

**Université de Bouira**  
*Akli Mohand Oulhadj*



**جامعة البويرة**  
أكلي محمد أولحاج

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

**Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées**  
**Département de Génie électrique**

# **Mémoire de fin d'études**

*Pour l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique*

*Option : Electromécanique et Système de Commande*

## **THÈME**

*Etude et réalisation d'un système d'automatisation  
du processus de dépôt des couches minces par la  
méthode sol-gel*

**Réalise par :**

**IDER YUCEF**

**TIGRINE LOTFI**

**Sujet Proposé et suivi par :**

**Mr. H.MEKKI (CRNB)**

**Mr. S.MOUDACHE (UAMOB)**

**Soutenu le 26 /06/2016 devant les Jurys :**

**Mr. BOUGHAROUAT (President)**

**Mr. BENZIANE (Examineur)**

**Mr. MEDJDOUB (Examineur)**

# REMERCIEMENTS

**E**n premier lieu nous remercions le Dieu le tout-puissant qui nous a aidé à accomplir ce modeste travail.

Tout d'abords nous souhaitons remercier le centre de recherche nucléaire de berine pour avoir ouvert ces portes et de nous donner l'opportunité de réalise le stage.

Nous exprimons nos reconnaissances les plus sincères :

Nos promoteurs Mr. MEKKI Hemza & Mr. MOUDACHE Said pour leurs aides et leurs conseils précieux.

Tous les enseignants de département de Génie électrique.

En suit en remerciant vivement toutes les personnes qui ont collaborés de près ou de loin à la réalisation de ce projet.

Nos profonds remerciements pour les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.



# DEDICACE

*Et ne voilà-t-il pas une occasion pour dire quelques mots en guise de reconnaissance pour tous celles et ceux qui sans cesse veillaient jusqu'à l'aube pour qu'aujourd'hui nous soyons là. A toi maman, Merci pour avoir veillé sur moi, à toi mon père, rien qu'en regardant dans vos yeux je devine l'amour sans limites que vous me réserviez. Un grand merci.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents :*

*Ma très chère mère qui m'a encouragée et soutenu pendant mes études depuis mon enfance*

*Mon très cher père qui a tout fait pour m'aider dans mes études*

*Mes sœurs*

*Mon frère*

*Tous mes amis (es)*

*Youcef*



# DEDICACE

*Et ne voilà-t-il pas une occasion pour dire quelques mots en guise de reconnaissance pour tous celles et ceux qui sans cesse veillaient jusqu'à l'aube pour qu'aujourd'hui nous soyons là. A toi maman , Merci pour avoir veillé sur moi, à toi mon père, rien qu'en regardant dans vos yeux je devine l'amour sans limites que vous me réserviez. Un grand merci.*

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes chers parents :*

*Ma très chère mère qui m'a encouragée et soutenu pendant mes études depuis mon enfance*

*Mon très cher père qui a tout fait pour m'aider dans mes études*

*Mes frères*

*Tous mes amis (es)*

## **Résumé**

Ce travail consiste à l'étude, la conception et la réalisation d'un système de dépôt de couches minces par la méthode SOL GEL, en vue de la réalisation des détecteurs nucléaires. L'élément principal du système est le moteur à courant continu. Notre contribution se focalise sur l'implémentation d'une commande numérique pour la régulation de la vitesse du moteur à CC. Pour cela nous avons opté pour une commande numérique de type PID. La commande PID est ensuite implémentée sur une carte à microcontrôleur open sources de type ARDUINO. Les résultats obtenus montrent l'efficacité de la méthode utilisée pour la réalisation du système de dépôt de couches minces.

## **Abstract**

This work consists of the study, the design and the realization of thin films deposition system based on the SOL GEL method, in the aim of the realization of nuclear detectors. The principal element of the system is the direct current motor. Our contribution is focalized on the implementation of a numeric control for the regulation of the DC motor speed. For this, the PID control has been retained. The PID based control is then implemented in an open sources ARDUINO Microcontroller. The obtained results shows the efficiency of the adopted method for the realization of thin films deposition system.

## Sommaire

---

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les couches minces et le dépôt par la voie sol gel</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2.Définition d'une couche mince .....	3
I.2.1.Fabrication d'une couche mince .....	4
I.2.2.Le principe d'une couche mince .....	4
I.2.3.La procédure de dépôt des couches minces .....	5
I.3.Méthode sol gel .....	6
I.3.1.La synthèse du « sol ».....	7
I.3.2.La formation du « gel ».....	7
I.3.3.Le séchage.....	7
I.4.Les différentes méthodes de dépôt de couches minces par sol-gel .....	8
I.4.1.Le Spin Coating ou la « TOURNETTE » .....	9
I.4.2.Dip-Coating ou méthode de trempage retrait .....	10
I.4.2.1.Le dépôt de films par Dip-Coating .....	11
I.5.-Les avantages et les inconvénients du procédé sol-gel .....	12
I.5.1.Les avantages du procédé sol-gel .....	12
I.5.2.Les limites du procédé sol gel.....	12
I.6.-Conclusion .....	12
<b>Chapitre II : régulation par PID</b>	
II.1. Introduction.....	13
II.2. Définition de la régulation/asservissement .....	13
II.2.1. L'asservissement.....	13

## Sommaire

---

II.2.2. La régulation.....	13
II.2.3. Différence entre asservir et réguler.....	14
II.3. Principe général de la régulation.....	14
II.3. 1. Système en boucle ouvert.....	14
II.3.2. Système en boucle fermée.....	15
II.4. Les caractéristiques d'un système asservi :.....	16
II.5. Le régulateur PID.....	17
II.5.1. L'action Proportionnel P .....	18
II.5.2. L'action Intégral I .....	18
II.5.3. L'action Dérivé D .....	18
II.6. Méthodes de Ziegler et Nichols (ZN) .....	19
II.6.1. Méthode de la réponse indicielle .....	19
II.6.2. Méthode du point critique .....	20
II.7. Conclusion .....	21

### Chapitre III : moteurs à courant continu

III.1. Introduction .....	22
III.2. Constitution d'une machine à courant continu.....	22
III.2.1. L'inducteur.....	23
III.2.2. L'induit.....	24
III.2.3. Collecteurs et balais.....	25
III.3. Les avantages et les inconvénients.....	26
III.3.1. Avantages .....	26
III.3.2. Inconvénients.....	26

## Sommaire

---

III.4. commande des moteurs à courant continu .....	26
III.4.1. Variation de vitesse du moteur.....	26
III.4.2. La variation du sens de rotation d'un moteur à courant continu.....	27
III.4.2.1. Principe de fonctionnement du pont en H .....	27
III.5. Modélisation d'un moteur à courant continu.....	29
III.5.1. La fonction de transfert .....	30
III.5.2. Identification en boucle ouverte .....	31
III.6. Conclusion .....	31

### **Chapitre IV : La partie pratique et les résultats obtenus**

IV.1. Introduction .....	32
IV.2. Description .....	32
IV.2.1 Le problème à étudié.....	32
IV.2.2 L'algorithme de commande .....	33
IV.3 Présentation de la carte Arduino .....	34
IV.3.1 Arduino DUE .....	34
IV.3.2 les avantages et les inconvénients de la carte.....	35
IV.3.3 Le logiciel Arduino.....	36
IV.4 Arduino Motor Shield.....	37
IV.5 Commande du moteur à courant continu avec la carte Arduino.....	38
IV.5.1 Présentation des sorties analogiques (mode PWM) .....	38
IV.5.2 Présentation du schéma électronique .....	39
IV.6 Exploitation de l'encodeur optique avec la carte Arduino .....	39



## Sommaire

---

IV.6.1 Présentation du capteur (encodeur) .....	39
IV.6.2 Principe de fonctionnement .....	40
IV.6.3 L'instruction de base pour l'acquisition .....	41
IV.6.4 Mesure de la vitesse de rotation avec un codeur incrémental .....	42
IV.7 Modélisation du système .....	42
IV.7.1 Présentation de l'étape d'identification avec Matlab.....	42
IV.7.2 Acquisition de la réponse indicielle du système .....	43
IV.7.3 Détermination de la fonction de transfert $G(p)$ .....	43
IV.8 Identification des paramètres de PID .....	47
IV.8.1 Outil Matlab PID Tuner .....	47
IV.8.2 Méthode de Ziegler Nichols (réponse indicielle) .....	50
IV.9 Implémentation de la commande sur la carte Arduino .....	51
IV.10 Les résultats obtenus .....	52
IV.11 Conclusion .....	55
Conclusion générale.....	56
Bibliographie.	
Annexe.	

## LISTE DES FIGURES

---

Figure I-1 : méthodes générales pour déposer une couche mince.....	6
Figure I-2 : Schéma de principe de sol-gel, (a) spin-coating (b) dip-coating.....	9
Figure I-3 : Dépôt de couches minces par centrifugation : les quatre étapes du dépôt.....	10
Figure I-4 : Les différentes étapes de la technique dip-coating (trempage-retrait).....	11
Figure II.1: Système en boucle ouvert.....	15
Figure II.2: Système en boucle fermée.....	15
Figure II.3: la précision d'un système et l'erreur statique.....	16
Figure II.4: la rapidité de système .....	16
Figure II.4: système stable (1 : consigne. 2 : système stable).....	17
Figure II.5: système oscillant. (1 : consigne. 2 : système oscillant).....	17
Figure II.6: système instable. ( 1 : consigne. 2 : système instable).....	17
Figure II.8 : Réponse indicielle d'un processus.....	20
Figure III.7: Constitution d'une machine à courant continu.....	23
Figure III. 8 : L'inducteur.....	24
Figure III.9 : Collecteurs et balais.....	25
Figure III.10: commande PWM de moteur à courant continu.....	27
Figure III. 11: Principe de fonctionnement du pont en H.....	28
Figure III. 12: pont en H à base des transistors.....	28
Figure III.13 Schéma équivalent d'un moteur à courant continu.....	29
Figure IV.14 L'algorithme de commande.....	33
Figure IV.15 : carte arduino DUE.....	34
Figure IV.16 : Interface de logiciel arduino.....	36
Figure IV.17 : shield moteur.....	38

## LISTE DES FIGURES

---

Figure IV.5: signal PWM.....	38
Figure IV.6 : Branchement de la carte Arduino avec un moteur DC.....	39
Figure IV.7 : Encodeur.....	39
Figure IV.8 : principe de fonctionnement de l'encodeur.....	40
Figure IV.9 : Les deux signaux issus de l'encodeur optique.....	41
Figure IV.10 : la vitesse de moteur en tr/s à une tension de 12V.....	42
Figure IV.11 : L'utilisation de l'outil System Identification.....	43
Figure IV.12 : L'interface de l'outil System identification.....	44
Figure IV.13 : Choix des types des données "Time Domain Data".....	44
Figure IV.14 : Saisie des données relatives aux Input et Output du système.....	45
Figure IV.15 : Choix de la description du système à estimer"Tranfer Function".....	45
Figure IV.16 : Choix du nombre des pôles et zéros de la fonction de transfert à estimer.....	46
Figure IV.17 : Visualisation du résultat de l'estimation.....	46
Figure IV.18 : Récupération de la fonction de transfert estimée.....	47
Figure IV.19 : Emplacement de l'outil PID tuning.....	47
Figure IV.20 : Interface de l'outil "PID tuner".....	48
Figure IV.21 : Importation du modèle estimé.....	48
Figure IV.22 : Interface de l'outil "Import Linear System".....	49
Figure IV.23 : Choix du régulateur à implémenter.....	49
Figure IV.24 : Récupération des paramétrés du régulateur.....	50
Figure IV.25 : Réponse indicielle.....	50
Figure IV.26: Implémentation de clavier et d'afficheur sur Proteus.....	52
Figure IV.27 : la réponse de moteur à une consigne de 1000 tr/min.....	52

---

## LISTE DES FIGURES

Figure IV.28 : la réponse de moteur à une consigne de 600 tr/min.....	53
Figure IV.29 : la réponse de moteur à une consigne de 600 tr/min.....	53
Figure IV.30 : la réponse de moteur à une consigne de 1000 tr/min.....	54
Figure IV.31 : la réponse de moteur à une consigne de 800 tr/min avec une charge.....	54
Figure IV.32 : la réponse de moteur à une consigne de 900 tr/min avec une charge.....	55

## LISTE DES TABLEAUX

Tab. 1: Paramètres PID obtenus à partir d'une réponse indicielle.....	20
Tab. 2: Paramètres PID obtenus à partir du point critique .....	21

# Introduction général

### Introduction générale

Le développement des connaissances, et des outils mathématiques, ont conduit à un formidable essor des systèmes automatisés, et des systèmes asservis, dans la deuxième moitié du 20ème siècle. Automatique comme substantif, désigne généralement un ensemble de problèmes qui se posent à propos de l'automatisation des processus industriels ou d'autres objets technologiques automatisés qui permettent au processus de se dérouler sans intervention d'un opérateur humain.

Ces dernières années ont vu un développement d'un grand nombre de techniques originales pour le dépôt des couches minces. Parmi ces techniques les méthodes qui sont basées sur des réactions chimiques où l'on trouve les dépôts chimiques en phase vapeur (Chemical Vapor Deposition, CVD) [1]. C'est un procédé exploité industriellement depuis de nombreuses années dans des secteurs d'activité variés tels que l'électronique, l'aéronautique, la décoration, etc.

Le procédé sol-gel est mis en œuvre au laboratoire depuis environ 20 ans [2]. Il permet d'élaborer un grand nombre de matériaux oxydes avec un bon contrôle de la composition chimique et un faible coût. Les traitements thermiques post-dépôt à relativement basse température (~600°C) présentent les avantages d'être simple à mettre en œuvre et de conduire à la réalisation de matériaux comportant des cristaux de diamètre nanométrique (~5 nm). Des traitements thermiques ultérieurs à plus haute température induisent des instabilités morphologiques au sein des couches minces polycristallines et simultanément une orientation cristalline préférentielle. Des cavités naissantes aux joints de grains puis grossissantes, fragmentent la couche en îlots isolés orientés de taille nanométrique. A partir de ce phénomène, des nanostructures ordonnées peuvent être réalisées à l'aide de surfaces particulières de substrats monocristallins, en particulier des surfaces vicinales.[3]

De nouveaux procédés basés sur la centrifugation (spin coating en anglais) ou la nébulisation (spray coating en anglais) des solutions ont été développés, en partie pour réduire les temps de construction trop longs par trempage.

Ce travail a été réalisé dans le département d'étude et de développement d'instrumentation nucléaire du Centre de Recherche Nucléaire de Birine (CRNB). Suit à un besoin spécifique de dépôt de couche mince par la méthode sol-gel et pour

objectif d'étudier et réaliser un dispositif automatisé de dépôt des couches minces par la méthode sol gel. « Spin-coating ».

Objectifs de la réalisation du dispositif

- Atteindre une vitesse de rotation qui avoisine les 5000 tr/minute.
- Régler le temps de rotation du moteur en seconde avec un arrêt instantané.
- Programmer le microcontrôleur avec un outil de programmation.
- Tester le fonctionnement de toutes les parties du dispositif.

-Dans le premier chapitre on va parler sur les couches minces et la méthode de sol gel.

-Dans le deuxième chapitre on va faire une description sur les systèmes asservis et le régulateur PID. Les méthodes d'identification (méthode de Ziegler Nichols).

-Dans le troisième chapitre on va faire la description sur les moteurs à courant continu et leurs commandes, comment avoir la fonction de transfert

-Le dernier chapitre est consacré à la partie pratique et les résultats obtenus.

# **Chapitre I :**

## **Généralité sur les couches minces et le dépôt par la voie sol gel**



## **I.1.Introduction**

L'intégration sans cesse plus poussée des dispositifs, exige le développement de techniques de dépôt de plus en plus sophistiquées pour l'élaboration des matériaux sous forme de couches minces. Aujourd'hui, les couches minces sont utilisées dans une logique de miniaturisation des composants dans de nombreux domaines tels que l'électronique, l'optique, la photonique, le magnétisme dans ses applications pour les capteurs, les micro-actionneurs ou encore l'enregistrement magnétique (stockage de grande densité).[4]

Dans ce chapitre, on va commencer par une présentation des définitions et des mécanismes de formations des couches minces. Après on va mettre l'accent sur la méthode de dépôt de la couche mince. Et on présentera aussi quelques différentes méthodes de dépôt de couches minces par sol-gel.

## **I.2.Définition d'une couche mince :**

La couche mince est une pellicule fine d'un matériau déposé sur un autre matériau, appelé substrat dont l'une des dimensions que on appelle l'épaisseur a été fortement réduite de telle sorte que cette faible distance entre les deux surfaces limites reste de l'ordre du  $\mu\text{m}$ , ce qui confère à la couche la quasi bidimensionnelle, ce qui entraîne une perturbation de la majorité des propriétés physiques. La différence essentielle entre le matériau à l'état massif et celle en couches minces est que dans l'état massif on néglige généralement avec raison le rôle des limites dans les propriétés, tandis que dans une couche mince ce sont, au contraire, les effets liés aux surfaces limites qui sont prépondérants. Il est assez évident qu'à chaque épaisseur plus faible, cet effet de bidimensionnelle sera plus important. Cependant, lorsque l'épaisseur dépassera un certain seuil; son effet deviendra minime et le matériau retrouvera les propriétés bien connues du matériau massif [4].

Le but de la couche mince est de donner des propriétés particulières à la surface de la pièce tout en bénéficiant des propriétés massives du substrat, par exemple :

- Conductivité électrique : métallisation de la surface, par exemple ; pour observer un échantillon isolant au microscope électronique à balayage.

## **Chapitre I : Généralité sur les couches minces et le dépôt par la voie sol gel**

---

- Optique : tain du miroir, traitement antireflet des objectifs de l'appareil photo, nickelage des casques des pompiers pour réfléchir la chaleur (infrarouges), dorure de leur visière pour éviter l'éblouissement.

Economique : l'élaboration des composants électroniques avec un peu d'étape technologique.

### **I.2.1.Fabrication d'une couche mince :**

La première méthode pour fabriquer des couches minces fut par voie humide : une réaction chimique entre une solution et un substrat [5]. Un exemple célèbre est le miroir d'argent : réduction d'ions  $Zn^{2+}$  (par exemple solution d'oxyde de zinc ZnO) par des sucres.

Actuellement les principales techniques utilisées sont:

- La déposition sous vide : le matériau à déposer est sublimé ou fondu, puis vaporisé et il va se condenser sur le substrat.

- La réaction en phase gazeuse : c'est une méthode similaire à la voie liquide, mais la réaction se fait entre un gaz et un substrat.

- La projection plasma : une haute tension est établie dans un gaz ce qui crée un plasma ; les ions accélérés viennent s'implanter sur la surface.

- L'ablation laser.

- La déposition par voie Sol-gel. [5]

### **I.2.2.Le principe d'une couche mince :**

Le principe de fonctionnement d'une couche mince s'effectue par une combinaison de processus de nucléation et de croissance qu'on peut décrire comme suit :

Les espèces, au moment de l'impact sur le substrat, perdent leur composante de vitesse de déplacement et sont absorbées physiquement sur la surface du substrat.

Initialement, les espèces absorbées ne sont pas en équilibre thermique avec le substrat, et se déplacent donc sur sa surface. Pendant ces déplacements, elles vont interagir entre elles; créant des amas (clusters) qui iront en se développant.

Ces amas, que l'on appelle îlots ou noyaux, sont thermodynamiquement instables et tendent naturellement à désorber. Toutefois, si les paramètres de dépôt (tels que les îlots) sont entrés en collision les uns avec les autres, ils se développent dimensionnellement. Lorsqu'ils atteignent une certaine taille, les îlots deviennent

thermodynamiquement stables. On dit que le seuil de nucléation a été franchi. Cette étape, qui voit la formation d'îlots stables, chimisorbés et d'une dimension suffisante, elle s'appelle la nucléation.

le processus de croissance d'une couche mince en disant que c'est une suite statistique de nucléation, puis une croissance par diffusion de surface et formation d'îlots, puis une formation d'îles de plus grandes dimensions, et enfin la formation d'une couche continue par remplissage des espaces entre ces îles. Selon les paramètres thermodynamiques des dépôts et de la surface du substrat [6].

### **I.2.3. La procédure de dépôt des couches minces :**

Tous les procédés de déposition des couches minces contiennent quatre (parfois cinq) étapes successives. La source qui constitue le matériau de base de la couche mince à élaborer il peut être un solide, un liquide, une vapeur ou un gaz. Lorsque le matériau est solide son transport vers le substrat s'effectue par vaporisation. Ce qui peut être réalisé par une évaporation thermique, un canon à électrons, une ablation laser ou par des ions positifs "pulvérisation". L'ensemble de ces méthodes est classé sous le nom de dépôt physique en phase vapeur PVD "physical vapor deposition". La source solide est occasionnellement transformée en vapeur par voie chimique. Dans d'autre cas, le matériau de base est sous forme d'un gaz ou d'un liquide ayant une pression de vapeur suffisante pour qu'il soit transporté à des températures modérées. Les procédés qui utilisent les matériaux de base, les gaz, les liquides évaporés ou les solides évaporés par voie chimique sont connues sous le nom de dépôts chimiques en phase vapeur, CVD "Chemical vapor deposition" [7].

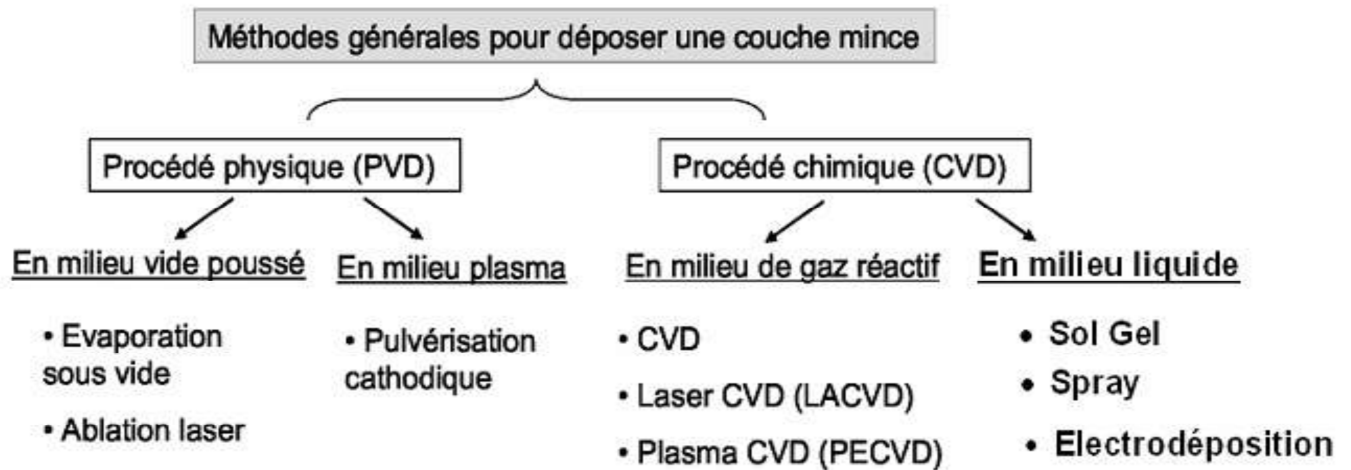


Figure I.1: méthodes générales pour déposer une couche mince

### I.3.Méthode sol gel :

La technique sol-gel est un procédé d'élaboration de matériaux permettant la synthèse de verres, de céramiques et de composés hybrides organo-minéraux, à partir de précurseurs en solution. Il permet de réaliser des couches minces constituées d'empilements de nanoparticules d'oxydes métalliques. Ce procédé s'effectue dans des conditions dites de chimie douce, à des températures nettement plus basses que celles des voies classiques de synthèse. Ces conditions offrent également la possibilité d'associer des espèces organiques et minérales pour former de nouvelles familles de composés hybrides organo-minéraux, possédant des propriétés inédites. Ce procédé peut être utilisé dans différents domaines tels que l'encapsulation et l'élaboration de matériaux hyper-poreux, mais c'est dans la réalisation de dépôts en couches minces qu'il trouve sa principale application

La première dépôt sol-gel a été réalisée par Ebelmen, qui décrit dès 1845 « la conversion en verre solide de l'acide silicique exposé à l'air humide ». Le procédé sol-gel était né mais il fallut attendre près d'un siècle pour que cette idée soit reprise par l'industrie verrière. Dans les années 1930, la firme allemande Schott Glaswerke utilise pour la première fois le procédé de polymérisation sol-gel pour la fabrication de récipients en verre puis de rétroviseurs [8]. Le premier brevet sol-gel a été déposé en 1939. Le principe du procédé sol-gel, autrefois appelé « chimie douce », repose sur l'utilisation d'une succession de réactions d'hydrolyse-condensation, à température modérée, proche de l'ambiante, pour préparer des réseaux d'oxydes, qui peuvent être à leur tour traités thermiquement. Il s'agit d'un processus de conversion en solution

d'alcoxydes métalliques, tels que les alcoxydes de silicium, zirconium, aluminium, titane, ... L'espèce métallique soluble peut aussi contenir des constituants organiques qui peuvent être ajustés selon les applications.

L'appellation sol-gel est une contraction des termes « solution-gélification ». Avant que l'état de gel ne soit atteint, le système est dans l'état liquide : il est constitué d'un mélange d'oligomères colloïdaux et de petites macromolécules ainsi que, selon le degré d'avancement de la réaction de dépôt, de différents monomères partiellement hydrolysés. Cette dispersion stable de particules colloïdales au sein d'un liquide est appelée « sol ». La taille des particules solides, plus denses que le liquide, doit être suffisamment petite pour que les forces responsables de la dispersion ne soient pas surpassées par la gravitation. Le gel est constitué d'un réseau d'oxyde gonflé par le solvant, avec des liaisons chimiques assurant la cohésion mécanique du matériau en lui donnant un caractère rigide, non déformable [9] (un gel peut présenter un caractère élastique, mais pas de viscosité macroscopique). Le gel correspond à la formation d'un réseau tridimensionnel de liaisons de Van der Waals.

Le temps nécessaire au « sol » pour se transformer en « gel » est appelé temps de gel (ou point de gel)[10].

### **I.3.1.La synthèse du « sol »**

Un sol est défini comme étant une dispersion stable dans un liquide de particules colloïdales. La synthèse d'un « sol » se fait à température ambiante par ajout d'eau dans une solution organique acidulée ou basique contenant des précurseurs. C'est la réaction d'hydrolyse. Par la suite, on peut faire évoluer ce « sol » par le biais de réactions de condensation en un réseau tridimensionnel à viscosité infinie, appelé « gel ».[10]

### **I.3.2.La formation du « gel »**

Un gel est défini comme un système biphasé dans lequel les molécules de solvant (eau, alcool) sont emprisonnées dans un réseau solide. Lorsque le liquide est l'eau, on parle d'un aquagel ou hydrogel, si c'est de l'alcool on parle d'alcolgel.

### **I.3.3.Le séchage**

L'obtention d'un matériau, à partir du gel, passe par une étape de séchage qui consiste à évacuer le solvant en dehors du réseau polymérique. Ce séchage peut entraîner un rétrécissement de volume.

Le procédé de séchage permettant l'obtention du matériau sol-gel nécessite que l'alcool, ou l'eau, puisse s'échapper en même temps que le gel se solidifie. Le procédé d'évaporation se produit grâce aux trous et aux canaux existants dans le matériau sol-gel poreux. Il existe plusieurs types de séchage permettant d'obtenir des types de matériaux différents :

- Xérogel : séchage classique (évaporation normale) entraînant une réduction de volume allant de 5 à 10%.
- Aérogel : séchage en conditions supercritiques (dans un autoclave sous pression élevée) n'entraînant pas ou peu de rétrécissement de volume.

À partir d'une même solution et en fonction du mode de séchage du gel, le matériau final prend des formes très différentes. Dans le cas d'un séchage supercritique, le gel donne un « aérogel », structure très ouverte avec une grande macroporosité. Dans le cas d'un séchage classique, les liquides résiduels provoquent des forces de capillarité très importantes qui mènent à la destruction de la macroporosité et aboutissent, finalement, à l'obtention de structures vitreuses. On obtient de cette manière un « xérogel ». [11]

### **I.4. Les différentes méthodes de dépôt de couches minces par sol-gel :**

Le procédé sol-gel consiste en plusieurs étapes dont la première est la formation en milieu liquide et à basse température ( $<100^{\circ}\text{C}$ ), d'une fraction des liens chimiques qui constituent l'oxyde final (sol). La difficulté réside dans l'élaboration d'une solution de précurseurs homogène, transparent et stable dans le temps. Les films sont alors obtenus au laboratoire essentiellement par la méthode de dip-coating (c'est-à-dire par trempage du substrat dans la solution) ou par la méthode de spin-coating (c'est-à-dire élaboration du film par rotation du substrat). Les deux méthodes sont schématisées ci-dessous. L'évaporation de solvants et la condensation se produisent simultanément lors de l'élaboration du film et entraînent la gélification du dépôt sur le substrat. Après évaporation des solvants, un traitement thermique est nécessaire à la densification du matériau déposé et à sa transformation en une phase purement inorganique. Par rapport aux autres méthodes de préparation, le procédé sol-gel présente plusieurs intérêts, en plus de celui de ne pas nécessiter l'utilisation de hautes températures : il offre la possibilité d'élaborer de nombreux types d'oxydes et d'obtenir des matériaux homogènes et purs. Le dopage par des ions actifs ou par des nanoparticules est facilité car il se fait en phase liquide dans la solution de

précurseurs. Il permet en outre une mise en forme variée des matériaux, monolithes, poudres plus ou moins fines, fibres et films.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour le dépôt de couches minces optiques sur un substrat donné: le "spin-coating" et "le dip-coating"[12].

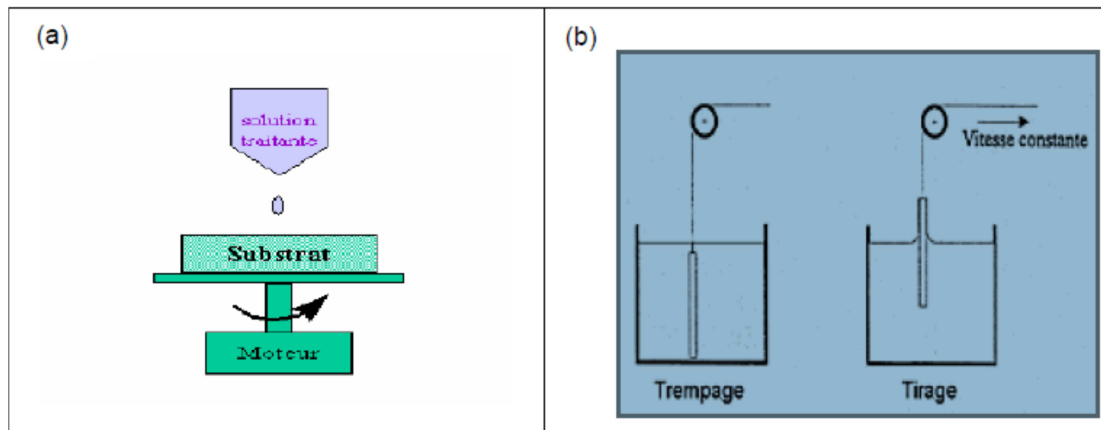


Figure I.2: Schéma de principe de sol-gel, (a) spin-coating (b) dip-coating.

### I.4.1. Le Spin Coating ou la « TOURNETTE »

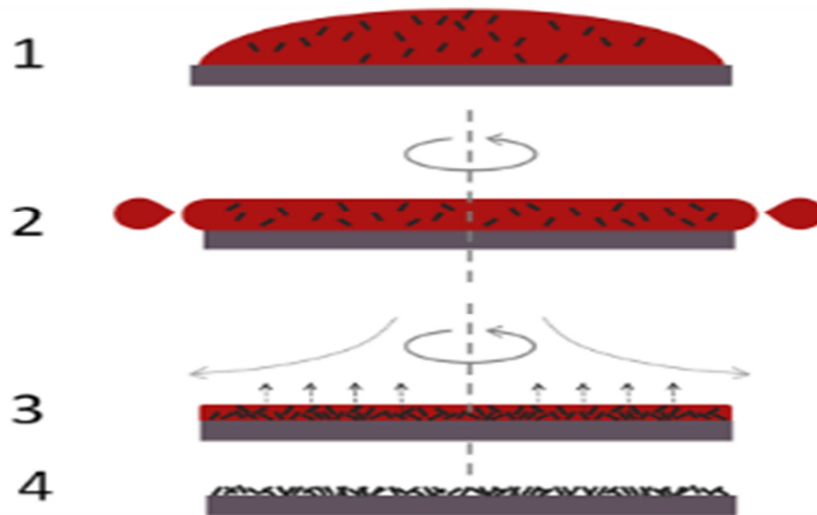
La technique du dépôt par spin-coating est très simple, elle consiste à déposer quelques gouttes de la solution sur le substrat de silicium et faire tourner l'échantillon une première fois assez lentement pour étaler la goutte entièrement sur la plaque et une deuxième fois un peu plus vite pour évaporer le solvant et jouer sur l'épaisseur. Au cours du premier palier, la vitesse est faible et le dépôt de liquide s'effectue en quelques secondes, s'il n'est pas déjà effectif pour de petits échantillons. C'est lors du deuxième palier que s'effectuent l'étalement et l'écoulement du liquide.

La durée de cette phase dépend principalement de la viscosité de la solution. Plus celle-ci est importante, plus la vitesse d'écoulement du liquide excédentaire est faible [13]. Le temps nécessaire à l'obtention d'une couche d'épaisseur homogène est alors allongé.

La préparation d'une couche passe donc par quatre phases essentielles :

- 1- Le dépôt de la solution sur le substrat.
- 2- L'accélération : c'est le début de la rotation, cette étape provoque l'écoulement du liquide vers l'extérieur du substrat.

- 3- La rotation uniforme : cette phase permet l'éjection de l'excès du sol sous forme de gouttelettes et la diminution de l'épaisseur de la couche de façon uniforme.
- 4- L'évaporation : durant cette étape, le substrat tourne toujours à une vitesse constante et l'évaporation des solvants les plus volatils est dominante ce qui diminue l'épaisseur du couche déposé.



**Figure I.3 : Dépôt de couches minces par centrifugation : les quatre étapes du dépôt**

Cette technique a l'avantage d'être facilement mise en œuvre. Elle permet également la réalisation des couches d'excellente qualité. L'épaisseur du film est inversement proportionnelle à la vitesse de rotation mais dépend aussi de la viscosité de la solution et de la durée de rotation.

### **I.4.2. Dip-Coating ou méthode de trempage retrait :**

Cette technique présente de nombreux avantages. Parmi les plus significatifs soulignons la haute qualité optique, le contrôle de la composition et de la microstructure du matériau utilisé dans des applications diverses. Parmi celles-ci, citons les couches optiques et protectrices, les cellules solaires, les systèmes photocatalytiques, les systèmes électrochromes, les capteurs et les guides d'onde [14].

Le procédé sol gel offre la possibilité d'introduire des dopants (ZnO, Cds ...) sous la forme de composés solubles de type organométallique ou de sels inorganiques, et ceci d'une manière très homogène sans phénomène d'agrégation [15]. Elle demande moins d'équipement et elle est donc moins coûteuse.



Les températures généralement utilisées dans ce procédé sont plus basses que celles utilisées dans les méthodes classiques.

Le procédé sol gel permet le dépôt de films de composition et d'épaisseurs différentes, et permet aussi l'utilisation de substrats de nature diverse de taille et de géométrie complexe (Si, Verre, ...). La haute pureté des matériaux élaborés par ce procédé vient du fait que la synthèse n'utilise pas d'étape de broyage et de pressage de poudre.

### I.4.2.1. Le dépôt de films par Dip-Coating :

Cette méthode consiste à tremper le substrat dans la solution et à le retirer à une vitesse constante. Ce système permet de réaliser des films de haute qualité comme en atteste les nombreux travaux effectués au Laboratoire de Céramiques de Constantine. Le dispositif utilisé est composé d'un béccher contenant la solution à déposer; le câble relié à un moteur est utilisé pour introduire le substrat dans la solution et le retirer à une vitesse constante.

La bonne qualité des dépôts dépend de la régularité du moteur et de la stabilité du béccher car l'ensemble doit être dépourvu de toute vibration de façon à ce que la surface de la solution reste immobile durant le dépôt.

La plus légère perturbation pendant cette étape va provoquer des stries horizontales sur le film liées à des micro-vagues au niveau du liquide.

Le liquide déposé sur le substrat subit une évolution rapide. Les précurseurs sont tout d'abord concentrés à la surface du support par drainage et évaporation des solvants ce qui a pour conséquence de les rapprocher les uns des autres et d'augmenter les cinétiques de polymérisation. Il y a ainsi formation d'un réseau tridimensionnel de chaînes polymériques rempli de solvant qui sera éliminé par séchage du dépôt

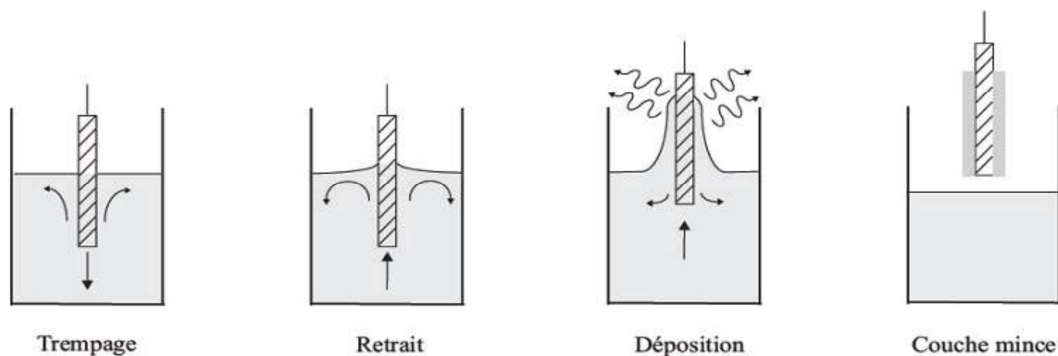


Figure I.4: Les différentes étapes de la technique dip-coating (trempage-retrait)

### **I.5.-Les avantages et les inconvénients du procédé sol-gel :**

#### **I.5.1.Les avantages du procédé sol-gel [16]:**

- faible coût énergétique : les gels secs peuvent être vitrifiés ou frittés à une plus basse température que celle utilisée dans l'industrie pour les matières premières conventionnelles.
- mise en œuvre simplifiée : la viscosité des sols et des gels permet d'élaborer directement les matériaux sous des formes variées : couches minces, fibres, poudres fines et matériaux massifs.
- des matériaux sur mesure : le contrôle des réactions de condensation permet d'orienter la polymérisation et d'optimiser les caractéristiques du matériau en fonction de l'application envisagée.
- grande pureté et meilleure homogénéité du matériau.
- Dépôt de couches minces sur les deux faces du support en une seule opération.
- Réalisation de dépôts multi-composants en une seule opération

#### **I.5.2.Les limites du procédé sol gel [16] :**

- Maîtrise délicate du procédé et temps de processus longs.
- manipulation d'une quantité importante de solvants.
- l'inconvénient majeur est la faible épaisseur des couches, ainsi on doit effectuer plusieurs étapes de dépôt et de séchage afin d'obtenir une épaisseur de plusieurs centaines de nanomètres, ce qui multiplie les risques de craquelures car les premières couches déposées subissent toutes des séchages successifs ce qui augmente les risques de court-circuit lors des tests électriques.

### **I.6.Conclusion :**

Les procédés sol-gel ne sont évidemment pas compétitifs pour la production de forts tonnages de verre. Cependant, ils peuvent trouver des créneaux intéressants pour la fabrication de produits à forte valeur ajoutée. En particulier, l'élaboration de couches minces à propriétés mécanique ou climatique, électrique ou électronique, magnétique ou optique, est sûrement la voie la plus prometteuse pour l'émancipation d'un tel procédé dans la mesure où les inconvénients cités sont alors minimisés. La plupart des développements industriels concernent aujourd'hui le dépôt de revêtements et l'élaboration de verres organo-minéraux.

# **Chapitre II :**

## **Régulation par PID**

### II.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. Or comme un moteur à courant continu a une vitesse qui varie facilement, il faut d'une part être capable de la mesurer et, d'autre part, pouvoir faire varier la tension du moteur pour qu'il tourne correctement.

Les régulateurs PID répondent à plus du 90% des besoins industriels et le nombre de régulateurs installés dans une usine par exemple, se compte par milliers. Malheureusement, malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies pour les paramètres P, I et D ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler. [17] [18]

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

### II.2. Définition de la régulation/asservissement

Lorsqu'il y a un retour d'information de la grandeur observée sur le régulateur, on parle d'un asservissement du système ou d'une régulation du système.

#### II.2.1. L'asservissement

La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, n'est pas constante et les grandeurs perturbatrices n'existent pas ou sont très peu influentes sur la grandeur à maîtriser.

Exemples :

- Asservissement de température : obtention d'un profil de température en fonction du temps dans un four de traitement thermique.
- Asservissement d'un débit d'air par rapport à un débit de gaz afin d'obtenir une combustion Idéale. [17]

#### II.2.2. La régulation

La consigne, traduisant l'objectif désiré du procédé, est constante et les grandeurs perturbatrices influencent fortement sur la grandeur à maîtriser.

Exemples :

- Régulation de température dans un local subissant les variations climatiques.
- Régulation de niveau dans un réservoir dépendant de plusieurs débits d'alimentation et de soutirage.
- Régulation de pH de rejets d'eau destinés à être déversés dans une rivière.

### II.2.3 Différence entre asservir et réguler

Un système en boucle fermée peut remplir la fonction :

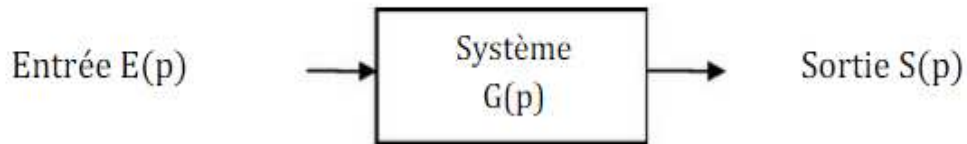
- Asservissement : poursuite par la sortie d'une consigne variable dans le temps.
- Régulation : la consigne est constante, le système compense les perturbations.

### II.3. Principe général de la régulation

Dans la plupart des appareils dans des installations industrielles et domestiques, il est nécessaire de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs déterminées, en dépit des variations externes ou internes influant sur ces grandeurs. Par exemple le niveau d'eau dans un réservoir, la température d'une étuve, la vitesse et la position des moteurs, étant par nature variables, doivent donc être réglés par des actions convenables sur le processus considéré. Si les perturbations influant sur la grandeur à contrôler sont lentes ou négligeables, un simple réglage dit en boucle ouverte, permet d'obtenir et de maintenir la valeur demandée (par exemple : action sur un robinet d'eau). Dans la majorité des cas, cependant, ce type de réglage n'est pas suffisant, parce que trop grossier ou instable. Il faut alors comparer, en permanence, la valeur mesurée de la grandeur réglée à celle que l'on souhaite obtenir et agir en conséquence sur la grandeur d'action, dite grandeur réglant. On a, dans ce cas, constitué une boucle de régulation et plus généralement une boucle d'asservissement. Cette boucle nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de moyens de mesure, de traitement de signal ou de calcul, d'amplification et de commande d'actionneur, constituant une chaîne de régulation ou d'asservissement. La consigne est maintenue constante se produit sur le procédé une modification d'une des entrées perturbatrices. L'aspect régulation est considéré comme le plus important dans le milieu industriel car les valeurs des consignes sont souvent fixes. Néanmoins, pour tester les performances et la qualité d'une boucle de régulation, on s'intéresse à l'aspect asservissement. [19]

#### II.3.1. Système en boucle ouverte

Un système est dit en boucle ouverte lorsque la commande est élaborée sans l'aide de la connaissance des grandeurs de sortie. Au niveau des inconvénients, il n'y a aucun moyen de contrôler, à plus forte raison de compenser les erreurs, les dérives, les accidents qui peuvent intervenir à l'intérieur de la boucle, autrement dit, il n'y a pas de précision ni surtout de fidélité qui dépendent de la qualité intrinsèque des composants. Enfin, le système en boucle ouverte ne compense pas les signaux de perturbation, le schéma bloc de système en boucle ouverte est donné par la figure ci-après. [20]



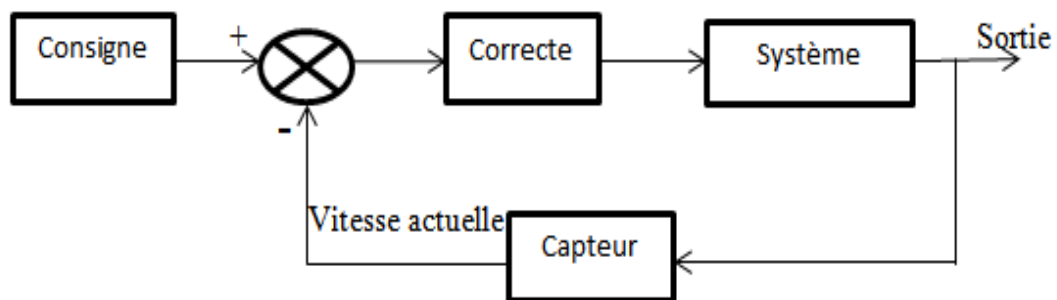
**Figure II.1: Système en boucle ouvert**

### II.3.2. Système en boucle fermée

La boucle fermée (contre réaction) est capable de stabiliser un système instable en boucle ouverte. Dans une régulation en boucle fermée, une bonne partie des facteurs perturbateurs externes sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé.

L'utilisation du retour d'information est le principe fondamental en automatique. [20]

La commande appliquée au système est élaborée en fonction de la consigne et de la sortie.



**Figure II.2: Système en boucle fermée**

Organisation d'un système en boucle fermée

Dans un système en boucle fermée, on trouve les éléments suivants :

- un capteur pour mesurer la sortie,
- un comparateur qui élabore l'erreur entre la consigne et la mesure de la sortie,
- un correcteur qui élabore la commande en fonction du signal d'erreur,
- un organe de commande qui module le signal d'entrée du système.

### II.4. Les caractéristiques d'un système asservi :

#### a. La précision

C'est la capacité du système à se rapprocher le plus possible de la valeur de consigne.

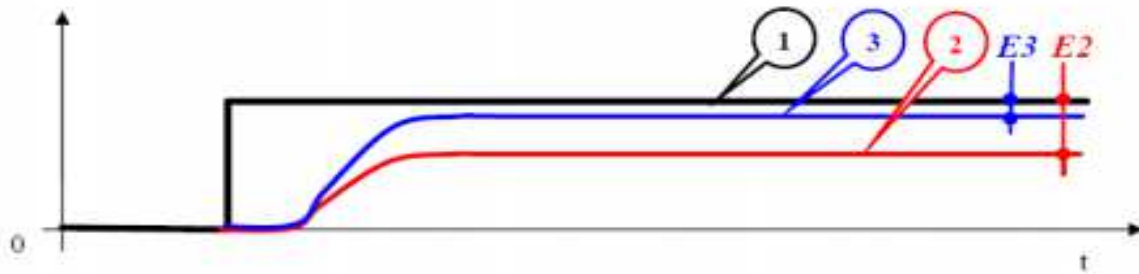


Figure II.3: la précision d'un système et l'erreur statique

1 : consigne

2 : système peu précis.

3 : système précis.

$E_2$  : erreur statique liée à la courbe 2.

$E_3$  : erreur statique liée à la courbe 3.

L'erreur s'exprime en pourcentage de la valeur de consigne.

#### b. La rapidité

C'est la capacité du système à atteindre dans les meilleurs délais son régime stable. La rapidité d'un système est définie par le temps nécessaire à la mesure pour entrer dans une zone  $\pm 5\%$  de sa valeur finale (soit entre 95% et 105%). Le système régulé est d'autant plus rapide que le temps de réponse à 5% est court.

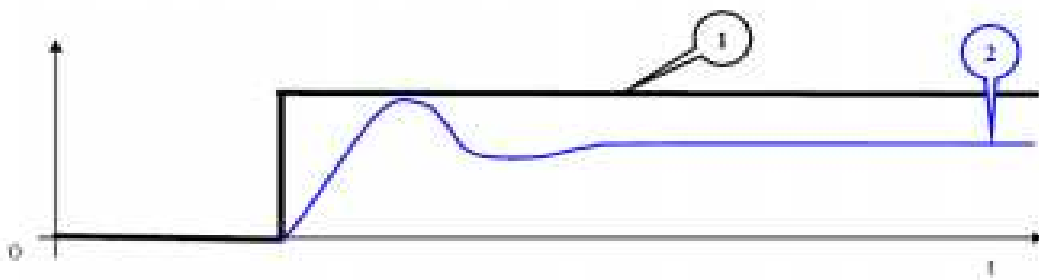


Figure II.4: la rapidité de système

### c. La stabilité

Dans le cas des systèmes linéaires représentés par une fonction de transfert, l'analyse des pôles permet de conclure sur la stabilité du système. On rappelle que, si les pôles de la fonction de transfert sont  $P_0, P_1 \dots P_n$ . Dans le cas d'une fonction de transfert continue utilisant la transformée de Laplace, tous les pôles doivent être à partie réelle strictement négative pour que le système soit stable.

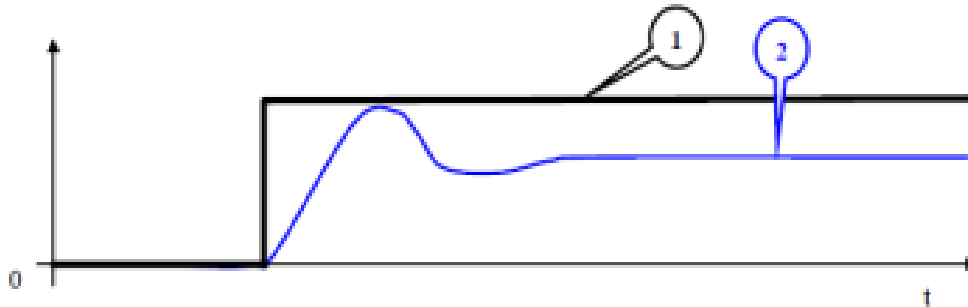


Figure II.4: système stable (1 : consigne, 2 : système stable.)

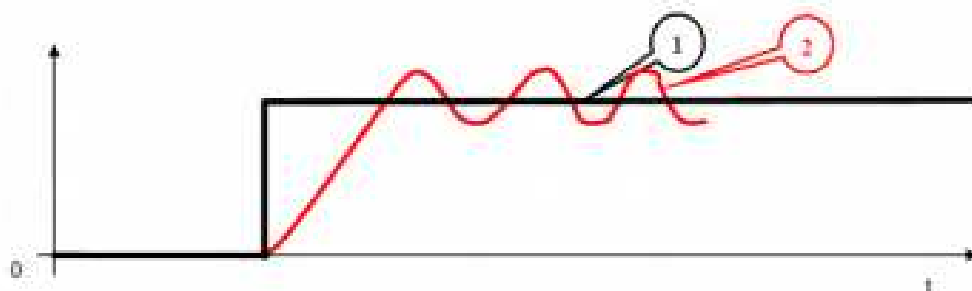


Figure II.5: système oscillant. (1 : Consigne, 2 : système oscillant.)

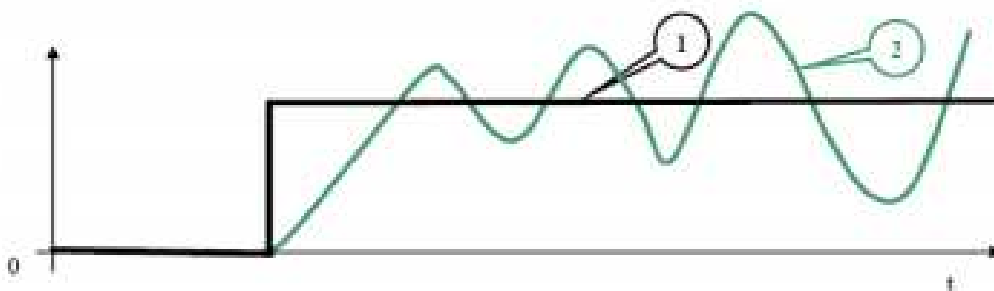


Figure II.6: système instable. (1 : Consigne, 2 : système instable.)

### II.5. Le régulateur PID :

Un régulateur Proportionnel Intégral Dérivé (PID) est un organe de contrôle qui permet d'effectuer une régulation en boucle fermée d'un procédé industriel.



Le régulateur compare une valeur mesurée sur le procédé avec une valeur de consigne. la différence entre ces deux valeurs (le signal d'erreur) est alors utilisée pour calculer une nouvelle valeur d'entrée du process tendant à réduire au maximum l'écart entre la mesure et la consigne (signal d'erreur le plus faible possible).

Le contrôle par PID peut ajuster les sorties du procédé, en fonction de l'amplitude du signal d'erreur, et en fonction du temps. il donne des résultats plus précis et un contrôle plus stable [25].

### II.5.1. L'action Proportionnel P :

L'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système :

$$\text{Consigne}(t) = k_p \cdot \varepsilon(t)$$

Ce qui en Laplace donne :  $\text{Consigne}(p) = k_p \cdot \varepsilon(p)$

Plus la valeur de  $k_p$  est grande, plus la réponse ne l'est aussi. En revanche, la stabilité du système s'en trouve détériorée et dans le cas d'un  $k_p$  démesuré le système peut même diverger.[21]

### II.5.2. L'action Intégral I :

Au contrôle proportionnel, nous pouvons ajouter l'intégration de l'erreur. Dans ce cas nous obtenons une régulation PI (proportionnel et intégré).

L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégré par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système.

$$\text{Consigne}(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt$$

Ce qui en Laplace donne :  $\text{Consigne}(p) = k_p \cdot \varepsilon(p) + k_i \frac{\varepsilon(p)}{p}$

Le terme intégral permet de compenser l'erreur statique et fournit par conséquent un système plus stable en régime permanent .plus  $k_i$  est élevé plus l'erreur statique est corrigée.[21]

### II.5.3. L'action Dérivé D :

Pour obtenir un contrôle en PID, il nous faut encore rajouter un terme. Celui-ci consiste à dériver l'erreur entre la consigne et la mesure par rapport au temps et à le multiplier lui aussi par une constante.

$$\text{Consigne}(t) = k_p \cdot \varepsilon(t) + k_i \int_0^t \varepsilon(t) dt + k_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\begin{aligned} \text{Consigne}(p) &= k_p \cdot \varepsilon(p) + k_i \frac{\varepsilon(p)}{p} + k_d \cdot p \cdot \varepsilon(p) \\ &= \varepsilon(p) \left[ k_p + k_i \frac{1}{p} + k_d \cdot p \right]. \end{aligned}$$

Le contrôle PI peut amener à un dépassement de la consigne, le terme dérivé permet de limiter cela. Lorsque le système s'approche de la consigne, ce terme freine le système en appliquant une action dans le sens opposé et permet ainsi une stabilisation plus rapide.[21]

### II.6. Méthodes de Ziegler et Nichols (ZN) :

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches heuristiques basées sur leur expérience et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité. [22]

#### II.6.1. Méthode de la réponse indicielle :

Pour obtenir les paramètres du régulateur PID, il suffit d'enregistrer la réponse indicielle du processus seul (c'est-à-dire sans le régulateur), puis de tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe. On mesure ensuite sa pente  $p$ , le retard apparent ( $L$ ) correspondant au point d'intersection de la tangente avec l'abscisse et le gain  $K_0 = y_1/E$ . On peut alors calculer les coefficients du régulateur choisi à l'aide du tableau 1. Généralement, les gains  $K_p$  proposés par Ziegler-Nichols sont trop élevés et conduisent à un dépassement supérieur à 20%. Il ne faut donc pas craindre de réduire  $K_p$  d'un facteur 2 pour obtenir une réponse satisfaisante. [18]

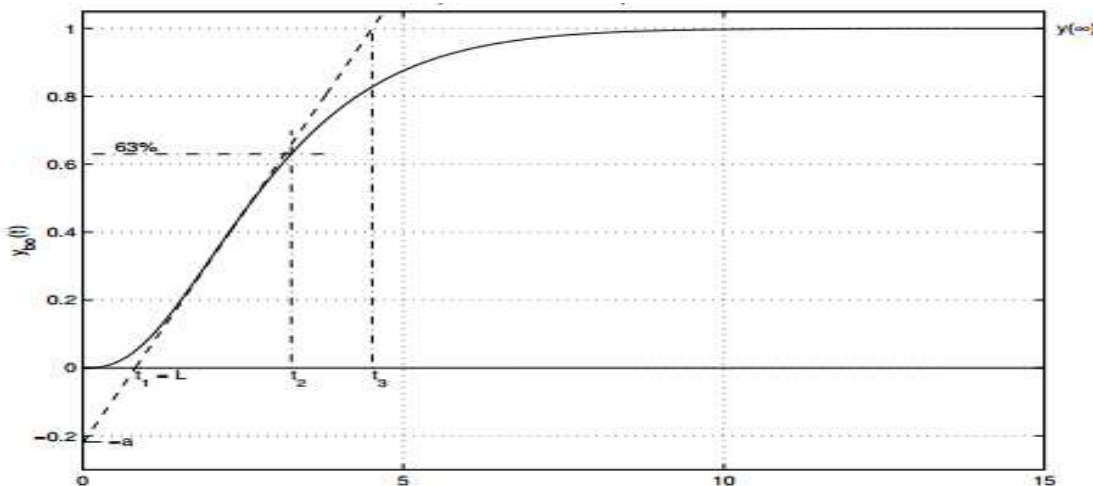
Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$1 / (pLK_0) = 1 / (aK_0)$		
PI	$0.9 / (pLK_0) = 0.9 / (aK_0)$	$3L$	
PID	$1.2 / (pLK_0) = 1.2 / (aK_0)$	$2L$	$0.5L$

**Tab. 1: Paramètres PID obtenus à partir d'une réponse indicielle**

Réponse indicielle La réponse indicielle d'un processus apériodique est illustrée par la figure. On y a mis en évidence les instants  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ . Ces instants nous permettent de définir les grandeurs suivantes :

- le retard apparent :  $L = t_1$
- la constante de temps apparente :  $T = t_2 - t_1$
- la pente de la tangente au point d'inflexion :  $p = y(\infty) / t_3 - t_1 = a / L$
- le temps mort relatif :  $\tau = L / (L + T) = t_1 / t_2$

Le rapport entre la valeur asymptotique  $y(\infty)$  et l'amplitude  $E$  du saut appliqué en entrée détermine le gain statique  $K_0$  du processus :  $K_0 = y(\infty) / E$



**Figure II.8 : Réponse indicielle d'un processus**

**II.6.2. Méthode du point critique :**

Cette méthode est basée sur la connaissance du point critique du processus. Expérimentalement, on boucle le processus sur un simple régulateur proportionnel dont on

augmente le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente ; on se trouve ainsi à la limite de stabilité. Après avoir relevé le gain critique  $K_{cr}$  du régulateur et la période d'oscillation  $T_{cr}$  de la réponse, on peut calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide du tableau 2. Ici également, les valeurs proposées conduisent à un temps de montée relativement court malheureusement assorti d'un dépassement élevé. Cette situation n'étant pas toujours satisfaisante, on peut être amené à corriger les coefficients proposés et, en particulier, à diminuer le gain  $K_p$ .

On notera que les paramètres  $T_i$  et  $T_d$  proposés par les deux méthodes de Ziegler-Nichols sont dans un rapport constant égal à 4. Le régulateur possède donc deux zéros confondus

Valant  $-1/(2T_d) = -2/T_i$ . [18]

Type	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5K_{cr}$		
PI	$0.4K_{cr}$	$0.8T_{cr}$	
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5T_{cr}$	$0.125T_{cr}$

**Tab. 2: Paramètres PID obtenus à partir du point critique**

### II.7. Conclusion :

L'asservissement par PID est aujourd'hui l'un des asservissements les plus utilisés et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, il est très simple à mettre en place et s'avère efficace pour la plupart des systèmes réels. Déplus, le calcul de coefficient laisse le choix entre plusieurs méthodes de difficulté croissante. D'une part, une méthode expérimentale et très facile à mettre en place permet d'obtenir rapidement des coefficients corrects pour des systèmes ne nécessitant pas de très grandes précisions dans l'asservissement [23]. D'autre part, des méthodes mathématiques avancées offrent des techniques pour obtenir des coefficients idéaux pour un système en particulier. Ainsi, la mise en place d'un asservissement PID peut être à la fois rapide et efficace et permettre une optimisation des coefficients pour les systèmes les plus avancés. Cependant, il est important de noter que ce type d'asservissement est limité par un certain nombre de contraintes, tout d'abord, il est peut s'avérer inefficace pour certains systèmes qui contiennent du bruit, ou qui ne sont pas linéaires. Enfin, il est possible d'optimiser la réponse d'un système en multipliant les asservissements. C'est pour ces raisons que ce modèle d'asservissement reste aujourd'hui le plus utilisé dans l'industrie

# **Chapitre III :**

## **Moteurs à courant continu**

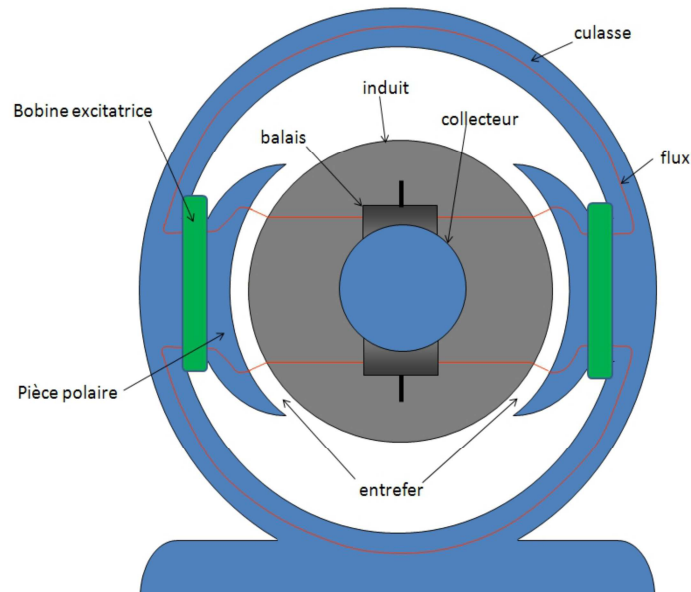
### **III.1.Introduction :**

Malgré le développement des moteurs à vitesse variable alimentés par une électronique de puissance, les machines à courant continu sont très utilisées de nos jours, notamment dans les applications automobiles, dans des applications de faible puissance utilisant des batteries (moteur de jouet) ou encore pour la traction électrique. Les structures et les principes de fonctionnement des machines à courant continu sont relativement bien connus. Aussi, il y a peu de travaux de recherche qui sont développés sur ce type de machine depuis plusieurs années.[29] En fait, l'essentiel de la recherche sur ces machines est mené par des industriels. Cette recherche porte plus particulièrement sur les matériaux qui sont utilisés pour réaliser les collecteurs et les balais. Sur des aspects purement de modélisation, la machine à courant continu est vraisemblablement la machine la plus difficile à modéliser en raison de la commutation du courant qui est réalisée par l'ensemble collecteur-balais. Il est difficile de reproduire parfaitement le contact collecteur-balais qui peut faire apparaître, dans certaines conditions de fonctionnement, des étincelles ou des arcs électriques. Pourtant une modélisation précise de ce contact est indispensable pour prédire correctement les performances de la machine et notamment sa caractéristique couple-vitesse et son rendement. Pour l'instant, il faut privilégier encore une approche expérimentale.

### **III.2.Constitution d'une machine à courant continu**

Un moteur 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, d'où l'énergie électrique est transformée en énergie mécanique. Un moteur électrique à courant continu est constitué : d'un stator qui est à l'origine de la circulation d'un flux magnétique longitudinal fixe créé par des enroulements statoriques (bobinage) soit par des aimants permanents à l'arrière du stator, se trouve la partie porte balais et les balais assurant les contacts électriques avec le rotor. Il est aussi appelé inducteur. D'un rotor bobiné relié à un collecteur rotatif inversant la polarité dans chaque enroulement rotorique au moins une fois par tour de façon à faire circuler un flux magnétique transversal en quadrature avec le flux statorique.

Les enroulements rotoriques sont aussi appelés enroulements d'induits, ou communément induit [19].

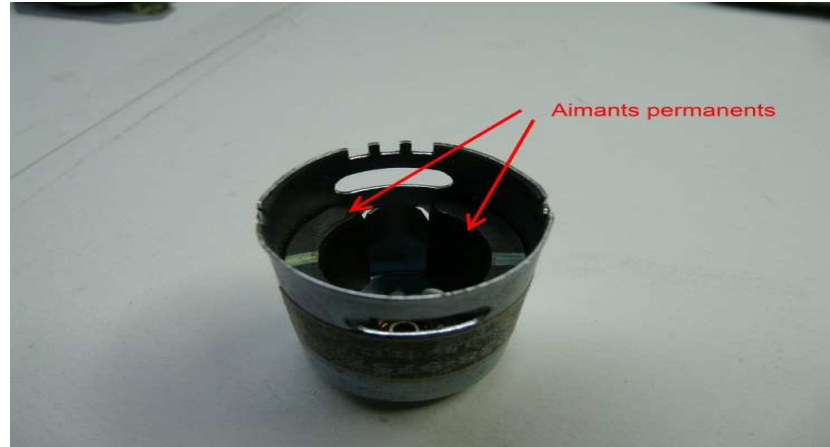


**Figure III.1: Constitution d'une machine à courant continu**

### III.2.1. L'inducteur

Le bobinage inducteur, traversé par le courant inducteur  $I_e$ , produit le flux magnétique dans la machine. Il est constitué d'un électro-aimant qui engendre la force magnétomotrice (F.M.M.) nécessaire à la production du flux. Dans les machines bipolaires (à deux pôles), deux bobines excitatrices sont portées par deux pièces polaires montées à l'intérieur d'une culasse. La culasse est généralement en fonte d'acier, tandis que les pièces polaires sont formées de tôles d'acier doux. Les bobines excitatrices sont alimentées en courant continu, et le courant qui les traverse porte le nom de courant d'excitation ( $I_e$ ). Ces bobines sont composées de plusieurs centaines de spires et sont traversées par un courant relativement faible. Dans certaines machines, les bobines et les pièces polaires sont remplacées par des aimants permanents. Le champ magnétique créé par la F.M.M. des bobines traverse les pièces polaires, la culasse, l'induit et l'entrefer. L'entrefer est l'espace d'air séparant la surface de l'induit de celle des pièces polaires : il est de l'ordre de 1,5 à 5 mm pour les machines de faible et moyenne puissance. Comme l'induit et l'inducteur sont construits avec des matériaux de faible réluctance, la majeure partie de la F.M.M. sert à « pousser » le flux à travers l'entrefer. Celui-ci doit donc être aussi peu long que possible. Le nombre de pôles que porte l'inducteur d'une machine à courant continu dépend surtout de la grosseur de la machine. Plus une machine est puissante et plus sa

vitesse est basse, plus grand sera le nombre de pôles. Les bobines excitatrices d'un inducteur multipolaire sont connectées de façon à ce que les pôles adjacents soient de polarités magnétiques opposées. [19]



**Figure III.2 : L'inducteur**

### III.2.2.L'induit

L'induit est composé d'un ensemble de bobines identiques réparties uniformément autour d'un noyau cylindrique. Il est monté sur un arbre et tourne entre les pôles de l'inducteur. L'induit constitue un ensemble de conducteurs qui coupent les lignes de champ magnétique. Les bobines sont disposées de telle façon que leurs deux côtés coupent respectivement le flux provenant d'un pôle nord et d'un pôle sud de l'inducteur. Le noyau est formé d'un assemblage de tôles en fer doux. Ces tôles sont isolées électriquement les unes des autres et portent des encoches destinées à recevoir les bobines. Les conducteurs de l'induit sont parcourus par le courant absorbé ou débité par la machine. Ils sont isolés du noyau par des couches de feuilles isolantes. Pour résister aux forces centrifuges, ils sont maintenus solidement en place dans les encoches au moyen de cales en fibre de verre. Si le courant est inférieur à une cinquantaine d'ampères, on emploie des conducteurs ronds. Au-delà de 50 A, les conducteurs sont rectangulaires, ce qui permet une meilleure utilisation du volume de l'encoche. [19]



### III.2.3. Collecteurs et balais

Le collecteur est un ensemble cylindrique de lames de cuivre isolées les unes des autres par des feuilles de mica. Le collecteur est monté sur l'arbre de la machine, mais isolé de celui-ci. Les deux fils sortant de chaque bobine de l'induit sont successivement et symétriquement soudés aux lames du collecteur. Dans une machine bipolaire, deux balais fixes et diamétralement opposés appuient sur le collecteur. Ainsi, ils assurent le contact électrique entre l'induit et le circuit extérieur. La construction du collecteur relève de la mécanique de précision. Les machines multipolaires ont autant de balais que de pôles. Les balais permettent l'injection ou la collecte du courant sur le collecteur. Lors de la construction des premières machines à courant continu, les balais étaient constitués de fils de cuivre disposés comme la paille de riz ou les branches sur les balais pour nettoyer, d'où le nom de balais. Les balais (aussi appelés « charbon ») sont en carbone (on choisit souvent du graphite). D'une part, ce matériau possède une bonne conductivité d'autre part, le frottement du couple cuivre/carbone est faible et ainsi, le collecteur ne s'use pas prématurément. La pression des balais sur le collecteur peut être réglée par des ressorts ajustables. Pour les intensités très importantes, on utilise plusieurs balais connectés en parallèle. [19]

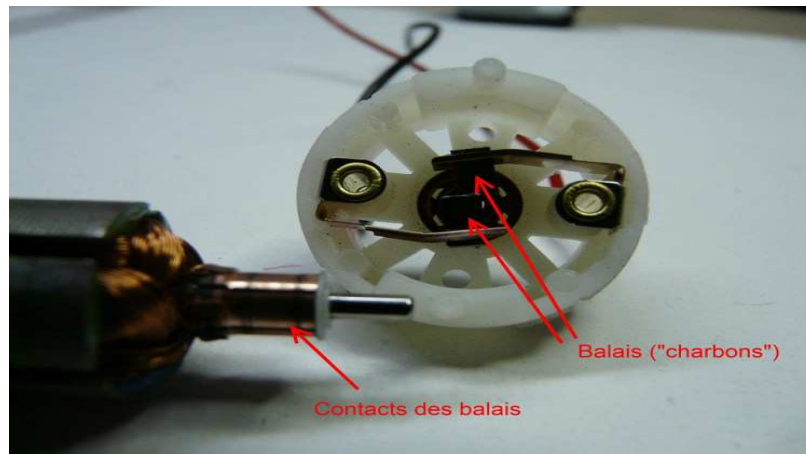


Figure III.3 : Collecteurs et balais

### III.3. Les avantages et les inconvénients

#### III.3.1. Avantages

On peut facilement faire varier leur vitesse. Longtemps omniprésentes, les MCC sont sévèrement concurrencées depuis les années 1990 par les machines à courant alternatif qui, grâce au progrès de l'électronique de puissance, sont maintenant :

- facilement réglables en vitesse.
- pas chère.
- travaille avec une tension continue.
- peuvent atteindre des vitesses de rotation très élevées. Osant une plus grande robustesse.
- facile à utiliser (2 fils).

#### III.3.2. Inconvénients

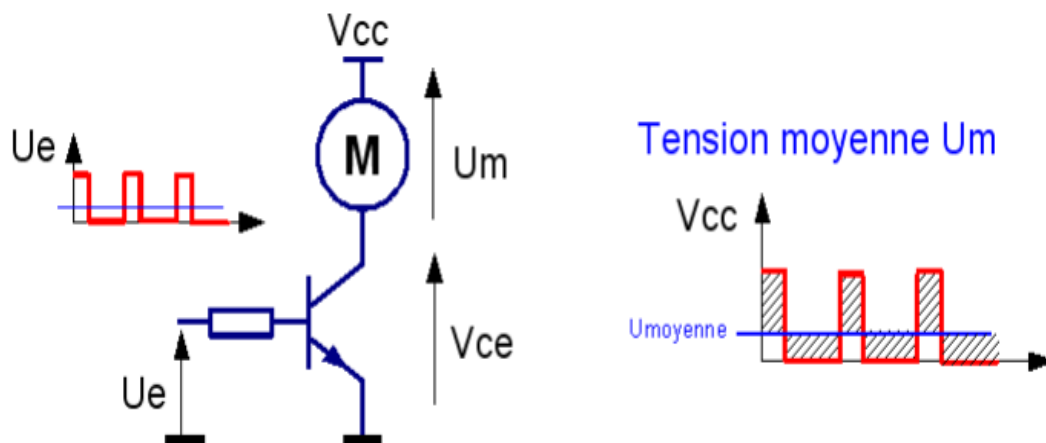
- peu de couple (car vitesse élevée, pour plus de couple => motoréducteur),
- relativement gourmand en courant,
- les balais (ou charbons) finissent par s'user.

### III.4. commande des moteurs à courant continu :

#### III.4.1. Variation de vitesse du moteur

Pour faire varier la vitesse d'un moteur on peut faire varier la tension d'alimentation à ses bornes mais dans ce cas une partie importante de l'énergie est consommée par le dispositif d'alimentation, on préfère l'alimenter de façon discontinue avec un hacheur et faire ainsi varier la tension moyenne à ses bornes.

On parle alors de Modulation par Largeur d'Impulsions (MLI), ou Pulse Wide Modulation (PWM)



**Figure III.4: commande PWM de moteur à courant continu**

Quand le transistor est saturé, le moteur est alimenté à la tension maximale. Le courant est important dans le transistor mais la tension  $V_{ce}$  est presque nulle, il n'y a donc pas d'échauffement du transistor. Quand le transistor est bloqué, le moteur n'est plus alimenté. La tension  $V_{ce}$  est maintenant maximale mais il n'y a plus de courant dans le transistor. Le rendement de ce dispositif d'alimentation est donc très bon. La fréquence est suffisamment élevée pour avoir une rotation continue et sans bruit du moteur [20].

### III.4.2. La variation du sens de rotation d'un moteur à courant continu :

Pour modifier le sens de rotation d'un moteur à courant continu, il suffit d'inverser l'alimentation à ses bornes (induit). La structure permettant de réaliser cette inversion est appelée « pont en H ».

Le pont en H est une structure électronique servant à contrôler la polarité aux bornes d'un récepteur. Il est composé de quatre éléments de commutation généralement disposés schématiquement en une forme de H d'où le nom. Les commutateurs peuvent être des relais, des transistors, ou autres éléments de commutation en fonction de l'application visée. Il permet d'inverser le sens de rotation d'un moteur à courant continu [21].

#### III.4.2.1. Principe de fonctionnement du pont en H

Le pont en H peut être symbolisé par une structure à quatre interrupteurs ouverts au repos (1). Dans ce cas, la tension aux bornes du moteur est nulle. Pour mettre en

rotation le moteur il suffit de fermer un couple d'interrupteurs (2) et de laisser les deux autres au repos. Le moteur est donc alimenté avec la tension  $U_M = V_{CC}$ . Pour modifier le sens de rotation, il suffit de permuter le couple d'interrupteurs fermés et ouverts (3). On aura donc  $U_M = -V_{CC}$ .

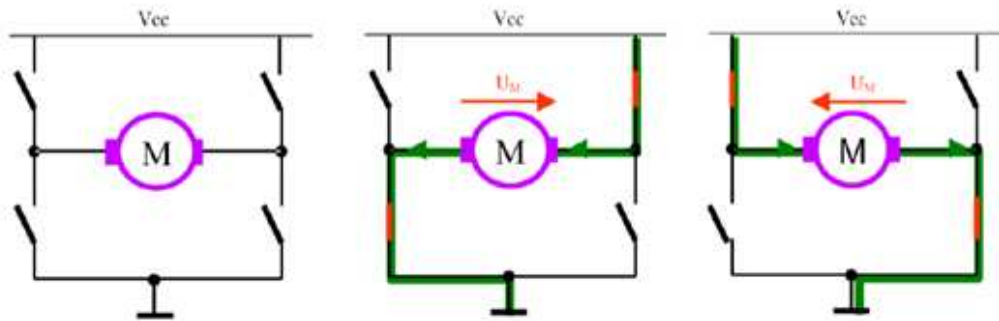


Figure III. 5: Principe de fonctionnement du pont en H

Les transistors vont assurer la fonction des interrupteurs et fonctionneront en saturé/bloqué.

Ainsi en bloquant un couple de transistor et en saturant l'autre, on établit une tension  $U_M$  aux bornes du moteur, dont on change le signe en modifiant les couples saturés/bloqués.

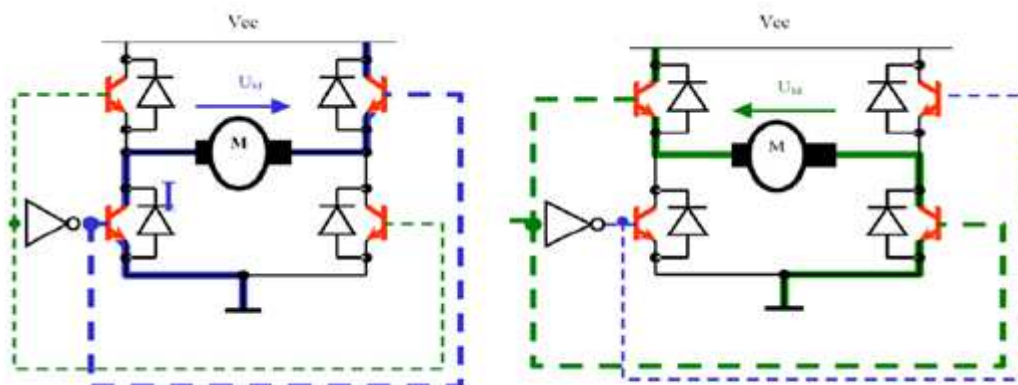
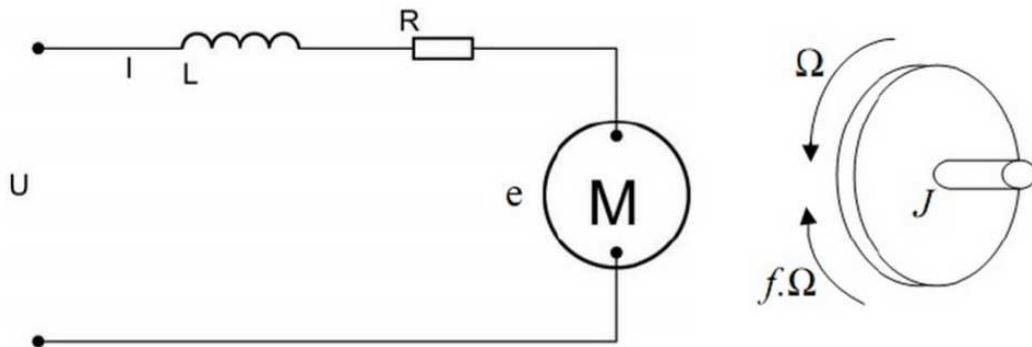


Figure III. 6: pont en H à base des transistors

Les diodes placées entre émetteurs et collecteurs des transistors jouent le rôle de diodes de roue libre (DRL). Elles permettent de protéger les transistors en devenant passantes lorsque ces derniers sont tous bloqués et qu'il faut évacuer le courant  $I_M$  de l'inductance du moteur. [20]

**III.5.Modélisation d'un moteur à courant continu**

Le moteur à courant continu peut être modélisé par le biais d'équations électrique, électromécanique et mécanique. Ces trois groupes d'équations nous permettrons de mieux appréhender le moteur à courant continu dans son fonctionnement réel.[32]



**Figure III.7 Schéma équivalent d'un moteur à courant continu**

Equations de moteur à courant continu :

Equations électriques :

Prenant en compte la résistance  $R_a$  et l'inductance  $L_a$  du circuit d'induit, du collecteur, des balais et des connexions, et en les supposant toutes deux constantes (pas de variation due à l'échauffement ni à la saturation magnétique), l'équation de tension induite s'écrit :

$$u_a = R_a i_a(t) + \frac{d\psi}{dt} = R_a i_a(t) + \frac{d(N\Phi_f)}{dt} \dots \dots \dots \text{III.1}$$

$$u_a = R_a i_a(t) + L_a \frac{d(i_a)}{dt} + e_m(t) \dots \dots \dots \text{III.2}$$

Equations électromécaniques

La tension induite  $e_m(t)$ , appelée FEM ("force électromotrice" dans l'optique de l'exploitation en générateur) est proportionnelle à la vitesse angulaire  $\omega(t)$  et au flux inducteur  $\Phi_f$  :

$$e_m(t) = k \cdot \Phi_f(t) \cdot \omega(t) \dots \dots \dots \text{III.3}$$

k est une constante dépendant de la construction de la machine. La première équation montre que  $e_m(t)$  s'oppose à  $u_a(t)$ , c'est à dire que le moteur réagit en créant une FEM

$e_m(t)$  tendant à équilibrer à  $u_a(t)$ . Cet effet correspondra à une contre-réaction bien visible dans le schéma fonctionnel du moteur

Le couple électromagnétique :

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

$$T_{em}(t) = k \cdot \Phi_f(t) \cdot i_a(t) \dots \dots \dots \text{III.4}$$

Equation mécanique

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

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{em}(t) - T_r(t) - T_f(t) - B\omega(t) \dots \dots \dots \text{III.5}$$

**III.5.1. La fonction de transfert**

L'objectif de cette partie est de déterminer une relation mathématique, sous forme de fonction de transfert. Pour ce faire, la structure de la fonction de transfert est déterminée à partir des équations physiques régissant le fonctionnement du moteur à courant continu aiment permanent. Les paramètres de cette fonction de transfert sont ensuite identifiés. [32]

$$\Omega(p) = \frac{kI}{jp+f} \dots \dots \dots \text{III.6}$$

$$I = \frac{(jp+f)}{k} \Omega(p) \dots \dots \dots \text{III.7}$$

Et en remplaçant cette nouvelle expression de I(p) dans l'équation

$$u_a(p) = R_a I(p) + p L_a I(p) + K\Omega \dots \dots \dots \text{III.8}$$

**On obtient :**

$$u_p(p) = R \cdot \frac{(jp+f)}{k} \Omega(p) + L \frac{(jp+f)}{k} \Omega(p) p(p) + k\Omega \dots \dots \dots \text{III.9}$$

$$\frac{u}{\Omega} = \frac{Rj\Omega p + Rf\Omega + Lj\Omega p^2 + Lf\Omega p + k^2\Omega}{k} \dots\dots\dots \text{III.10}$$

$$T = \frac{\Omega}{u} = \frac{k}{Ljp^2 + (Rj+f)p + f + k^2} \dots\dots\dots \text{III.11}$$

Identifier un système consiste à trouver un modèle mathématique représentatif du comportement statique et dynamique. ce modèle peut revêtir la forme explicite d'une fonction de transfert  $F(p)$  ou implicite sous forme d'un graphe représentant gain et phase de la réponse harmonique  $F(j\omega)$ . Ce modèle issu d'une étude physique exploitant des lois connues (modèle de connaissance) ou d'une étude expérimentale exploitant la réponse à des stimuli connus sera plus ou moins précis, complet, réaliste, simplifié, approximatif : il doit en tout cas se prêter à une finalité primordiale pour l'automaticien, à savoir la synthèse d'un correcteur. [23]

**II.5.2. Identification en boucle ouverte**

On suppose pouvoir accéder directement à l'entrée du système ; la sortie est disponible sur le capteur qui élabore normalement le signal de retour. Si le système est déjà sous contrôle d'un régulateur, il suffit de le placer en marche dite « manuelle » (boucle ouverte) et de régler l'action proportionnelle à 100% (gain de 1). [23]

**III.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel sur la constitution de la machine à courant continu, son principe de fonctionnement. et nous avons aussi exposé les différentes commandes de moteur à courant continu (variateur de vitesse et de sens).

Nous avons fait aussi rappel à la fonction de transfert des moteurs à courant continu.

**Chapitre IV :**  
**La partie pratique et les résultats**  
**obtenus**



### IV.1. Introduction :

Le développement de la microélectronique et la micro-informatique met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur des circuits à très haut degré d'intégration dont les possibilités matérielles sont encore accusées par leur facilité de programmation tel que l'Arduino et les microcontrôleurs. Comme en électrotechnique, on s'intéresse toujours en premier lieu à la machine à courant continu car il est possible d'obtenir de manière relativement simple sa modélisation il s'ensuit que la machine à courant continu est une référence, aussi bien en fonctionnement moteur qu'en génératrice.

Ce chapitre s'articule sur trois axes principaux :

- L'identification de système (moteur à courant continu).
- La régulation par un contrôleur PID.
- Implémentation de la commande sur la carte Arduino.

### IV.2. Description :

#### IV.2.1 Le problème à étudier :

Réalisation d'un dispositif de dépôt de couche mince « Spin-coating ».

Pour ce faire on a besoin :

- Intégrer un moteur à courant continu qui permet la rotation du porte-substrat.
- Contrôler deux paramètres : la vitesse et le temps de rotation du moteur.
- Intégrer un clavier pour entrer la vitesse et le temps de rotation.
- Un afficheur LCD pour visualiser les valeurs choisies.

IV.2.2 L'algorithme de commande :

On commence par l'insertion de temps et la vitesse de rotation à l'aide d'un clavier, le microcontrôleur va effectuer la vérification, si les données ne sont pas complètes il va attendre l'insertion des données manquantes, sinon il va afficher le temps et la vitesse de rotation actuelle du moteur, donc le système démarre s'il fonctionne correctement (le moteur atteint la consigne) le système continue à tourner jusqu'à l'écoulement du temps, sinon (autres problèmes) là il faut que l'utilisateur intervienne pour redémarrer le système et recommencer la procédure.

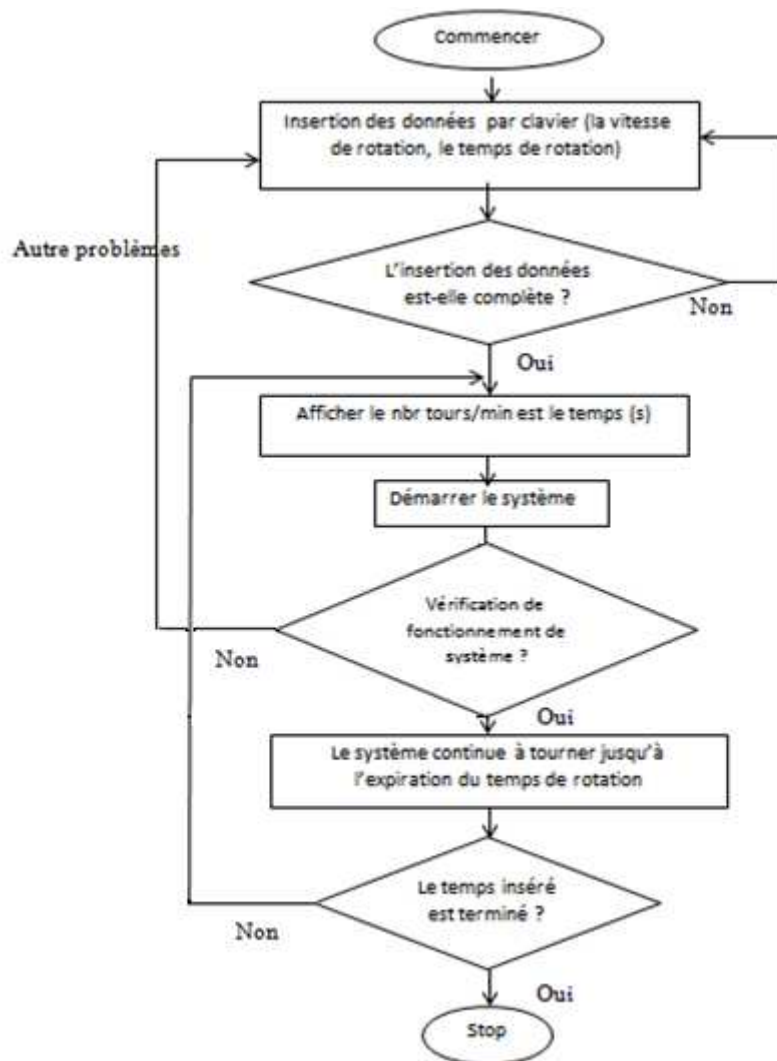


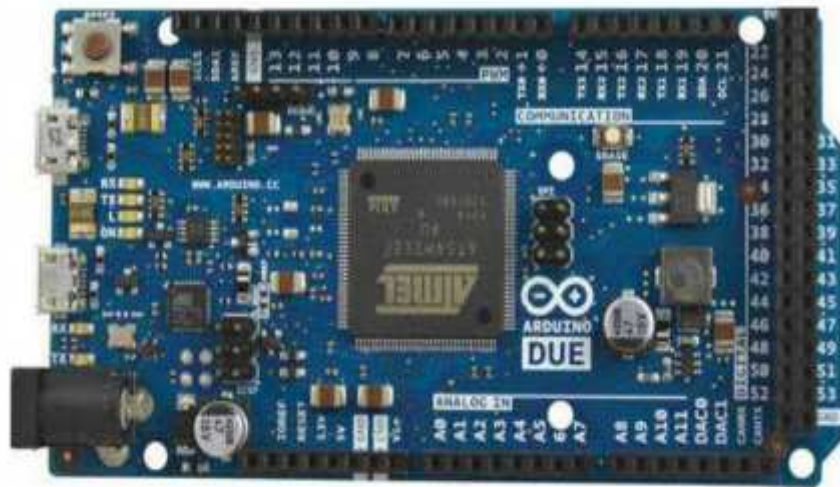
Figure IV.1 L'algorithme de commande

### IV.3 Présentation de la carte Arduino

Les cartes à microcontrôleur de type Arduino sont des nouveaux outils open sources Software et Hardware de développement des systèmes électronique pour la commande, l'asservissement et l'automatisation, elles peuvent être utilisées par des professionnels ainsi que par des amateurs. Les cartes Arduino sont muni d'un processeur de type ATmega SAM3X8E pour la carte DUE et microcontrôleur ATmega328 pour la carte UNO.

#### IV.3.1 ArduinoDUE :

L'Arduino Due est la première carte Arduino équipée d'un processeur 32 bits. La fréquence d'horloge de 84 MHz permet de réaliser des calculs complexes en un temps record. De plus, les programmes les plus lourds disposent désormais d'une capacité mémoire suffisante. Comme toutes les cartes Arduino antérieures utilisant une tension d'entrée de 5 V, des problèmes risquent de se poser si l'on ne sait pas que les entrées de la carte Arduino Due sont limitées à une tension de 3,3 V. La carte risque d'être irrémédiablement détruite [28].



**Figure IV.2 : carte arduino DUE**

Voici un résumé des spécifications de la carte Arduino Due :

Microcontrôleur : ATmega SAM3X8E basé sur une architecture ARM Cortex M3 à 32 bits

Fréquence d'horloge : 84MHz

Tension de service : 3,3 V (attention, ce n'est pas du 5 V !)

Tension d'entrée (recommandée) : 7-12 v

Tension d'entrée (limite) : 6-20V

Ports numériques : 54 entrées et sorties (12 sorties commutables en MLI)

Ports analogiques : 12 entrées analogiques

Courant maxi. Par broche 3,3 V (c.c.) : 800mA

Courant maxi. Par broche 5 V (c.c.) : 800mA

Memoire: 512 Ko Flash, 94 Ko SRAM {2 banes: 64 Ko + 32 Ko), 512 octets EEPROM

Dimensions : 10,2 cm x 5,3 cm

### IV.3.2 les avantages et les inconvénients de la carte [28] :

#### • Avantages

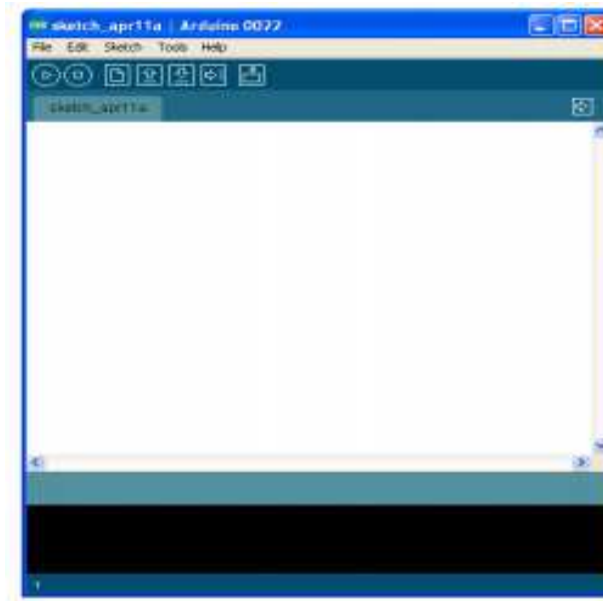
- Processeur ARM 32 bits;
- Nombreuses entrées et sorties pour raccorder des capteurs ou des actionneurs ;
- Broches UART étendues (4 ports de communication série matériels) ;
- Connexion USB-OTG (On-The-Go);
- Deux CNA (convertisseur numérique-analogique) qui peuvent être utilisés pour générer des signaux audio, par exemple ;
- Deux bus TWI (Two Wire Interface);
- Peut recevoir des shields Arduino à condition qu'ils fonctionnent en 3,3 V et qu'ils soient conformes avec le brochage de l'Arduino 1.0 (à vérifier absolument).

#### • Inconvénients

- Tension de fonctionnement de 3,3 V !
- Ne pas utiliser de shields Arduino qui fonctionnent en 5 V.

### IV.3.3 Le logiciel Arduino

Arduino IDE (Integrated Development Environment) est gratuit et open source. Ce logiciel permet d'écrire, de modifier un programme et de le convertir en une série d'instructions compréhensibles pour la carte Arduino pour réaliser l'interfaçage avec Matlab/simulink et implémenter la commande directement. [29]



**Figure IV.3 : Interface de logiciel Arduino**

Structure d'un programme Arduino Le langage de programmation Arduino dérivé du langage C++ et il en respecte les règles de syntaxe :

1. Une ligne qui commence par `"/` est considérée comme un commentaire.
2. Un paragraphe qui commence par `"/*` et qui se termine par `*/` est considéré comme un commentaire.
3. Toute ligne d'instruction de code doit se terminer par un point-virgule `;`
4. Un bloc d'instructions (définition d'une fonction, boucle `"while"` ou `"if"/"else"...`) doit être délimité par des accolades ouvrantes `"{"` puis fermantes `"}"`.
5. Toutes les variables doivent être déclarées, ainsi que leur type (`int,float,...`) avant d'être utilisées. Un programme (ou "sketch") Arduino est constitué de 2 fonctions distinctes :

a). La fonction de configuration "void setup" exécutée une seule fois au lancement du programme.

b). La fonction "voidloop" qui est ensuite exécutée indéfiniment en boucle.

Remarque : On peut relancer le programme en actionnant le bouton poussoir "reset" sur la carte.

### IV.4 Arduino Motor Shield

Le bouclier moteur (Shield motor) Arduino est basé sur la L298, qui est un pilote à double pont complet conçu pour piloter des charges inductives telles que des relais, des solénoïdes, DC et moteurs pas à pas. Il nous permet de conduire deux moteurs à courant continu avec notre carte Arduino, le contrôle de la vitesse et la direction de chacun indépendamment. On peut également mesurer l'absorption de courant du moteur de chaque moteur, entre autres caractéristiques. Le bouclier est compatible, ce qui signifie qu'on peut créer rapidement des projets en branchant des modules à la carte.

Le bouclier moteur Arduino doit être alimenté uniquement par une alimentation externe. Étant donné que le circuit intégré L298 monté sur le blindage comporte deux connexions électriques distinctes, l'une pour la logique et l'autre pour le conducteur d'alimentation du moteur. Le courant du moteur requis dépasse souvent la note maximale de courant USB.

Pour éviter d'endommager la carte Arduino sur laquelle le blindage est monté, il est recommandé d'utiliser une alimentation externe qui fournit une tension entre 7 et 12V. Si notre moteur nécessite plus de 9V il faut séparer les lignes électriques de l'écran et la carte Arduino sur laquelle le blindage est monté. Ceci est possible en coupant le cavalier "Vin Connect" placé sur la face arrière de l'écran. La limite absolue pour le Vin aux bornes à vis est 18V

Les broches d'alimentation sont les suivants:

Vin sur le bornier à vis est la tension d'entrée du moteur connecté au blindage. Une alimentation externe connectée à cette broche fournit également le pouvoir de la carte Arduino sur lequel est monté. En coupant le cavalier "Vin Connect" vous faites ce une ligne électrique dédiée pour le moteur.

GND Masse sur le bornier à vis.

Le bouclier peut fournir 2 ampères par canal, pour un total de 4 ampères au maximum [32].

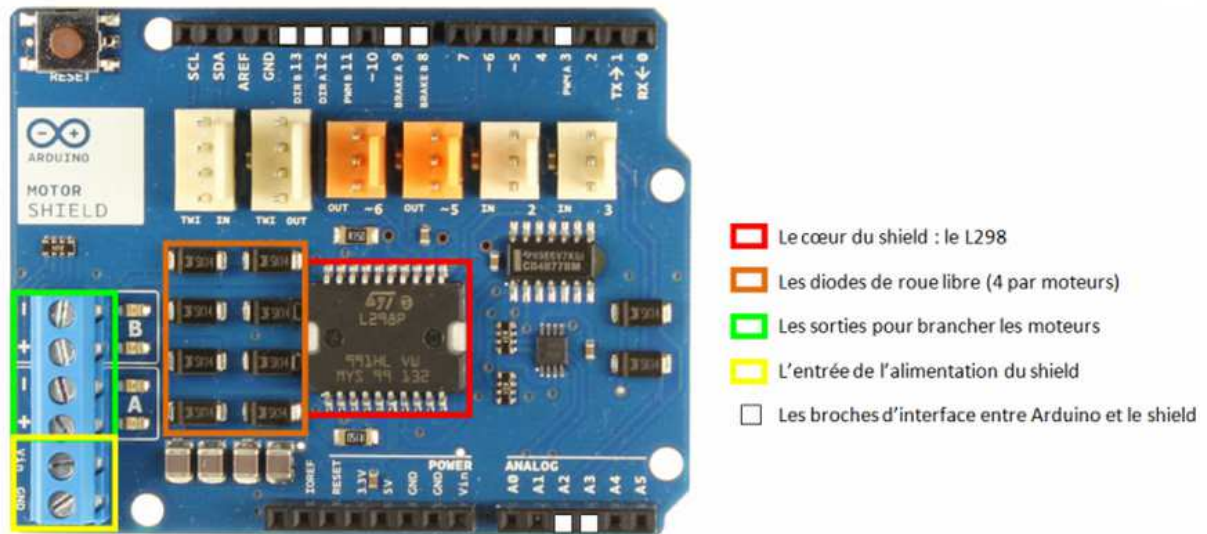


Figure IV.4 : shield moteur

### IV.5 Commande du moteur à courant continu avec la carte Arduino

#### IV.5.1 Présentation des sorties analogiques (mode PWM)

La carte Arduino dispose des sorties qui peuvent être utilisées en mode PWM, c'est-à-dire en modulation de largeur d'impulsion. Ce sont des signaux logiques binaires de fréquence constante (500Hz) mais de rapport cyclique variable.



Figure IV.5: signal PWM

Lorsqu'un moteur est alimenté par ce type de tension, tout se passe comme si il était alimenté par une tension continue ajustable entre 0V (rapport cyclique= 0) et 5V (rapport cyclique=255). Ces sorties doivent être initialisées comme des sorties digitales.

La syntaxe de l'instruction permettant de générer le signal PWM est la suivante :

`analogWrite (pin, valeur) ;`

- pin : la pin sur laquelle on souhaite envoyer le signal.
- valeur : le rapport cyclique entre 0 et 255.

$$V_{out} = V_S \cdot \frac{\tau_o}{\tau_c} \text{ avec } \tau_c = 2 \text{ ms}$$

### IV.5.2 Présentation du schéma électronique

Le circuit électronique ci-dessous permet de contrôler un moteur à courant continu à partir des sorties PWM de la carte Arduino. Ce circuit doit amplifier le courant de sortie de la carte Arduino, et doit aussi supporter la fréquence de signal PWM.

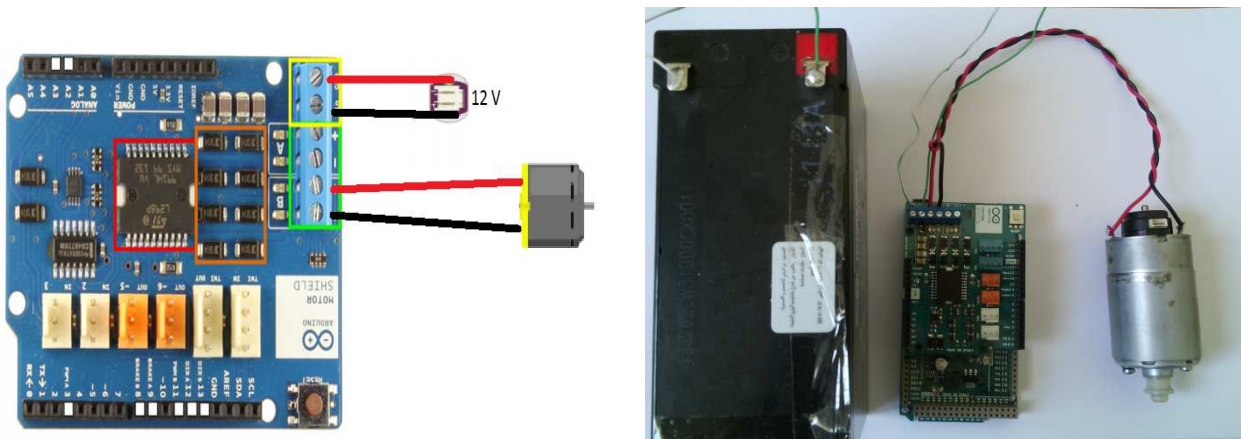


Figure IV.6 : Branchement de la carte Arduino avec un moteur DC

### IV.6 Exploitation de l'encodeur optique avec la carte Arduino

#### IV.6.1 Présentation du capteur (encodeur) :

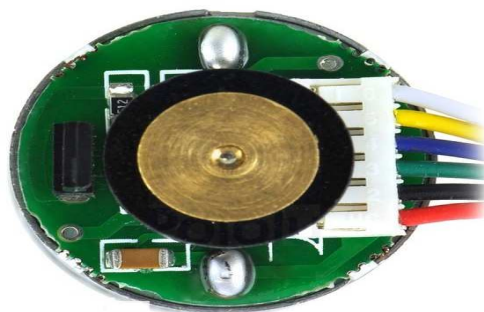


Figure IV.7 : Encodeur

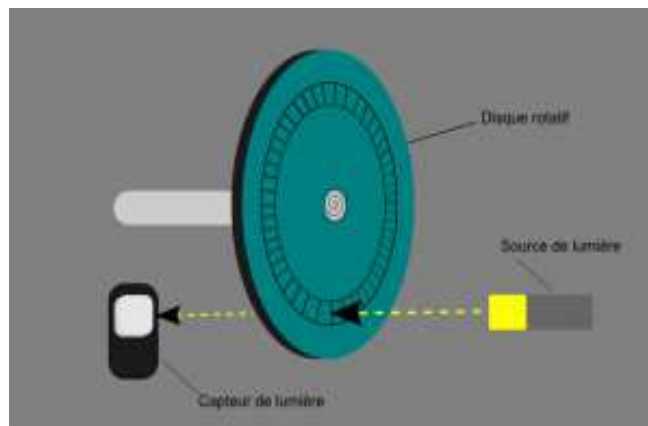


Un encodeur est un dispositif électromécanique qui génère un signal électrique en fonction de la position ou du déplacement de l'élément mesuré. Les encodeurs rotatifs sont utilisés pour mesurer le déplacement (sens et vitesse de rotation) de moteur.

Un encodeur permet d'obtenir une information en quasi-temps réel sur la position et vitesse du moteur et donc d'appliquer des corrections (on parle de boucle de contrôle) si le comportement du moteur n'est pas conforme à l'ordre qu'on lui a transmis, ce qui arrive fréquemment.

### IV.6.2 Principe de fonctionnement

La plupart des encodeurs pour moteur utilisent des capteurs optiques (mais il existe des encodeurs utilisant une information mécanique ou magnétique). L'idée est de placer un disque alternant des zones transparentes et opaques devant un capteur de lumière et de relier le disque solidaire de l'axe de rotation. La fréquence d'apparition des zones blanches et noires (ou de tout autre principe offrant un contraste suffisant) devant le capteur de lumière va indiquer la vitesse de rotation. Le schéma suivant présente le principe de fonctionnement basique de l'encodeur :



**Figure IV.8: principe de fonctionnement de l'encodeur**

Lorsque le disque tourne, les segments opaques bloquent la lumière alors que les segments transparents la laissent passer. Ceci génère des impulsions d'onde carrée qui peuvent ensuite être interprétées comme position ou mouvement.

Si le fonctionnement précédent indique la vitesse de rotation, il n'indique pas le sens de rotation. Ce problème est résolu dans par l'encodeur en quadrature (l'encodeur en quadrature le nom que l'on donne à l'encodeur rotatif incrémental). L'encodeur en quadrature comporte

deux pistes de code dont les secteurs sont décalés de 90 degrés d'une piste à l'autre. Ces deux pistes génèrent deux signaux de sortie. Si le premier signal devance le second alors le disque tourne dans le sens des aiguilles d'une montre et dans l'autre sens dans le cas contraire. Par conséquent, en mesurant à la fois le nombre d'impulsions et les phases relatives des deux signaux on peut mesurer la position et la direction de la rotation de moteur.

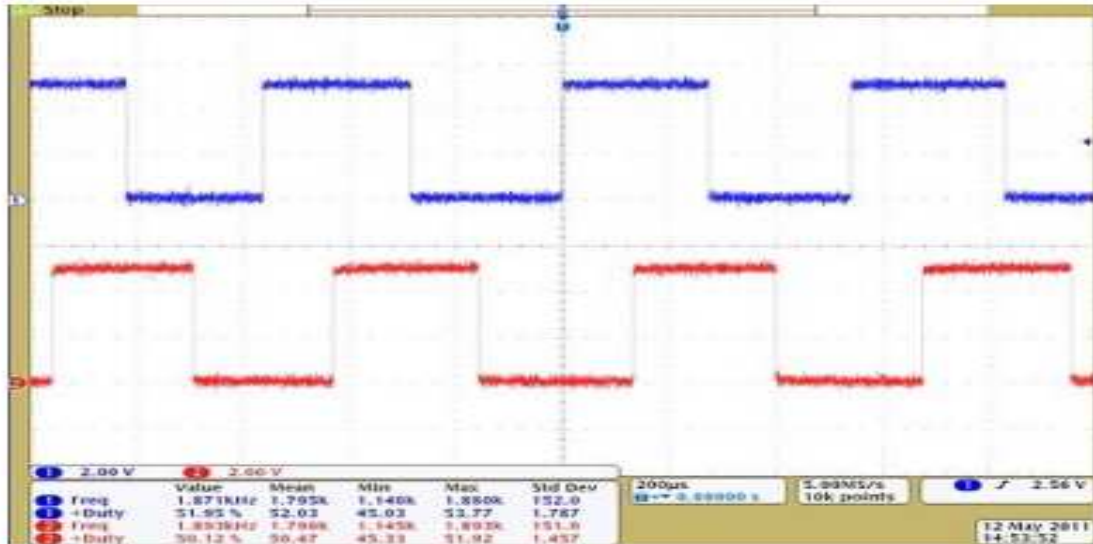


Figure IV.9 : Les deux signaux issus de l'encodeur optique

### IV.6.3 L'instruction de base pour l'acquisition

Le programme d'acquisition des impulsions se base sur la fonction suivante :

Attach Interrupt( interruption , fonction , mode )

Lorsqu'une interruption externe survient cette instruction spécifie la fonction à appeler. La plupart des cartes Arduino ont deux interruptions externes : interruption externe n°0 sur la broche numérique 2 et interruption externe n°1 sur la broche numérique 3. Les paramètres de cette fonction sont :

- interruption : le numéro de l'interruption (type int)
- fonction : la fonction à appeler quand l'interruption survient ; la fonction doit recevoir aucun paramètres et ne renvoie rien. Cette fonction est également appelée une routine de service d'interruption (ou ISR).
- mode : définit la façon dont l'interruption externe doit être prise en compte. Quatre constantes ont des valeurs prédéfinies valables :
- LOW : pour déclenchement de l'interruption lorsque la broche est au niveau BAS
- CHANGE : pour déclenchement de l'interruption lorsque la broche change d'état BAS/HAUT

- RISING : pour déclenchement de l'interruption lorsque la broche passe de l'état BAS vers HAUT (front montant)
- FALLING : pour déclenchement de l'interruption lorsque la broche passe de l'état HAUT vers l'état BAS (front descendant)

### IV.6.4 Mesure de la vitesse de rotation avec un codeur incrémental

La mesure de la vitesse se fait simplement en comptant le nombre d'impulsions pendant un temps fixe. Les données du problème sont les suivantes :

- Le codeur génère 120 impulsions à chaque fois qu'il fait un tour
- La cadence d'échantillonnage utilisée pour l'asservissement sera de 0.01 s.

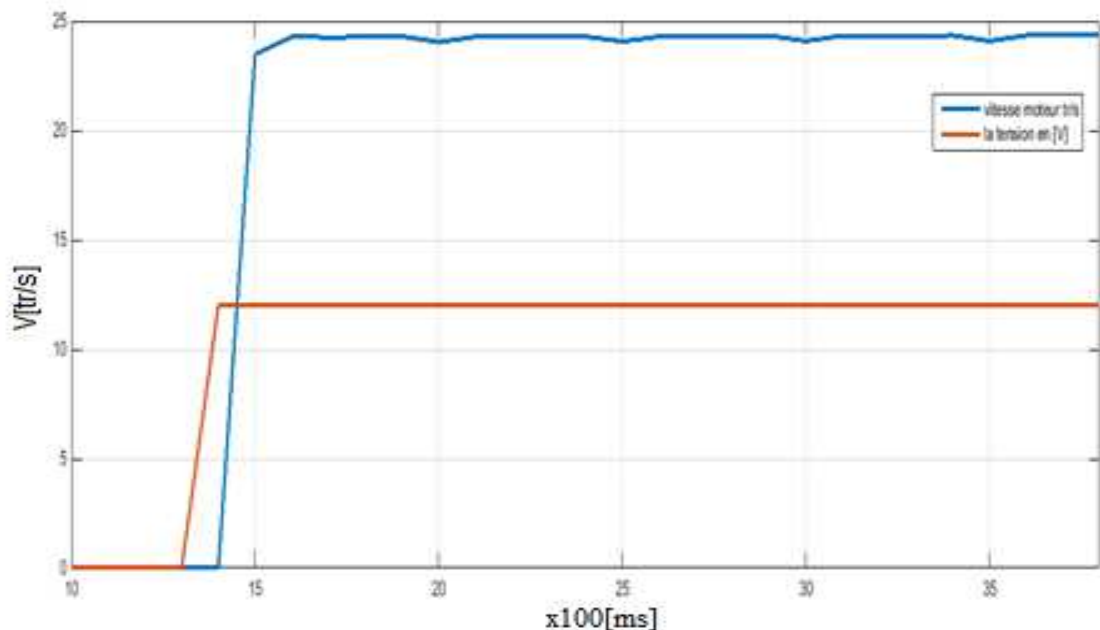


Figure IV.10 : la vitesse de moteur en tr/s à une tension de 12V

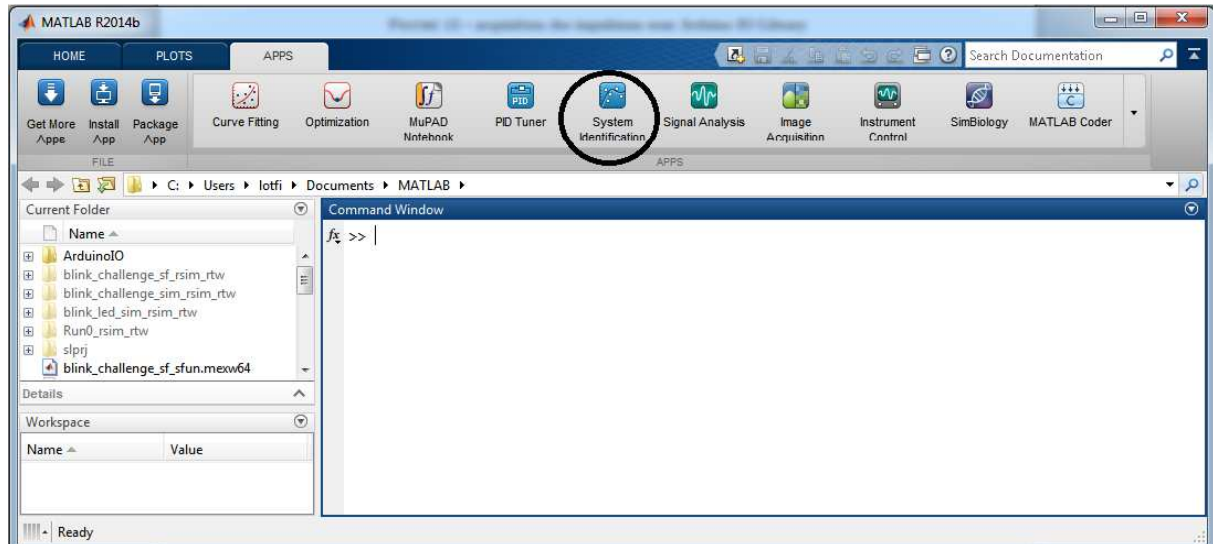
### IV.7 Modélisation du système

Le but de cette partie est de déterminer la fonction de transfert échantillonnée de notre système en boucle ouvert notée  $G(p)$ . L'entrée du système est la vitesse de consigne  $U(t)$  en (tours/min) et la sortie est la vitesse  $S(t)$  en (tours/min).

#### IV.7.1 Présentation de l'étape d'identification avec Matlab

Identification System Toolbox fournit des fonctions MATLAB, Simulink blocs, et une application pour la construction de modèles mathématiques des systèmes dynamiques à partir des données entrées-sorties mesurées. Il vous permet de créer et d'utiliser des modèles de

systèmes dynamiques pas facilement modélisés à partir des principes ou des spécifications. Vous pouvez utiliser les données dans le domaine temporel et le domaine fréquentiel d'entrée-sortie pour identifier à temps continu et des fonctions de transfert en temps discret, des modèles de processus et des modèles espace-état. La boîte à outils fournit également des algorithmes pour l'estimation des paramètres intégrés.



**Figure IV.11 : L'utilisation de l'outil System Identification**

### IV.7.2 Acquisition de la réponse indicielle du système

Plusieurs méthodes sont utilisées pour la modélisation d'un système comme la détermination des équations physiques du système, l'étude de la réponse d'un système à une entrée....etc. Dans notre cas on va identifier notre système en étudiant la réponse de notre système à une consigne de vitesse.

### IV.7.3 Détermination de la fonction de transfert $G(p)$

Après avoir déterminé la réponse du système, on passe à la détermination de la fonction de transfert  $G(p)$ . donc en suit les étapes suivantes :

### 1. Ouvrir l'outil System identification Tool

L'application qui nous permet de identifier notre système

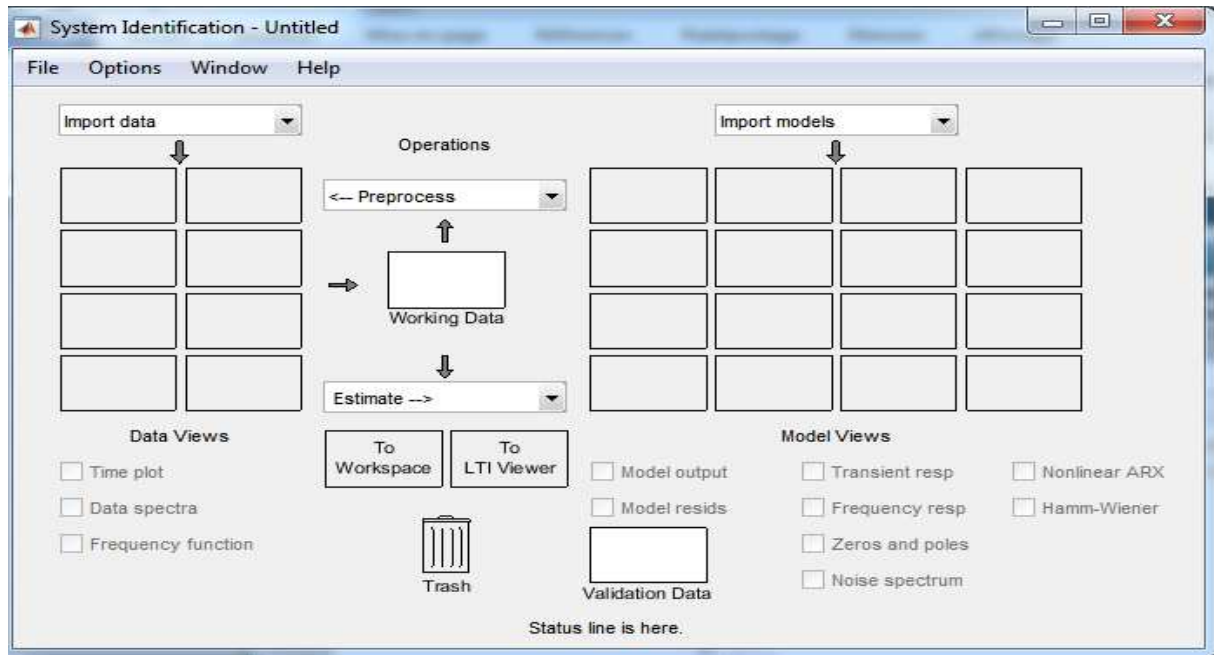


Figure IV.12 : L'interface de l'outil System identification

### 2. Cliquer sur import data et choisir Time domain data.

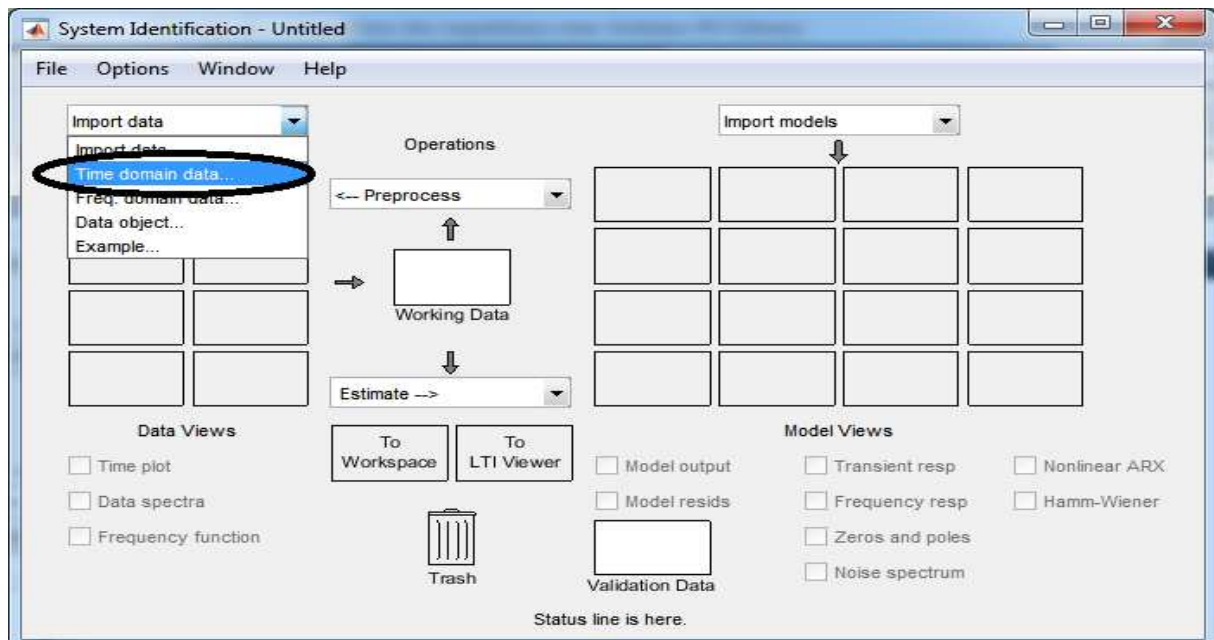


Figure IV.13 : Choix des types des données "Time Domain Data"

2. Entrer le nom de la variable Input et la variable Output ainsi que temps de starting time et sample time. Enfin cliquer sur Import.

(Input, Output) sont les vecteurs (entrées, sorties) de système récupéré à l'aide de l'encodeur.

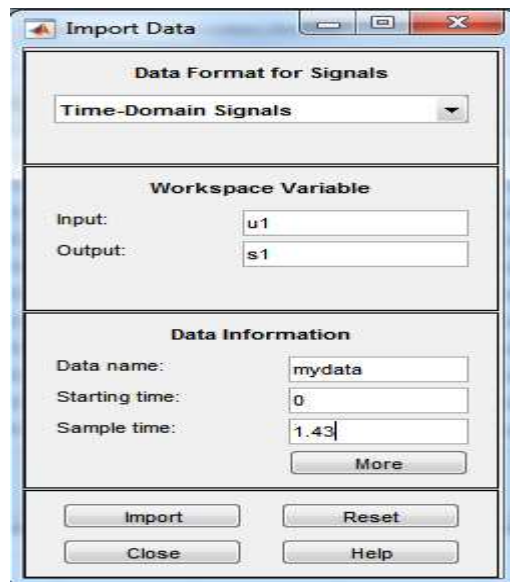


Figure IV.14 : Saisie des données relatives aux Input et Output du système

4. Cliquer sur Estimate et choisir Transfer Function Models

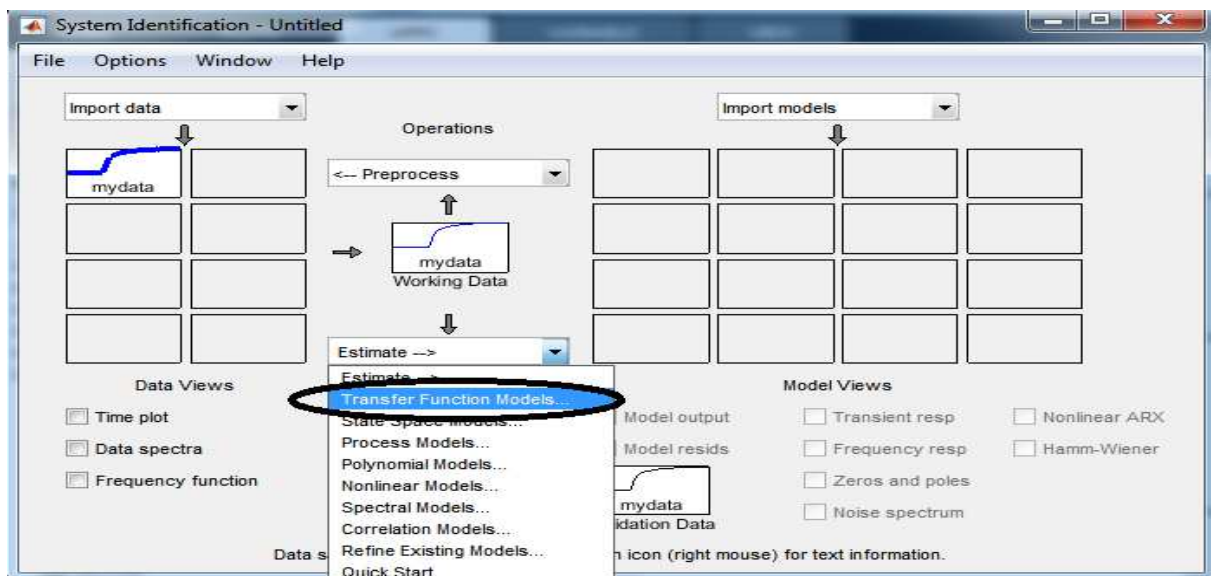


Figure IV.15 : Choix de la description du système à estimer "Transfer Function"

5. Entrer le nombre de pôle et de zéro ensuite cliquer sur Estimate.

Après l'étude effectuée sur le moteur à courant continu à aimant permanent (voir le chapitre III) on a constaté que le MCC se modélise par une fonction de transfert de 2<sup>ème</sup> ordre ou le nombre de pôles de 2 et nombre de zéros et zéro.

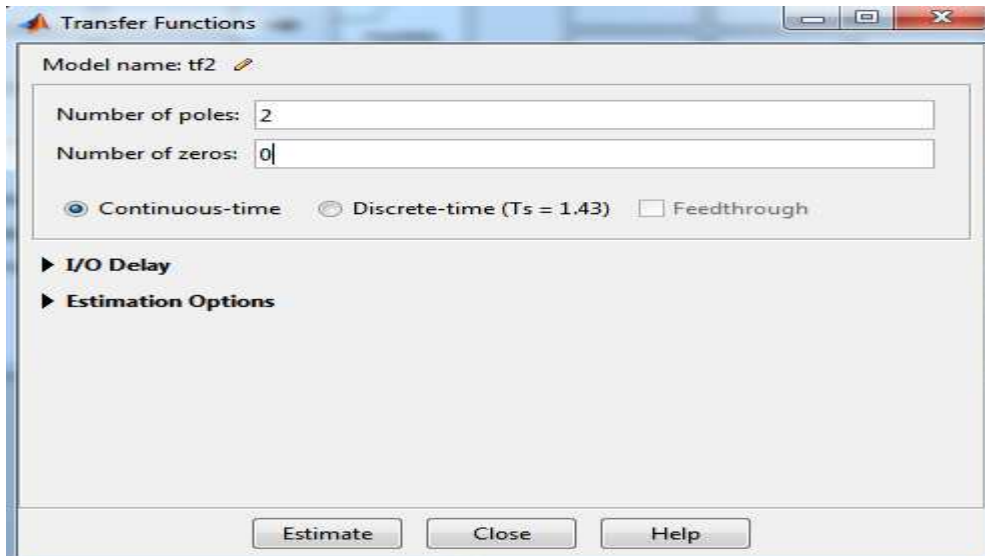


Figure IV.16 : Choix du nombre des pôles et zéros de la fonction de transfert à estimer

6. Vous pouvez revenir à l'interface System Identification Tool et cliquer deux fois sur tf1 pour voir le résultat.

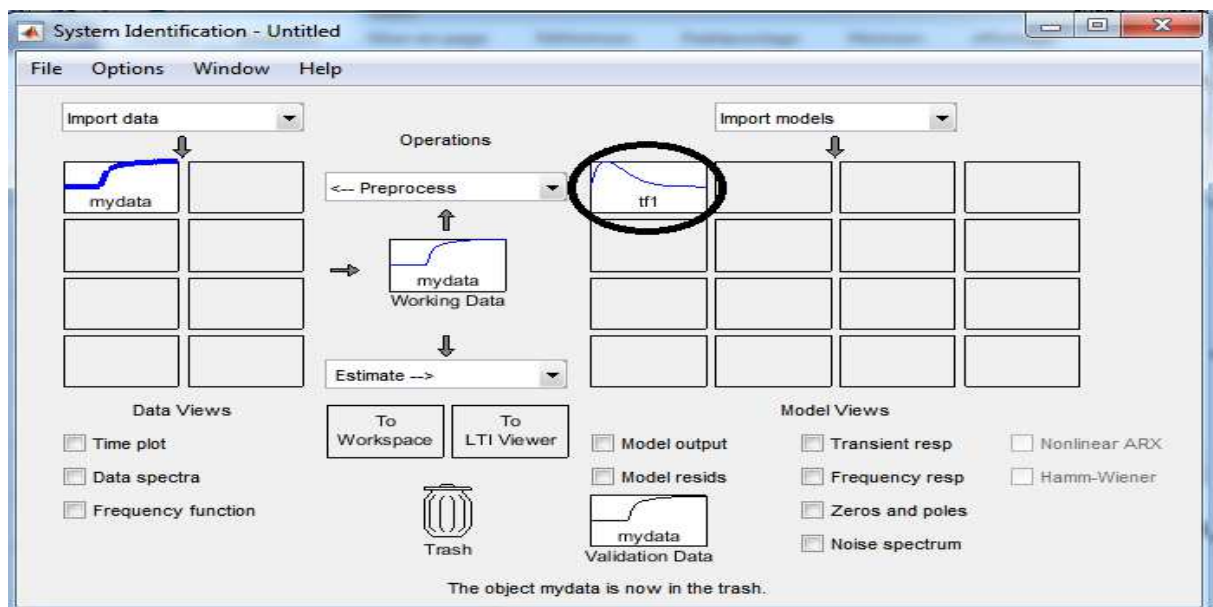


Figure IV.17 : Visualisation du résultat de l'estimation

7. Une fenêtre apparaît dans laquelle vous trouvez G(p).

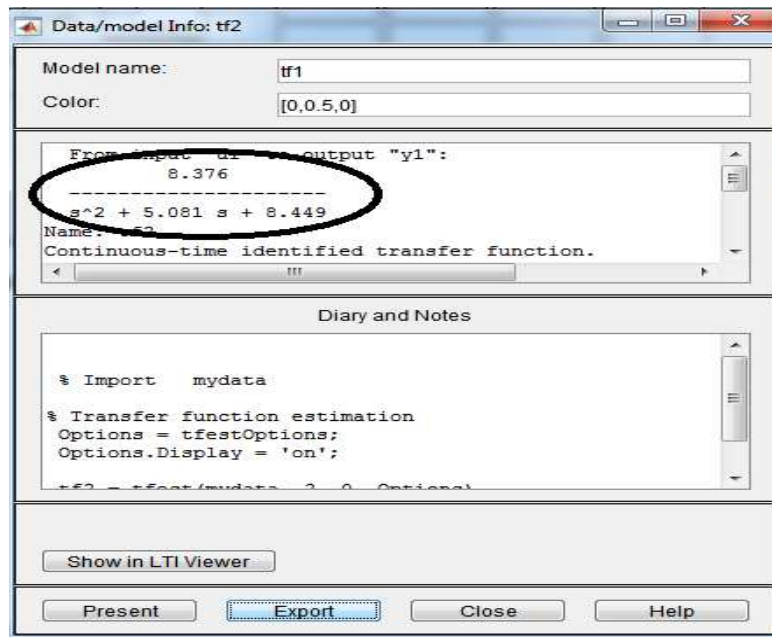


Figure IV.18 : Récupération de la fonction de transfert estimée

La fonction de transfert obtenue est  $G(P) = \frac{8.376}{s^2 + 5.081 s + 8.449}$

## IV.8 Identification des paramètres de PID :

### IV.8.1 Outil Matlab PID Tuner:

Cette étape consiste à utiliser l'outil Matlab PID Tuner pour déterminer les différents paramètres de notre régulateur PID à savoir  $K_p$ ,  $K_i$  et  $K_d$  en fonction de notre objectif de commande.

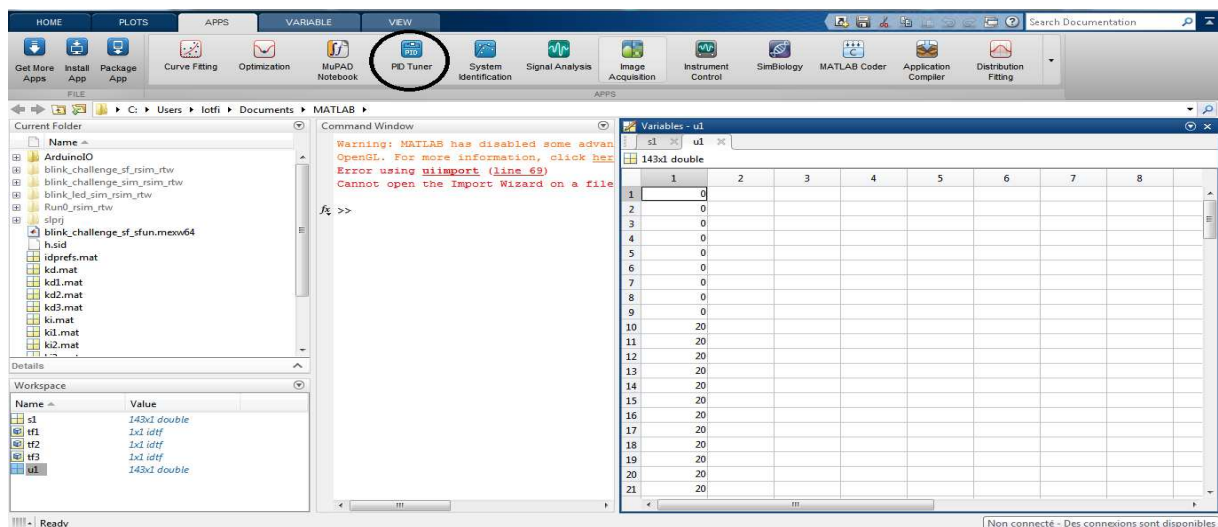


Figure IV.19 : Emplacement de l'outil PID tuning



### Synthèse du régulateur numérique

#### 1. Ouvrir l'outil PID Tuner

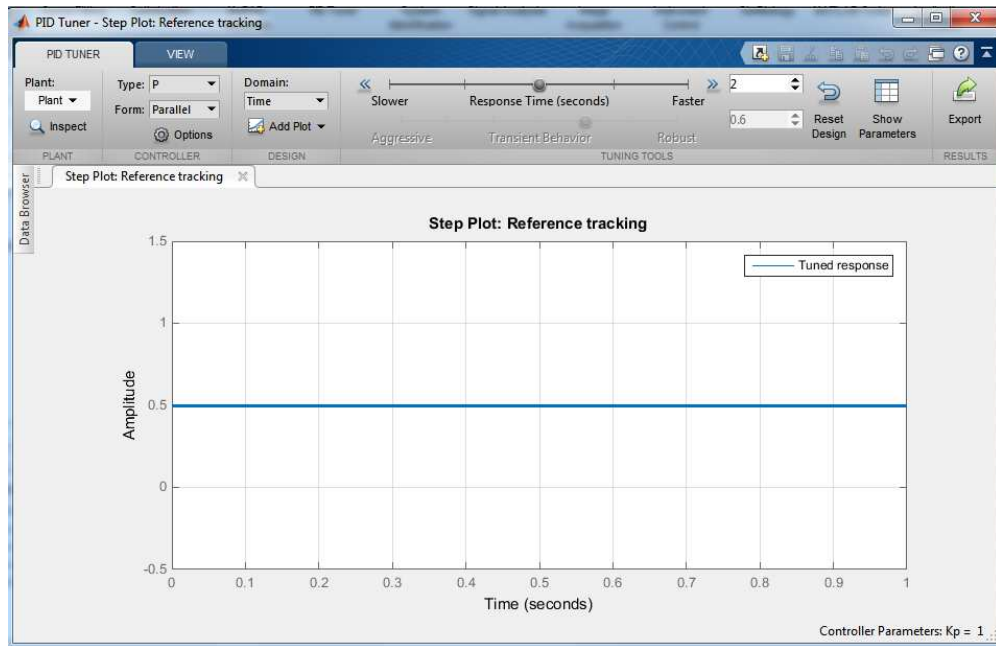


Figure IV.20 :Interface de l'outil "PID tuner"

#### 2. Cliquer sur Import new plant, une nouvelle fenêtre apparaît.

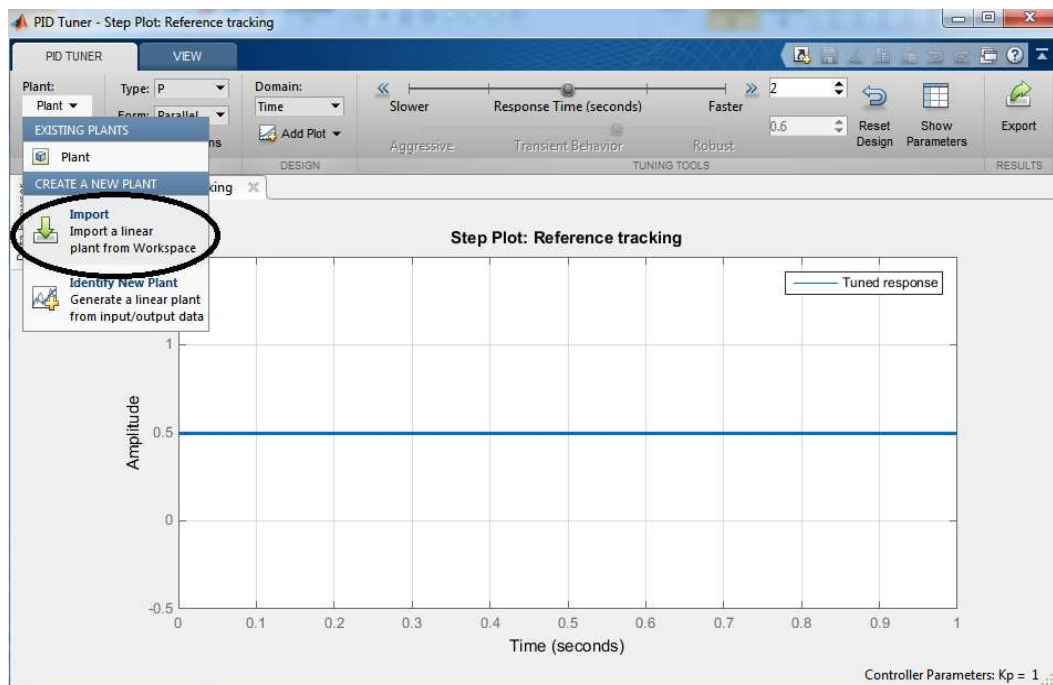


Figure IV.21 : Importation du modèle estimé

3. Une nouvelle fenêtre apparaît dans laquelle vous allez sélectionner tf1 ensuite cliquer sur import puis close.

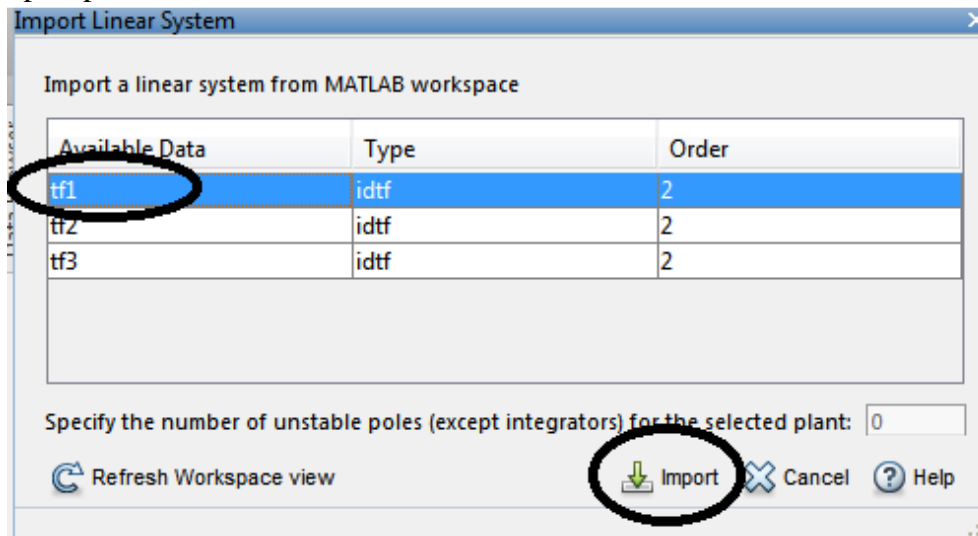


Figure IV.22 : Interface de l'outil "Import Linear System"

4. Revenir à la fenêtre PID Tuner, vous pouvez choisir le type de régulateur à implémenter et les objectifs de la commande en boucle fermée et voir la réponse de la sortie du système.

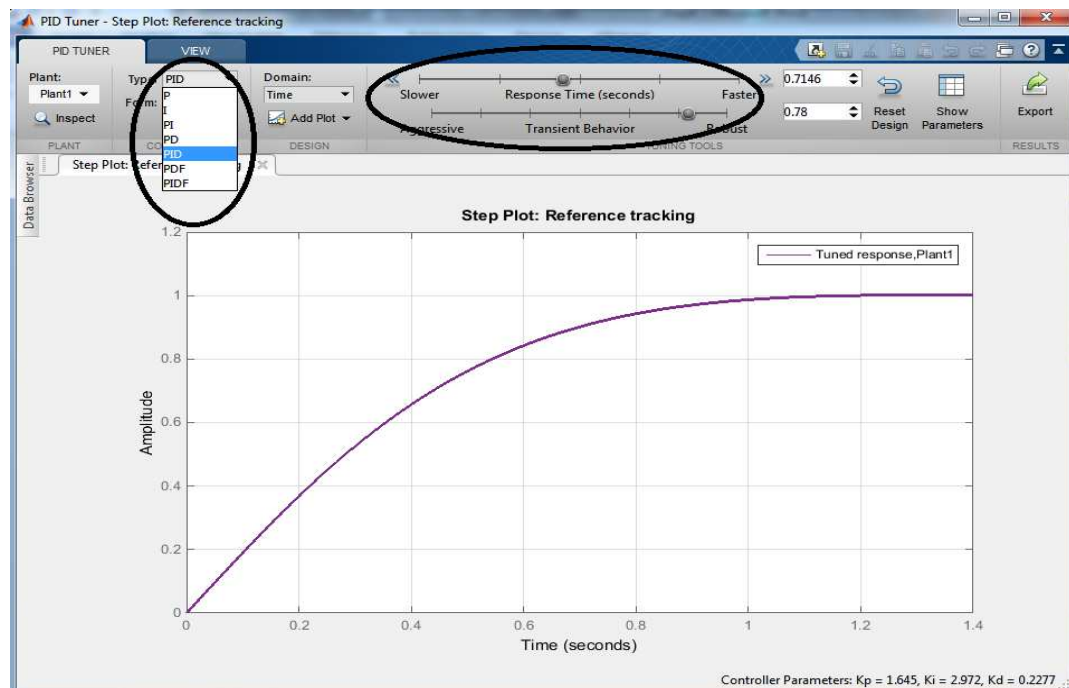


Figure IV.23 : Choix du régulateur à implémenter

5. Cliquer sur show paramètre pour voir les paramétrés utilisés de votre régulateur ainsi que les performances du système en boucle fermé.

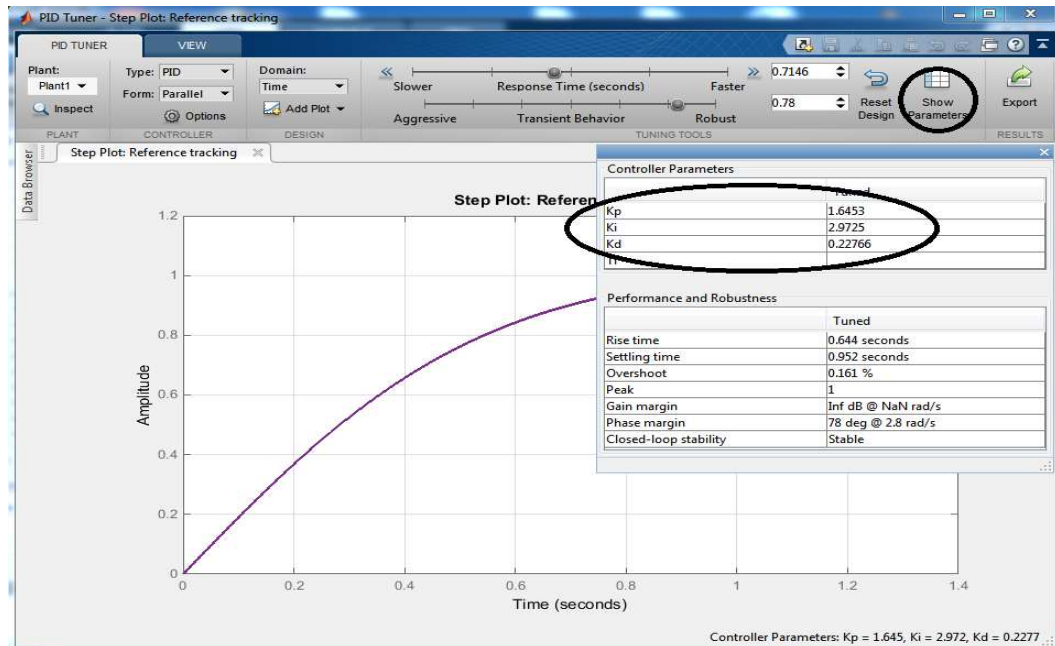


Figure IV.24 : Récupération des paramétrés du régulateur

$$k_p = 1.6459, k_i = 2.9725, k_d = 0.22766.$$

### IV.8.2 Méthode de Ziegler Nichols (réponse indicielle) :

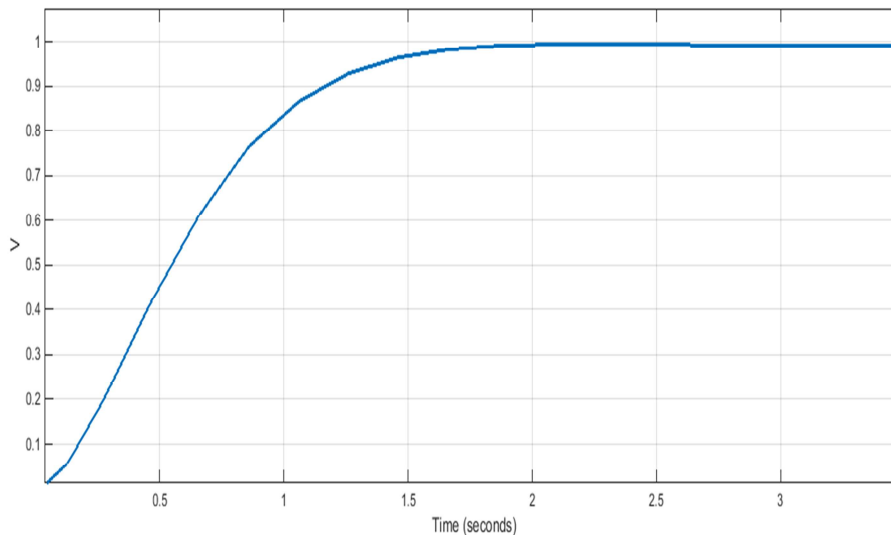


Figure IV.25 : Réponse indicielle

Sur la réponse indicielle du processus  $G(p)$  (figure IV.25), nous avons mesuré :

$$t_1 = 0.15 \text{ s}$$

$$t_2 = 0.733 \text{ s}$$

$$t_3 = 1.1 \text{ s}$$

la pente au point d'inflexion :

$$P = \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{1}{t_3 - t_1} = 1.0526 \text{ s}^{-1}$$

Le retard apparent :

$$L = t_1 = 0.15 \text{ s}$$

Du premier tableau de Ziegler-Nichols, on tire les 3 paramètres du régulateur PID :

$$k_p = 7.61, k_i = 0.3, k_d = 0.075$$

### IV.9 Implémentation de la commande sur la carte Arduino :

Dans cette partie on discutera l'implémentation du régulateur directement sur la carte Arduino. Ce type de correcteur est défini par une équation différentielle (voir chapitre II page 19).

L'équation de contrôle PID numérique peut être exprimée en de diverses manières, mais une formulation générale est donnée par l'équation suivante [31] :

$$\text{PID} = k_p * \text{erreur} + k_i * \sum(\text{erreur} * \Delta t) + k_d * \frac{(\text{erreur} - \text{erreur}_{\text{précédent}})}{\Delta t}$$

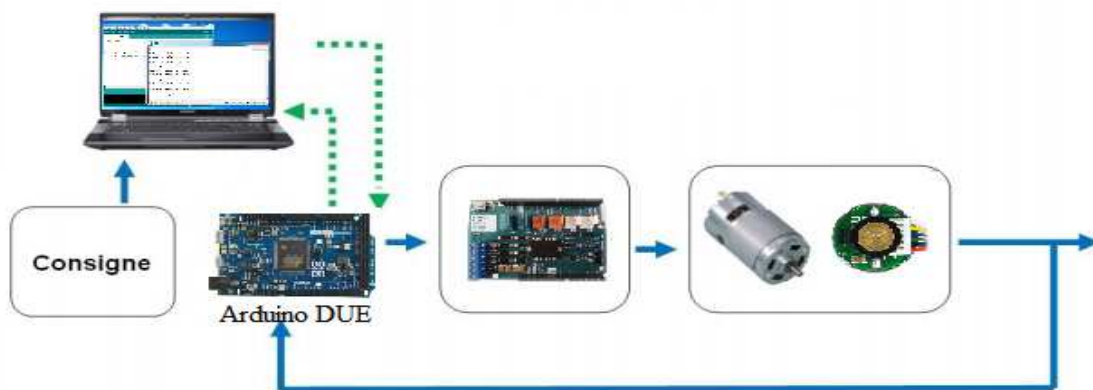


Figure IV.26 : Schéma synoptique de l'asservissement

Implémentation de clavier et d'afficheur sur Proteus :

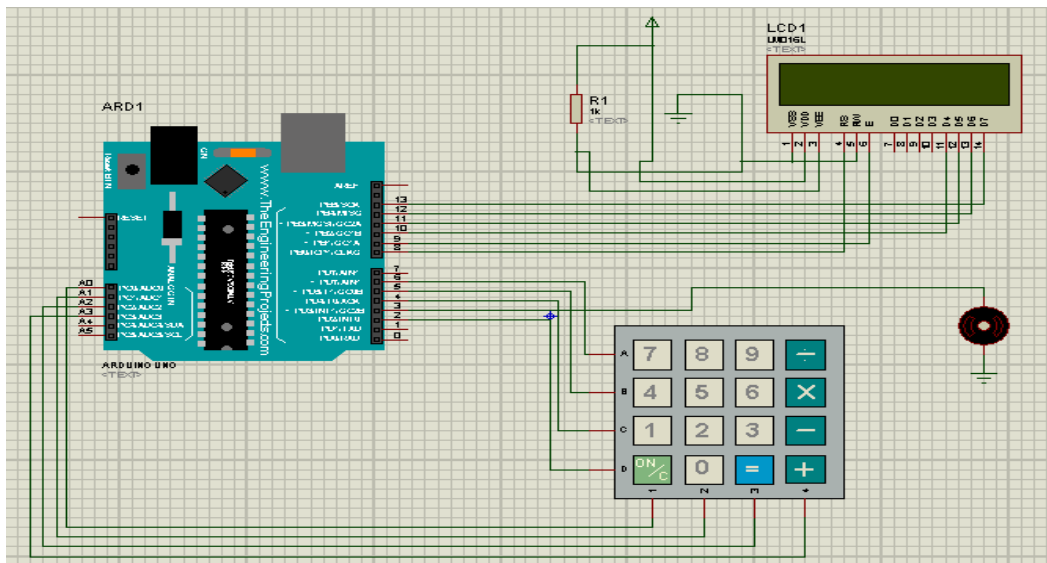


Figure IV.27: Implémentation de clavier et d'afficheur sur Proteus

IV.10 Les résultats obtenus :

IV.10.1 Sans charge :

IV.10.1.1 méthode de Ziegler Nichols (réponse indiciel)

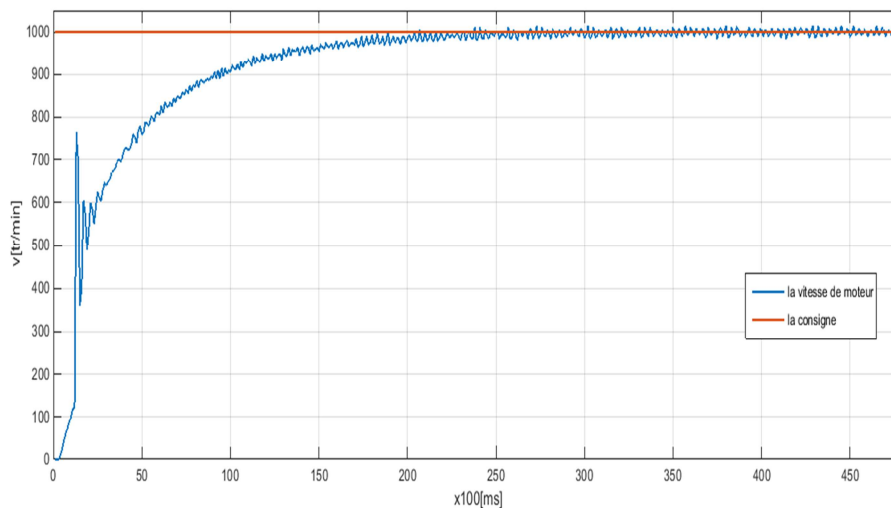
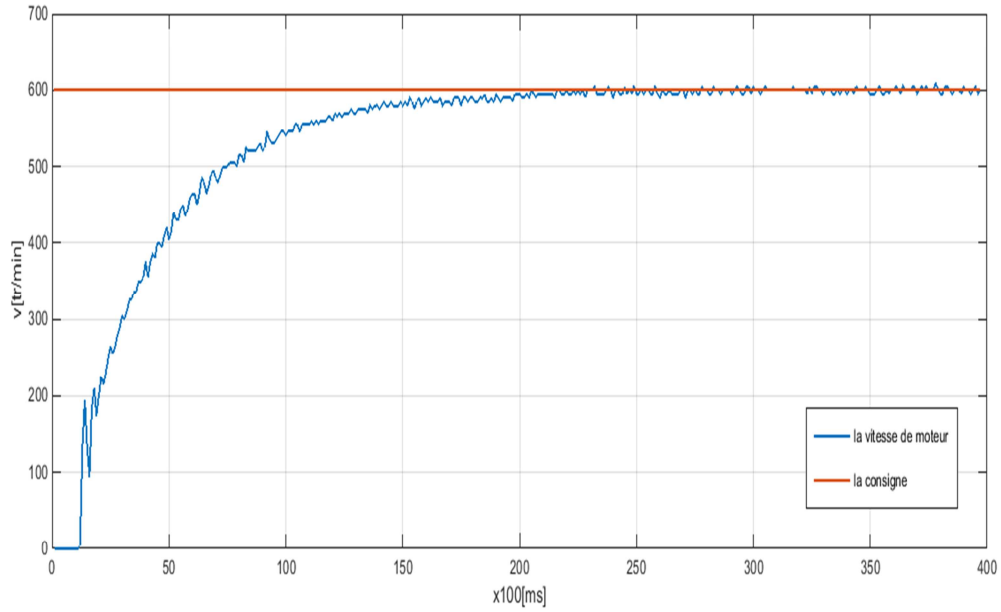


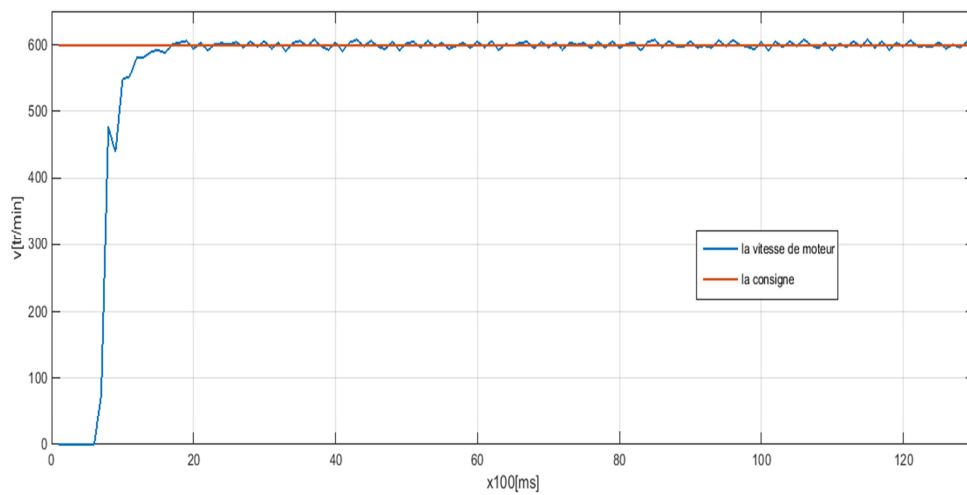
Figure IV.28 : la réponse de moteur à une consigne de 1000 tr/min



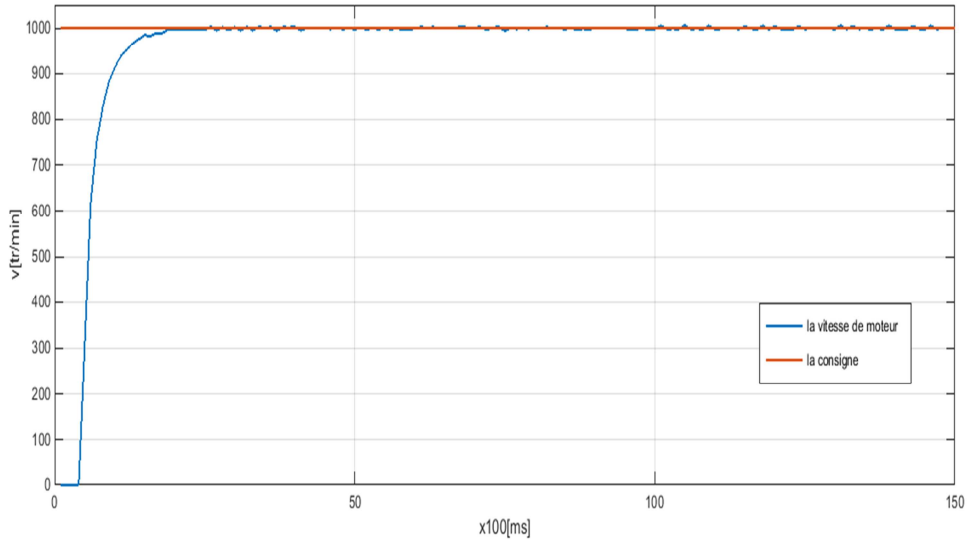
**Figure IV.29: la réponse de moteur à une consigne de 600 tr/min**

On remarque que la vitesse de moteur suit les consignes, avec un temps de réponse relativement lent.

### IV.10.1.2 Matlab PID Tuner



**Figure IV.30 : la réponse de moteur à une consigne de 600 tr/min**

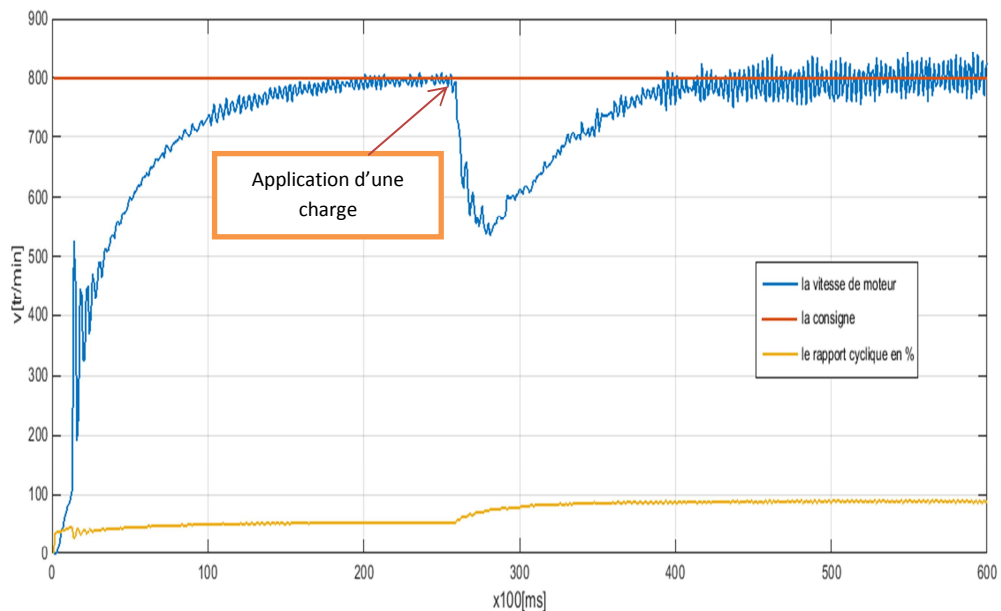


**Figure IV.31 : la réponse de moteur à une consigne de 1000 tr/min**

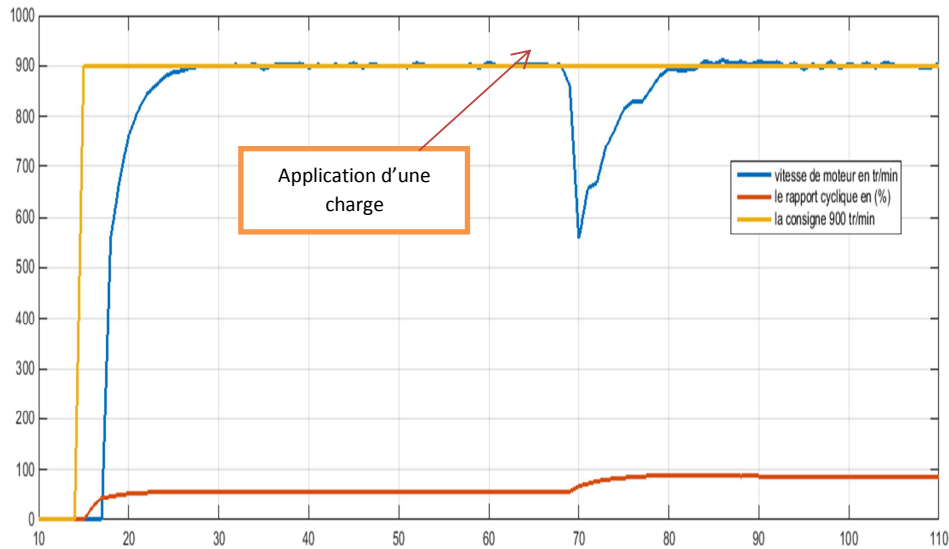
On remarque que la vitesse de moteur suit les consignes, avec un temps de réponse petit.

### IV.10.2 Avec charge :

#### IV.10.2.1 Méthode de Ziegler Nichols (réponse indicielle)



**Figure IV.32 : la réponse de moteur à une consigne de 800 tr/min avec une charge**

**IV.10.2.2 Matlab PID Tuner**

**Figure IV.33 : la réponse de moteur à une consigne de 900 tr/min avec une charge**

On constate que la vitesse oscille autour de la consigne et le signal de commande et stable.

Quand on applique une charge sur le moteur on voit que la vitesse diminue et le signal de commande réagi (il augmente) pour que la vitesse atteigne la consigne.

On remarque que le temps de la réponse pour les paramètres obtenus par la méthode Matlab PID Tuner est très rapide (elle atteint rapidement la consigne).

Par contre les paramètres obtenus par la méthode Ziegler Nichols (réponse indicielle) a une réponse lente.

**IV.11 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a présenté l'identification de système (MCC), suivi d'un régulateur PID I permettant de commander le moteur à courant continu tout en garantissant une amélioration de l'erreur. Grâce à ce régulateur qui a fait ces preuves est qui donne des bons résultats grâce à l'action proportionnelle qui améliore la rapidité, l'intégrale pour la précision, la dérivée pour la stabilité.



# Conclusion général

---

## Conclusion générale

### Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'étude avait pour objectif la commande par régulateur PID d'un moteur à courant continu en utilisant une carte Arduino ; qui fait partie d'un dispositif de dépôt de couche mince spin coating.

La partie essentielle de notre travail se résume dans le dernier chapitre pratique, là on a travaillé sur la coordination des trois parties théoriques données dans les trois premiers chapitres, et pour assurer cela on a suivi les étapes suivantes :

- La programmation des cartes Arduino et leurs différentes utilisations,
- L'utilisation de capteur optique (Encodeur) avec la carte Arduino et l'acquisition d'informations.
- L'utilisation des informations récupérées pour l'identification de notre système (Mcc) avec l'utilisation de logiciel Matlab.
- L'identification des paramètres par deux méthodes différentes.
- L'implémentation de la commande sur la carte Arduino.

A travers les résultats obtenus, nous avons pu réaliser la partie importante de ce projet, qui est l'identification, et la commande PID du moteur à CC utilisé afin de répondre aux exigences fixées par le cahier des charges (vitesse et le temps de rotation de rotation de moteur).

En termes de travaux futurs ; on peut recommander l'utilisation des moteurs de type Brushless qui peuvent atteindre des vitesses de l'ordre de 12000 tr/min.

## Bibliographie

---

- [1] H. Abdelkader (Étude du Dopage des Couches Minces de ZnO Élaborées par Spray Ultrasonique) mémoire de Magister Université Mentouri, Constantine 2007.
- [2] A. Badev, S. Marinel, R. Heuguet, E. Savary, D. Agrawal (Sintering behavior and nonlinear properties of ZnO varistors processed in microwave electric and magnetic fields at 2.45GHz) Acta Materialia, 2013.
- [3] Romain BACHELET (Couches minces d'oxydes élaborées par voie sol-gel, épitaxiées et nanostructurées par traitements thermiques post-dépôt) Thèse de doctorat Université de Limoges 2006.
- [4] T. Takieddine (L'effet du débit de la solution sur les propriétés des couches minces d'oxyde de zinc (ZnO) déposées par spray pyrolyse) Mémoire de magister Université Med Khider Biskra 2013-2014.
- [5] N. Bouhssira (Elaboration et Caractérisation des Couches Minces d'Oxyde de Zinc par Evaporation) Mémoire de magister, Université Mentouri, Constantine, (2005).
- [6] K. L. Chopra, S. Major, D. K. Panday, (Thin Solid Films) (1983).
- [7] C. Salim (Propriétés des fenêtres optiques ZnO:Al pour cellules solaires en couches minces à base de CIGS), Mémoire de magister Université Ferhat Abbas, setif. 2012.
- [8] J.L. Rousselet (Les procédés sol-gel, revue du verre, Vol 6) Octobre (2000).
- [9] K. Mouhli, K. Taraft, (élaboration des couches minces de ZnO et de ZnO:Al par le procédé sol-gel) mémoire DuA, université de Bejaia (2010).
- [10] C. Azeddine, (élaboration des nano-composites ZnSe/SILICE, ZnO/SILICE, ZnSe/Polystyrène et ZnO/ Polystyrène. Caractérisation structurale et optique), thèse de doctorat, Constantine (2007).
- [11] K. Daoudi (Élaboration et caractérisation de films minces d'oxyde d'indium dopé à l'étain obtenus par voie Sol-Gel), Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon 1, (2002).
- [12] S. Rabaste, (Microcavités optiques élaborées par voie sol-gel : applications aux ions terre rare d'Eu<sup>3+</sup> et aux nano cristaux semi-conducteurs de CdSe) thèse de doctorat, université Claude Bernard , Lyon 1 (2003).

## Bibliographie

---

- [13] A. Mourad (Elaboration et caractérisation des couches minces d'oxyde de silicium, obtenues par voie sol-gel) Université Mentouri, Constantine 2010.
- [14] E.Saliha (Contribution à l'étude structurale et physique des couches minces de TiO<sub>2</sub> Obtenues avec la méthode sol-gel) U.kasdi merbah ouargla 11/06/2014.
- [15] R. P. Spiers, C. V. Subbaraman, et W. L. Wilkinson. (Chemical Engineering journal).(1994).
- [16] dossier technique : le procédé sol gel.  
<http://rescoll.fr/blog/wp-content/uploads/2009/04/dossier-technique-sol-gel-blog-rescoll1.pdf>
- [17] M. Arhoujdam (Mise en œuvre d'une régulation de vitesse d'un moteur à courant continu) mémoire de fin d'études Université Mohammed V- souissi.2003
- [18] D. Ross Etienne Deguine Mickaël Camus (Asservissement par PID) 2010.
- [19] P. Rousseau (physique appliquée asservissement linéaire continue.) 2000.
- [20] R. komn (automatique, commande analogique et numérique des systèmes) 1998.
- [21] M. Fellah (cours d'Asservissements Linéaires Continus)U. Sidi Bel-Abbès 2007.
- [22] K.J. Astrom, T. Hagglund (Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control) 2004.
- [23] F. Mudry (Ajustage des Paramètres d'un Régulateur PID) 2002.
- [24] C. chevassu (machine a courant continu Cours et Problèmes site mach électrique) 2014.
- [25] ssi science de l'ingénieur, fiche de cours, distribuer l'énergie électrique vers un mcc : changement de sens & variation de vitesse.
- [26] F.Deschamps (cours bac ssi-distribuer-pont en H) 2005.
- [27] (DC motors speed controls servo systems) electro-craft corporation, USA 1975.
- [28] E. Bartmann (le grand livre d'Arduino 2<sup>ème</sup> édition) 2015.
- [29] C. taverrecer (arduino maitrisez sa programmation et ces cartes d'interfaces shield).2014

## Bibliographie

---

[30] B.Said (Méthodes de rétablissement des caractéristiques des moteurs à aimants permanents à courant continu) Mémoire de magister Université Tizi-ouzou 2013.

[31] (PID Control: A brief introduction and guide, using Arduino) 2011.

[32] [http ://www.arduino.cc/](http://www.arduino.cc/)

**Code Arduino pour l'acquisition d'impulsion de l'encodeur :**

```
const int pinPower = 3;      // Digital pin pour commande moteur
unsigned int tick_codeuse = 0; // Compteur de tick de la codeuse
/* Routine d'initialisation */
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pinPower, OUTPUT); // Sortie moteur
  analogWrite(pinPower, 255); // Sortie moteur à 0
  attachInterrupt(0, compteur, RISING ); // Interruption sur tick de la codeuse (interruption
0 = pin2 arduino DUE)
}
/* Fonction principale */
void loop(){
  Serial.println(tick_codeuse);
  delay(10);
}
/* Interruption sur tick de la codeuse */
void compteur(){
  tick_codeuse++; // On incrémente le nombre de tick de la codeuse
}
```

**Code Arduino pour récupérer la vitesse de moteur :**

```
#include "SimpleTimer.h"

SimpleTimer timer;

unsigned int tick_codeuse = 0;

const int frequence_echantillonnage =10;

const int tick_par_tour_codeuse = 120;

unsigned long tick;

const int pinPower = 3;

float consigne_moteur;
```

## Annexe

---

```
float consigne_moteur_min;

float vit_roue_tour_sec;

/* Routine d'initialisation */

void setup() {

    Serial.begin(9600);    // Initialisation port COM

    pinMode(pinPower, OUTPUT); // Sorties commande moteur

    pinMode( 2, INPUT_PULLUP );

    attachInterrupt(2, compteur, RISING); // Interruption sur tick de la codeuse (interruption 2
= pin2 arduino)

    timer.setInterval(1000/frequence_echantillonnage, asservissement);

}

/* Fonction principale */

void loop(){

    timer.run();

    analogWrite(pinPower, 255);

}

/* Interruption sur tick de la codeuse */

void compteur(){

    tick_codeuse++;

}

void asservissement()

{

    int frequence_codeuse = frequence_echantillonnage*tick_codeuse;
```

```
float vit_roue_tour_sec = (float)frequence_codeuse/(float)tick_par_tour_codeuse;

float vit_roue_tour_min = vit_roue_tour_sec *60;

tick_codeuse=0;

Serial.println(vit_roue_tour_min);
}
```

### Code pour tester un clavier 4\*4 branché à l'Arduino:

```
/*la touche enfoncée s'affiche dans le moniteur série.*/

#include <Keypad.h>
const byte ROWS = 4; //nombre de lignes
const byte COLS = 4; //nombre de colonnes
char keys[ROWS][COLS] = {
  {'1','2','3','A'},
  {'4','5','6','B'},
  {'7','8','9','C'},
  {'*','0','#','D'}
};
byte rowPins[ROWS] = {9, 8, 7, 6}; //entrées numériques où sont branchées les lignes
byte colPins[COLS] = {5, 4, 3, 2}; //entrées numériques où sont branchées les colonnes
Keypad keypad = Keypad( makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS );
void setup(){
  keypad.setDebounceTime(500);
  Serial.begin(9600);
}
void loop(){
  char key = keypad.getKey();
  if (key != NO_KEY){
    Serial.println(key);
  }
}
```



**Code d'implémentation de régulateur PID:**

```
#include "SimpleTimer.h"

SimpleTimer timer;

unsigned int tick_codeuse = 0;

int vitMoteur = 0;

const int frequence_echantillonnage =10;

const int tick_par_tour_codeuse = 120;

unsigned long tick;

const int pinPower = 3;

//consigne en tour/s

float consigne_moteur;

float consigne_moteur_min = 1000;

// init calculs asservissement PID

float erreur_precedente = consigne_moteur;

float somme_erreur = 0;

//Definition des constantes PID

float kp =2.0085;

float ki=2.9102; // Coefficients de régulateur

float kd =0.30428;

/* Routine d'initialisation */

void setup() {

    Serial.begin(9600); // Initialisation port COM

    pinMode(pinPower, OUTPUT); // Sorties commande moteur

    pinMode( 2, INPUT_PULLUP );

    attachInterrupt(2, compteur, RISING); // Interruption sur tick de la codeuse (interruption 0
= pin2 arduino)

    timer.setInterval(1000/frequence_echantillonnage, asservissement); // Interruption pour
calcul du PID et asservissement; toutes les 10ms, on recommence la routine
```

## Annexe

---

```
}

/* Fonction principale */
void loop(){
timer.run();
}

/* Interruption sur tick de la codeuse */
void compteur(){
    tick_codeuse++; // On incrémente le nombre de tick de la codeuse. Un seul sens
}

/* Interruption pour calcul du P */
void asservissement()
{
    // Calcul de l'erreur

    int frequence_codeuse = frequence_echantillonnage*tick_codeuse; //100*tick_codeuse

    float vit_roue_tour_sec =
(float)frequence_codeuse/(float)tick_par_tour_codeuse/(float)rapport_reducteur;

    float erreur = consigne_moteur - vit_roue_tour_sec ; // pour le proportionnel

    float vit_roue_tour_sec = vit_roue_tour_min /60;
float vit_roue_tour_min = vit_roue_tour_sec*60;

    somme_erreur += erreur; // pour l'intégrateur

    float delta_erreur = (erreur-erreur_precedente); // pour le dérivateur
    erreur_precedente = erreur;

    // RÃ©initialisation du nombre de tick de la codeuse
    tick_codeuse=0;

    // P : calcul de la commande

    vitMoteur = kp*erreur + ki*somme_erreur *0.01+ kd*delta_erreur/0.01; /*Normalisation et
contrôle du moteur*/

    if (vitMoteur > 255) {
```

```
    vitMoteur = 255;
}
else if (vitMoteur <0) {
    vitMoteur = 0;
}
// Serial.print(vit_roue_tour_min);
analogWrite(pinPower, vitMoteur);
}
```