



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغزور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



N° Série : .....

**Mémoire de fin d'étude**  
*Pour l'obtention du diplôme de Master*  
**Filière : Electrotechnique**  
**Spécialité : Commandes Electriques**

Présenté par  
**Benabid Younes**  
&  
**Igoubane Oussama**

THEME

**Etude et adaptation d'un signal physiologique  
dédié à la commande d'une Prothèse Médicale  
à base d'un moteur pas à pas**

*Soutenu le :*

*devant la commission d'examen composée de :*

*Chaiba Azzedine*

*Grade*

*à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela*

*Président*

*Beddiaf Yassine*

*MCA*

*à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela*

*Encadrant*

*Dr Benhadda Nabil*

*Grade*

*à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela*

*Examineur*

**Promotion 2022/2023**

# Remerciements :

Tout d'abord nous tenons à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces cinq années. Pour mener à réaliser ce Mémoire.

Nous aimerons dans ces quelques lignes remercier toutes les personnes qui d'une manière ou d'une autre, ont contribué au bon déroulement de notre travail.

En guise de reconnaissance, nous tenons à remercier, très sincèrement notre encadrant, DR.BEDDIAF YAASINE, chef de spécialité de la commande électrique, nous avons eu l'honneur et la chance de bénéficier de ses connaissances et compétences, de ses précieux conseils et de son suivi.

Nous ajoutons en particulière sa patience et ses encouragements, nous a permis de travailler dans des bonnes conditions.

Nous tenons à remercier les membres du jury pour leur présence et patience pendant la présentation de ce travail et leur critique constructive.

Nous tenons à remercier vivement tous les enseignants et employés du département de génie électrique.



# DÉDICACES

Je remercie **ALLAH** le tout puissant d'avoir exaucé mon vœu de réaliser ce projet de fin d'études.

Je voudrais dédier le présent travail tout spécialement à **mes chers parents** qui m'ont élevé et soutenu tout au long de ma vie. C'est grâce à leur sacrifices leurs encouragements et le leurs conseils qui étaient toujours un bonus pour éclairer mon chemin.

Je dédier également ce projet à **mon très chère frère, à mon petite chère sœur**, ainsi que et toute la famille.

Je tiens énormément à remercier **mes chers amis (es) et camarades**.

Enfin, je voudrais dédier cette mémoire de fin d'études à mon encadrant, **DR. BEDDIAF YAASINE** et à toute personne ayant participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

***Benabid Younes***





# DÉDICACES

Je dédie ce projet :

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à  
mon égard, de me soutenir*

*Et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes  
objectifs.*

*A mon frère Akram,*

*A ma chère sœur,*

*Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux  
tout au long de mes études.*

*A mes chères amies*

*A toute ma famille*

*A tous ceux que j'aime et ceux qui m'aiment.*

***Igoubane Oussama***



# Sommaire

Liste des tableaux	
Tableau des figures	
Notations et symboles	
Introduction générale .....	- 1 -

## **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LE TISSU NERVEUX**

I.1 Introduction .....	- 2 -
I.2 Composition du tissu nerveux .....	- 2 -
I.3 Architecture de la cellule nerveuse et cheminement de l'influx nerveux .....	- 2 -
I.4 Constitution de la membrane cellulaire neuronale .....	- 3 -
I.5 Modèle électrique de la membrane neuronale .....	- 4 -
I.6 La cellule nerveuse .....	- 6 -
I.6.1 Structure du neurone .....	- 6 -
I.6.2 Les cellules gliales .....	- 7 -
I.6.3 Structure du nerf .....	- 9 -
I.6.4 L'influx nerveux .....	- 9 -
I.6.5 La synapse .....	- 11 -
I.7 Conclusion .....	- 12 -

## **CHAPITRE II : L'AMPLIFICATION ET FILTRAGE D'UN SIGNAL PHYSIOLOGIQUE**

II.1 Introduction .....	- 13 -
II.2 Les différents étages du système d'acquisition .....	- 13 -
a) Les électrodes.....	- 13 -
b) L'amplificateur du signal physiologique .....	- 14 -
II.3 Schéma électrique de la carte d'acquisition proposée.....	- 15 -
II.3.1 Filtre des signaux physiologique .....	- 15 -
II.4 Schéma de simulation sous matlab.....	- 18 -

II.5 Alimentation .....	- 18 -
II.6 Résulta de simulation sous proteus .....	- 19 -
II.7 Conclusion .....	- 20 -

## **CHAPITRE III : LA MODELISATION ET LA COMMANDE D'UN MOTEUR PAS A PAS**

III.1 Introduction .....	- 21 -
III.2 Présentation .....	- 21 -
III.3 Principe de fonctionnement .....	- 21 -
III.4 Caractéristiques des moteur pas a pas.....	- 22 -
III.4.1 Les Caractéristiques mécaniques, électriques et électromécaniques.....	- 22 -
III.5 Les différents types des moteur pas a pas.....	- 23 -
III.5.1 Type selon la technologie du rotor .....	- 23 -
III.5.1.1 Moteur a aimants permanent.....	- 24 -
III.5.1.2 Moteur a réluctance variable .....	- 25 -
a) Différents type de la MRV .....	- 25 -
III.5.1.3 Moteur hybride.....	- 26 -
a) Moteur unipolaire .....	- 26 -
b) Moteur bipolaire .....	- 27 -
III.6 Comparaison des différents types des moteur pas a pas.....	- 27 -
III.6.1 Les Moteur a aimants permanent.....	- 27 -
III.6.2 Les Moteur a réluctance variable.....	- 28 -
III.6.3 Les Moteur hybride.....	- 28 -
III.7 Modélisation d'un moteur pas a pas.....	- 28 -
III.7.1 Equation des tensions.....	- 28 -
III.7.2 Transformation de park.....	- 30 -
III.7.3 Transformation de park appliquée aux moteur pas a pas a aimants permanent.....	- 30 -

III.7.3.1 Equation de couple .....	- 31 -
III.8 Domaine de fonctionnement du moteur pas a pas.....	- 33 -
III.8.1 Comportement statique .....	- 33 -
III.8.2 Comportement dynamique.....	- 33 -
III.8.3 Caractéristiques couple vitesse.....	- 34 -
III.8.4 Modes de séquençement du moteur pas a pas.....	- 34 -
III.9 Schéma de Simulation sur matlab/Simulink .....	- 35 -
III.10 Resulta de Simulation .....	- 36 -
III.10.1 Intrepretation des resultats de Simulations.....	- 38 -
III.11 Conclusion .....	- 39 -

## **CHAPITRE IV : VALIDATION EXPERIMENTALE**

IV.1 Introduction .....	- 40 -
IV.2 Définition du module Aurduino-UNO.....	- 40 -
IV.3 Les gammes de la carte Aurduino .....	- 40 -
IV.4 Description de la carte Aurduino modèle UNO.....	- 41 -
IV.5 Caractéristiques de la carte Aurduino UNO.....	- 42 -
IV.6 Les différents composants de la carte Aurduino UNO.....	- 43 -
IV.6.1 Le microcontrolleur ATMega328.....	- 43 -
IV.6.1.1 Description.....	- 43 -
IV.6.1.2 Les composants de L' ATMega328.....	- 44 -
IV.6.2 Les sources de l'alimentation de la carte .....	- 45 -
IV.6.3 Les entrées & sorties.....	- 45 -
IV.6.4 Les portes de communication .....	- 46 -
IV.7 Description du fonctionnement du moteur pas a pas 28BYJ-48.....	- 47 -
IV.8 Programme Aurduino .....	- 49 -
IV.9 Résultats.....	- 52 -

IV.10 Conclusion .....- 53 -

Conclusion générale .....- 54 -

Annexe

Bibliographie

## Tableaux des figures

<b>Figure (I.1) :</b>	Architecture du neurone et cheminement de l'influx nerveux.	<b>-3-</b>
<b>Figure (I.2) :</b>	Résistance variable	<b>-5-</b>
<b>Figure (I.3) :</b>	Schema electrique de la membrane suivant le modele de Hodgkin et Huxley.	<b>-6-</b>
<b>Figure (I.4) :</b>	Structure schématique d'un neurone (d'après Farish, modifié).	<b>-7-</b>
<b>Figure (I.5) :</b>	Schéma d'une coupe transversale dans une fibre nerveuse amyélinique.	<b>-8-</b>
<b>Figure (I.6) :</b>	Origine de la gaine de myéline des axones myéliniques.	<b>-8-</b>
<b>Figure (I.7) :</b>	Fibre formée par l'axone d'un neurone moteur ou sensitif (entrouné ou non d'une gaine de Myéline et d'une gaine de Schawnn).	<b>-9-</b>
<b>Figure (I.8) :</b>	Variation du potentiel électrique du cytoplasme d'un axone par rapport à l'extérieur, et origine de la dépolarisation (d'après Beck et al. Corrigé et modifié).	<b>-10-</b>
<b>Figure (I.9) :</b>	Illustration de la progression de l'influx nerveux le long d'un neurone amyélinique (en haut) et le long d'un neurone myélinique (en bas) (d'après Farish, modifié).	<b>-10-</b>
<b>Figure (I.10) :</b>	Mécanisme de la transmission synaptique de l'influx nerveux (d'après Farish, modifié).	<b>-11-</b>
<b>Figure (II.1) :</b>	Schéma synoptique générale de la chaine d'acquisition.	<b>-13-</b>
<b>Figure (II.2):</b>	Electrodes d'acquisition du signal physiologique.	<b>-13-</b>
<b>Figure (II.3):</b>	Schéma électrique de l'amplificateur proposé à base de 741.	<b>-14-</b>
<b>Figure (II.4):</b>	Amplification et filtrage.	<b>-15-</b>
<b>Figure (II.5) :</b>	Filtre passe-bas (Type R.C).	<b>-16-</b>
<b>Figure (II .6):</b>	La simulation du filtre RC. A droite, le tracé de Bode du filtre RC.	<b>-16-</b>
<b>Figure (II.7):</b>	Structure d'un filtre coupe-bande.	<b>-17-</b>
<b>Figure (II.8) :</b>	Le tracé de Bode du filtre.	<b>-17-</b>
<b>Figure (II.9) :</b>	Schéma bloc de simulation du filtre réjecteur sous Matlab.	<b>-18-</b>
<b>Figure (II.10) :</b>	Réponse du filtre réjecteur.	<b>-18-</b>
<b>Figure (II.11):</b>	Le circuit d'alimentation.	<b>-19-</b>
<b>Figure (II.12) :</b>	Résultat d'amplification.	<b>-19-</b>
<b>Figure (III.1):</b>	Principe de base de la création d'un champ tournant.	<b>-22-</b>
<b>Figure (III.2):</b>	Type des moteurs pas à pas selon la technologie du rotor.	<b>-24-</b>
<b>Figure (III.3):</b>	Moteur pas - à - pas à aimant permanentant.	<b>-24-</b>
<b>Figure (III.4):</b>	Moteur pas - à - pas à reluctance variable.	<b>-25-</b>
<b>Figure (III.5):</b>	Schéma de principe de fonctionnement du moteur pas- à - pas à	<b>-25-</b>

	reluctance variable.	
<b>Figure (III.6):</b>	Moteur pas à pas hybride selon la conception des enroulements statorique.	<b>-26-</b>
<b>Figure (III.7) :</b>	Moteur à aimant permanent unipolaire.	<b>-27-</b>
<b>Figure (III.8):</b>	Moteur à aimant permanent bipolaire.	<b>-27-</b>
<b>Figure (III.9) :</b>	Schéma équivalent d'une phase du moteur.	<b>-30-</b>
<b>Figure (III.10):</b>	Caractéristique statique.	<b>-33-</b>
<b>Figure (III.11):</b>	Domaine de fonctionnement d'un moteur pas à pas.	<b>-34-</b>
<b>Figure (III.12):</b>	Schéma de simulation d'un moteur pas à pas sur Matlab.	<b>-35-</b>
<b>Figure (III.13):</b>	Caractéristique de la position $\theta$ .	<b>-36-</b>
<b>Figure(III.13.a):</b>	Caractéristique de la position $\theta$ Zoom.	<b>-36-</b>
<b>Figure (III.14) :</b>	Caractéristique du couple $C_E$ .	<b>-37-</b>
<b>Figure(III.14.a):</b>	Caractéristique du couple $C_E$ Zoom.	<b>-37-</b>
<b>Figure (III.15):</b>	Caractéristique de la vitesse $\omega$ .	<b>-38-</b>
<b>Figure(III.15.a):</b>	Caractéristique de la vitesse $\omega$ Zoom.	<b>-38-</b>
<b>Figure (IV.1) :</b>	La carte Arduino UNO.	<b>-42-</b>
<b>Figure (IV.2) :</b>	Les composants de la carte Arduino-UNO.	<b>-43-</b>
<b>Figure (IV.3) :</b>	Microcontrôleur atmega328.	<b>-43-</b>
<b>Figure (IV.4) :</b>	Datasheet d'atmega328.	<b>-44-</b>
<b>Figure (IV.5) :</b>	Constitution de la carte Arduino UNO.	<b>-47-</b>
<b>Figure (IV.6) :</b>	Moteur pas à pas à 04 phases.	<b>-48-</b>
<b>Figure (IV.7) :</b>	Chronogrammes commande.	<b>-48-</b>
<b>Figure (IV.8) :</b>	Schéma de branchement des leds sens 1 (S1) et sens 2 (S2).	<b>-48-</b>
<b>Figure (IV.9) :</b>	Le branchement du driver pour l'alimentation du moteur.	<b>-49-</b>
<b>Figure (IV.9.a) :</b>	Phase 1 et 2.	<b>-52-</b>
<b>Figure (IV.9.b) :</b>	Phase 3 et 4.	<b>-53-</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau(II.1)</b>	Les composants électroniques utilisés dans la carte d'acquisition.	-15-
<b>Tableau(III.1)</b>	Comparatif des différents types des moteurs pas à pas.	-28-
<b>Tableau(IV.1)</b>	Les Caractéristiques de la carte Arduino UNO.	-42-

## Notation et Symboles

*ECG = Electrocardiographie*

*EEG = Electro encéphalographie*

*EMG = Electromyographie*

*EKG = Electrogastrographie*

*AOP = Amplificateur Opérationnel*

*R = Résistance d'une phase statorique*

*L = Inductance d'une phase statorique*

*Ns = Nombre des dents statorique*

*Nr = Nombre des dents rotorique*

*K = Coefficient du couple et de la force électromotrice*

*F = Coefficient de frottement visqueux*

*Cr = Couple de charge*

*Crs = Coefficient de frottement sec*

*Ce = Couple électromagnétique*

*$\Omega$  = Vitesse de rotation du rotor*

*J = Inertie des masses tournantes*

*$\theta$  = Position*

*M.R.V = Moteur à Réductance variable*

*M.P = Moteur à Aimant permanent*

*MH = Moteur Hybride*

*E = Ecart entre la grandeur réelle et sa référence r Référence e Ecart*

*$I_\alpha, I_\beta$  = Intensité dans les phases  $\alpha$  et  $\beta$*

*$U_\alpha, U_\beta$  = Tensions aux bornes des phases  $\alpha$  et  $\beta$*

*$\alpha, \beta$  = Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au stator*

*$d, q$  = Axes correspondants au référentiel fixe par rapport au champ tournant*

*$S(X, t)$  = Surface de glissement*

*$U(X, t)$  = Loi de commande*

*$U_{eq}$  = Grandeur de commande équivalente*

*U = Commande non linéaire*

*U = Commande globale*

$V(x)$  = *Fonction de lyapunov*

$V'(x)$  = *Dérivée de la fonction de lyapunov*



**INTRODUCTION  
GENERALE**

## Introduction Générale

Le système bio-potentiel est un moyen pour le diagnostic de plusieurs maladies d'origines diverses, notamment cardiovasculaire, cérébrale, oculaire, etc. Les bio-potentiels sont connus sous des appellations relatives à leurs origines de prélèvement, exemple : signaux électrocardiogramme (ECG), Electro-oscillogramme (EOG) et électrorétinogramme (ERG).

Les signaux bio-potentiels ou physiologiques ont été étudiés dès 1800 et exactement par l'apparition d'électrocardiographie en 1887 sur les animaux.

Les mesures des signaux d'amplitude très faibles sont devenues possibles grâce à Willem Einthoven (1860–1927), ce dernier a amélioré la sensibilité des galvanomètres existants pour développer le « galvanomètre à corde » permettant de tracer les faibles potentiels. Comme il a développé quelques techniques expérimentales parmi lesquelles le positionnement de trois électrodes sur les membres (bras et chevilles) ou le thorax, qui constituent un triangle équilatéral fermé, appelé triangle d'Einthoven. L'amplification de ces signaux était devenue possible dès le développement des lampes à vide.

L'apparition de l'électronique de pointe a permis de détecter et d'amplifier les signaux physiologiques. Donc l'exploitation de l'électronique dans le domaine de l'instrumentation médicale a considérablement évolué en peu de temps. Chaque spécialité médicale utilise de plus en plus d'appareillages faisant appel aux dernières créations en techniques de pointe.

Dans notre mémoire, on a présenté l'amplification et la mise en forme d'un signal physiologique afin de l'exploiter pour commander un moteur pas à pas dans un mécanisme utilisé comme prothèse (main ou autre).

### **Le travail présenté s'articule sur quatre chapitres :**

- Le premier chapitre : on va présenter sur les sur les tissus nerveux
- Le deuxième chapitre dédié à l'amplification et filtrage d'un signal physiologique
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et la commande d'un moteur pas à pas
- Le quatrième chapitre est consacré à la réalisation pratique de la commande du moteur pas à pas par Arduino-UNO R3.

Le mémoire sera clôturé par une conclusion générale dont on a proposé des suggestions à prendre en considération pour améliorer notre proposition.



# Chapitre I

## **GENERALITES SUR LE TISSU NERVEUX**

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter des généralités sur le système nerveux, ceci dans le but de bien formaliser les signaux physiologiques sous forme d'un modèle électrique simple.

## I.2 Composition du tissu nerveux

Dans le système nerveux on trouve essentiellement deux sortes de cellules : les cellules gliales et les cellules nerveuses (neurones). Les cellules gliales ont un rôle de soutien mécanique ainsi que de régulation de la composition du milieu extracellulaire interstitiel. Le neurone est l'unité fondamentale du système nerveux. Ce sont des cellules électriquement excitables dont la fonction première est de transmettre et propager l'influx nerveux sous forme d'impulsions électriques sur de plus ou moins longues distances (de quelques dizaines de micromètres à plusieurs dizaines de centimètres) et ce sans perte d'amplitude. A cette fin, le neurone dispose d'une morphologie et de propriétés bioélectriques spécifiques qui lui permettent d'intégrer l'information et de la propager [1].

Le tissu nerveux dans le système nerveux central est essentiellement composé du soma des cellules nerveuses et de neurones amyélinique. D'un point de vue macroscopique, le tissu nerveux dans le système nerveux central est un tissu excitable, globalement assimilable à un milieu électrique purement conducteur dans la bande de fréquence des potentiels enregistrés et pour les fréquences de stimulus employées (inférieures à 100 kHz). Ainsi, l'impédance du tissu biologique peut être assimilée à la simple composante résistive due au milieu extracellulaire (conductivité de l'ordre de quelques siemens par mètres) [1].

## I.3 Architecture de la cellule nerveuse et cheminement de l'influx nerveux

Le neurone possède une architecture spécifique lui permettant :

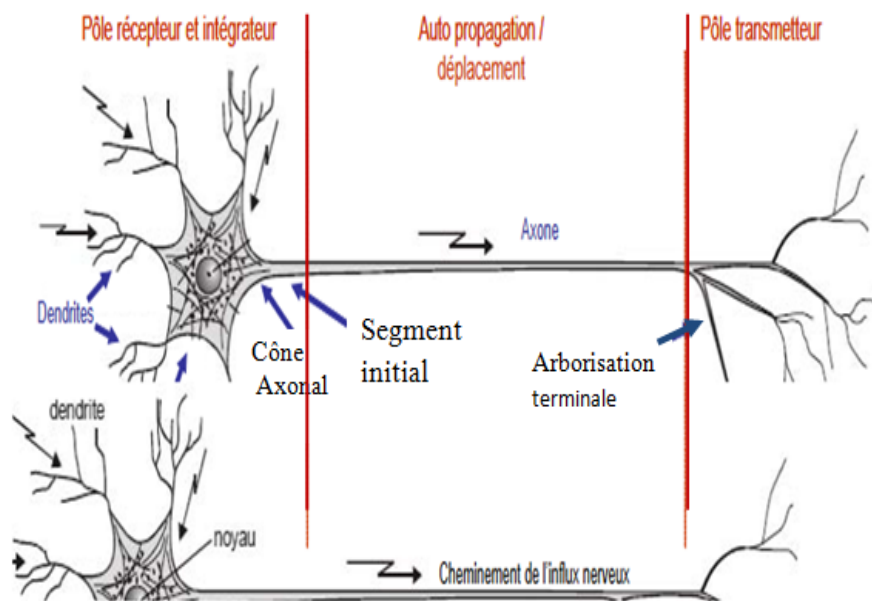
- d'intégrer l'information provenant en amont d'autres neurones ou de cellules sensorielles,
- de propager cette information sous forme d'un potentiel d'action le long de sa membrane cellulaire.
- de transmettre l'influx nerveux à d'autres neurones ou cellules effectrices (ex. : fibres musculaires) (Figure I.1). [1]

L'influx nerveux des cellules en amont du neurone est réceptionné au niveau du soma et des dendrites par l'intermédiaire de synapses. Les informations transmises par le biais de ces synapses sont ensuite intégrées dans le corps neuronal suivant une sommation spatio-temporelle. Chaque neurone amont va donc influencer la réponse d'un neurone. Un potentiel

d'action est alors déclenché sous réserve que la somme des influx transmis par les neurones en amont soit suffisante.

Il est initié au niveau de la zone du neurone appelée segment initial, zone se situant au début de l'axone après le cône axonal. Une fois le potentiel d'action déclenché, celui ci s'auto propage dans tout le neurone le long de sa membrane cellulaire. [1]

Néanmoins, l'influx nerveux ne transite que dans une seule direction. Il n'est en effet transmis qu'aux cellules en aval par l'intermédiaire des synapses situées au bout de l'axone au niveau de son arborisation terminale. [1]



*Figure (I.1) : Architecture du neurone et cheminement de l'influx nerveux.*

#### **I.4 Constitution de la membrane cellulaire neuronale**

La membrane cellulaire du neurone présente des propriétés particulières qui la rendent électriquement excitable. Elle est formée d'une double couche bi-lipidique d'une épaisseur d'environ cinq nanomètres qui sépare le milieu intracellulaire du milieu extracellulaire et forme une barrière au passage des ions solubles dans l'eau [2-4].

Il existe par ailleurs plusieurs voies de passage des ions à travers la membrane permettant la génération du potentiel d'action. Les voies de passage impliquées dans le mécanisme du potentiel d'action sont les canaux ioniques, les canaux de fuite et les pompes ioniques [5].

Les canaux ioniques sont des protéines imbriquées dans la membrane qui fonctionnent comme des portes laissant passer un type d'ion préférentiel, et qui s'ouvrent sous l'action d'une tension, d'une action mécanique ou d'un agent chimique (ligand).[1]

Les canaux contrôlés en tension, et principalement les canaux sodiques et potassiques, sont responsables de l'initiation et de la propagation du potentiel d'action.

On en trouve sur la membrane du neurone principalement au niveau du soma et de l'axone, et en plus grande concentration au niveau de la zone intermédiaire entre le soma et l'axone, au niveau du cône axonal et du segment initial. [1]

Les canaux ligands- ou chimio - dépendants sont responsables de la transmission synaptique de l'influx nerveux. Les ligands sont dans ce cas appelés neurotransmetteurs.

Quand les canaux sont activés, les ions diffusent selon leur gradient de concentration vers le milieu de moindre concentration suivant la loi de diffusion de Fick [3.4].

Il existe ensuite des canaux de fuite (typiquement les canaux chloriques) qui permettent une diffusion des ions à travers la membrane selon leur gradient de concentration.

Il existe par exemple une diffusion des ions  $K^+$  du milieu intracellulaire vers le milieu extracellulaire et une diffusion de  $Na^+$  dans le sens inverse [1].

La pompe sodium/potassium est une protéine qui permet, par un transport actif, consommateur d'énergie, de contrebalancer la diffusion passive des ions  $Na^+$  et  $K^+$ .

Ces protéines assurent le transport actif des ions à contre-courant de leurs flux diffusionnels passifs.

Elles permettent ainsi le maintien des différences de concentrations ioniques entre les milieux intra et extracellulaires à l'origine du potentiel de repos membranaire. [6]

## **I.5 Modèle électrique de la membrane neuronale**

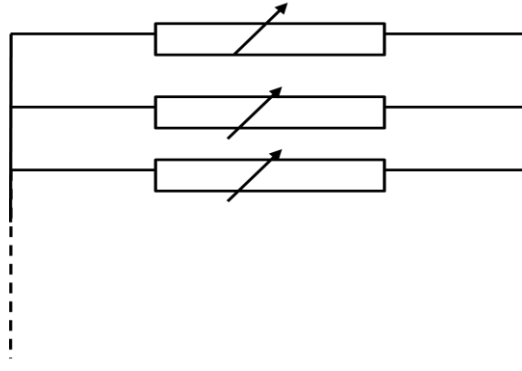
### **La couche bi-lipidique**

Elle sépare physiquement deux milieux de charges différentes, elle se comporte ainsi comme un condensateur. La capacité membranaire  $C_m$  est donnée par unité de surface. La valeur typique pour un neurone est  $1\mu F/cm^2$ . [1]

### **Les canaux ioniques**

Ils sont équivalents à des résistances variables en parallèle (la conductance  $G$  est égale à l'inverse de la résistance  $R$ ). Un canal ouvert à une impédance de l'ordre de  $5 G\Omega$  à  $500 G\Omega$ , ce qui correspond à une impédance surfacique de  $1 M\Omega \cdot \mu m^2$  à  $100 G\Omega \cdot \mu m^2$ .

L'impédance des canaux contrôlés en tension est dépendante de la valeur du potentiel membranaire. Les canaux de fuite sont eux d'impédance constante [1].



*Figure (I.2) : Résistance variable*

### Les gradients ioniques

Maintenus grâce aux pompes ioniques, ils sont assimilables à des batteries dont la valeur est égale au potentiel de Nernst de l'ion considéré.

Le potentiel de Nernst (Equation I.1) traduit en effet l'équilibre pour un ion donné entre les forces de diffusion (gradient de concentration) et les forces électriques [1].

$$E_i = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} * \ln \frac{C_{in}}{C_{out}} \text{ (I.1)}$$

$E_i$  : Potentiel de Nernst de l'ion  $i$  (V);  $R$ : constante des gaz parfaits (J/mol/K) ;

$T$  : Température (K) ;  $z$ : valence de l'ion  $i$  ;  $F$  : constante de faraday (C/mol) ;

$C_{out}$  et  $C_{in}$  : concentrations extra – et intracellulaire de  $i$  (mol/l) [1].

### Le potentiel membranaire de repos

Il existe une différence de potentiel de part et d'autre de la membrane même en dehors de l'occurrence d'un potentiel d'action.

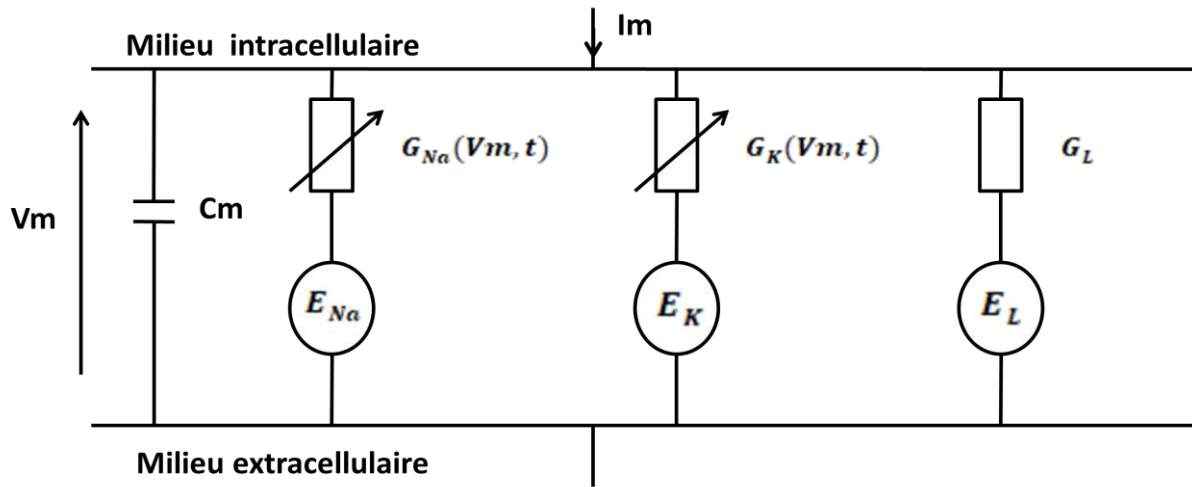
Ce potentiel de repos membranaire est dû au fait que les compositions ioniques de part et d'autre de la membrane sont très différentes.

Il résulte de l'équilibre entre les forces diffusives et électriques de tous les ions présents de part et d'autre de la membrane.

Pour un neurone, le potentiel de repos membranaire est de l'ordre de  $-60 \text{ mV}$  à  $-80 \text{ mV}$ .

Par convention, la face externe d'une cellule est positive par rapport à sa face interne (potentiel de repos  $V_m$  égal au potentiel intracellulaire moins le potentiel extracellulaire) [1].

Schéma électrique équivalent de la membrane neuronale [1] :



Figure(I.3) : Schéma électrique de la membrane suivant le modèle de Hodgkin et Huxley.

$V_m$ : Potentiel membranaire ;  $C_m$ : capacité membranaire ;

$g_i$ : conductivité ionique spécifique maximum des canaux ioniques de l'ion  $i$  ;

$E_i$ : potentiel de Nernst de l'ion  $i$  ;  $Na^+$ : ion sodium ;

$K^+$ : ion potassium ;  $L$  : désigne les canaux de fuite (« Leakage »).

## I.6 La cellule nerveuse

Les neurones hautement différenciés et spécialisés dans la communication intercellulaire reçoivent, traitent et transmettent des informations codées sous la forme de signaux ou influx nerveux. [7]

### I.6.1 Structure du neurone

Le **neurone** est la cellule fondamentale du tissu nerveux. Rien que dans le cerveau humain, on trouve 10 milliards de neurones! Comme la plupart des cellules, les neurones sont délimités par une membrane cellulaire et possèdent un noyau et de multiples organites.

Mais les neurones possèdent une faculté qui leur est propre : celle de transmettre un **influx nerveux**. [8].

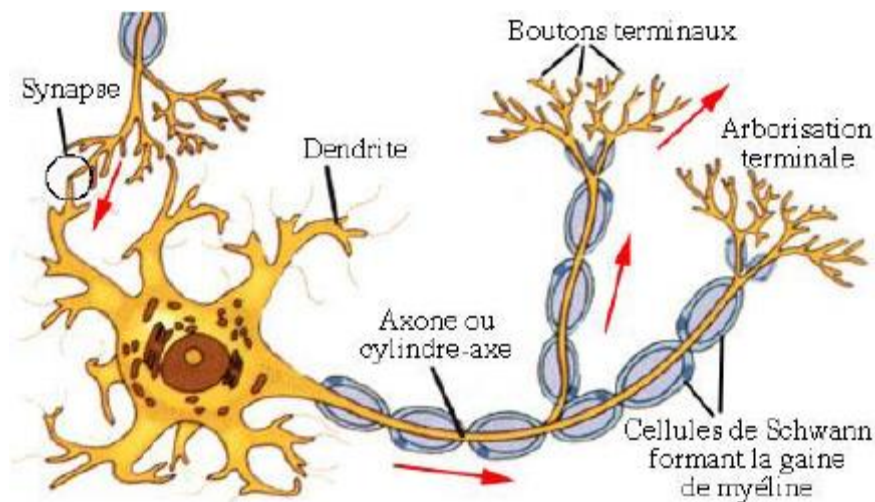
Du corps cellulaire, qui est la plus grosse partie du neurone et qui contient le noyau, partent des ramifications courtes, les **dendrites** [8]; Leur rôle est de capter les messages des autres cellules avec lesquelles le neurone est en contact et de les transmettre au corps cellulaire.

Sur le **cône d'implantation**, élévation conique du corps cellulaire, prend naissance le plus grand prolongement du corps cellulaire : l'**axone** ou cylindre-axe, qui conduit l'influx nerveux.

Cet axone, toujours unique, a une longueur allant de quelques mm pour les neurones du cerveau à plus d'1 m s'il va de la **moelle épinière** où se trouve le corps cellulaire jusqu'à l'organe qu'il innerve. [7].

Si plusieurs neurones, mis bout à bout, sont nécessaires pour atteindre un organe, les corps cellulaires intermédiaires entre la moelle épinière et l'organe innervé sont rassemblés en **ganglions nerveux** [8].

A son extrémité, l'axone se ramifie abondamment pour former l'**arborisation terminale** qui se termine en **boutons terminaux** au point de contact avec les autres cellules : cellules musculaire ou glandulaire, corps cellulaire, dendrites ou cône d'implantation de l'axone d'autres neurones. [7]



*Figure (I.4) : Structure schématique d'un neurone (d'après Farish, modifié).*

Les flèches rouges indiquent le sens de progression de l'influx nerveux. [8]

### I.6.2 Les cellules gliales

Les **cellules gliales** forment un tissu étroitement associé aux neurones: la **névroglie**.

Dans le Système Nerveux Central se trouvent 4 sortes de cellules gliales : [7]

- ❖ les astrocytes.
- ❖ les microgliocytes.
- ❖ les épendymocytes.
- ❖ les oligodendrocytes. [7]

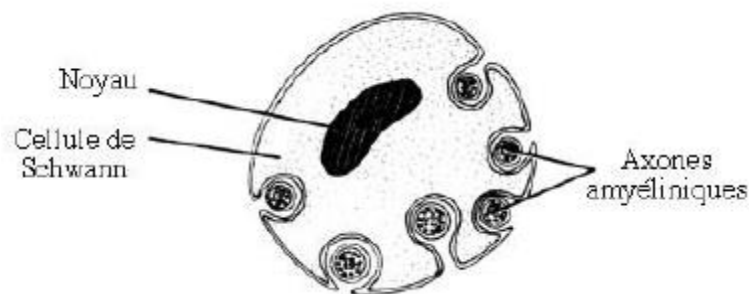
Dans le Système Nerveux Périphérique se trouvent 2 sortes de cellules gliales [9] :

- ❖ les cellules de Schwann (ou neurolemmocytes)
- ❖ les cellules satellites. [9]

### Rôle des cellules gliales :

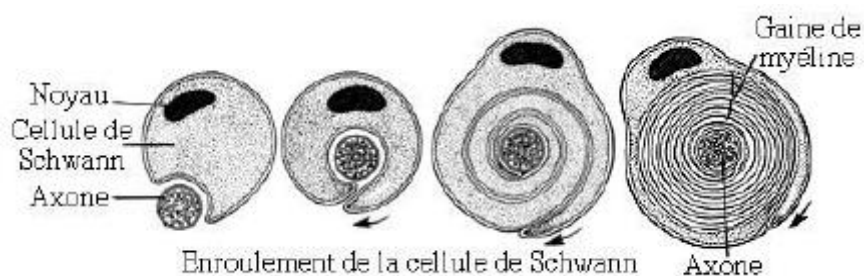
- ❖ protection, soutien, nutrition des neurones
- ❖ régulation de l'activité neuronale
- ❖ défense du système nerveux
- ❖ remplissent tous les vides entre les neurones
- ❖ précurseurs du renforcement de la mémoire
- ❖ les **cellules de Schwann** s'associent aux neurones formant les nerfs du **système nerveux périphérique**,

Une cellule de Schwann peut entourer plusieurs axones de façon simple: on parle dans ce cas de **fibres nerveuses amyéliniques**. [7]



*Figure (I.5) : Schéma d'une coupe transversale dans une fibre nerveuse amyélinique.*

Mais la membrane cellulaire d'une cellule de Schwann peut aussi s'enrouler (de 20 à 30 fois) autour de l'axone pour former la **gaine de myéline**: on parle alors d'une **fibre nerveuse myélinique**. [7]



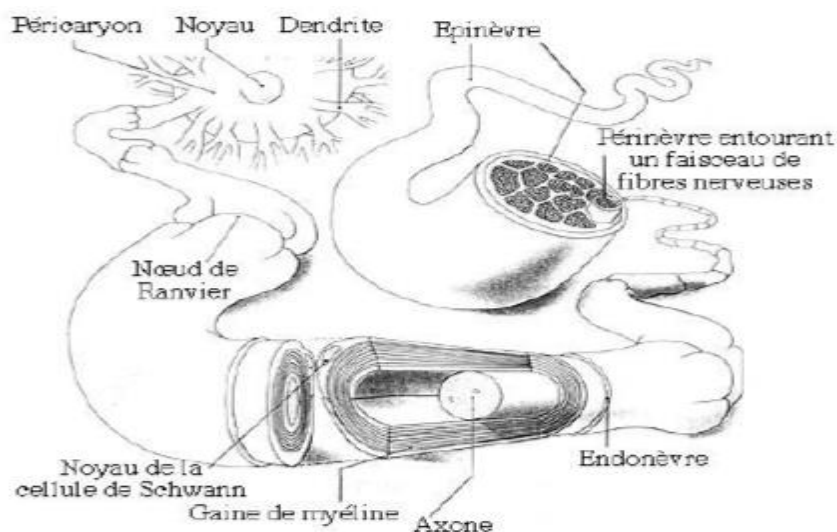
*Figure (I.6) : Origine de la gaine de myéline des axones myéliniques.*

Si les cellules de Schwann entourent l'axone des neurones du système nerveux périphérique, les fibres nerveuses du système nerveux central peuvent également être myéliniques ou amyéliniques: les cellules gliales qui y ont ce rôle sont les **oligodendrocytes**. [7]

### I.6.3 Structure du nerf

Les nerfs sont formés de faisceaux de fibres nerveuses agencées de la façon suivante au niveau d'un gros **nerf rachidien** : la fibre nerveuse, c'est-à-dire l'axone d'un neurone entouré ou non de sa gaine de myéline, est recouverte d'une fine couche de tissu conjonctif, l'**endonèvre**. Plusieurs fibres sont regroupées en un faisceau entouré d'une autre gaine de tissu conjonctif, la **périnèvre**.

Un ensemble de faisceaux de fibres nerveuses constitue un **nerf** et est recouvert d'une gaine fibreuse baptisée **épinèvre**. [7]



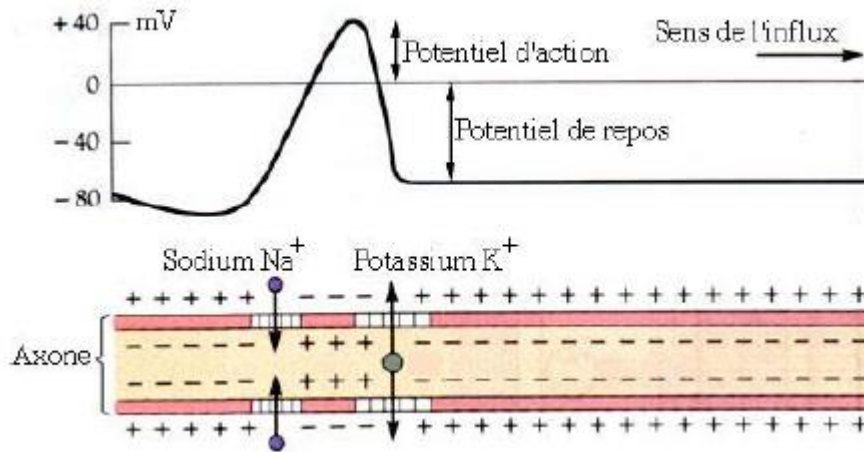
*Figure (I.7) : Fibre formée par l'axone d'un neurone moteur ou sensitif (entrouné ou non d'une gaine de Myéline et d'une gaine de Schwann).*

### I.6.4 L'influx nerveux

La caractéristique d'un neurone est son excitabilité, c'est-à-dire sa capacité de générer et de conduire rapidement un influx électrique des dendrites ou du corps cellulaire le long de l'axone jusqu'aux synapses. [7]

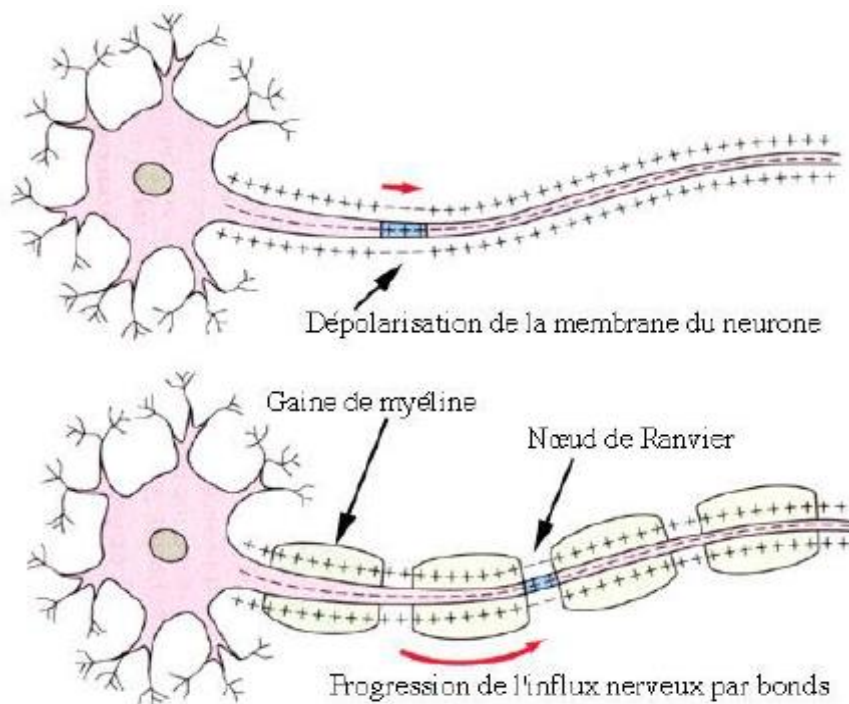
La capacité d'un neurone d'accepter et de relayer de l'information résulte premièrement de différences dans la distribution des ions de part et d'autre de la membrane, ce qui crée une **différence de potentiel** électrique entre l'intérieur et l'extérieur de la cellule au repos, et deuxièmement de modifications momentanées de la perméabilité de cette membrane à certains ions, ce qui engendre une **dépolarisation** de la membrane.

La dépolarisation électrique de la membrane, c'est-à-dire l'inversion du potentiel électrique, se transmet de proche en proche le long de l'axone et constitue la transmission de l'information nerveuse ou **influx nerveux**. [7]



**Figure (I.8) :** Variation du potentiel électrique du cytoplasme d'un axone par rapport à l'extérieur, et origine de la dépolarisation (d'après Beck et al. corrigé et modifié).

Après avoir été dépolarisée, la membrane retrouve rapidement son état initial polarisé, mais jusqu'à ce que les ions soient revenus à leur place, l'axone ne peut conduire de nouvel influx: c'est ce que l'on nomme la **période réfractaire**. [7]



**Figure (I.9) :** Illustration de la progression de l'influx nerveux le long d'un neurone amyélinique (en haut) et le long d'un neurone myélinique (en bas) (d'après Farish, modifié).

Les influx voyagent à la surface des neurones d'un nerf en sens unique: dendrites - corps cellulaire - axone - boutons terminaux, c'est-à-dire d'abord centripète puis centrifuge.

En fait, le neurone pourrait conduire l'influx dans les deux sens, mais la jonction entre deux neurones, ou **synapse**, est unidirectionnelle et impose le sens de l'influx. [7]

### I.6.5 La synapse

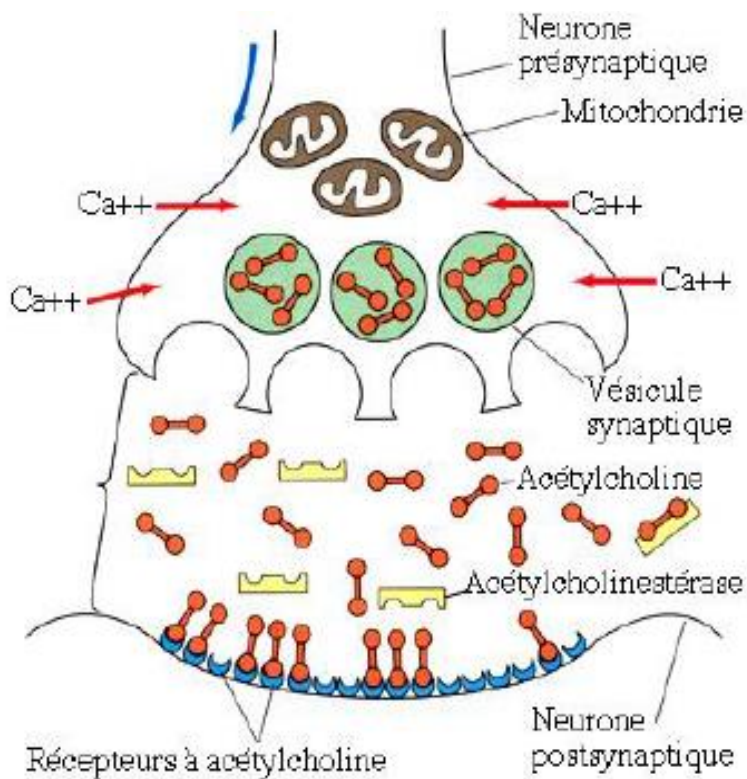
#### Action de l'influx nerveux au niveau de la synapse:

L'influx nerveux doit fréquemment se transmettre d'un neurone à un autre : il le fait au niveau d'une synapse ou **jonction synaptique**. [7]

Dans les boutons terminaux se trouvent de petites **vésicules synaptiques** contenant des **neurotransmetteurs** ou **neuromédiateurs**, substances synthétisées par le neurone.

Lorsque l'influx nerveux atteint le bouton synaptique, il cause la libération des neurotransmetteurs dans un espace infime de 20 à 50 nm séparant les neurones pré- et post synaptiques et appelé **fente synaptique**. [7]

Arrivés dans la fente synaptique, ces neurotransmetteurs se fixent sur des récepteurs de la membrane du neurone post synaptique et induisent, selon leur nature chimique, plusieurs réactions.



**Figure (I.10) :** Mécanisme de la transmission synaptique de l'influx nerveux (d'après Farish, modifié).

**I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a présenté la composition du tissu nerveux et son modèle électrique. On a présenté aussi la caractéristique d'un neurone est son excitabilité, c'est-à-dire sa capacité de générer et de conduire rapidement un influx électrique des dendrites ou du corps cellulaire le long de l'axone jusqu'aux synapses. A partir de ces caractéristiques ; on a proposé une méthode d'exploitation de ces signaux physiologiques pour actionner un mécanisme médical par moteur pas à pas. Ceci fait l'objet du chapitre qui suit.



## Chapitre II

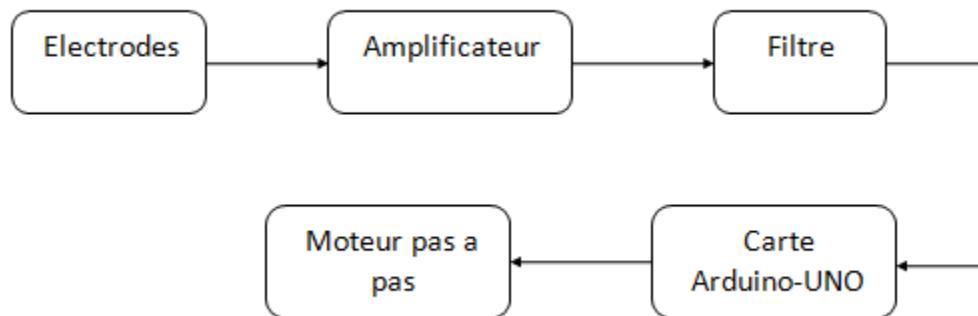
# L'AMPLIFICATION ET FILTRAGE D'UN SIGNAL PHYSIOLOGIQUE

## II. 1 Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter la méthode d'amplification et de mise en forme par filtrage du signal physiologique acquis à partir des électrodes place sur le membre désigné (main, bras.....), la mise en forme du signal traité va être utilisé par suite pour contrôler le mécanisme via un moteur pas à pas.

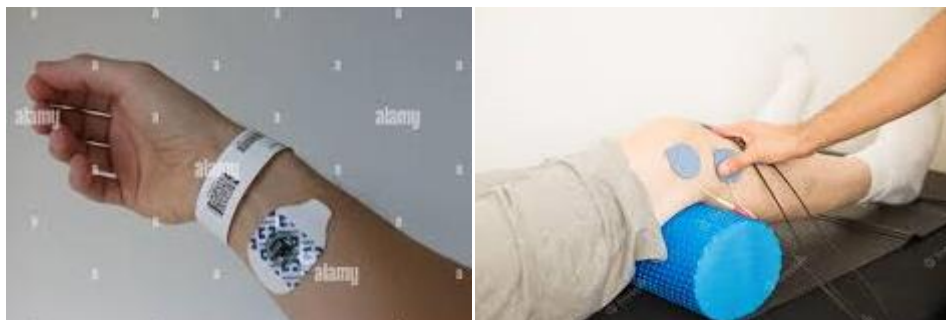
## II. 2 Les différents étages du système d'acquisition

Le schéma synoptique de notre système peut être représenté comme suit :



*Figure (II.1) : Schéma synoptique générale de la chaine d'acquisition.*

Le système d'acquisition est constitué de différents étages ayant pour but de convertir le signal acquis via les électrodes en un signal analogique comme le montre *la figure (II.2)*. [10]



*Figure (II.2): Electrodes d'acquisition du signal physiologique.*

### a) Les électrodes

Ce sont des électrodes constituées de phases métalliques utilisées fréquemment pour recueillir des signaux du corps (ECG, EEG, EMG, EGG...). [10]

Dans la pratique, l'électrode la plus utilisée est dite flottante. Elle est composée d'un métal

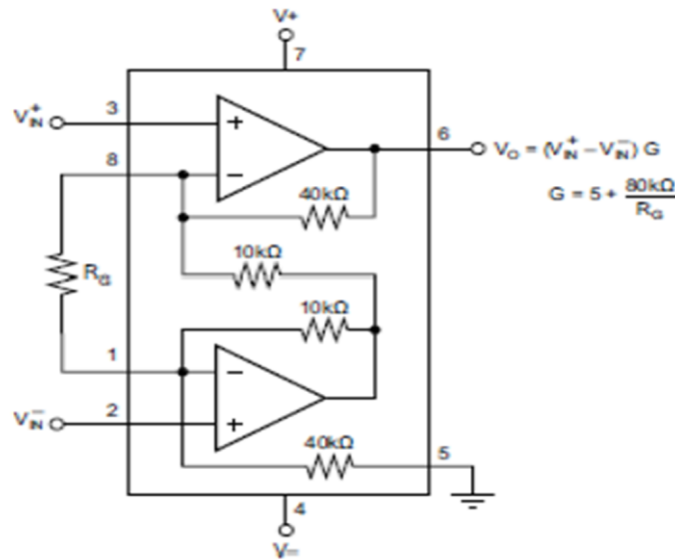
(Ag) recouvert d'un sel très peu soluble de l'Ag cl. Cette électrode est isolée mécaniquement de la peau par un support souple collé à son périphérique. Ce dernier est constitué d'une éponge imbibée d'un gel qui assure la continuité de la conduction. [10]

**b) L'amplificateur du signal physiologique**

Pour faire l'étude d'un phénomène physiologique, souvent on fait appel à un signal électrique le caractérisant. Le signal est souvent faible et entaché de bruit. Il est nécessaire de l'amplifier, mais cette amplification ne doit concerner que le signal utile. Or ce dernier est accompagné de tensions parasites. Pour remédier à ce problème, on doit faire un filtrage du signal acquis.

Il existe plusieurs références d'amplificateur d'instrumentation sur le marché. Dans notre projet, nous avons opté pour le 741 pour sa précision et son adaptation aux signaux physiologiques tels que.[10]

Le schéma électrique de l'amplificateur proposé est basé sur l'AOP741est illustré sur *la figure (II.3)*.

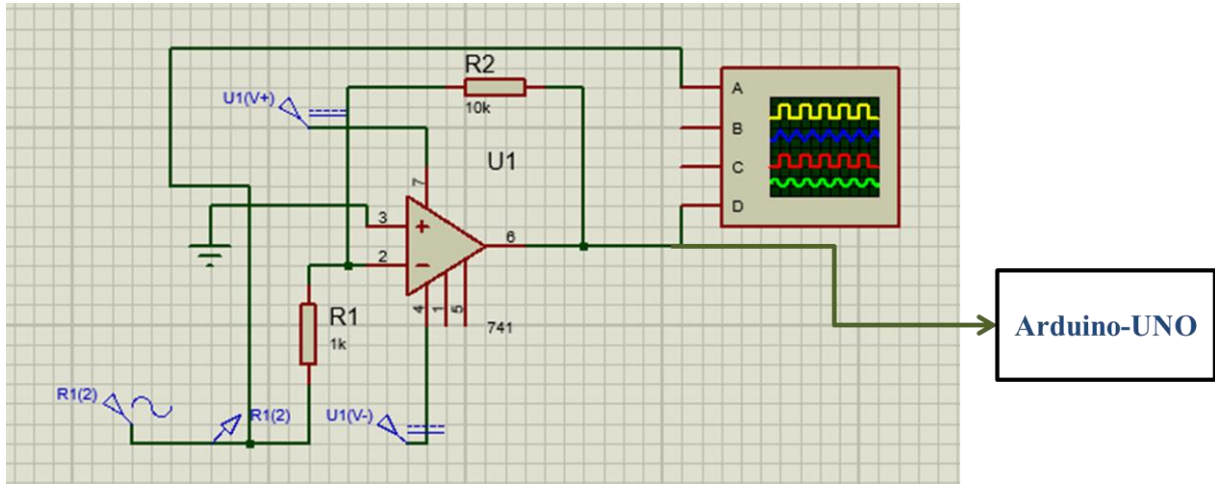


**Figure (II.3):** Schéma électrique de l'amplificateur proposé à base de 741.

L'amplificateur mesure la différence entre les deux tensions et la multiplie par le gain en suivant la loi ci-dessous :

$$V_{out} = (V_{in}^+ + V_{in}^-) \times \left( 5 + \frac{80}{R_G} \right)$$

**II. 3 Schéma électrique de la carte d'acquisition proposée**



*Figure (II.4): Amplification et filtrage*

La partie mémorisation comprend l'oscilloscope et le transfert de données vers l'ordinateur. Les différents composants utilisés dans notre carte d'acquisition sont représentés dans le tableau suivant :[10]

Description	Désignation	Valeur	quantité
Résistance	R1	1kΩ	1
Résistance	R2	10kΩ	1
Amplificateur opérationnel	AOP 741	/	1
Arduino-Uno	Arduino-Uno	/	1

*Tableau (II.1) : Les composants électroniques utilisés dans la carte d'acquisition.*

**II.3.1 Filtre des signaux physiologiques**

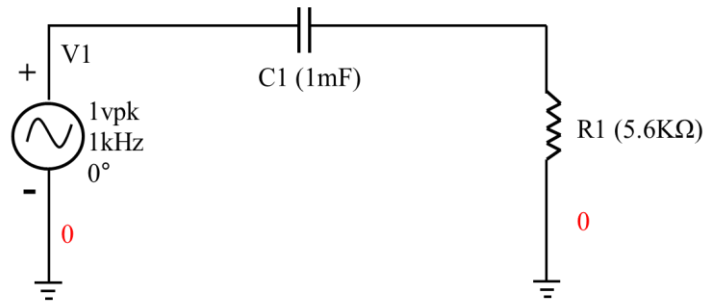
Selon le type du signal capté, on propose deux types de filtres :

- **Filtre passe-bas:** il est utilisé pour laisser passer le signal à fréquence basse seulement. Le schéma classique est illustré sur la figure(II.4), il est de type RC. Sa fonction de transfert est:[11]

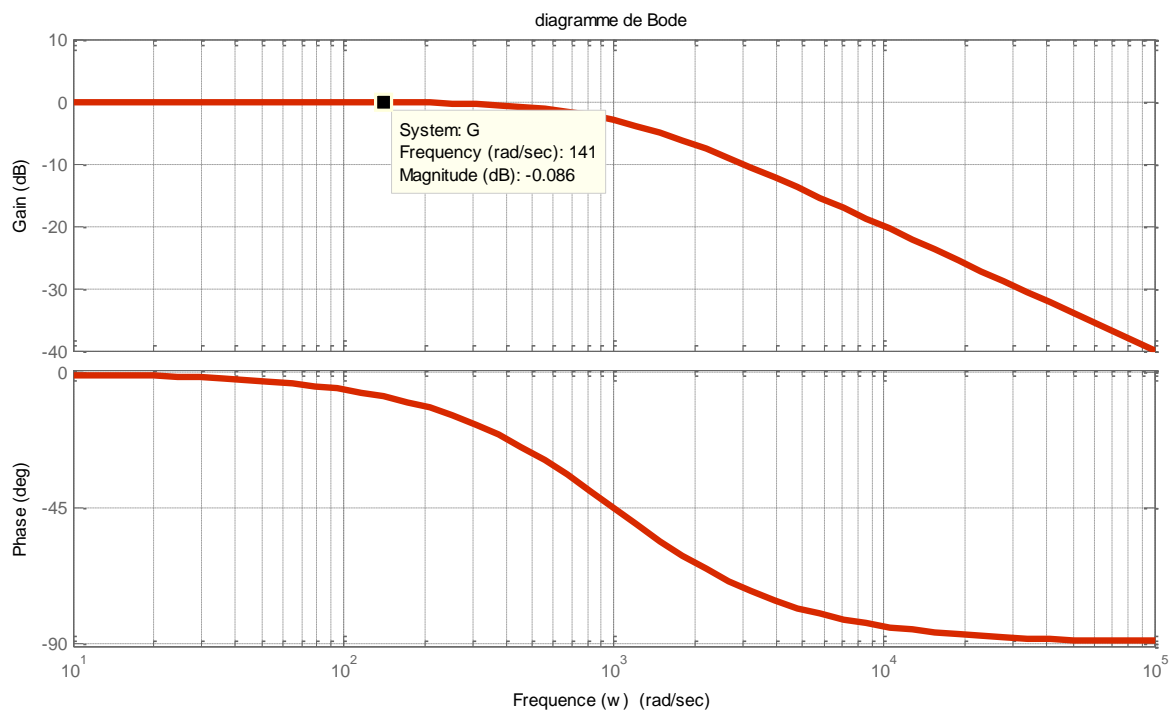
$$H(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Exemple : si on prend  $C = 1\mu F$  et  $R = 1k \Omega \rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi \cdot 10^{-3}} = 150 \text{ Hz}$

La simulation de ce circuit réalisée sur le logiciel MATLAB permet de visualiser le diagramme de Bode comme illustré par *la figure (II.4) :[11]*



*Figure (II.5) : Filtre passe-bas (Type R.C).*



*Figure (II .6): La simulation du filtre RC. A droite, le tracé de Bode du filtre RC.*

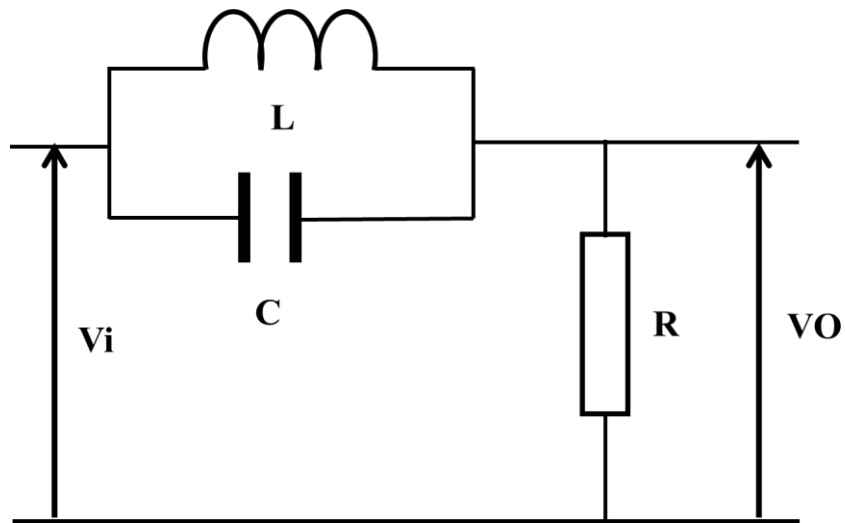
Selon la simulation de ce circuit, la réponse fréquentiel de ce filtre montre bien une fréquence de coupure à 150 Hz.[11]

➤ **Filtre réjecteur ou coupe-bande :**

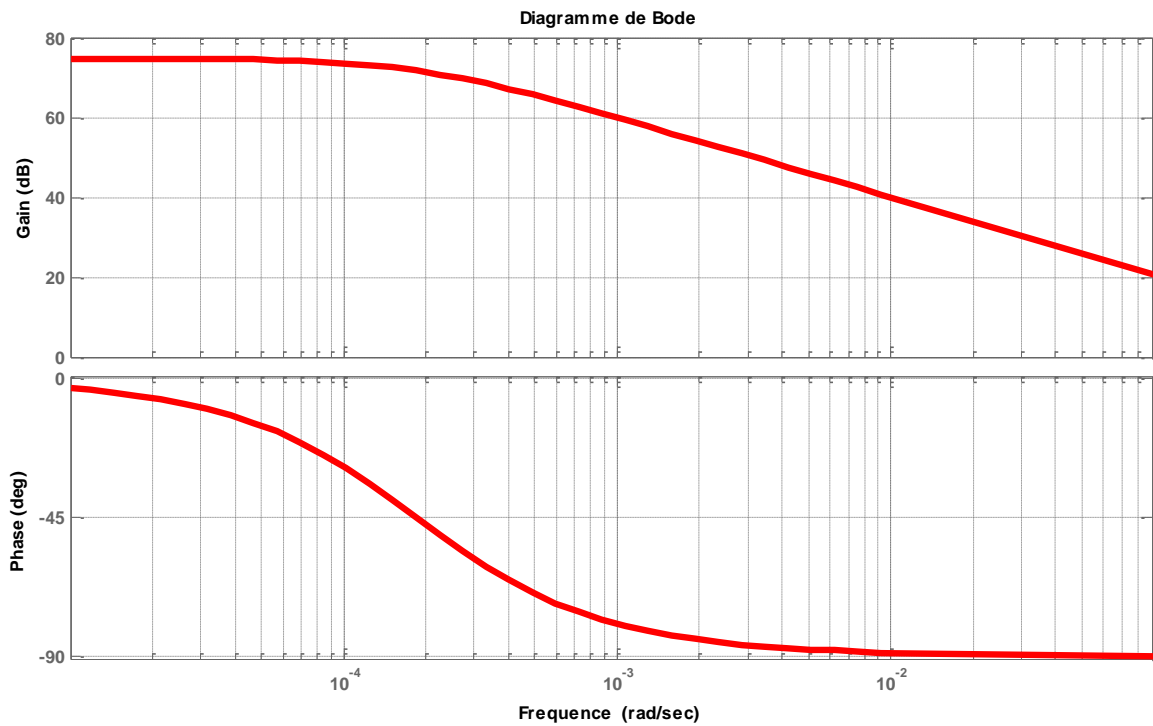
Un filtre coupe-bande aussi appelé filtre réjecteur de bande est un filtre empêchant le passage d'un intervalle de fréquences.

il est composé d'un filtre passe-haut et d'un filtre passe-bas dont les fréquences de coupure sont souvent proches mais différentes, la fréquence de coupure du filtre passe-bas est systématiquement inférieure à la fréquence de coupure du filtre passe-haut. [11]

Ce filtre est utilisé pour supprimer le bruit de secteur de  $f$ . La structure de ce filtre est donnée comme suit :[11]



Figure(II.7): Structure d'un filtre coupe-bande.



Figure(II.8) : le tracé de Bode du filtre.

Selon le tracé de Bode, la réjection de la fréquence de 50Hz est bien réalisée, et le système est bien stable.

II. 4 Schéma de simulation sous Matlab

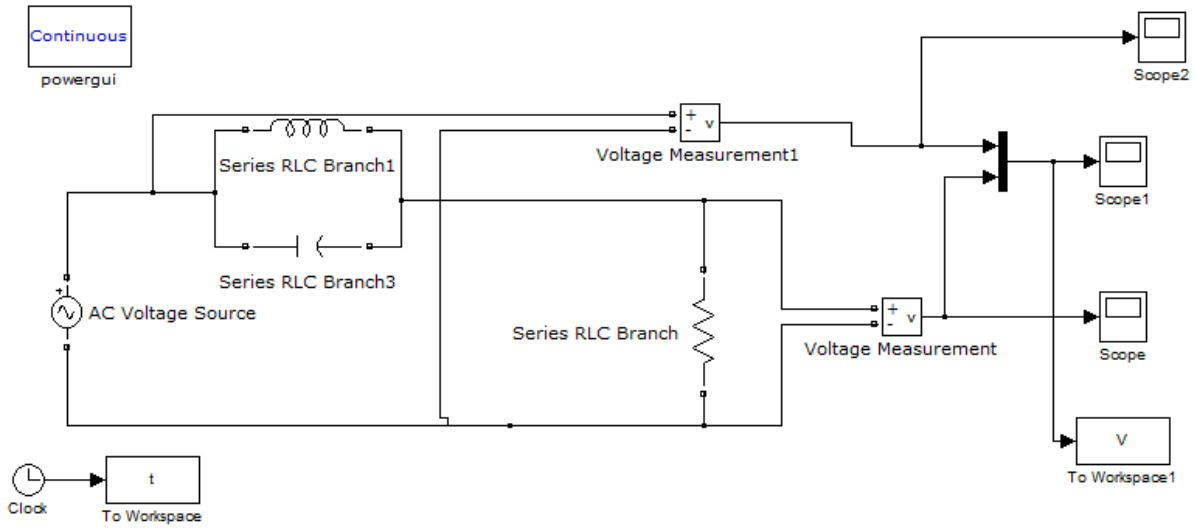


Figure (II.9) : Schéma bloc de simulation du filtre réjecteur sous Matlab.

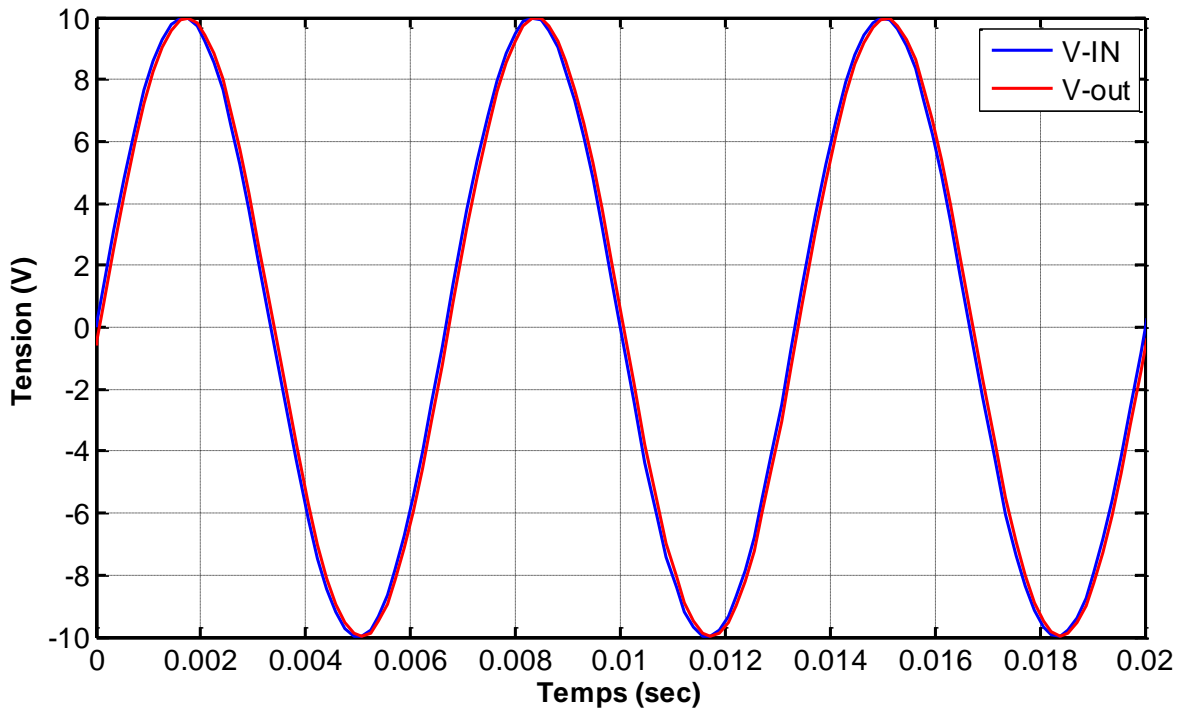
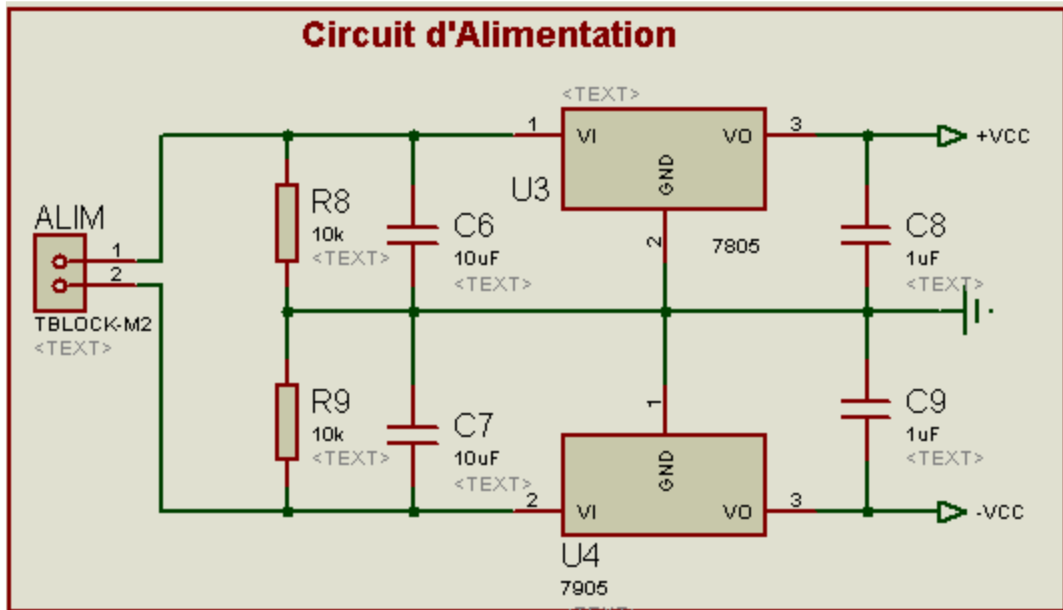


Figure (II.10) : Réponse du filtre réjecteur.

II. 5 Alimentation:

Les composants ont été choisis de façon à ce qu'ils s'alimentent par la même tension. A cet effet, Une alimentation de 9V a été réalisée. Le circuit est illustré sur la figure (II.8) ci-dessous. [5]



Figure(II.11): Le circuit d'alimentation.

## II. 6 Résultat de simulation sous Proteus

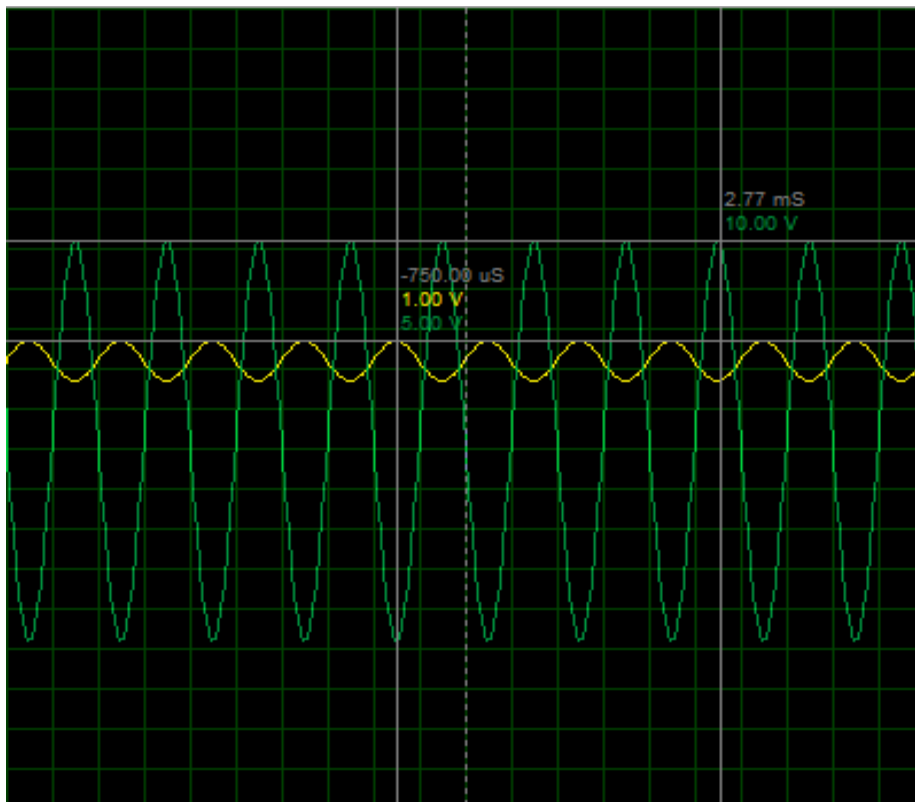


Figure (II.12) : Résultat d'amplification.

La figure (II.12) montre bien que le signal capté d'entrée est amplifié 10 fois, ce qui prouve la faisabilité du système proposé.

On remarque aussi que le signal filtré à l'entrée n'a pas perdu sa nature, ceci ne laisse dire que notre système peut être exploité pour l'amplification et l'utilisation des signaux physiologiques afin de réaliser un mécanisme contrôlant une prothèse.

## II. 7 Conclusion

La conclusion qu'on peut tirer dans ce chapitre, c'est la confirmation du modèle électrique de l'influx nerveux, les résultats de simulation montre bien la faisabilité des circuits proposés, soit pour l'oposés, soit pour l'alimentation stabilisée, soit pour le circuit d'amplification et mise en forme d'un signal.



## Chapitre III

# **LA MODELISATION ET LA COMMANDE D'UN MOTEUR PAS A PAS**

### III. 1 Introduction :

Notre projet cible la commande d'un mécanisme électrique (prothèse) actionné par un moteur pas à pas. Pour réaliser la commande de ce dernier, on doit effectuer sa modélisation mathématique.

### III. 2 Présentation :

Les premiers moteurs pas à pas datent de 1930, leur véritable développement est lié à l'événement de la micro-informatique (microprocesseur). Les moteurs pas à pas permettent de convertir directement un signal électrique numérique en un positionnement angulaire de caractère incrémental. Chaque impulsion envoyée par le système de commande au module de puissance se traduit par la rotation d'un pas du moteur. La résolution angulaire d'un moteur pas à pas va de 4 à 400 pas.

Le moteur pas à pas peut remplir deux fonctions :

- ✓ Conversion d'énergie électrique en énergie mécanique (c'est le moteur classique).
- ✓ Conversion de l'information numérique en un positionnement angulaire ou linéaire.

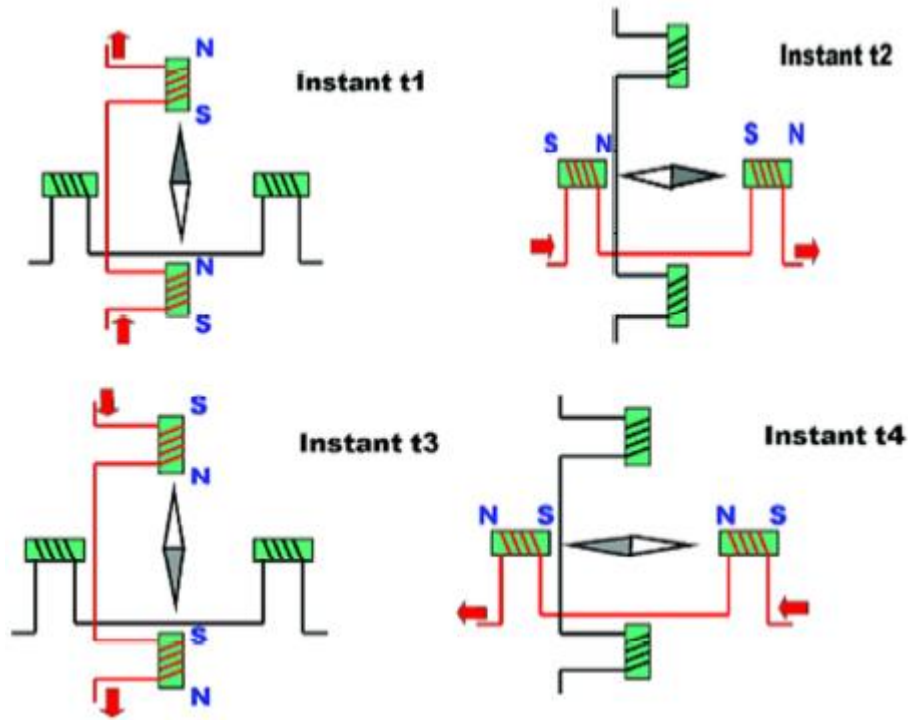
Le caractère synchrone du moteur pas à pas permet de faire fonctionner sans boucle de retour.

[12]

### III. 3 Principe de fonctionnement :

Le principe de base est la création d'un champ tournant, les pôles magnétiques de rotation de même nom se repoussent et les pôles des noms contraires s'attirent, le champ magnétique entraînera le rotor alimenté dans le même sens. [14]

Ceci traduit le fait qu'on transforme une grandeur numérique en une grandeur analogique. La fréquence de rotation, ou vitesse est donc commandée par des impulsions (consigne de rotation) contrôlées elle-même par un dispositif électronique en technologie câblée programmée. Le passage d'un courant, successivement dans chaque bobinage, fait tourner l'aimant.[14]



*Figure (III. 1): Principe de base de la création d'un champ tournant.*

- Nous avons créé un moteur de quatre pas par tour.
- Les impulsions électriques sont du type tout ou rien, c'est à dire passage de courant ou pas de passage de courant.
- L'électronique actuelle permet de piloter la chronologie de ces impulsions avec beaucoup de précision et d'en comptabiliser le nombre.
- Le moteur pas à pas et son circuit de commande permettent donc la rotation d'un axe avec beaucoup de précision en vitesse et en amplitude.[14]

### III. 4 Caractéristiques des moteurs pas à pas :

Il y a deux sortes de caractéristiques : les caractéristiques mécaniques qui dépendent essentiellement du moteur, et les caractéristiques électromagnétiques et électromécaniques qui dépendent du circuit de commande. Les constructeurs ont l'habitude de fournir ces dernières pour des circuits-types, à partir desquels on doit extrapoler.[15]

#### III. 4. 1. Les Caractéristiques mécaniques, électriques et électromécaniques

- Nombre de pas par tour : Il correspond au nombre de systèmes de pôles. Il est donné pour une commande dite "en plein pas" et vaut 4 fois le nombre de systèmes de pôles pour les moteurs diphasés.

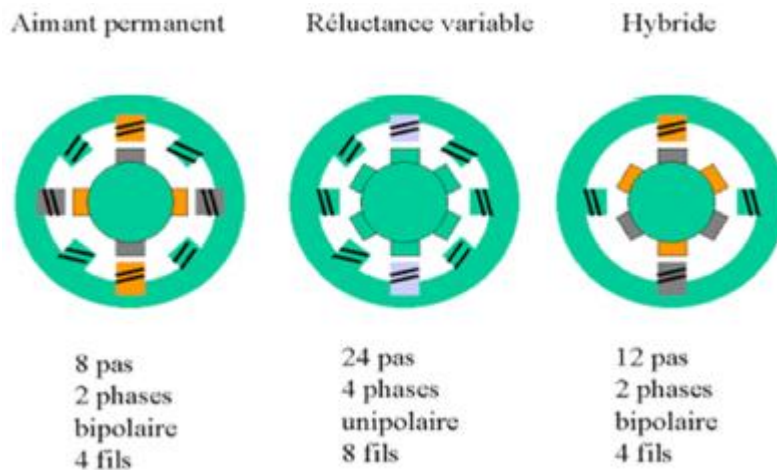
- Précision du pas : C'est la tolérance non-cumulative de la position des pas par rapport à leur place théorique. Elle est donnée en % de l'intervalle angulaire entre deux pas.
- Inertie du rotor : C'est le moment d'inertie donné en g. cm<sup>2</sup>.
- Couple résiduel : C'est le couple qu'il faut fournir au moteur non alimenté pour vaincre l'attraction magnétique rotor-stator. Les fabricants y incluent aussi le frottement des paliers.
- Résistance et inductance de phase : C'est la valeur ohmique de chaque enroulement et l'inductance de chaque enroulement non couplé aux autres (tous les autres en circuit ouvert), respectivement.
- Courant de phase: C'est l'intensité nominale moyenne par phase. Elle est limitée par des considérations d'échauffement et par la saturation du circuit magnétique. Ces deux limitations agissent différemment selon le mode de commande. Cette valeur ne constitue pas la limite supérieure mais plutôt correspond à la performance optimum en service continu.
- Couple de retenue: C'est le couple qu'il faut appliquer pour faire décrocher le moteur (le déplacer de façon permanente de sa position initiale). Cette valeur est généralement donnée pour un moteur à l'arrêt mais sous tension.
- Couple dynamique: la valeur du couple résistante qui provoque le décrochage en marche.
- Puissance nominale: la puissance qu'on peut tirer en régime de puissance maximale en alimentant avec un circuit simple donne en référence.[15]

### III. 5 Les différents types des moteurs pas à pas

#### III. 5. 1. Type selon la technologie du rotor

Il y a trois principaux types de moteurs pas à pas :

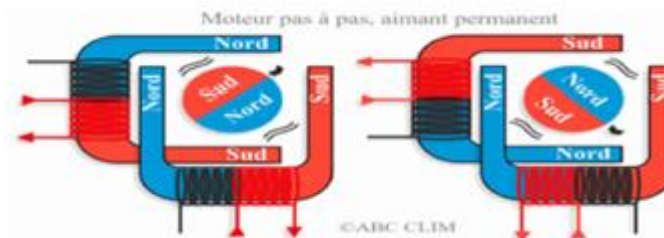
- ✓ Les moteurs à aimant permanent
- ✓ Les moteurs à réluctance variable
- ✓ Les moteurs hybrides. [12]



*Figure (III.2): Type des moteurs pas à pas selon la technologie du rotor.*

### III. 5. 1. 1 Moteur à aimants permanents

Les moteurs à aimants permanents sont constitués par le rotor qui possède des pôles NORD et SUD. À cause des aimants permanents, le rotor reste freiné à sa dernière position lorsque le bloc d'alimentation cesse de fournir des impulsions. Une façon simple de voir le système, est de placer une boussole entre deux aimants. Suivant bobine qui est alimentée et le sens du courant, l'aimant va s'aligner avec le champ. [12]



*Figure (III.3): Moteur pas - à - pas à aimant permanentant.*

#### Avantages du moteur à aimant permanent :

- ✓ Bon marché
- ✓ Dimensions réduites
- ✓ Bon rendement
- ✓ Bon amortissement des oscillations
- ✓ Grand angle de pas (nombre de pas faible : 48). [15]

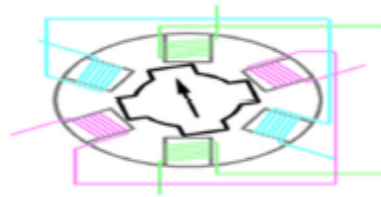
#### Inconvénients du moteur à aimant permanent :

- ✓ Puissance faible

- ✓ Paliers en bronze ou plastique (pas de roulement)
- ✓ Couple résiduel sans courant
- ✓ Vitesse faible. [15]

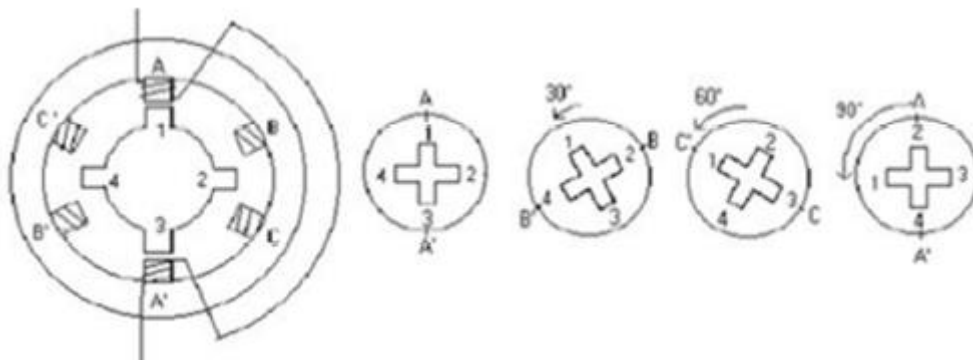
### III. 5. 1. 2 Moteurs à réluctance variable

Il s'agit d'un moteur qui comporte un rotor à encoches se positionnant dans la direction de la plus faible réluctance. Ce rotor, en fer doux, comporte moins de dents qu'il n'y a de pôles au stator. Le fonctionnement du moteur est assuré par un pilotage du type unipolaire et l'avance du rotor est obtenue en excitant tour à tour une paire de pôles du stator. [13]



*Figure (III.4): Moteur pas - à - pas à reluctance variable.*

A chaque impulsion de la commande, la phase suivante du stator est alimentée. On constate que les pôles du rotor les plus proches des bobines alimentées se positionnent en face de ces dernières. Suivant l'ordre d'alimentation des phases du stator, on peut choisir le sens de rotation. [13]



*Figure (III.5): Principe du moteur pas- à - pas à reluctance variable.*

#### a) Différents types de la MRV

Les machines à réluctance variable se divisent, de parts leur construction, en deux grandes catégories :

- ✓ Les machines à stator lisse.
- ✓ Les machine à double denture dite « vernier ».

Dans ces deux types le rotor est à  $N_r$  dents identiques et régulièrement réparties. [14]

#### A- Inconvénients des MRV

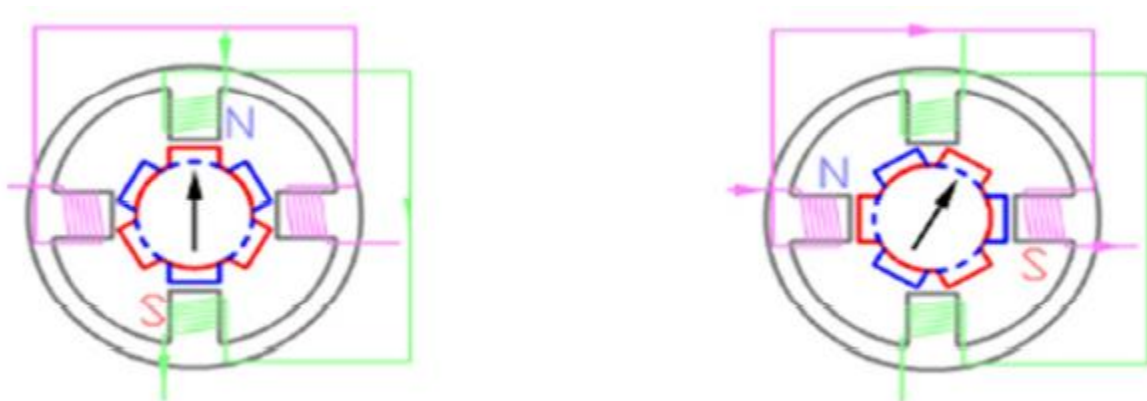
- ✓ Nécessite au moins trois bobinages, pour obtenir un cycle complet.
- ✓ Pas de couple résiduel, c'est-à-dire que hors tension, le rotor est libre, ce qui peut être problématique pour ce genre de moteur.
- ✓ Fabrication est assez délicate, les entrefers doivent être très faibles. [12]

#### B- Avantage des MRV

- ✓ Peu coûteux,
- ✓ Bonne précision.
- ✓ Sens du courant dans la bobine n'a aucune importance. [12]

### III. 5. 1. 3Moteur hybride

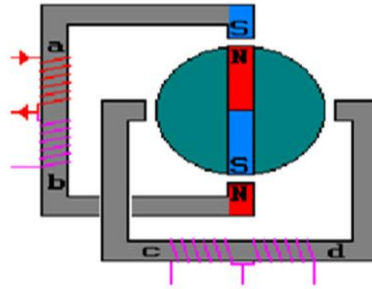
En mode pas entier, les bobines sont alimentées une par une alternativement, dans un sens puis dans l'autre. On voit bien ici l'intérêt d'avoir un rotor polarisé : quand on coupe l'alimentation de la bobine verte et qu'on alimente la bobine rose, en l'absence de polarisation du rotor on n'aurait aucun contrôle sur le sens de rotation, les deux dents bleues et rouges étant attirés de la même façon par la bobine. Avec un rotor polarisé, on peut choisir une de ces deux dents en agissant sur le sens du courant dans la bobine. Il en résulte le mouvement décrit sur l'animation suivante :[12]



*Figure (III.6): Moteur pas à pas hybride selon la conception des enroulements statorique.*

#### a) Moteurs unipolaire

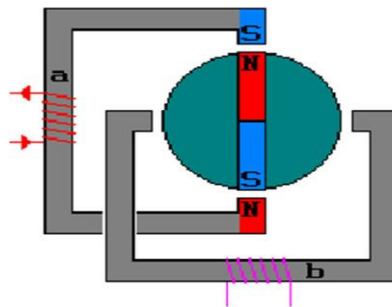
Les bobinages d'un moteur unipolaire sont alimentés toujours dans le même sens par une tension unique d'où le nom d'unipolaire.[13]



*Figure (III.7) : Moteur à aimant permanent unipolaire.*

### b) Moteurs bipolaire

Les bobines d'un moteur bipolaire sont alimentées une fois dans un sens, une fois dans l'autre sens. Ils créent une fois un pôle nord, une fois un pôle sud d'où le nom de bipolaire.[13]



*Figure (III.8): Moteur à aimant permanent bipolaire.*

## III. 6 Comparaison des différents types de moteurs pas à pas

### III. 6. 1. Les moteurs à aimant permanent

- ✓ Ils ont un couple élevé en raison de l'incorporation d'un aimant sur le rotor.
- ✓ Étape angles disponibles sont grandes.
- ✓ La taille est conditionnée par le rotor à aimant permanent et le terrain, vous pouvez obtenir de petites tailles. Parce que l'aimantation du rotor, ce moteur un couple résiduel ou un couple de freinage.
- ✓ L'effet d'amortissement généré par l'aimantation des limites de la plage de vitesses.[15]

### III. 6. 2. Les moteurs à réluctance variable

- ✓ Ne comprenant pas un aimant permanent, le rotor peut être fabriqué avec un petit diamètre, et donc la taille du moteur est également réduite.
- ✓ Avec un petit diamètre de rotor, le moment d'inertie de cette offre également une plage dynamique élevée (haute vitesse), et un couple de départ.
- ✓ L'angle de pas est limité, le diamètre de pôles de stator limite le nombre de bobines qu'il peut contenir.
- ✓ Il n'a pas de couple participation résiduelle quand il est éteint, ce qui est souvent un inconvénient.
- ✓ Ils sont beaucoup moins de couple, mais en la rendant plus facile.[15]

### III. 6. 3. Les moteurs hybrides

Possibilité d'obtenir des angles de petit pas, sans l'aide d'un grand nombre de phases. Ils sont des bonnes gammes dynamiques que les moteurs à aimants permanents ou à réluctance variable.

Ces mesures sont contenues sans atteindre le moteur VR en raison de l'emplacement de l'aimant permanent dans le stator et produit un couple élevé produit par des moteurs à réluctance vigueur que VR. Le tableau ci-après résume les avantages de l'un par rapport à l'autre :[12]

Type de moteur	Moteur a aimant permanent	Moteur a reluctance variable	Moteur hybride
Résolution (nb de pas/tour)	Moyenne	Bonne	Elevée
Sens de rotation	Il dépend : -du sens du courant pour les moteurs bipolaires -L'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend uniquement de l'ordre d'alimentation des bobines	Il dépend : -du sens du courant pour les moteurs bipolaires -L'ordre d'alimentation des bobines
Couple moteur	Elevée	Faible	Elevée
Fréquence de travail	FRD	Grande	Grande

*Tableau(III.1) : Comparatif des différents types des moteurs pas à pas.*

## III. 7 Modélisation d'un moteur pas à pas

### III. 7. 1. Equation des tensions

Les expressions des tensions  $U_\alpha$  et  $U_\beta$  aux bornes des deux phases  $\alpha$  et  $\beta$  respectivement, sont :

$$U_{\alpha} = R_{\alpha}I_{\alpha} + \frac{d\psi_{\alpha}}{dt} \quad (\text{III.1})$$

$$U_{\beta} = R_{\beta}I_{\beta} + \frac{d\psi_{\beta}}{dt} \quad (\text{III.2})$$

avec :  $R_{\alpha}, R_{\beta}$  : résistances des phases  $\alpha$  et  $\beta$ .

$\psi_{\alpha}, \psi_{\beta}$  : flux associés aux phases  $\alpha$  et  $\beta$ .

Le flux de chaque phase  $i$  peut se représenter par la somme des termes correspondant au flux propre  $\varphi_{ii}$ , aux flux mutuels entre phases  $\varphi_{ij}$  et aux flux mutuels entre phases et aimant  $\varphi_{im}$ .

$$\psi_{\alpha} = \psi_{\alpha\alpha} + \psi_{\alpha\beta} + \psi_{\alpha m} \quad (\text{III.3})$$

$$\psi_{\beta} = \psi_{\beta\beta} + \psi_{\beta\alpha} + \psi_{\beta m} \quad (\text{III.4})$$

En définissant les inductances propres  $L_{\alpha\alpha}$  et  $L_{\beta\beta}$  des deux phases  $\alpha$  et  $\beta$  respectivement,

$$L_{\alpha\alpha} = \frac{\psi_{\alpha\alpha}}{I_{\alpha}} \text{ Et } L_{\beta\beta} = \frac{\psi_{\beta\beta}}{I_{\beta}} \quad (\text{III.5})$$

Nous pouvons écrire :

$$\frac{d\psi_{\alpha}}{dt} = L_{\alpha\alpha} \frac{dI_{\alpha}}{dt} \quad (\text{III.6})$$

$$\frac{d\psi_{\beta}}{dt} = L_{\beta\beta} \frac{dI_{\beta}}{dt} \quad (\text{III.7})$$

Le flux mutuel phase- aimant peut être décrit par une fonction sinusoïdale de la position  $\theta$  :

$$\psi_{\alpha m} = \psi_0 \cos(N_r \theta) \quad (\text{III.8})$$

$$\psi_{\beta m} = \psi_0 \sin(N_r \theta) \quad (\text{III.9})$$

$\psi$  : flux mutuel maximal produit par l'aimant.

$N_r$  : nombre de dent srotorique.

$\theta$  : angle de position mécanique .

$$\frac{d\psi_{\alpha m}}{dt} = -Kw \sin(N_r \theta) \quad (\text{III.10})$$

$$\frac{d\psi_{\beta m}}{dt} = Kw \cos(N_r \theta) \quad (\text{III.11})$$

Avec :

$$K = N_r \psi_0: \text{Constante de couple}$$

$$w = \frac{d\theta}{dt}: \text{vitesse mécanique de rotation.}$$

Si on considère les phases du moteur en Quadrature, le flux mutuels entre les deux phases peuvent être négligés. On a :  $\psi_{\alpha\beta} = \psi_{\beta\alpha} = 0$

La variation du flux total dans chaque phase s'écrit alors, en reprenant (III.3) et(III.4) :

$$\frac{d\psi_{\alpha}}{dt} = L_{\alpha\alpha} \frac{dI_{\alpha}}{dt} - Kw \sin(N_r \theta) \quad (\text{III.12})$$

$$\frac{d\psi_\beta}{dt} = L_{\beta\beta} \frac{dI_\beta}{dt} + Kw \cos(N_r \theta) \quad (\text{III.13})$$

En posant  $R_\alpha = R_\beta = R$  et  $L_{\alpha\alpha} = L_{\beta\beta} = L$  les relations de (III.1 et III.2) deviennent alors :

$$\begin{aligned} U_\alpha &= RI_\alpha + L \frac{dI_\alpha}{dt} - Kw \sin(N_r \theta) \\ U_\beta &= RI_\beta + L \frac{dI_\beta}{dt} + Kw \cos(N_r \theta) \end{aligned} \quad (\text{III.14})$$

Avec :

$$\begin{aligned} U_{m\alpha} &= -Kw \sin(N_r \theta) \\ U_{m\beta} &= Kw \cos(N_r \theta) \end{aligned} \quad (\text{III.15})$$

$U_{m\alpha}$  et  $U_{m\beta}$  Représentent les tensions induites de mouvement dans les deux phases  $\alpha$  et  $\beta$ .

Le modèle mathématique des phases, donnée par la relation (III.14), permet de schématiser chacune d'elles par le circuit électrique de la figure (III.9).

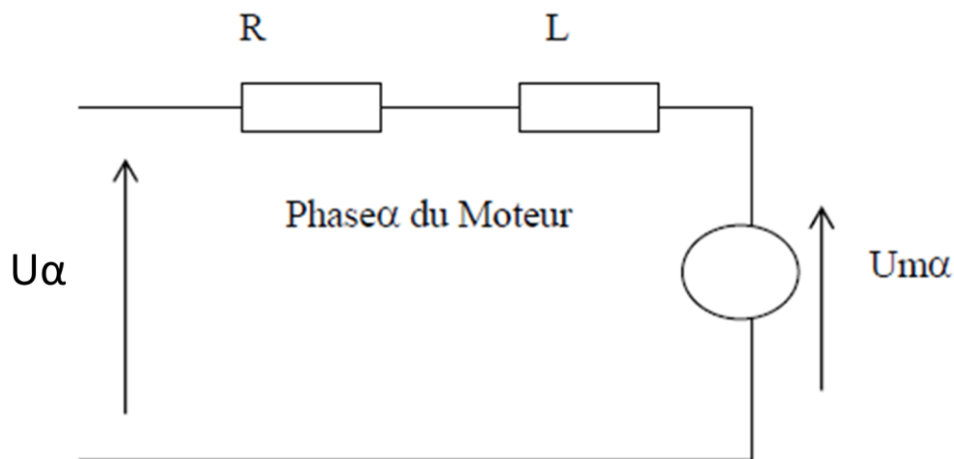


Figure (III.9) : Schéma équivalent d'une phase du moteur.

### III. 7. 2. Transformation de Park

La transformation de Park a pour but de traiter une large gamme de machines de façon unifiée en les ramenant à un modèle unique dit machine primitive ou machine de Kron. Cette conversion appelée souvent transformation des deux axes, fait correspondre aux enroulements de la machine originale, des enroulements équivalents du point de vue électriques et magnétique disposés selon les axes  $\mathbf{d}$  et  $\mathbf{q}$ . Cette transformation a pour objectif de rendre les inductances mutuelles du modèle indépendantes de la rotation.[16]

### III. 7. 3. Transformation de Park appliquée au moteur pas à pas à Aimant permanent

On désire transformer les enroulements de la machine à des enroulements orthogonaux équivalents selon les axes  $\mathbf{d}$  et  $\mathbf{q}$  dénommés :[16]

- Direct selon (d)
- Transversal selon (q)

Selon Park, on utilise la matrice de transformation pour les courants et les tensions définies par :

$$M = \begin{vmatrix} \cos(N_r \theta) & \sin(N_r \theta) \\ -\sin(N_r \theta) & \cos(N_r \theta) \end{vmatrix} \quad (\text{III.16})$$

$$M^{-1} = \begin{vmatrix} \cos(N_r \theta) & -\sin(N_r \theta) \\ \sin(N_r \theta) & \cos(N_r \theta) \end{vmatrix} \quad (\text{III.17})$$

On peut exprimer les courants et les tensions dans le repère d-q tournant lié au rotor :

$$V_{\alpha\beta} = M^{-1}V_{dq} \quad (\text{III.18})$$

$$V_{dq} = M.V_{\alpha\beta} \quad (\text{III.19})$$

$$i_{\alpha\beta} = M^{-1}i_{dq} \quad (\text{III.20})$$

$$i_{dq} = M.i_{\alpha\beta} \quad (\text{III.21})$$

Et le modèle de l'équation (III.14). D'où les équations s'expriment sous la forme suivante :

Ce modèle d'équation

$$U_{\alpha} = RI_{\alpha} + L \frac{dI_{\alpha}}{dt} - Kw \sin(N_p \theta) \quad (\text{III.22})$$

$$U_{\beta} = RI_{\beta} + L \frac{dI_{\beta}}{dt} + Kw \cos(N_r \vartheta) \quad (\text{III.23})$$

et le modèle de l'équation (III.14) voir la transformation dans l'annexe (B). Peut s'exprimer sous la forme suivante

$$L \frac{di_d}{dt} = V_d - Ri_d + N_r L \Omega i_q \quad (\text{III.24})$$

$$L \frac{di_q}{dt} = V_q - Ri_q - N_r L \Omega i_d \quad (\text{III.25})$$

### III. 7. 3. 1 Equation de couple

Le couple développé par un moteur à aimant permanent est donné par :

$$C_e = \psi_{am} (-I_{\alpha} \sin \theta_e + I_{\beta} \sin \theta_e) + M [(I_{\alpha}^2 - I_{\beta}^2) \sin 2 \theta_e + 2I_{\alpha} I_{\beta} \sin 2 \theta_e] \quad (\text{III.26})$$

Avec :

$\psi_{am}$  : Le flux crée par l'aimant dans les bobines.

$I_{\alpha}, I_{\beta}$  : Les courants d'alimentation des deux phases.

$\theta_e$  : L'angle électrique de la machine.

$M$  : Le coefficient d'inductance mutuelle entre les deux bobines.

La relation (III.26) montre que le couple développé est le résultat de deux effets. L'un, Proportionnel à  $\psi_{\alpha m}$  est dû à la présence de l'aimant : l'autre est engendré par l'effet de la variation de l'entrefer entre le rotor et le stator. Ce deuxième effet est généralement considéré comme négligeable devant celui de l'aimant, ce qui simplifie l'expression du couple:

$$C_e = \psi_{\alpha m}(-I_\alpha \sin \theta_e + I_\beta \sin \theta_e) \quad (\text{III.27})$$

Le couple dynamique développé par le moteur est essentiellement dû à la variation du flux envoyé par l'aimant à travers des deux phases.

$$C_e = I_\alpha \frac{d\psi_\alpha}{d\theta} + I_\beta \frac{d\psi_\beta}{d\theta}$$

$$C_e = -K(I_\alpha \sin(N\theta) - I_\beta \cos(N\theta)) \quad (\text{III.28})$$

## III. 8 Domaine de fonctionnement du moteur pas à pas

### III. 8. 1. Comportement statique

Soit un moteur à aimant à deux phases  $\alpha$  et  $\beta$ , alimenté selon une configuration qui fait correspondre, pour un couple de charge nul, une position d'équilibre  $\theta_1$  (*figure III.10*).

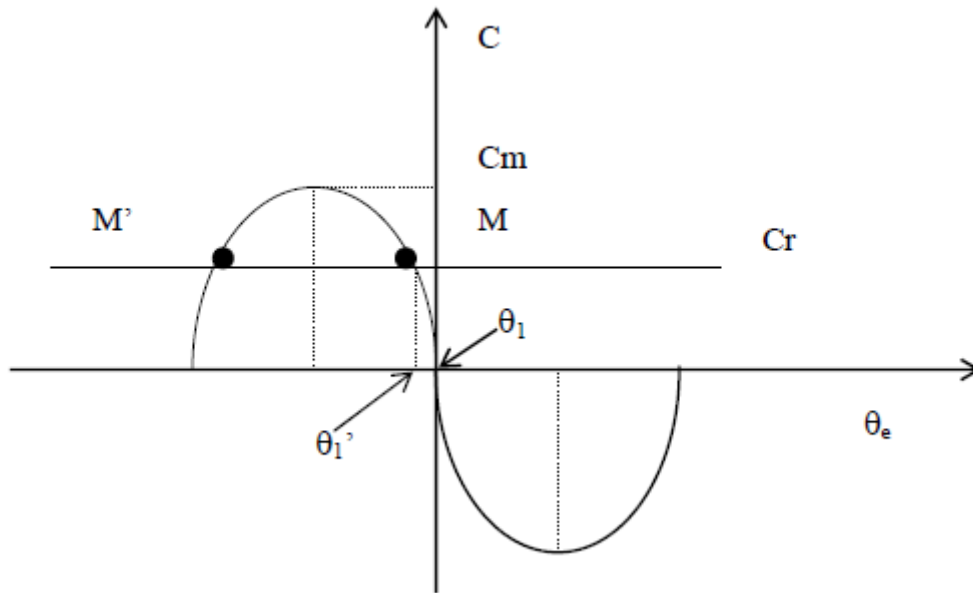
.La variation du couple statique, comme pour les autres structures de moteurs pas à pas, est sinusoïdale en fonction de la position.[16]

L'application d'un couple résistant  $C_r$  permet d'écrire :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = C - C_r \quad (\text{III.29})$$

Avec  $J$ , le moment d'inertie de l'ensemble des parties tournantes du rotor.

L'équilibre défini par la  $itton = C_r$ , fait apparaître deux positions d'équilibres représentées par les points M et M'. Seul le point M correspond à un équilibre stable à la position  $\theta_1$ .



Figure(III.10): Caractéristique statique.

La présence du couple de charge  $C_r$  entraîne un écart de position statique défini par :

$$\Delta\theta = \theta_1^- - \theta_1 = -\text{arc sin}\left(\frac{C_r}{C_m}\right) \quad \text{(III.30)}$$

Où  $C_m$  est le couple de maintien qui correspond au couple de charge maximal applicable au rotor, sans provoquer sa rotation.

### III. 8. 2. Comportement dynamique

En appliquant le principe fondamental de la dynamique on obtient:

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_e + F\omega + C_{rs} \cdot \text{sign}(\omega) + C_r \quad \text{(III.31)}$$

Avec :

$F$ : Coefficient de frottement visqueux

$C_r$ : Couple de charge

$C_{rs}$  : Coefficient de frottement sec

$$J \frac{d\Omega}{dt} = K \cdot i_q - C_r \quad \text{(III.32)}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \Omega \quad \text{(III.33)}$$

### III. 8. 3. Caractéristique couple vitesse

Les performances dynamiques du moteur sont définies par des courbes qui caractérisent l'évolution du couple en fonction de la fréquence de commande (*figure III.11*). On distingue quatre zones de fonctionnement :

- ❖ **Zone 1** : c'est la zone d'arrêt-démarrage du moteur, elle est délimitée par la fréquence limite de démarrage ( $F_{dm}$ ) au dessus de laquelle le moteur ne pourra plus démarrer.
- ❖ **Zone 2** : pour accéder à cette zone, dite de survitesse ou d'entraînement, le moteur devra effectuer une accélération à partir de la zone d'arrêt-démarrage. L'arrêt d'un moteur fonctionnant dans la zone de survitesse doit se faire par une décélération progressive, jusqu'à une fréquence inférieure à  $F_{dm}$ .

Lors du fonctionnement dans la zone d'arrêt-démarrage, des instabilités, dites de basses fréquences.

- ❖ **Zone 3** : peuvent entraîner une perte de synchronisme. Ceci est dû essentiellement au phénomène de résonance qui se produit lorsque la durée du pas est voisine de la pseudo-période des oscillations.
- ❖ **Zone 4** : un phénomène d'oscillations de la vitesse instantanée du moteur autour de la vitesse de synchrone peut également conduire à une perte de synchronisme. [16]

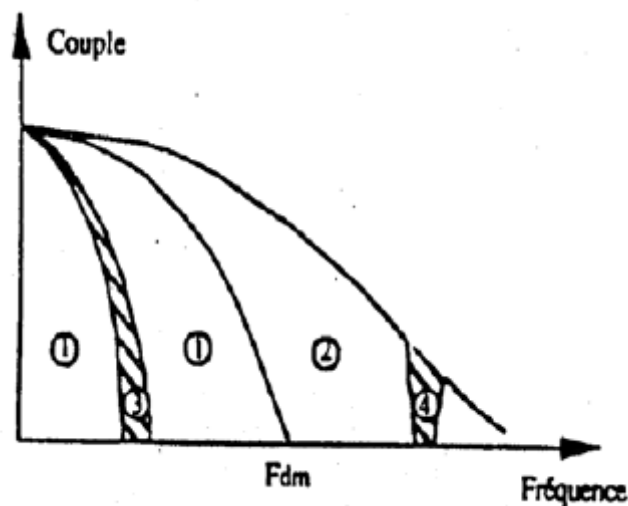


Figure (III.11): Domaine de fonctionnement d'un moteur pas à pas.

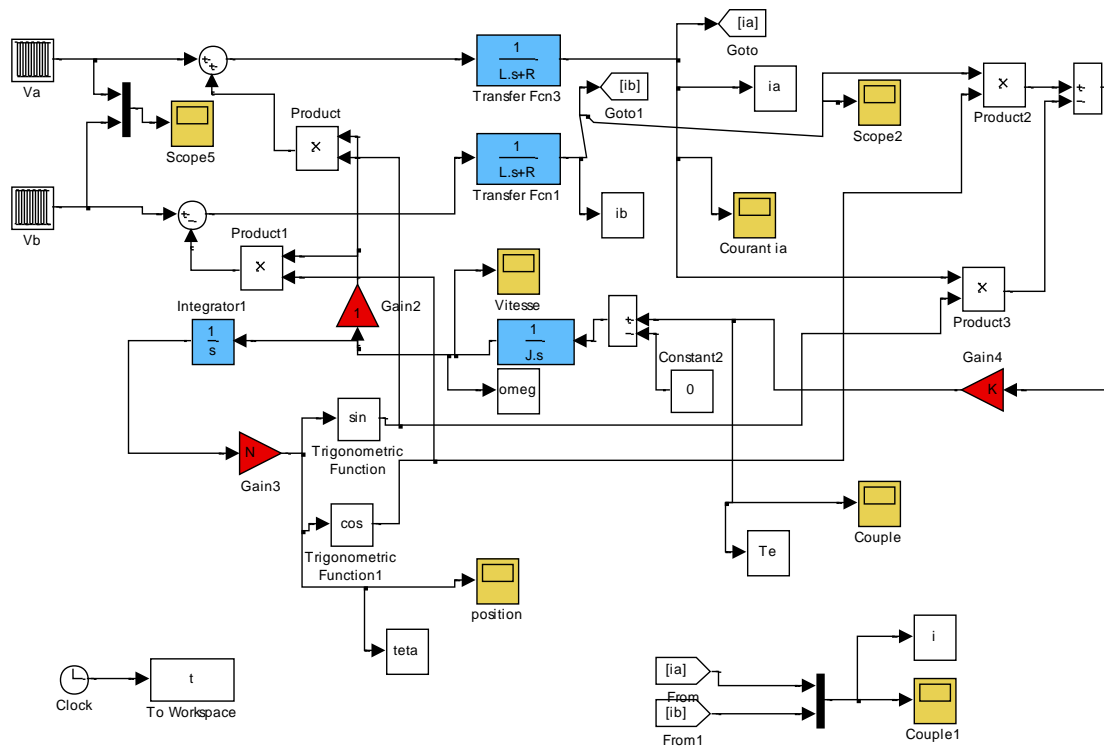
### III. 8. 4. Modes de Séquencement du moteur pas à pas

Les caractéristiques de sortie d'un moteur pas à pas sont étroitement liées à la manière d'alimenter les différents enroulements. Ces modes d'alimentation, imposés par le séquencement des différentes impulsions de commande, dépendent du type de moteur ainsi que de la nature du bobinage des différentes phases. [17]

Les modes de séquençement les plus répandus pour les moteurs diphasés sont :

- **Mode 1** : à un instant donné, une seule phase du moteur est alimentée.
- **Mode2** : les deux phases sont alimentées en même temps. Ce mode de séquençement fait apparaître des positions d'équilibre intermédiaires. Le couple développé de racine de deux plus grand que celui disponible avec mode 1.
- **Mode3** : il correspond à une utilisation alternative des deux premiers modes. Son avantage est de doubler le nombre de positions d'équilibre (demi- pas) mais les couples sont différents pour les déplacements élémentaires.
- **Mode4** : il répond au problème de déséquilibre du couple du mode 3. Lorsque l'on alimente une seule phase, le courant est régulé à une valeur de racine de deux fois plus grande que celle normalement utilisée pour le mode 1. Ceci permet pour tous les déplacements élémentaires.
- **Mode5** : ce mode utilise le principe de modulation des courants de phase pour augmenter le nombre de déplacements élémentaires appelés micros-pas. La modulation peut se faire selon une loi sinusoïdale. [18]

### III. 9 Schéma de Simulation sur Matlab /Simulink



Figure(III.12): Schéma de simulation d'un moteur pas à pas sur Matlab.

## III. 10 Résultats de Simulation

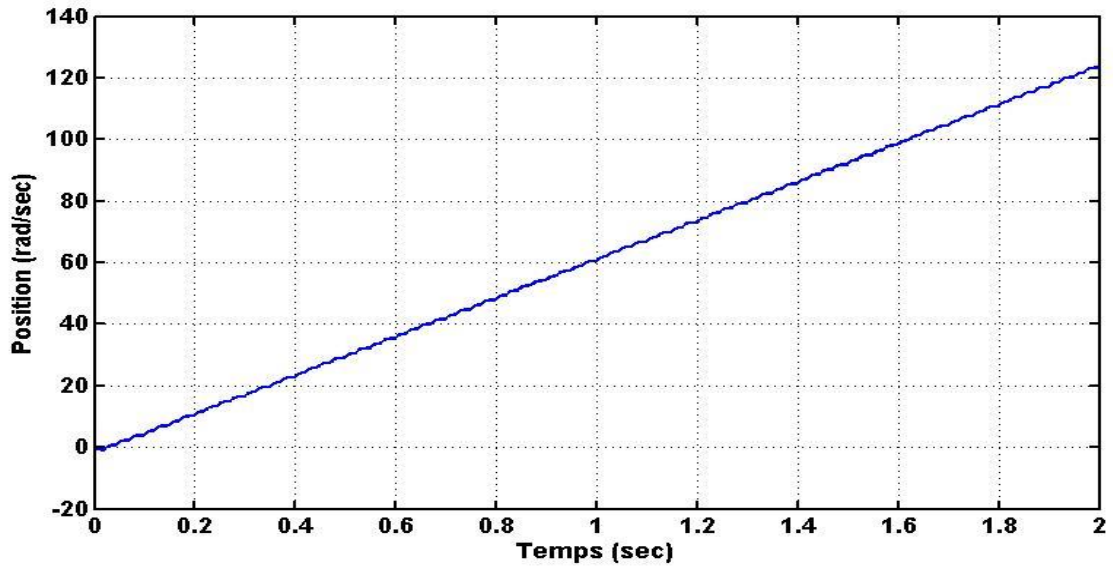


Figure (III.13): Caractéristique de la position  $\theta$ .

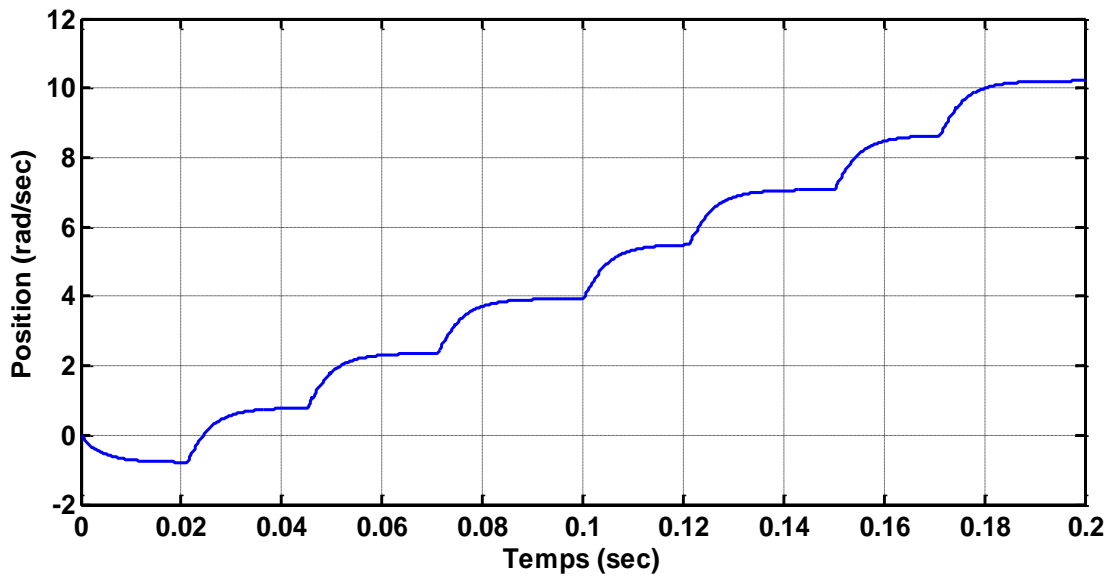


Figure (III.13.a): Caractéristique de la position  $\theta$  Zoom.

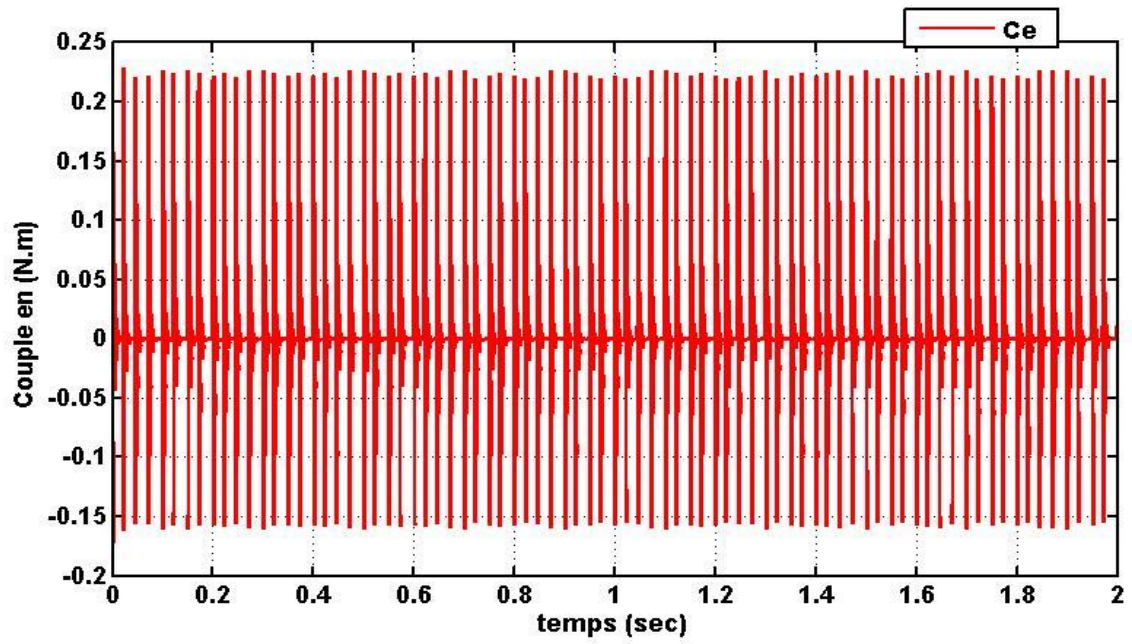


Figure (III.14) : Caractéristique du couple  $C_e$ .

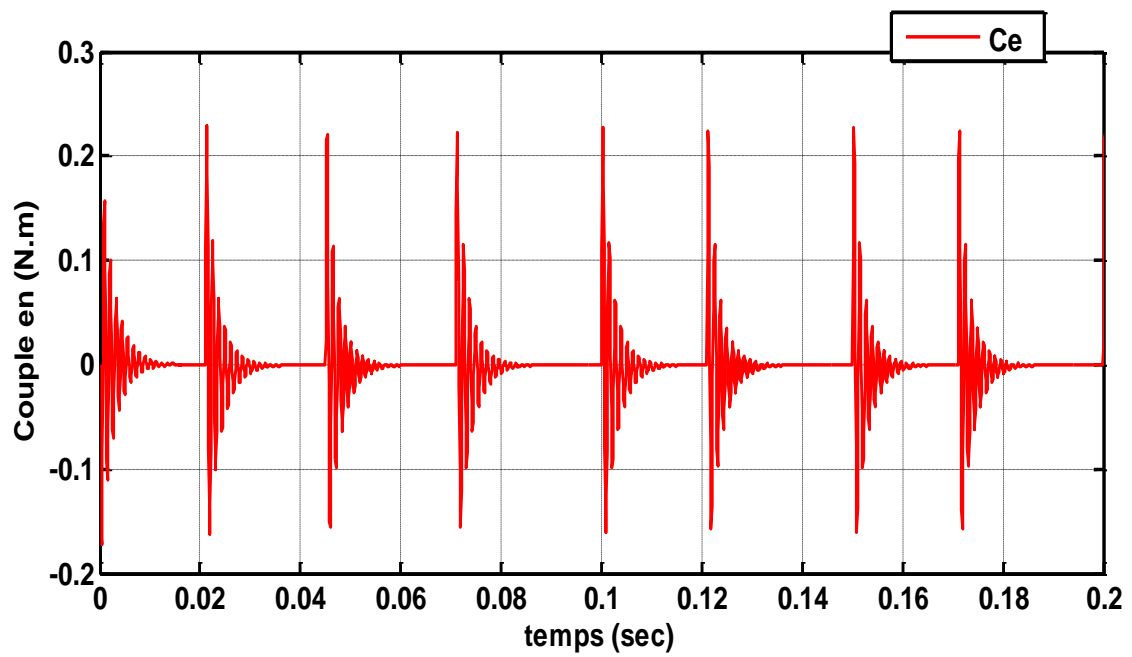


Figure (III.14.a) : Caractéristique du couple  $C_e$  Zoom.

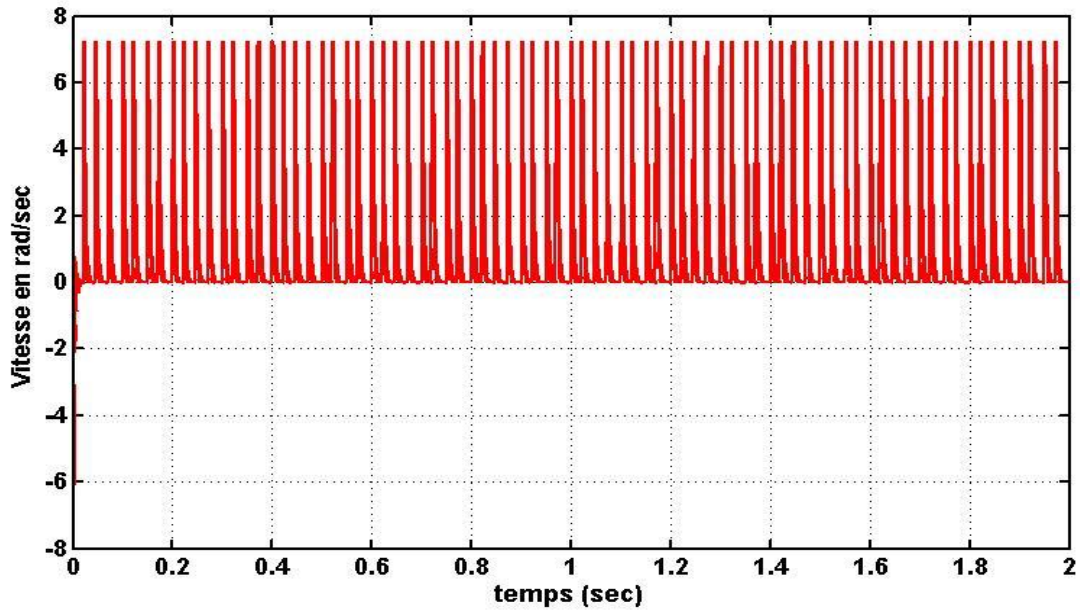


Figure (III.15) : Caractéristique de la vitesse  $\Omega$ .

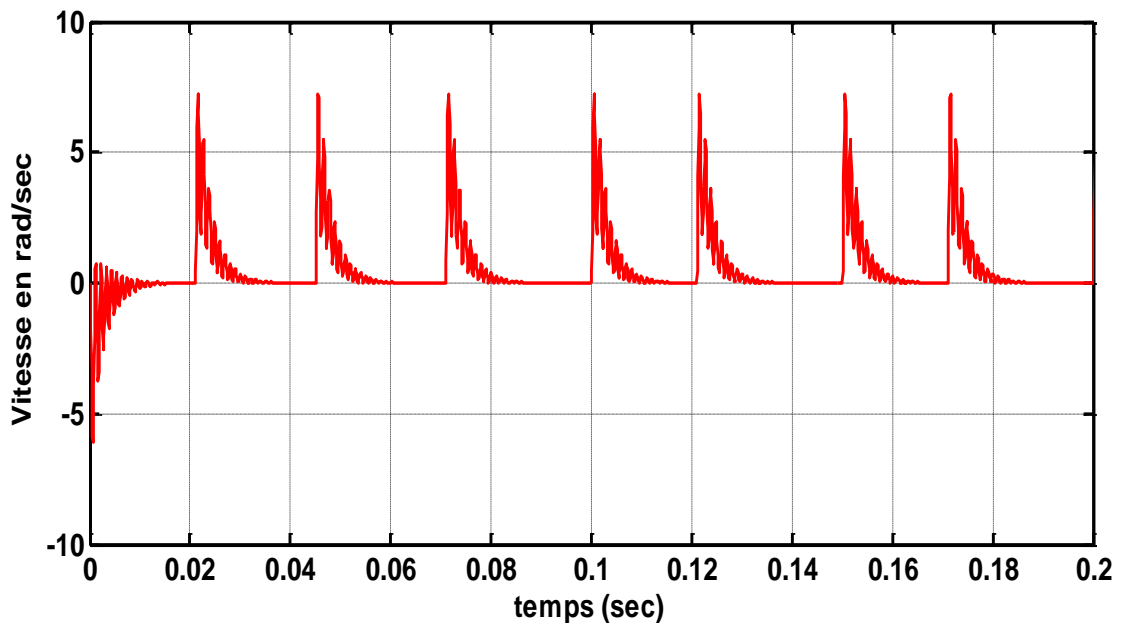


Figure (III.15.a) : Caractéristique de la vitesse  $\Omega$  Zoom.

### III. 10. 1. Interprétation des résultats de simulations

Les paramètres du moteur pas à pas utilisés en simulation sont donnés en annexe C. Ce modèle néglige la variation de la réluctance liée à la rotation, et inclus le couple de détente dans le couple résistant, le moteur est alimenté sous une tension en mode deux à fréquence fixe d'amplitude 4.2v. Les courbes de **la figure (III.13-15)** représentent les résultats de simulation du moteur pas à pas à aimant permanent à vide.

L'examen des caractéristiques dynamiques sont parfaitement identiques, ceci justifier et confirme la faisabilité du modèle mathématique du moteur.

### **III. 11 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle mathématique du moteur pas à pas pour l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques d'une part et d'autre part pour l'élaboration des lois de commande. Les résultats obtenus confirme la validité du modèle.



# Chapitre IV

**VALIDATION  
EXPERIMENTALE**

### **IV. 1. Introduction**

Dans ce chapitre ; on a présenté la validation expérimentale du système proposé. Le signal physiologique est assimilé par un signal sinusoïdal filtré c'est-à-dire sans harmoniques. Le contrôle du moteur pas à pas est réalisé par la carte électronique Arduino-UNO. La tension d'alimentation Vcc de cette carte ainsi que celle du moteur sont obtenue par une alimentation stabilisée qu'on a réalisée.

### **IV. 2. Définition du module Arduino-UNO**

Le module Arduino-Uno est un système électronique composé de plusieurs composants électroniques, dont l'élément principal est le microcontrôleur. Un microcontrôleur programmé peut analyser et produire des signaux électriques de manière à effectuer des tâches très diverses. Arduino est utilisé dans beaucoup d'applications comme l'électrotechnique industrielle et embarquée ...etc. Chaque module d'Arduino possède un régulateur de tension +5 V et un oscillateur à quartz 16 MHz (ou un résonateur céramique dans certains modèles). Pour programmer cette carte, on utilise l'logiciel IDE Arduino.[19]

### **IV. 3. Les gammes de la carte Arduino**

Actuellement, il existe plusieurs versions de module Arduino, nous citons quelques un afin d'éclaircir l'évaluation de ce produit scientifique et académique:

- Le NG d'Arduino, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un ATmega8.
- L'extrémité d'Arduino, avec une interface d'USB pour programmer et usage d'un Microcontrôleur ATmega8.
- L'Arduino Mini, une version miniature de l'Arduino en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Nano, une petite carte programme à l'aide porte USB cette version utilisant un microcontrôleur ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version).
- Le LilyPad Arduino, une conception de minimaliste pour l'application wearable en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- Le NG d'Arduino plus, avec une interface d' USB pour programmer et usage d'un ATmega168.

- L'Arduino Bluetooth, avec une interface de Bluetooth pour programmer en utilisant un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Diecimila, avec une interface d'USB et utilise un microcontrôleur ATmega168.
- L'Arduino Duemilanove ("2009"), en utilisant un microcontrôleur l'ATmega168 (ATmega328 pour une plus nouvelle version) et actionné par l'intermédiaire de la puissance d'USB/DC.
- L'Arduino Mega, en utilisant un microcontrôleur ATmega1280 pour I/O additionnel et mémoire.
- L'Arduino UNO, utilisations microcontrôleur ATmega328.
- L'Arduino Mega2560, utilisations un microcontrôleur ATmega2560, et possède toute la mémoire à 256 KBS. Elle incorpore également le nouvel ATmega8U2 (ATmega16U2 dans le jeu de puces d'USB de révision 3).
- L'Arduino Leonardo, avec un morceau ATmega328 qui élimine le besoin de raccordement d'USB et peut être employé comme clavier.
- L'Arduino Esplora : ressemblant à un contrôleur visuel de jeu, avec un manche et des sondes intégrées pour le bruit, la lumière, la température, et l'accélération.[4] ETUDE

Parmi ces types, nous avons choisi une carte Arduino UNO (carte Basique). L'intérêt principal de cette carte est de faciliter la mise en œuvre d'une telle commande qui sera détaillée par la suite.[20]

#### IV. 4. Description de carte Arduino modèle UNO

Le modèle UNO (**Figure IV.1**) de la société Arduino est une carte électronique dont le cœur est un microcontrôleur ATMEL de référence ATmega328. Le microcontrôleur ATmega328 est microcontrôleur 8bits de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C. Cette carte possède 14 entrées /sorties numérique (dont 6 peuvent être utilisées comme étant des sorties PWM(Pulse Width Modulation),6 entrées analogiques avec un convertisseur Analogique/Numérique de 10 bits de résolution,1 résonateur céramique (quartz) de 16 Mhz,un connecteur ICSP (In\_Circuit Serial Programming) qui permet la programmation du microcontrôleur sur le circuit sans avoir à l'enlever ,un connecteur jack pour une alimentation extérieur, un bouton de reset pour mettre le processus à Zéro.[21]



*Figure(IV.1) :La carte Arduino UNO.*

#### IV. 5. Caractéristiques de la carte Arduino UNO

Micro contrôleur	ATmega328
Tension d'alimentation interne	5V
Tension d'alimentation (recommandée)	7 à 12V, limites = 6 à 20 V
Entrées/sorties numériques	14 dont 6 sorties PWM
Entrées analogiques	6
Courant max par broches E/S	40 mA
Courant max sur sortie 3,3V	50mA
Mémoire Flash	32 KB dont 0.5 KB utilisée par le boot loader
Mémoire SRAM	2 KB
Mémoire EEPROM	1 KB
Fréquence horloge	16 MHz

**Tableau (IV.1) :** Les Caractéristiques de la carte Arduino UNO

## IV. 6. Les différents composants de la carte Arduino-UNO

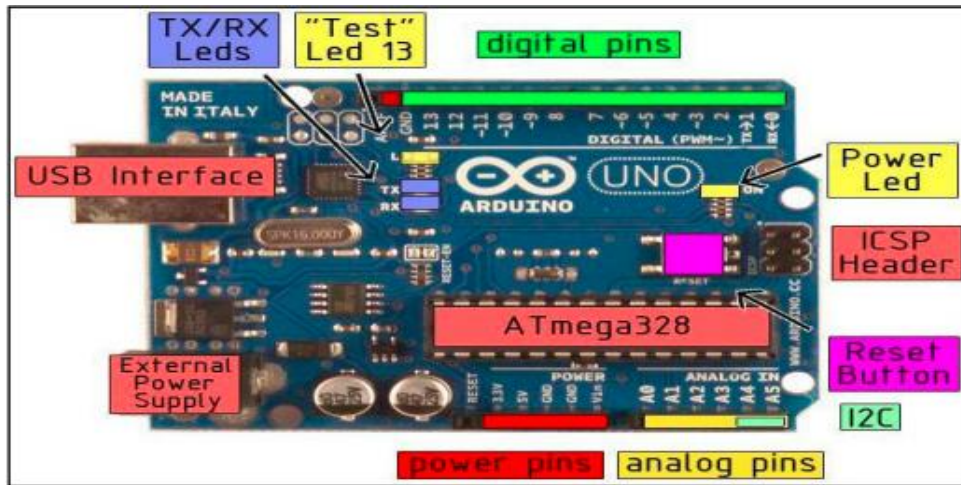


Figure (IV.2) : Les composants de la carte Arduino-UNO.

### IV. 6. 1 Le Microcontrôleur ATmega328

#### IV. 6. 1. 1 Description

Un microcontrôleur ATmega328 (**Figure IV.3**) est un circuit intégré qui rassemble sur une puce plusieurs éléments complexes dans un espace réduit au temps des pionniers de l'électronique. Aujourd'hui, en soudant un grand nombre de composants encombrants ; tels que les transistors ; les résistances et les condensateurs tout peut être logé dans un petit boîtier en plastique noir muni d'un certain nombre de broches dont la programmation peut être réalisée en langage C. la figure(IV.3) montre un microcontrôleur ATmega 328, qu'on trouve sur la carte Arduino.[22]



Le composant CMS



Le composant classique

Figure(IV.3) : Microcontrôleur ATmega328.

Le microcontrôleur ATmega328 est constitué par un ensemble d'éléments qui ont chacun une fonction bien déterminée. Il est en fait constitué des mêmes éléments que sur la carte mère d'un ordinateur. Globalement, l'architecture interne de ce circuit programmable se compose essentiellement sur :

- **La mémoire Flash:** C'est celle qui contiendra le programme à exécuter. Cette mémoire est effaçable et réinscriptible mémoire programme de 32Ko (dont boot loader de 0.5 ko).
- **RAM :** c'est la mémoire dite "vive", elle va contenir les variables du programme. Elle est dite "volatile" car elle s'efface si on coupe l'alimentation du microcontrôleur. Sa capacité est 2 ko.
- **EEPROM :** C'est le disque dur du microcontrôleur. On y enregistre des infos qui ont besoin de survivre dans le temps, même si la carte doit être arrêtée. Cette mémoire ne s'efface pas lorsque l'on éteint le microcontrôleur ou lorsqu'on le reprogramme. [20]

#### IV. 6. 1. 2 Les composant de L'ATMega328

L'ATMega328 (**Figure IV.4**) ce compose de 28 pattes qui sont :

1 : *Reset* : C'est pour le bouton poussoir de réinitialisation.

2 : *E/S numérique réservé pour RX (la réception).*

3 : *E/S numérique réservé pour TX (la transmission).*

7 – 20 : *VCC* : c'est l'alimentation avec 5 V.

8 – 22 : *GND* : c'est la masse.

9 – 10 : *Crystal (quartz).*

21 : *AREF (Analog référence).*

23 – 24 – 25 – 26 – 27 – 28 : *Des entrées analogiques.*

4 – 5 – 6 – 11 – 14 – 15 – 16 – 17 – 18 – 19 : *Entrées /sorties numérique .*[23]



**Figure (IV.4) :** Datasheet d'ATMega328.

**IV. 6. 2 Les sources de l'alimentation de la carte**

On peut distinguer deux genres de sources d'alimentation (Entrée Sortie) et cela comme suit :

- **VIN**. La tension d'entrée positive lorsque la carte Arduino est utilisée avec une source de tension externe (à distinguer du 5V de la connexion USB ou autre source 5V régulée). On peut alimenter la carte à l'aide de cette broche, ou, si l'alimentation est fournie par le jack d'alimentation, accéder à la tension d'alimentation sur cette broche.
- **5V**. La tension régulée utilisée pour faire fonctionner le microcontrôleur et les autres composants de la carte (pour info : les circuits électroniques numériques nécessitent une tension d'alimentation parfaitement stable dite "tension régulée" obtenue à l'aide d'un composant appelé un régulateur et qui est intégré à la carte Arduino). Le 5V régulé fourni par cette broche peut donc provenir soit de la tension d'alimentation VIN via le régulateur de la carte, ou bien de la connexion USB (qui fournit du 5V régulé) ou de toute autre source d'alimentation régulée.
- **3V3**. Une alimentation de 3.3V fournie par le circuit intégré FTDI (circuit intégré faisant l'adaptation du signal entre le port USB de votre ordinateur et le port série de l'ATmega) de la carte est disponible : ceci est intéressant pour certains circuits externes nécessitant cette tension au lieu du 5V. L'intensité maximale disponible sur cette broche est de 50Ma. [20]

**IV. 6. 3 Les entrées & sorties**

Cette carte possède 14 broches numériques (numérotée de 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions pin Mode ( ), digital Write ( ) et digital Read ( ) du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40mA d'intensité et dispose d'une résistance interne de "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20-50 KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction digital Write (broche, HIGH).

En plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :

- **Interruptions Externes** : Broches 2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur. -Impulsion PWM (largeur d'impulsion modulée) :

Broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11. Fournissent une impulsion PWM 8-bits à l'aide de l'instruction analog Write.

- **SPI** (Interface Série Périphérique): Broches 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Ces broches supportent la communication SPI (Interface Série Périphérique) disponible avec la librairie pour communication SPI. Les broches SPI sont également connectées sur le connecteur ICSP qui est mécaniquement compatible avec les cartes Mega.
- **I2C** : Broches 4 (SDA) et 5 (SCL). Supportent les communications de protocole I2C (ou interface TWI (Two Wire Interface - Interface "2 fils"), disponible en utilisant la librairie Wire/I2C (ou TWI - Two-Wire interface - interface "2 fils").
- **LED** : Broche 13. Il y a une LED incluse dans la carte connectée à la broche 13. Lorsque la broche est au niveau HAUT, la LED est allumée, lorsque la broche est au niveau BAS, la LED est éteinte.

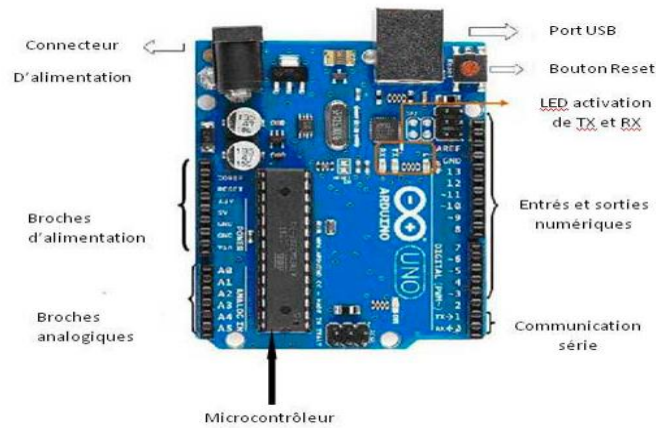
La carte UNO dispose 6 entrées analogiques (numérotées de 0 à 5), chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (c.à.d. sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction analogRead du langage Arduino. Par défaut, ces broches mesurent entre le 0V (valeur 0) et le 5V (valeur 1023), mais il est possible de modifier la référence supérieure de la plage de mesure en utilisant la broche AREF et l'instruction analog Reference du langage Arduino.

La carte Arduino UNO intègre un fusible qui protège le port USB de l'ordinateur contre les surcharges en intensité (le port USB est généralement limité à 500mA en intensité). Bien que la plupart des ordinateurs aient leur propre protection interne, le fusible de la carte fournit une couche supplémentaire de protection. Si plus de 500mA sont appliqués au port USB, le fusible de la carte coupera automatiquement la connexion jusqu'à ce que le court circuit ou la surcharge soit stoppé.[19]

#### **IV. 6. 4 Les ports de communications**

La carte Arduino UNO a de nombreuses possibilités de communications (**Figure IV.5**) avec l'extérieur. L'Atmega328 possède une communication série UART TTL (5V), grâce aux broches numériques 0 (RX) et 1 (TX). On utilise (RX) pour recevoir et (TX) transmettre (les données séries de niveau TTL). Ces broches sont connectées aux broches correspondantes du circuit intégré ATmega328 programmé en convertisseur USB – vers – série de la carte, composant qui assure l'interface entre les niveaux TTL et le port USB de l'ordinateur.

Comme un port de communication virtuel pour le logiciel sur l'ordinateur, La connexion série de l'Arduino est très pratique pour communiquer avec un PC, mais son inconvénient est le câble USB, pour éviter cela, on peut utiliser la méthode sans fil.



*Figure (IV.5) : Constitution de la carte Arduino UNO.*

#### IV. 7. Description du fonctionnement du moteur pas à pas 28BYJ-48

Notre projet consiste à commander le moteur pas à pas 4 phases (**Figure IV.6**) en mode demi - pas. Pour booster le courant dans les phases du moteur on a utilisé le driver ULN2003. La carte Arduino sert à générer les signaux de commande (8 commandes / tour) cadencés par une fréquence.

Les chronogrammes (**Figure IV.7**) illustrent les signaux de la commande en mode demi - pas, le changement du sens se fait par l'inversion des séquences des commandes [1 9 8 12 4 6 2 3] au lieu de [1 3 2 6 4 12 8 9]. Le circuit contient deux Leds pour indiquer le sens de rotation du moteur S1 et S2 pour le sens 1 et sens 2 de rotation. Les Leds sont connectés aux pins 8 et 9 de l'Arduino (**Figure IV.8**). Pour changer la vitesse de rotation du moteur il suffit de changer la fréquence ( $Fre = 1/DelayMs$ , comme l'indique le programme). D'après le Datasheet la fréquence maximale est limitée à 1000 Hz.

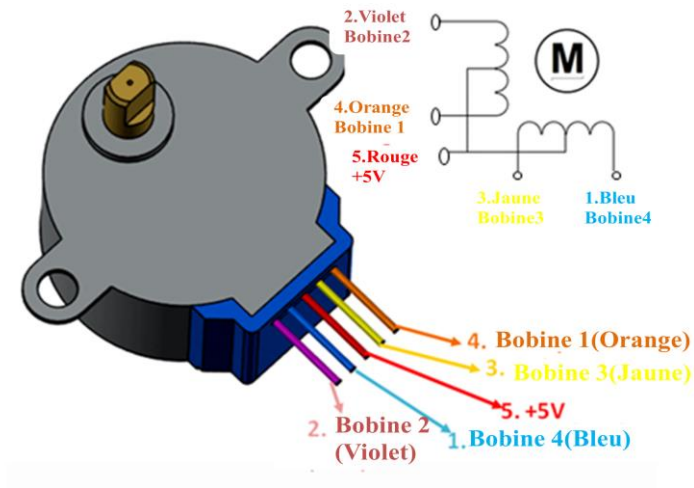


Figure (IV.6) : Moteur pas à pas à 04 phases.

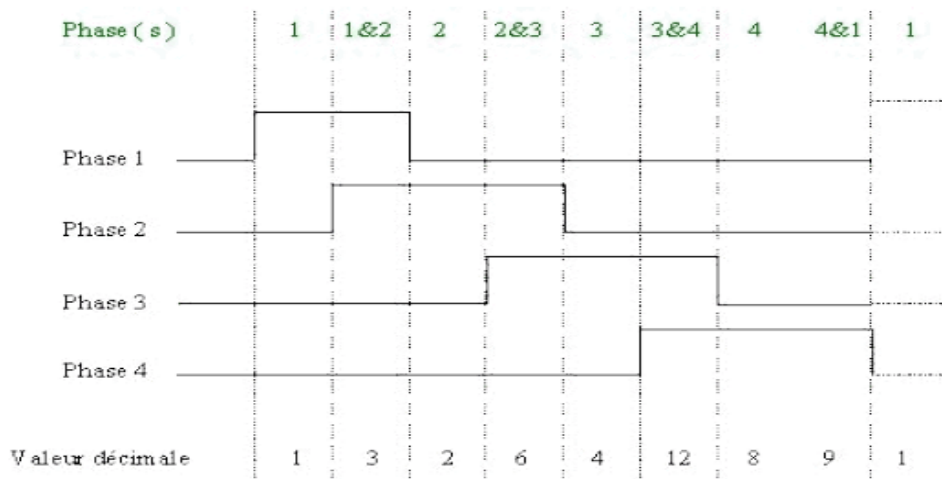


Figure (IV.7) : chronogrammes commande.

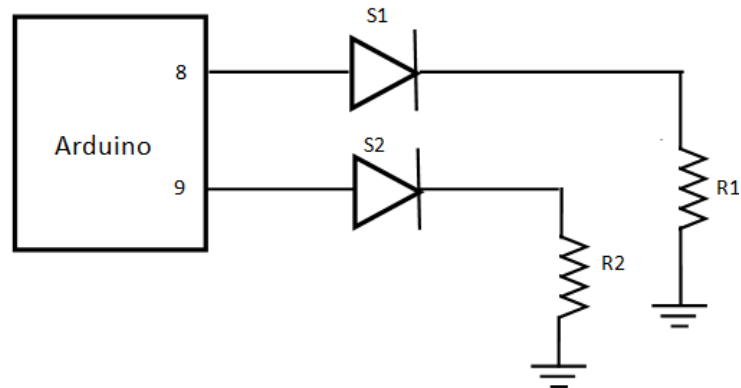
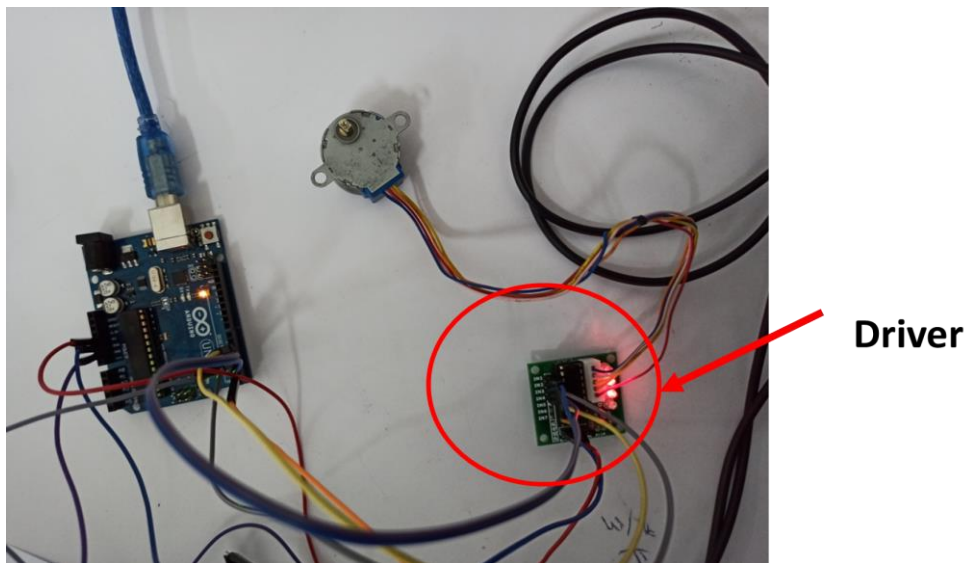


Figure (IV.8) : Schéma de branchement des leds sens 1 (S1) et sens 2 (S2).

La photo de la **figure (IV.9)** montre le branchement du driver pour l'alimentation du moteur.



*Figure (IV.9) : le branchement du driver pour l'alimentation du moteur.*

## IV. 8. Programme Arduino

```
//const int DelayMs = 10;          /* 1/10E-3 =100 Hz*/
const int DelayMs_Init = 10;
const int Num_Half_Step= 50; /*64*8*/;
int i= 0;

const int OUT1 = 2;
const int OUT2 = 3;
const int OUT3 = 4;
const int OUT4 = 5;

const int SENS1 = 7;
const int SENS2 = 8;

void setup() {

PinMode(OUT1, OUTPUT);
pinMode(OUT2, OUTPUT);
PinMode(OUT3, OUTPUT);
pinMode(OUT4, OUTPUT);

pinMode(SENS1, OUTPUT);
pinMode(SENS2, OUTPUT);

digitalWrite(OUT1, LOW);
digitalWrite(OUT2, LOW);
```

```
digitalWrite(OUT3, LOW);
digitalWrite(OUT4, LOW);

digitalWrite(SENS1, LOW);
digitalWrite(SENS2, LOW);

delay(3000);
}

void loop() {

// Sens 1

digitalWrite(SENS1, HIGH);
digitalWrite(SENS2, LOW);

for(i=0; i<Num_Half_Step;i++)
{

// 1 - 0001
digitalWrite(OUT1, HIGH);
delay(DelayMs);

// 3 - 0011
digitalWrite(OUT1, HIGH);
digitalWrite(OUT2, HIGH);
delay(DelayMs);

// 2 - 0010
digitalWrite(OUT1, LOW);
digitalWrite(OUT2, HIGH);
delay(DelayMs);

// 6 - 0110
digitalWrite(OUT2, HIGH);
digitalWrite(OUT3, HIGH);
delay(DelayMs);

// 4 - 0100
digitalWrite(OUT2, LOW);
digitalWrite(OUT3, HIGH);
delay(DelayMs);

// 12 - 1100
digitalWrite(OUT3, HIGH);
digitalWrite(OUT4, HIGH);
delay(DelayMs);

// 8 - 1000
digitalWrite(OUT3, LOW);
digitalWrite(OUT4, HIGH);
```

```
delay(DelayMs);

// 9 - 1001
digitalWrite(OUT1, HIGH);
digitalWrite(OUT4, HIGH);
delay(DelayMs);

digitalWrite(OUT1, LOW);
digitalWrite(OUT2, LOW);
digitalWrite(OUT3, LOW);
digitalWrite(OUT4, LOW);
delay(DelayMs_Init);
}

// Sens 2

digitalWrite(SENS1, LOW);
digitalWrite(SENS2, HIGH);
for(i=0; i<Num_Half_Step;i++)
{
// 9 - 1001
digitalWrite(OUT1, HIGH);
digitalWrite(OUT4, HIGH);
delay(DelayMs);

// 8 - 1000
digitalWrite(OUT1, LOW);
digitalWrite(OUT4, HIGH);
delay(DelayMs);

// 12 - 1100
digitalWrite(OUT3, HIGH);
digitalWrite(OUT4, HIGH);
delay(DelayMs);

// 4 - 0100
digitalWrite(OUT4, LOW);
digitalWrite(OUT3, HIGH);
delay(DelayMs);

// 6 - 0110
digitalWrite(OUT2, HIGH);
digitalWrite(OUT3, HIGH);
delay(DelayMs);

// 2 - 0010
digitalWrite(OUT3, LOW);
digitalWrite(OUT2, HIGH);
delay(DelayMs);

// 3 - 0011
```

```

digitalWrite(OUT1, HIGH);
digitalWrite(OUT2, HIGH);
delay(DelayMs);

// 1 - 0001
digitalWrite(OUT1, HIGH);
digitalWrite(OUT2, LOW);
delay(DelayMs);

digitalWrite(OUT1, LOW);
digitalWrite(OUT2, LOW);
digitalWrite(OUT3, LOW);
digitalWrite(OUT4, LOW);

delay(DelayMs_Init);
}
}

```

#### IV. 9. Résultats

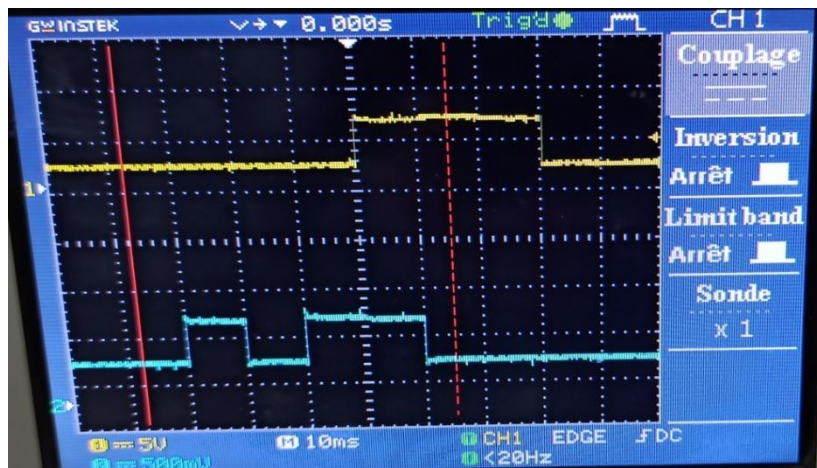


Figure (IV.9.a) : Phase 1 et 2.

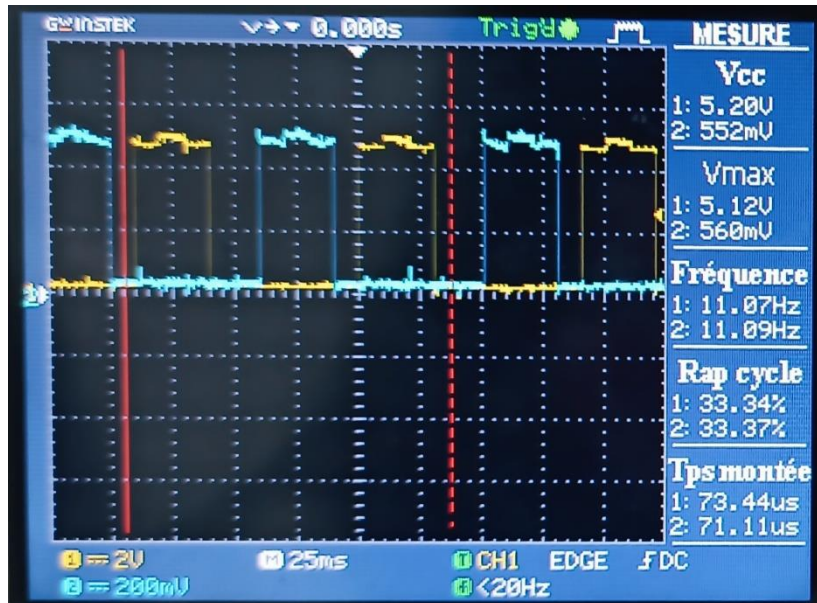


Figure (IV.9.b) : Phase 3 et 4.

#### IV. 10. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la validation expérimentale du modèle mathématique du moteur pas à pas, En outre, les résultats obtenus montre bien la variation du couple et du nombre de pas par rapport à la fréquence des tensions d'alimentation, ce qui ne permet de dire que ce type de moteur peut être utilisé pour la réalisation d'une prothèse orthopédique contrôlée par les signaux physiologiques.



**CONCLUSION  
GENERALE**

## Conclusion générale

Notre projet de fin d'études nous a fourni des informations importantes et nécessaires pouvant servir comme base de données pour une éventuelle continuation dans le domaine de génie-Biomédical. C'est ainsi qu'il nous a permis la réalisation d'un amplificateur relié aux activités du corps humain à travers l'acquisition des signaux physiologiques et leur amplification, et leur mise en forme.

Vu le manque d'équipements nécessaires pour l'acquisition des signaux physiologiques ; on a simulé ces derniers via un signal généré par Matlab. Ce présent travail nous a permis aussi de connaître le fonctionnement du système nerveux humain, ceci dans l'objectif de remédier aux problèmes de handicap moteur des personnes, d'où son utilité socio-économique puisqu'il nous ouvre une fenêtre afin d'évaluer et de faire un développement sur un mécanisme stratégique dans le domaine médical.

Dans ce projet ; on a intégré le moteur pas à pas comme actionneur. Sa commande est effectuée directement selon la fréquence des signaux acquis et adaptés.

Nous avons présenté le modèle mathématique du moteur pas à pas à aimant permanent, les résultats de simulation obtenus confirment le modèle de la machine et son comportement dynamique qui est une phase primordiale pour l'observation et l'analyse des différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques.

En continuité de ce travail, on propose quelques perspectives dont le but est d'améliorer les performances du système proposé :

- L'application d'autres techniques intelligentes de commande comme la logique floue et les réseaux neuronaux,
- La réalisation d'un filtre numérique sur le logiciel.
- La modulation et la démodulation du signal.
- Le traitement de signal.
- La classification des données.

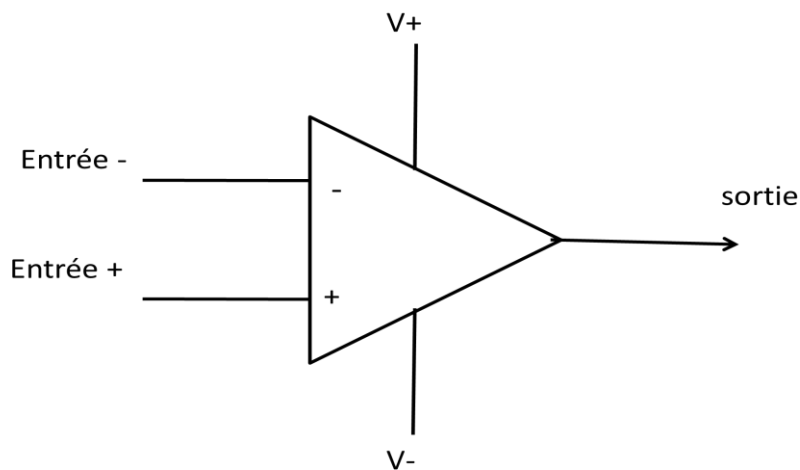
## Annexe A

Le circuit AOP 741: est un **amplificateur opérationnel** à usage général ayant une capacité nulle de tension de décalage. Le gain élevé et la large gamme de tensions de fonctionnement fournissent des performances supérieures dans les intégrateurs, les amplificateurs de sommation et les applications de retour d'informations générales. Le réseau de compensation interne (6 dB / octave) assure la stabilité dans les circuits en boucle fermée.

### Caractéristiques

- Vitesse de balayage: 0,5 V /  $\mu$ s
- Gain de bande passante produit: 1 MHz
- Tension - Offset d'entrée: 1mV
- Courant - Biais d'entrée: 10mA
- Courant - Sortie / Canal
- Tension - alimentation simple, double ( $\pm$ ): 10 V ~ 44 V,  $\pm$  5 V ~ 22 V
- Température de fonctionnement: 0 ° C à 70 ° C
- 8 DIP (0,300 ", 7,62 mm)

### Symbole



L'amplificateur opérationnel est un dispositif amplificateur de gain élevé, très facile à contrôler.

## Annexe B

On reprend les équations

$$U_\alpha = RI_\alpha + L \frac{dI_\alpha}{dt} - K\Omega \sin(N_r \theta)$$

$$U_\beta = RI_\beta + L \frac{dI_\beta}{dt} + K\Omega \cos(N_r \theta)$$

on va exprimer les tensions et les courants dans le repère d-q tournant lié au rotor :

$$M = \begin{bmatrix} \cos N_r \theta & \sin N_r \theta \\ -\sin N_r \theta & \cos N_r \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos N_r \theta & \sin N_r \theta \\ -\sin N_r \theta & \cos N_r \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos N_r \theta & \sin N_r \theta \\ -\sin N_r \theta & \cos N_r \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix}$$

On écrit les équations (2.11) et (2.12) sous forme matriciel et en la multiplie par la matrice M

on obtient :

$$[M] \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} [M] \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} [M] \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} + [M] \begin{bmatrix} -k\Omega \sin N_r \theta \\ K\Omega \cos N_r \theta \end{bmatrix}$$

En développant le terme  $\frac{d}{dt} \left( [M] \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \right)$ , il vient :

$$\frac{d}{dt} [M] \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \frac{d}{dt} [M] = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \frac{d}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} [M] \text{ Or}$$

$$\frac{d}{d\theta} [M] = N_r \begin{bmatrix} \sin N_r \theta & -\cos N_r \theta \\ \cos N_r \theta & \sin N_r \theta \end{bmatrix} \text{ et } \frac{d\theta}{dt} = \Omega \text{ il vient que :}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \Omega N_r \begin{bmatrix} \sin N_r \theta & -\cos N_r \theta \\ \cos N_r \theta & \sin N_r \theta \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + N_r \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix}$$

En développant aussi le terme

$$[M] \begin{bmatrix} -K\Omega \sin N_r \theta \\ K\Omega \cos N_r \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K\Omega \sin N_r \theta \cos N_r \theta + K\Omega \sin N_r \theta \cos N_r \theta \\ K\Omega \cos^2 N_r \theta + K\Omega \sin^2 N_r \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ K\Omega \end{bmatrix}$$

Puis en remplace ces termes dans l'équation on obtient :

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \Omega N_r \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K\Omega \end{bmatrix}$$

En la développant on obtient les équations (2.11) et (2.12) ci dessus

## Annexe C

Paramètre du moteur pas a pas

$$Pas = 1.8$$

$$V = 4.2v$$

$$R = 4.2\Omega$$

$$L = 4.2e - 3H$$

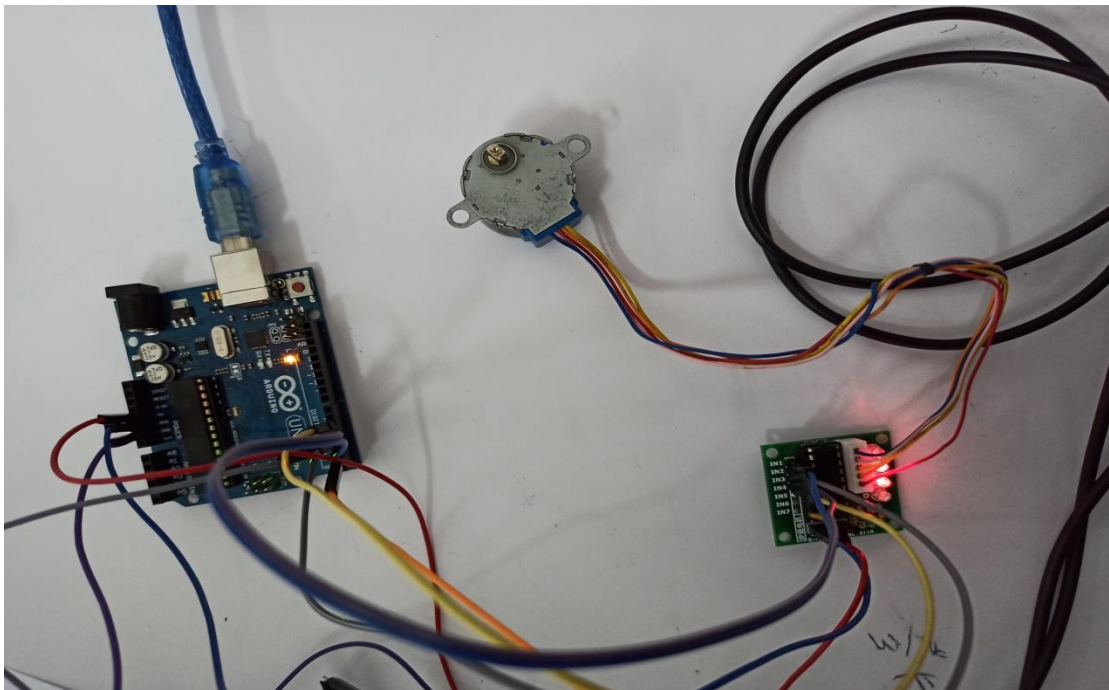
$$J = 0.00001Kgm^2$$

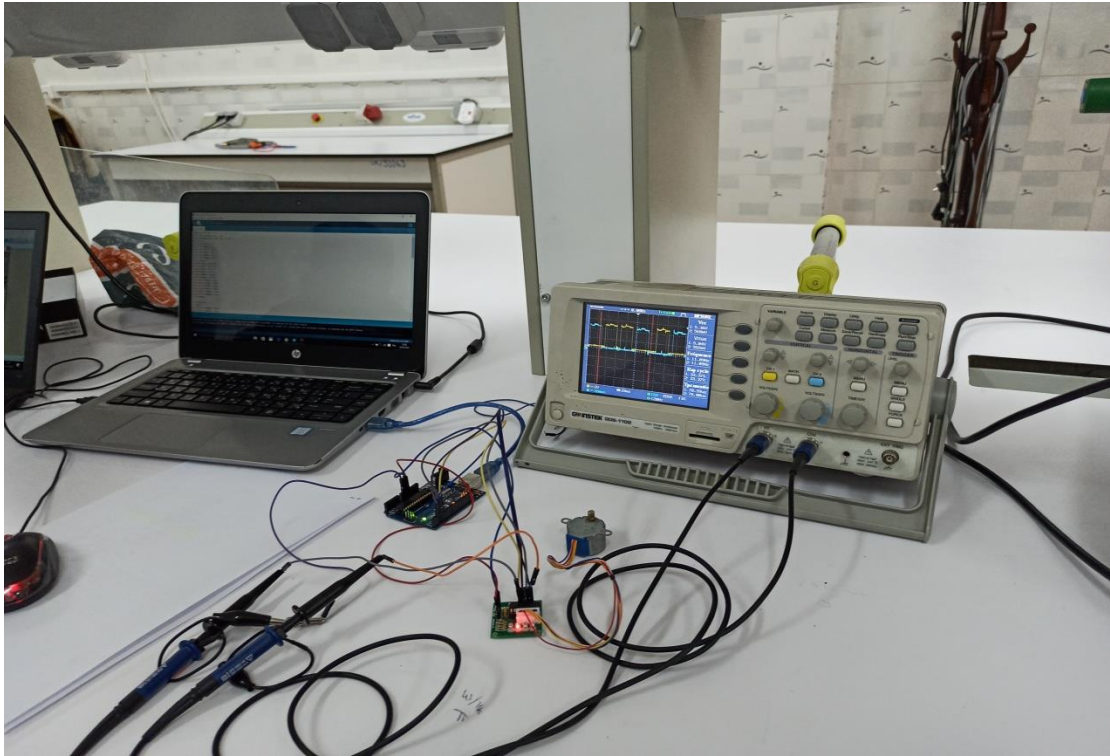
$$K = 1Nm/A$$

$$N = 50$$

## Annexe D

Photos du projet







# **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] M. Hubin, "Capteurs biomédicaux : propriétés diélectriques des tissus biologiques", Disponible sur : [http://perso.orange.fr/michel.hubin/capteurs/biomed/chap\\_b6.htm](http://perso.orange.fr/michel.hubin/capteurs/biomed/chap_b6.htm), consulté le 07/07/2006.
- [2] I. Ingster-Moati, "Cours d'électrophysiologie générale n°1," 2002. Université Paris 7 : Collège National des Enseignants de Biophysique et de Médecine Nucléaire.
- [3] J. L. Borke, A. Costoff, J. M. Ginsburg, et al., "Essentials of Human Physiology", Disponible sur : <http://www.lib.mcg.edu/edu/eshuphysio/program/default.htm>, Augusta, GA : Medical College of Georgia, 1998.
- [4] L. K. Buehler, "Bioelectricity of cell membranes", Disponible sur : [http://www.whatislife.com/reader2/membrane\\_bioelectricity.htm](http://www.whatislife.com/reader2/membrane_bioelectricity.htm), consulté le 07/07/2006.
- [5] N. A. Campbell, "Structure et fonction des membranes," in Biologie, 1995. Bruxelles : De Boeck université.
- [6] D. Rose, "Le site des neurobranchés, Le neurone", Disponible sur : <http://neurobranches.chez-alice.fr/>, consulté le 07/07/2006.
- [7] Dr Laouamri Okba ; « Physiologie nerveuse » ; 1ere année chirurgie dentaire Maître assistant en anesthésie réanimation ; Université Ferhat Abbas Sétif ; Faculté de médecine ; Département de médecine dentaire.
- [8] <https://www.afblum.be/bioafb/neurone/neurone.htm>
- [9] <http://www.noesis-reseau.com/wp-content/uploads/2018/06/8-TISSU-NERVEUX.pdf>
- [10] Réalisé Par : BEBANE RYMA & HADDADOU SAMRA «Conception et réalisation d'une carte d'acquisition Du signal électrogastrographique (EGG) », Thèse de Magister, Mémoire soutenu publiquement à Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.
- [11] Projet national de recherche , « Conception et réalisation d'un dispositif d'exploration fonctionnelle cardio-vasculaire » Faculté de technologie, université de Tlemcen, CERIST , 2011-2013.
- [12] Réalisé Par : Chrif elmoukhtar cherif el meky & Hassene ismail El Hacem «Commande d'un Moteur Pas à Pas à Aimant Permanent par Mode Glissant et MRAS», Thèse de Magister, Mémoire soutenu publiquement le xx juillet 2021.
- [13] Réalisé Par : Kharchoufa Youness «Commande d'un moteur pas-à-pas par un Micro contrôleur», Thèse de Magister, Soutenu le 08 Juin 2017 devant le jury.

- [14] Réalisé Par : BADRI Meriam «ETUDE ET REALISATION D'UN VARIATEUR DE VITESSE D'UN MOTEUR PAS A PAS A BASE DE MICROCONTROLEUR PIC 16F876r», Thèse de Magister, Mémoire de fin d'études soutenu publiquement à Oum El Bouaghi juin2016
- [15] Réalisé Par : CHAIB Youcef et GACEM CHAOUICHE Farhat «Programmation d'un microcontrôleur et commande d'un moteur pas à pas», Thèse de Magister, Mémoire soutenu publiquement le 18 septembre 2014.
- [16] Présenté par : Kercha Mébarka «Commande par mode de glissement d'un Moteur pas à pas à Aimant Permanent», Thèse de Magister, Mémoire de fin d'études soutenu publiquement à Batna le: 14 /12 /05.
- [17] A. Hamzaoui, « Modèles Dynamique et Commandes d'un Moteur pas à pas », Thèse Doctorat, 1992.
- [18] C. Goedel, « Contribution à la modélisation, à l'alimentation et à la commande des moteurs pas à pas ». Thèse d'Etat. I.N.P.L. Nancy –1984.
- [19] <http://www.generationrobots.com/fr/152-arduino>. consulter le: mars 2015.
- [20] S.V.D.Reyvanth, G.Shirish, « PID controller using Arduino ».
- [21] Mr. KAROUBITARIK. Mémoire fin d'étude conception et réalisation d'un system de mesurer de flambement et de formation base d'une arduino Uno.
- [22] C. Tavernier, « Arduino applications avancées ». Version Dunod.
- [23] [www.itechnofrance.wordpress.com](http://www.itechnofrance.wordpress.com) consulter le : Juillet/2017