'une des ces applications le contrôle de vitesse d'un moteur à courant continu par la boucle de verrouillage à phase (PLL).

**Mots clés :** Boucle de verrouillage à phase, moteur.

**Abstrac :**

The phase locked loop is mong the technics that made a great progress in science technologie, and electronics. It can be used in different applications thanks to it adaptation casiness to digital technologies.

One of it applications is the control of the speed of DC engine.

**Keyword :** Phase locked loop, engine.