

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de RELIZANE
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Electrotechnique et d'automatique



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :
Automatique et systèmes
Intitulé

**CONCEPTION ET REALISATION D'UNE COMMANDE D'UN
MOTEUR PAS A PAS PAR CARTE D'ACQUISITION**

Présenté par :

Mlle : MERATIA AIDA

Mlle : YAHIAOUI HAFSA KAOUTHER

Devant les membres de jury :

Président : Mr RAHMOUNI WALID

Maître de conférences (B) (U. Relizane)

Encadrant : Mr HAMRI DJILALI

Maître de conférences (B) (U. Relizane)

Examineur : Mr YSSAAD BENYSSAAD

Professeur (U. Relizane)

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement mon directeur de mémoire, M. [Djilali Hamri], pour ses précieux conseils, son accompagnement constant et son expertise qui ont grandement enrichi ce travail. Sa disponibilité et ses remarques pertinentes m'ont permis de progresser tout au long de cette recherche.

Je remercie également les membres du jury, M. [Yssaad Benyssaad] et M. Rahmouni walid], pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour leurs observations constructives.

Un grand merci à ma famille pour leur soutien inconditionnel et leur compréhension tout au long de mon parcours académique. Leur encouragement m'a permis de surmonter les difficultés et de persévérer.

Je n'oublie pas mes amis et collègues, qui ont partagé avec moi de précieux moments de collaboration, d'échanges et de convivialité.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance envers toutes les personnes et institutions qui m'ont apporté leur aide, directement ou indirectement, au cours de cette étude.

Merci à tous.

Dédicace

بسم الله الرحمان الرحيم
إلى أولئك الذين رسموا أحلامهم على جدران الجامعة
و حملوا دفاترهم في طريقهم إلى الشهادة
إلى طلبة غزة الجامعيين الذين رحلوا قبل أن تكتمل الحكاية
قبل أن ينادى بأسمائهم يوم التخرج
فصاروا نورا لا ينطفئ في سماء العلم و الكرامة
سلاما على أرواحكم الطاهرة و موعدنا عند رب لا ينسى

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mes parents, pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur soutien sans faille tout au long de mon parcours.

À mes frères, pour leur présence, leurs encouragements, et les moments de complicité qui m'ont souvent redonné force et motivation

À mes sœurs, pour leurs encouragements dans les moments de doute.

Aida

Dédicace

À ma mère, source infinie d'amour, de tendresse et de force.

À mon père, dont le soutien discret et la confiance m'ont toujours portée.

Pour mes sœurs, partenaires de chaque moment, je dédie ce texte en reconnaissance de leur amour, soutien et les éclats de rire que nous avons partagés.

À ma grand-mère, douce étoile de sagesse, dont les prières m'accompagnent chaque jour.

À mon cher Koki, mon chat bien-aimé, qui nous a quittés trop tôt... mais qui restera à jamais dans nos cœurs. Ta disparition me chagrine, mais le souvenir de toi m'apporte du réconfort.

Ce mémoire est un hommage à tous ceux qui m'ont entourée d'amour.

Hafsa

Résumé :

Ce projet a pour objectif la conception et la réalisation d'un système de commande d'un moteur pas à pas à l'aide d'une carte d'acquisition de données NI USB-6009. L'actionneur électrique appelé moteur pas à pas offre un positionnement de haute précision. Il est couramment employé dans les systèmes de pilotage numérique, l'automatisation et la robotique. Le processus suivi dans ce projet a été structuré autour de plusieurs phases clés :

- L'analyse théorique des mécanismes des moteurs pas à pas (variétés, modes d'excitation, spécificités, etc.) ;
- L'élaboration d'un circuit de contrôle approprié au moteur choisi, comprenant un conducteur de puissance pour réguler le courant dans les bobinages ;
- La carte NI USB-6009 est employée en tant qu'interface d'acquisition et de contrôle entre le moteur et un ordinateur grâce au logiciel LabVIEW.
- Il s'agit de l'élaboration d'une interface de contrôle sous LabVIEW qui permet à l'utilisateur de gérer la vitesse, le sens de rotation et le nombre de pas du moteur. L'application expérimentale et la vérification du système via des essais fonctionnels. Ce projet démontre la synergie entre l'électronique de contrôle, l'informatique industrielle et l'instrumentation virtuelle, en soulignant les opportunités que proposent les cartes d'acquisition de National Instruments dans le secteur du prototypage et de l'automatisation.

Mots-clés :

Moteur pas à pas, carte NI USB-6009, driver L298N, LabVIEW, commande numérique, automatisation, positionnement précis, instrumentation virtuelle.

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى تصميم وبناء نظام تحكم بمحرك خطوي باستخدام بطاقة اكتساب بيانات NI USB-6009 يوفر المحرك الكهربائي، المعروف باسم محرك الخطوي، تحديداً دقيقاً للمواضع. ويُستخدم هذا المحرك عادةً في أنظمة التحكم الرقمية والأتمتة والروبوتات. تمحورت العملية المتبعة في هذا المشروع حول عدة مراحل رئيسية: - التحليل النظري لآليات محرك الخطوي (أنواعه، أوضاع الإثارة، خصائصه الخاصة، إلخ)؛ - تطوير دائرة تحكم مناسبة للمحرك المختار، تتضمن موصل طاقة لتنظيم التيار في اللفات؛ - تُستخدم بطاقة NI USB-6009 كواجهة اكتساب وتحكم بين المحرك وجهاز كمبيوتر باستخدام برنامج - LabVIEW. يتضمن هذا تطوير واجهة تحكم في LabVIEW تُمكن المستخدم من إدارة سرعة المحرك واتجاه دورانه وعدد خطواته. التطبيق التجريبي والتحقق من النظام من خلال الاختبار الوظيفي. يوضح هذا المشروع التآزر بين إلكترونيات التحكم والحوسبة الصناعية والأجهزة الافتراضية، مع تسليط الضوء على الفرص التي توفرها بطاقات الاستحواذ الخاصة بشركة National Instruments في قطاع النماذج الأولية والأتمتة.

الكلمات المفتاحية:

محرك خطوي، بطاقة NI USB-6009، مشغل L298N، برنامج LabVIEW، التحكم الرقمي، الأتمتة، التوقيع الدقيق، الأدوات الافتراضية.

Summary:

The objective of this project is the design and implementation of a control system for a stepper motor using an NI USB-6009 data acquisition board. The stepper motor, an electric actuator, offers high-precision positioning and is commonly used in CNC systems, automation, and robotics.

The project was structured around several key phases:

Theoretical analysis of stepper motor mechanisms (types, excitation modes, characteristics, etc.);

Development of a control circuit adapted to the selected motor, including a power driver to regulate current through the windings;

Use of the NI USB-6009 board as an acquisition and control interface between the motor and a computer via LabVIEW software;

Development of a LabVIEW-based control interface that allows the user to manage the motor's speed, direction of rotation, and number of steps.

The experimental implementation and system verification were carried out through functional testing.

This project demonstrates the synergy between control electronics, industrial computing, and virtual instrumentation, highlighting the opportunities offered by National Instruments data acquisition boards in the fields of prototyping and automation.

Keywords:

Stepper motor, NI USB-6009 board, L298N driver, LabVIEW, digital control, automation, precise positioning, virtual instrumentation.

Sommaire

Remerciement.....	1
Dédicace	3
Dédicace	4
Dédicace	5
Résumé :	6
ملخص.....	7
Summary:	8
Introduction Générale.....	1
Objectif.....	2
Chapitre I :	
I.1.Introduction :	4
I.2.Historique :	4
I.3.Définition:	4
I.4.Environnement du moteur pas à pas :	5
I.5. Caractéristiques des moteurs pas à pas :	6
I.5.1. Les caractéristiques statiques :	6
5.2) Les caractéristiques dynamiques :	7
I.6. Les types de moteur pas à pas :	7
I.6.1. Les moteurs pas à pas à réluctance variable :	8
I.6.1.1. Principe de fonctionnement moteurs à réluctance variable :	8
I.6.1.2. Les caractéristiques des moteurs à réluctance variable :	9
I.6.1.3. Avantages et inconvénients du moteur pas à pas à réluctance variable :	9
I.6.2. Les moteurs pas à pas à aimant permanent :	9
I.6.2.1. Principe de fonctionnement du moteur à aimant permanent :	10
I.6.2.2. Les caractéristiques du moteur à aimant permanent :	12
I.6.2.3. Avantages et inconvénients du moteur pas à pas à aimant permanent :	12
I.6.3. Moteur pas à pas hybride MH :	12
I.6.3.1. Principe de fonctionnement du moteur pas à pas hybride :	13
I.6.3.2. Les caractéristiques du moteur hybride :	13
I.6.3.3. Avantages et inconvénients du moteur pas à pas hybride :	13
I.7. Alimentation des moteurs pas à pas :	13
I.7.1. Objectifs d'une bonne alimentation et classification :	13

I.7.2) Types d'alimentation :.....	14
I.7.2.1. Alimentation en tension :.....	14
I.7.2.2. Alimentations en courant :.....	16
I.8. Comparaison des trois catégories de moteurs pas à pas :.....	17
I.9. Principe de fonctionnement du moteur pas à pas :.....	18
I.10. Fonctionnement d'un moteur pas à pas :.....	19
I.10.1. Fonctionnement en pas complet :.....	19
I.10.2. Fonctionnement en mode demi-pas :.....	20
I.10.3. Fonctionnement en mode micropas (microstep) :.....	20
I.11. Applications des moteurs pas à pas :.....	21
I.12. La comparaison de Moteur pas à pas avec le moteur à courant continu :.....	21
I.13. Avantages du moteur pas à pas :.....	23
I.14. Les inconvénients du moteur pas à pas :.....	23
I.15. Couple et vitesse d'un moteur pas à pas :.....	23
I.16. Conclusion :.....	24
Chapitre II :	
I.1. Introduction :.....	26
II.2. Commande des moteurs pas à pas :.....	26
II.2.1. Alimentation symétrique :.....	28
II.2.2. Alimentation simple :.....	28
II.3. Commande des moteurs pas à pas par des circuits intégrés non spécialisés :.....	29
II.4. Commande des moteurs pas à pas par des circuits intégrés spécialisés :.....	30
II.4.1. La commande avec le couple L297 et L298 :.....	30
II.4.1.1. Présentation et brochage du circuit intégré L297 :.....	30
II.4.1.2. Présentation et brochage du circuit intégré L298 :.....	33
II.4.1.3. Circuit de commande avec le couple L297/L298 :.....	34
II.4.2. Commande d'un moteur pas à pas unipolaire avec l'EDE1200 :.....	34
4.2.1. Présentation et brochage :.....	34
II.4.2.2. Différentes possibilités d'utilisation de circuits EDE1200 :.....	35
II.5. Commande des moteurs pas à pas par microprocesseur :.....	37
II.5.1. La présentation des microcontrôleurs PIC :.....	37
II.6. Commande des moteurs pas à pas avec une carte d'acquisition :.....	38
II.6.1. Mode de fonctionnement :.....	38
II.6.2. Les applications :.....	38

II.7. Conclusion :	39
Chapitre III :	
III.1. Introduction :	41
III.2. Composants principaux du montage :	41
III.2.1. Définition du moteur pas à pas NEMA 17 :	41
III.2.1.1 Les caractéristiques :	42
III.2.2. Définition du driver L298N :	42
III.2.2.1. Les caractéristiques :	43
III.2.3. Définition carte d'acquisition NI USB-6009 DAQ :	43
III.2.3.1. Les caractéristiques :	44
III.2.4. La plaque d'essai :	45
III.2.4.1. Les caractéristiques :	45
III.2.5. Alimentation :	45
III.3. Définition de LabVIEW :	46
III.3.1. Les principaux usages de LabVIEW :	46
III.4. Les modes de fonctionnement :	47
III.4.1. Full Step (Couple Normal):	47
III.4.1. 1.Caractéristiques :	47
III.4.1.2. Code LabVIEW :	47
III.4.1.3. Contrôle du Sens de Rotation (Orientation) :	48
III.4.1.4. Contrôle de vitesse :	48
III.4.2. Full Step (Couple Maximum):	48
III.4.2.1Caractéristiques :	48
III.4.2.2. Contrôle du Sens de Rotation (Orientation) :	49
III.4.2.3. Contrôle de la vitesse :	49
III.4.3. Demi-pas (Half Step) :	49
III .4.3.1Caractéristiques :	50
III.4.3.2. Résumé du fonctionnement :	50
III.4.3.3. Contrôle du Sens de Rotation (Orientation) :	51
III.4.3.4. Contrôle de la vitesse :	51
III.4. 4. Vitesse et orientation :	51
III.5. Commande d'un moteur pas à pas avec NI USB-6009 :	51
III.6. Conclusion :	52
Conclusion Générale :	53
Bibliography	54

Liste des figures :

Chapitre I :

FigI.1:Les Moteurs pas à pas.	5
FigI.2:environnement du moteur pas à pas.	6
FigI.3:Les différents types des moteurs pas à pas.	8
FigI.4:Moteur à réluctance variable.	8
FigI.5:Fonctionnement moteur à réluctance variable.	9
FigI.6:Moteur à aimant permanant.	10
FigI.7:mode monophasé.....	11
FigI.8:Mode biphasé	11
FigI.9:Mode demi pas	11
FigI.10: Moteur pas à pas hybride MH	12
FigI.11:Alimentation unipolaire en tension	14
FigI.12:Alimentation en tension bidirectionnelle (montage en pont)	15
FigI.13:Hachage du courant.....	17
FigI.14: Principe de fonctionnement du moteur pas à pas en pas complet avec alimentation biphasé.....	20
FigI.15:Principe de fonctionnement du moteur en mode demi-pas avec une alimentation biphasée	20

Chapitre II :

FigII.1: commande des moteurs unipolaires et bipolaires.	27
FigII.2:commande d'un moteur unipolaire par transistors.	27
FigII.3:commande d'un moteur bipolaire avec alimentation symétrique.	28
FigII.4: Commande d'un moteur bipolaire avec alimentation simple.....	29
FigII.5: Commande d'un moteur à base des bascules JK.....	30
FigII.6: Brochage du circuit L297.....	31
FigII.7: Structure interne du circuit L297	32
FigII.8: Les séquences du translateur du L297	32

FigII.9:Brochage du circuit L298	
FigII.10 : Structure interne du circuit L298	34
FigII.11: Commande des moteurs pas à pas avec le couple L297 et L298.....	34
FigII.12:Brochage de l'EDE1200	35
FigII.13: Commande de quatre transistors par l'EDE1200	36
FigII.14: Association de l'EDE1200 et ULN2003A	37
FigII.15: Schéma synoptique de la carte de commande	38

Chapitre III :

FigIII.1:Moteur pas à pas NEMA 17. [13].....	42
FigIII.2:Driver L298N.....	42
FigIII.3:Carte d'acquisition NI USB-6009 DAQ. [14].	43
FigIII.4:Une plaque d'essai. [15]	45
FigIII.5:LabVIEW.	46
FigIII.6:Code de commande d'un moteur pas à pas Full Step (Couple Normal) sur block diagram (Boucle while true).....	48
FigIII.7:Code de commande d'un moteur pas à pas Full Step (Couple Maximum) sur block diagram (Boucle while false).	49
FigIII.8:Code de commande d'un moteur pas à pas Demi-pas (Half Step) sur block diagram (Boucle while false).	51
FigIII.9:Commande d'un moteur pas à pas avec NI USB-600	52

Liste des Tableaux :

Chapitre I :

Table I.1: Comparaison entre les différents types des moteurs pas à pas. ... **Error! Bookmark not defined.**

Table I.2:La comparaison avec le moteur à courant continu. 22

Chapitre II :

Table II.1: Fonctions des broches de circuit EDE1200.....35

Chapitre III :

Table III.1:Étapes d'activation des bobines pour rotation horaire (Full Step-couple normal)47

Table III.2:Étapes d'activation des bobines pour rotation horaire (Full Step-couple maximum) **Error! Bookmark not defined.**

Table III.3:Étapes d'activation des bobines pour rotation horaire (Demi-pas (Half Step)) **Error! Bookmark not defined.**

Introduction Générale

L'automatisation des systèmes représente actuellement un enjeu majeur dans les domaines technologiques et industriels modernes. Elle offre la possibilité d'accroître la productivité, la précision, la sécurité et la fiabilité dans divers secteurs tels que la robotique, les systèmes de fabrication, les machines-outils numériques, ainsi que les systèmes biomédicaux.

Dans ce domaine, la commande des actionneurs électriques est cruciale pour l'implémentation de systèmes autonomes, précis et fiables.

Le moteur pas à pas, qui fait partie des actionneurs les plus couramment employés, se démarque par sa faculté à réaliser des mouvements angulaires précis en fonction de signaux numériques. Cette propriété en fait un composant essentiel dans les applications nécessitant un positionnement exact. Dans ce contexte, les moteurs pas à pas occupent une place importante en raison de leur aptitude à convertir des signaux numériques en mouvements angulaires précis, sans avoir besoin d'un capteur de position externe.

Le moteur pas à pas est un actionneur électromécanique couramment utilisé dans les applications nécessitant un contrôle précis de la position, de la vitesse ou du couple. Sa commande repose sur la création de séquences logiques permettant l'excitation des bobinages dans un ordre déterminé, garantissant ainsi des mouvements angulaires discrets. Néanmoins, l'utilisation de ce type de moteur requiert un système de pilotage approprié, capable de traiter simultanément les éléments logiques et de puissance.

C'est dans cette optique que s'inscrit ce travail de mémoire, qui a pour objectif la conception et la réalisation d'un système de commande d'un moteur pas à pas. Cela repose sur l'emploi d'une carte d'acquisition de données NI USB-6009 et d'un driver de puissance L298N. La NI USB-6009, conçue par National Instruments, offre la capacité de capturer et de produire des signaux analogiques et numériques, permettant ainsi une interface adaptable entre le logiciel de contrôle (comme LabVIEW ou MATLAB) et le système physique. Le driver L298N, quant à lui, assure l'adaptation en puissance nécessaire pour piloter le moteur à partir des signaux logiques délivrés par la carte.

Ce travail est organisé en trois chapitres : la première est dédiée aux moteurs pas à pas où l'on donne leurs définitions, les différents types de moteurs ainsi que les modes de séquençement et d'alimentation. Le deuxième concerne la commande d'un moteur pas à pas et nous présentons plusieurs exemples de circuits de contrôle et de commande, le dernier chapitre étant consacré à la commande de moteur avec la carte ni USB 6009

Objectif :

Concevoir et mettre en œuvre un système intégral de commande d'un moteur pas à pas, reposant sur une structure incluant une carte d'acquisition (NI USB-6009) ainsi qu'un pilote de puissance (L298), puis valider expérimentalement ses performances.

Objectifs spécifiques, :

- Étudier le principe de fonctionnement des moteurs pas à pas ainsi que leurs différentes méthodes de commande.
- Analyser les caractéristiques techniques et les capacités d'E/S de la carte NI USB-6009.
- Concevoir l'interface matérielle entre la carte et le moteur en utilisant le driver L298.
- Développer un logiciel d'application pour produire les signaux de commande à partir d'un ordinateur.
- Effectuer les tests de validation expérimentale et examiner les résultats obtenus.



CHAPITRE I :
LES MOTEURS PAS A
PAS

I.1.Introduction :

Les moteurs pas à pas sont des moteurs spécialisés dotés d'un stator comprenant des éléments polaires et des bobinages. Ils offrent un contrôle exact du mouvement et de la position d'un objet. Comme le suggère leur appellation, ils fonctionnent grâce à des mouvements discrets : chaque rotation est activée par un courant d'impulsion transmis à l'un des enroulements du stator.

Bien qu'ils soient fréquemment utilisés dans les systèmes informatiques, les principes de leur fonctionnement restent parfois mal compris. On les trouve dans divers équipements courants tels que les lecteurs de disquettes, les disques durs, les scanners et même les imprimantes.

Dans le domaine de la robotique, ils constituent un élément clé des systèmes d'actionnement. Grâce à leur conception alliant électricité et mécanique, ces dispositifs offrent une précision remarquable, les plaçant comme lien essentiel entre les systèmes d'information et le monde électromécanique.

Les moteurs pas à pas, capables de gérer avec précision la position et la vitesse via un ensemble d'impulsions, sont utilisés dans de nombreuses applications : le déplacement de robots mobiles, les moteurs à fort couple, ou encore l'indexation rotative ou linéaire.

Traditionnellement, ces moteurs fonctionnent à partir d'une alimentation en courant continu ou en tension, avec un contrôle en boucle ouverte. Cela permet de réguler la vitesse et la position sans capteurs de rétroaction. Ce mode de contrôle présente plusieurs avantages : coût réduit, installation simple et facilité d'utilisation grâce à une horloge externe ou intégrée dans un microprocesseur. Cependant, il présente aussi des limites : un couple de démarrage limité, une instabilité à certaines fréquences, et une accélération modérée.

Avec les avancées technologiques, les moteurs pas à pas sont de plus en plus intégrés dans les machines à commande numérique, avec des tailles et des puissances adaptées aux différentes applications industrielles.

Dans ce chapitre, nous allons explorer en détail les différents types de moteurs pas à pas ainsi que leurs modes de fonctionnement.

I.2.Historique :

Les premiers moteurs pas à pas ont été utilisés par la marine de guerre britannique dans les années 1920 pour déplacer les indicateurs de direction des lance-torpilles et des canons. Dans les années 1930, l'ingénieur Marius Lavet a découvert un type particulier de moteur pas à pas à aimant, connu aujourd'hui sous le nom de moteur Lavet, qui a permis le développement de cette machine dans le domaine de l'horlogerie grâce à sa miniaturisation et à son faible coût. Il équipe aujourd'hui presque toutes les montres à aiguilles. Le moteur pas à pas classique est apparu dans les années 1940, mais c'est l'avènement de l'électronique numérique dans les années 1960 qui a permis son développement. [1]

I.3.Définition:

Un moteur pas à pas est un moteur électrique synchronisé sans équilibrage qui convertit les entrées numériques en révolutions de l'arbre. Chaque cycle de moteur est décomposé en plusieurs phases distinctes, généralement 200, et chacune d'elles nécessite une

impulsion. Le moteur ne peut effectuer qu'un seul passage à la fois, et chaque passage est de taille identique. Chaque impulsion entraîne une rotation précise du moteur, généralement de 1,8 degré, permettant un contrôle de position sans nécessiter de système de rétroaction. La rotation se transforme progressivement en un mouvement continu à mesure que la fréquence des impulsions augmente, la vitesse de rotation étant directement liée à cette fréquence.

Les moteurs pas à pas sont largement utilisés dans divers secteurs industriels et commerciaux en raison de leur faible coût, de leur grande fiabilité, de leur couple élevé à faible vitesse et de leur conception simple et robuste, ce qui les rend adaptés à presque tous les environnements. [2]

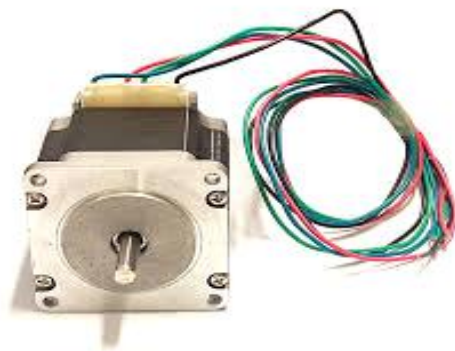


Fig1.1:Les Moteurs pas à pas. [2]

I.4.Environment du moteur pas à pas :

Le moteur pas à pas permet d'effectuer des déplacements incrémentaux en boucle ouverte, tout en maintenant un couple de positionnement à l'arrêt. Comme illustré dans la figure 2, un entraînement à moteur pas-à-pas est composé de plusieurs éléments essentiels.

Parmi eux, le séquenceur joue un rôle clé en pilotant les courants circulant dans le moteur via l'amplificateur de puissance. Il reçoit deux informations principales : le sens de rotation et une impulsion correspondant au déplacement d'un pas. Ainsi, en générant un nombre fini d'impulsions, il assure le contrôle de la position, tandis que la fréquence de ces impulsions détermine la vitesse de rotation du moteur. [3]

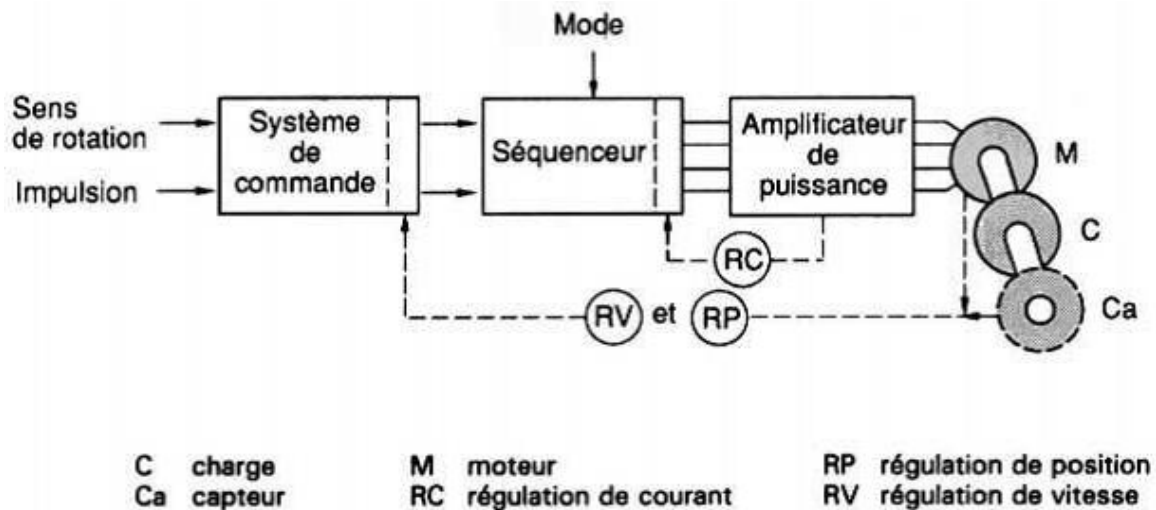


Fig1.2:environnement du moteur pas à pas. [3]

I.5. Caractéristiques des moteurs pas à pas :

Les caractéristiques des moteurs pas à pas sont divisées en deux catégories : statiques et dynamiques. [4]

I.5.1. Les caractéristiques statiques :

Les caractéristiques statiques concernent le moteur lorsqu'il est au repos. Elles dépendent principalement de la conception mécanique du moteur. Parmi ces caractéristiques, on trouve :

- **Angle de pas (ϕ_p) :**
- Il s'agit de l'angle élémentaire que le moteur effectue lorsqu'un ou plusieurs enroulements sont alimentés. Cet angle est défini par le constructeur et peut être exprimé par la formule suivante :

$$\phi_p = (360 / m) \times Nr$$

Où m représente le nombre de phases, et Nr est le nombre de révolutions ou le nombre d'étapes par tour.

Cette formule s'applique particulièrement aux moteurs à réluctance variable.

- **Précision du pas :**

La précision du pas correspond à l'écart relatif entre la position réelle de l'élément mobile du moteur et la position théorique d'équilibre (mesurée à vide). Elle est exprimée en pourcentage de l'angle de pas, selon la formule :

$$\text{Précision} = (\text{Erreur max. d'angle} \times 100) / \text{Pas.}$$

- **Courant par phase :**

C'est l'intensité électrique fournie à chaque phase du moteur lorsque ce dernier est à l'arrêt (fréquence nulle). Ce courant provoque l'échauffement maximum admissible par le moteur lorsqu'il est en fonctionnement.

- **Angle de puissance :**

Il s'agit de l'angle de retard du rotor par rapport au champ magnétique généré, ce retard étant causé par une charge extérieure appliquée au moteur.

- **Résolution :**

La résolution est définie comme le déplacement minimal que le moteur doit effectuer, ou l'angle du pas en degrés. [4]

5.2) Les caractéristiques dynamiques :

Les caractéristiques dynamiques concernent le démarrage, la rotation et le freinage du moteur. Elles dépendent de la fréquence des commutateurs de phases et du circuit d'alimentation, afin de permettre un démarrage et un fonctionnement sans perte de pas. Il est donc essentiel de connaître ces caractéristiques.

- **Temps de montée (T_m) :**

- C'est le temps nécessaire pour passer d'une position d'équilibre à une autre. Ce temps est noté T_m .

- **Temps d'établissement (T_e) :**

C'est le temps nécessaire pour que la position du rotor se stabilise autour d'une position d'équilibre, avec une tolérance d'erreur de position définie. Ce temps est noté T_e .

- **Fréquence maximale réversible (réponse maximale) :**

Il s'agit de la fréquence maximale à laquelle le moteur peut inverser le sens de rotation tout en restant synchronisé avec les impulsions d'excitation des phases.

- **Fréquence maximale de démarrage :**

C'est la fréquence maximale à laquelle le moteur peut suivre la commande au moment du démarrage. Cette fréquence est légèrement supérieure à la fréquence maximale réversible.

- **Couple maximal dynamique :**

Il s'agit du couple maximal disponible sur l'arbre du moteur lorsque les phases sont alimentées successivement.

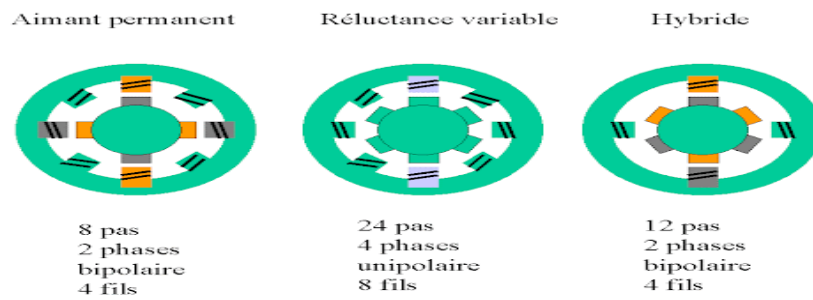
- **Couple de démarrage et d'entraînement :**

C'est le couple maximal disponible sur l'axe du moteur lors du démarrage (ou de l'entraînement) à une fréquence donnée, sans perte de pas. [4]

I.6. Les types de moteur pas à pas :

La classification des moteurs pas à pas se base sur le principe physique qui gouverne l'interaction entre le stator et le rotor. On distingue trois catégories de moteurs pas à pas :

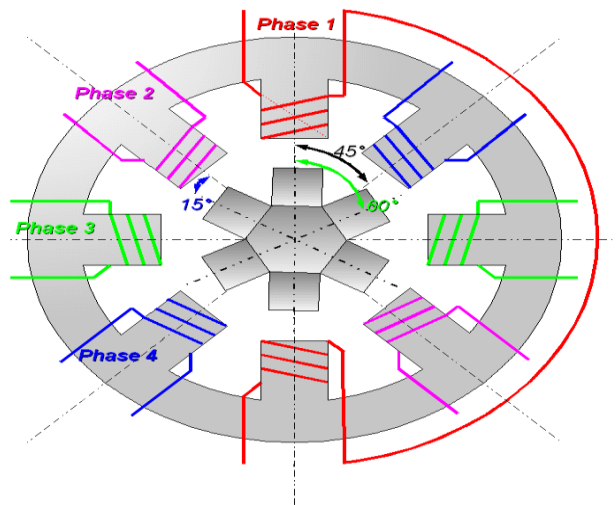
- Moteurs à réluctance variable : Fondés sur le concept du flux maximal.
- Moteurs à aimants permanents (M.P.) : Ces moteurs exploitent l'effet d'un champ magnétique sur un aimant permanent pour produire un mouvement.
- Moteurs hybrides (M.H.) : Ils associent les deux méthodes précédentes pour proposer des performances améliorées. [5]



FigI.3:Les différents types des moteurs pas à pas [5].

I.6.1. Les moteurs pas à pas à réductance variable :

Les moteurs à réductance variable opèrent sur un principe distinct de celui des moteurs à aimants permanents. Leur stator est fabriqué en acier doux non magnétique et, à la différence des moteurs à aimants permanents, il n'est pas lisse mais présente de nombreuses dents. Dans un moteur à aimants permanents, tel que démontré dans l'exemple de la figure I.4, le stator est composé de 8 plots qui portent les bobines, créant ainsi 4 phases. Cependant, un moteur à réductance variable dispose d'un stator qui ne possède que 6 dents. [5]



FigI.4:Moteur à réductance variable [5].

I.6.1.1. Principe de fonctionnement moteurs à réductance variable :

Dans un moteur pas à pas à réductance variable, la rotation résulte de l'interaction entre le champ magnétique du stator (partie fixe) et un rotor saillant (partie mobile). Cette interaction provoque l'alignement naturel de la partie saillante du rotor avec le pôle créé par le champ magnétique.

Ce principe repose sur la propriété d'un matériau magnétique doux qui, lorsqu'il est soumis à un champ magnétique, adopte une position minimisant la réductance, générant ainsi un couple de rappel (*Multon, 1994*). Ce type de moteur se caractérise par une structure dentée, aussi bien au niveau du stator que du rotor.

Le nombre de phases du moteur dépend du nombre de bobines présentes dans le stator ainsi que de leur mode de connexion. Contrairement au stator, le rotor (voir figure 5) possède moins de dents que de pôles et n'est pas aimanté. [5]

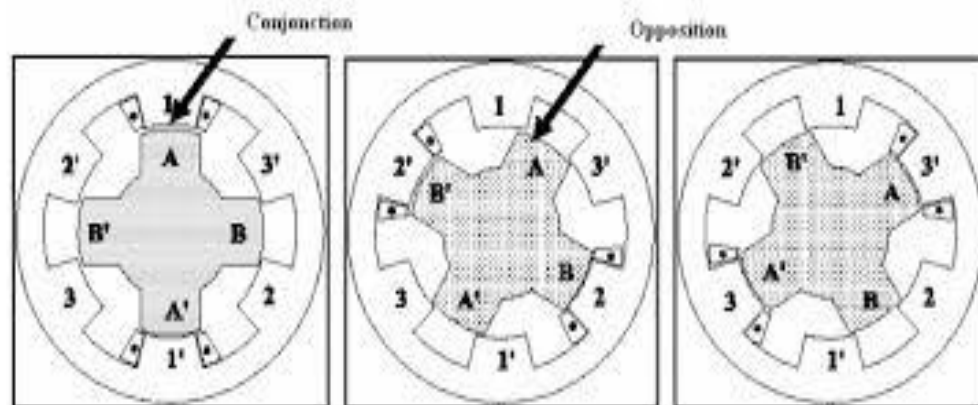


Fig1.5:Fonctionnement moteur à réluctance variable. [5]

I.6.1.2. Les caractéristiques des moteurs à réluctance variable :

Les moteurs à réluctance variable (VRM) possèdent plusieurs caractéristiques qui influencent leur performance et leur utilisation :

- Haute précision de positionnement
- Couple proportionnel au carré du courant
- Faible inertie avec un couple élevé
- Inductance élevée
- Absence de couple sans courant
- Grand nombre de pas
- Sens de rotation contrôlé par l'ordre d'alimentation des bobines
- Rendement relativement faible
- Fonctionnement à des fréquences élevées
- Nombre de pas important. [5]

I.6.1.3. Avantages et inconvénients du moteur pas à pas à réluctance variable :

Avantages :

- Faible inertie du rotor.
- Rapport couple/inertie élevé.

Inconvénients :

- Poids réduit.
- Capable d'atteindre un taux de pas élevé.
- Possibilité de fonctionnement en roue libre. [5]

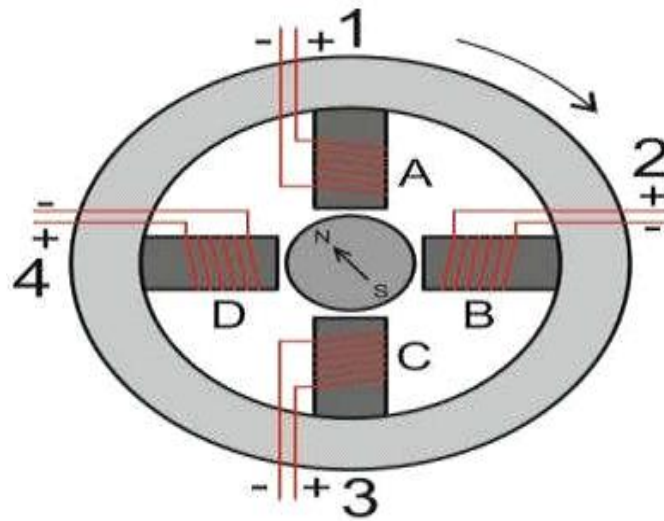
I.6.2. Les moteurs pas à pas à aimant permanent :

Les moteurs à aimants permanents fonctionnent de la même manière que les moteurs à réluctance variable, sauf que le rotor est équipé de pôles NORD et SUD. Grâce aux aimants permanents, le rotor reste positionné à l'endroit où il s'est arrêté, même lorsque l'alimentation

électrique cesse d'envoyer des impulsions.

Pour visualiser ce système, imaginez une boussole placée entre deux aimants. En fonction de la bobine alimentée et du sens du courant, l'aimant s'aligne sur le champ magnétique généré.

[5]



FigI.6:Moteur à aimant permanent [6] .

I.6.2.1. Principe de fonctionnement du moteur à aimant permanent :

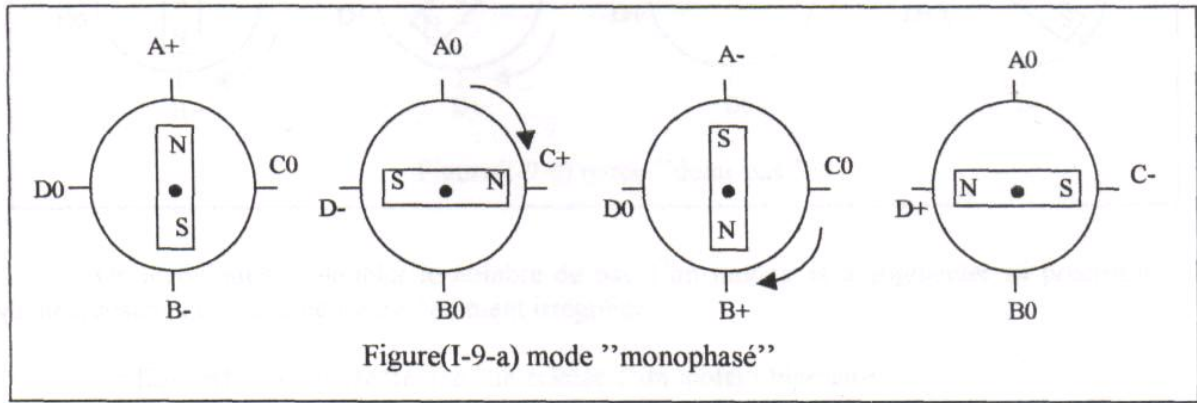
La figure I.6 illustre le schéma de principe d'un moteur à aimant permanent. Ce dispositif opère grâce à un champ électromagnétique produit par des bobines disposées autour de plots espacés de manière régulière, et influence un rotor fabriqué à partir d'aimants permanents.

Les aimants permanents sont positionnés à distance de l'axe du moteur (rotor), alors que les bobines d'excitation sont placées sur le bord intérieur du stator et reçoivent une alimentation en alternance. Le mécanisme est basé sur le principe du flux maximal.

Ce genre de moteur présente une résolution inférieure à cause des défis liés à l'intégration de l'aimant, et sa fabrication est plus compliquée. Toutefois, il produit un couple important, proportionnel au courant, et la direction de rotation est déterminée à la fois par l'ordre d'alimentation des bobines et la direction du courant. [6]

- **A) Mode monophasé :**

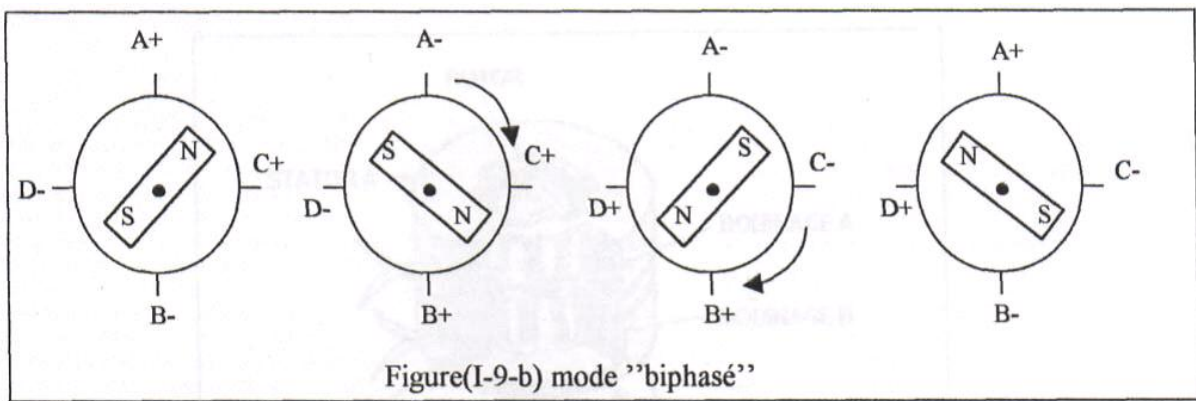
L'alimentation d'une seule phase à chaque pas entraîne un couple développé par le moteur relativement faible. La figure (I.7) illustre la chronologie à respecter : AB, CD, BA, DC, puis AB ... [6]



FigI.7:mode monophasé [6].

- **Mode biphasé :**

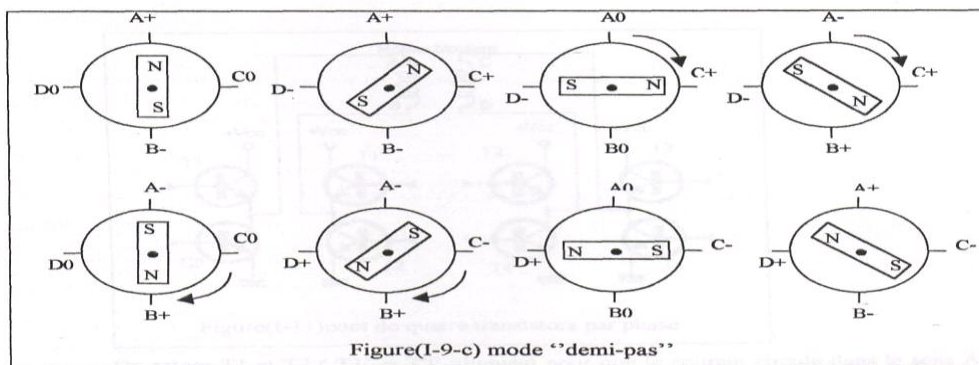
L'alimentation simultanée des deux phases, le couple développé par le moteur est très important. [6]



FigI.8:Mode biphasé [6].

- **Mode demi pas :**

Le moteur est alimenté en biphasé puis en monophasé, dans ce mode on augmente la précision du moteur (nombre de pas) mais le couple irrégulier. [6]



FigI.9:Mode demi pas [6].

I.6.2.2. Les caractéristiques du moteur à aimant permanent :

- Un couple développé proportionnel au carré du courant
- De faibles inerties pour des couples importants
- La présence de couple en l'absence du courant
- Le sens de rotation dépend de l'ordre d'alimentation
- Sens du courant
- Nombre de pas réduit dû à la difficulté de loger les aimants
- Fréquence de travail faible. [5]

I.6.2.3. Avantages et inconvénients du moteur pas à pas à aimant permanent : Avantages :

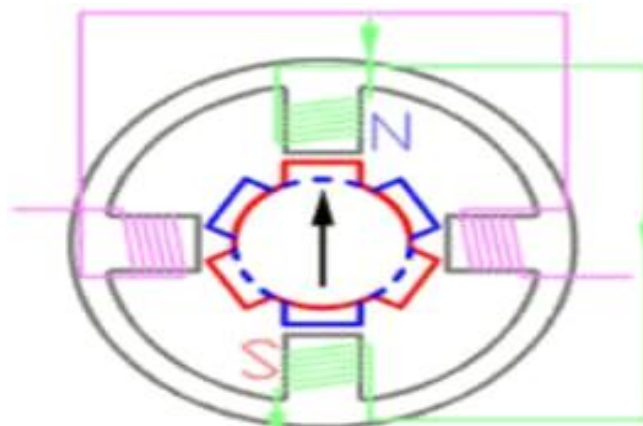
- Faible consommation de puissance.
- Couple de détente plus élevé que celui du moteur à réluctance variable.
- Absence de besoin en courant d'excitation externe pour le rotor.
- Production d'un couple plus important par ampère de courant statorique. [5]

Inconvénients :

- Inertie plus élevée.
- Accélération plus lente. [5]

I.6.3. Moteur pas à pas hybride MH :

En combinant les structures des deux moteurs précédents, c'est-à-dire en insérant les aimants du moteur à aimant permanent dans un circuit ferromagnétique, on obtient un nouveau type de moteur, appelé moteur à réluctance polarisée ou moteur hybride (HB). Dans ce moteur, un couple de réluctance est généré par la variation des perméances liée à l'interaction entre chaque aimant et la bobine. [5]



FigI.10: Moteur pas à pas hybride MH [5].

I.6.3.1. Principe de fonctionnement du moteur pas à pas hybride :

Le moteur pas à pas hybride fonctionne en combinant les effets de la réluctance variable et d'un aimant permanent. Lors de son activation, les enroulements du stator sont alimentés successivement, générant un champ magnétique qui attire les dents du rotor et assure un positionnement précis selon le principe de la réluctance variable.

En parallèle, le rotor intègre un aimant permanent qui produit un couple de maintien, empêchant tout mouvement involontaire à l'arrêt et garantissant ainsi une meilleure stabilité. L'interaction entre ces deux phénomènes permet de transformer efficacement les impulsions électriques en mouvements mécaniques contrôlés, faisant du moteur pas à pas hybride un dispositif fiable et précis. [5]

I.6.3.2. Les caractéristiques du moteur hybride :

Les moteurs pas à pas hybrides associent, du moins en partie, les avantages des moteurs à réluctance variable et à aimant permanent :

- Génération de couple même en l'absence de courant
- Le sens de rotation est déterminé par l'ordre d'alimentation
- Direction du courant
- Le couple principal est proportionnel au courant
- Forte inertie (pour les moteurs avec rotor à aimant permanent)
- Précision de positionnement élevée. [5]

I.6.3.3. Avantages et inconvénients du moteur pas à pas hybride :

Avantages :

- Moins sujet aux phénomènes de résonance.
- Capable de fournir un couple de détente même lorsque les enroulements sont hors tension.
- Couple de maintien plus élevé.
- Capable d'atteindre un taux de pas élevé. [5]

Inconvénients :

- Inertie et poids accrus en raison de la présence de l'aimant dans le rotor.
- Performances sensibles aux variations de la force magnétique. [5]

I.7. Alimentation des moteurs pas à pas :

I.7.1. Objectifs d'une bonne alimentation et classification :

Un bobinage de moteur pas à pas constitue un circuit électrique hautement inductif, où se manifeste une force électromotrice changeante, ou parfois une inductance fluctuante en fonction de la position. Ces facteurs résistent à des changements brusques de la source d'alimentation. Un régime alimentaire approprié doit :

- Mettre en place rapidement un courant spécifique dans un circuit inductif.
- Préserver ce courant à son niveau, malgré les variations des facteurs du circuit, en particulier ceux qui changent en fonction de la vitesse ou de la localisation.

- Mettre fin rapidement à ce courant.

En fonction des applications, des performances requises et des moteurs employés, on observe diverses sortes d'alimentations. Les moteurs à réluctance variable, qui produisent un couple proportionnel au carré du courant, ont uniquement besoin d'alimentations unipolaires (courant produit dans une seule direction).

D'autres moteurs nécessitent des courants de type bipolaire. Ces derniers sont produits par un unique enroulement bipolaire (qui permet le passage du courant dans les deux directions) ou par deux enroulements unipolaires, étroitement liés, en situation d'opposition. [7]

I.7.2) Types d'alimentation :

Le moteur pas à pas peut être alimenté soit en courant, soit en tension. On distingue deux cas. Dans le premier cas, le courant dans les phases est toujours dans le même sens (alimentation unidirectionnelle). Cette alimentation est valide pour les moteurs à réluctance variable qui ne sont pas sensibles au sens du courant, ainsi que pour certains moteurs à aimant, en particulier ceux munis d'enroulements bifilaires. Dans le deuxième cas, il est nécessaire d'inverser le sens du courant à chaque fois (alimentation bidirectionnelle). Cette alimentation est utilisée pour les moteurs à aimant ou hybrides munis d'enroulements simples. [3]

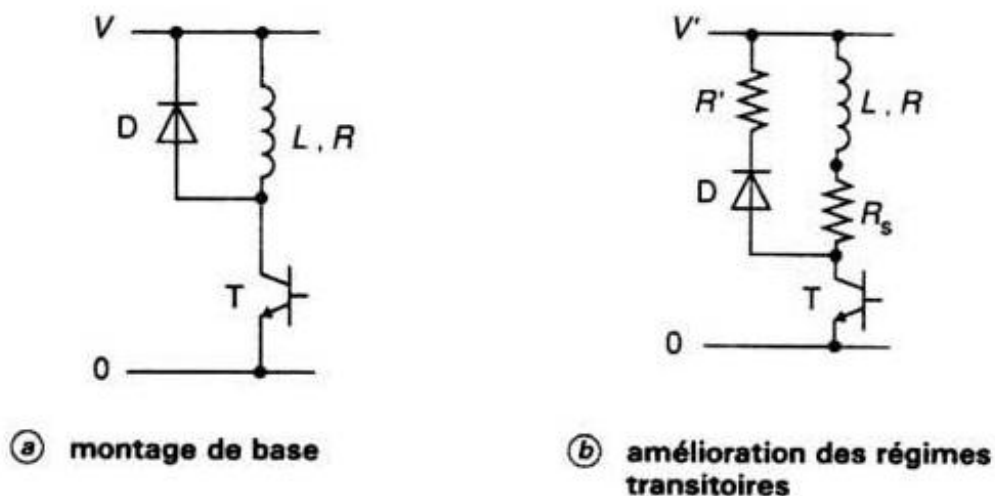
I.7.2.1. Alimentation en tension :

I.7.2.1.1. Alimentation unipolaire en tension :

Ce genre de source d'alimentation, le plus ancien et aussi le plus simple (voir figure 11), implique la connexion de chaque phase à une alimentation ayant une tension V par l'intermédiaire d'un transistor T .

Une diode D , positionnée en configuration antiparallèle sur l'enroulement, autorise l'arrêt du courant lorsque le transistor est dans un état de blocage. Si l'on définit R comme la résistance de la phase, le courant nominal qui est obtenu lorsque le moteur est arrêté peut-être exprimé par la formule ci-dessous :

$$I_n = V/R$$



FigI. 11:Alimentation unipolaire en tension [3].

Dès que le moteur commence à tourner, il faut tenir compte des régimes transitoires électriques et mécaniques qui peuvent ralentir, voire empêcher, l'établissement des courants aux valeurs nominales. L'équation électrique de l'enroulement est la suivante :

$$V= Ri+l di/dt+\text{termes dus au mouvement}$$

Avec :

- L représentant l'inductance de l'enroulement.
- Les termes dus au mouvement incluent la force contre-électromotrice ($f_{cém}$) induite par l'aimant tournant ou par la variation de la réluctance avec l'angle.

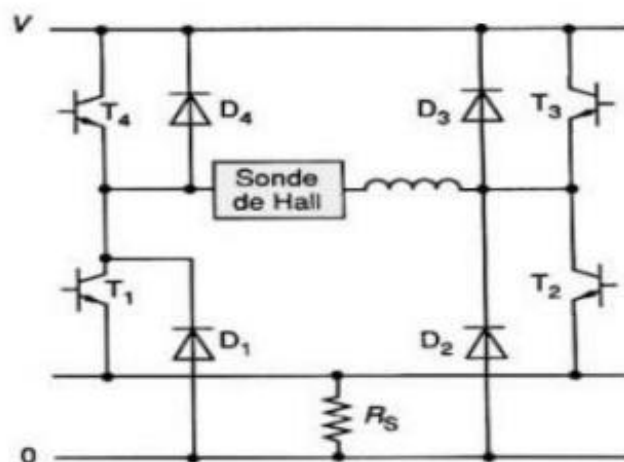
La constante de temps L/R détermine les fluctuations du courant. Afin d'accélérer la réponse transitoire sans affecter l'intensité nominale du courant, il est nécessaire d'intégrer une résistance R_s en série avec l'enroulement et d'employer une source d'alimentation ajustée V' comme suit :

$$V'=(R+R_s) / I_n$$

Cela diminue la nouvelle constante de temps à $L/R+R_s$. Pour une extinction plus rapide, il est possible d'ajouter une résistance R' (voir figure 11) en série avec la diode ou d'employer une diode Zener. Même si cette option est assez facile à appliquer, elle occasionne des pertes électriques additionnelles dans la résistance série, qui s'accroissent en fonction du degré d'amélioration. Cette approche est donc surtout appropriée pour les systèmes qui ont une puissance modeste, où la réduction des dépenses est essentielle. [3]

I.7.2.1.2. Alimentation bipolaire en tension :

Selon le diagramme de la figure I.12, chaque étape est alimentée par un pont constitué de quatre transistors. Afin de générer un courant positif, nous actionnons les transistors **T4** et **T2**, ce qui provoque une augmentation du courant **I** jusqu'à atteindre I_n . Quand ces transistors sont arrêtés, le courant persiste à circuler dans la même direction grâce aux diodes de décharge **D1** et **D3**, puis diminue progressivement jusqu'à disparaître. Pour un courant négatif, on active **T1** et **T3**, tandis que **D2** et **D4** garantissent la récupération du courant.



FigI. 12:Alimentation en tension bidirectionnelle (montage en pont) [3].

Il est à noter que les transistors bloqués ne doivent supporter que la tension d'alimentation V . Ce genre d'alimentations existe en tant que circuits intégrés, regroupant deux ponts et le séquenceur au sein d'un même boîtier. [3]

I.7.2.2. Alimentations en courant :

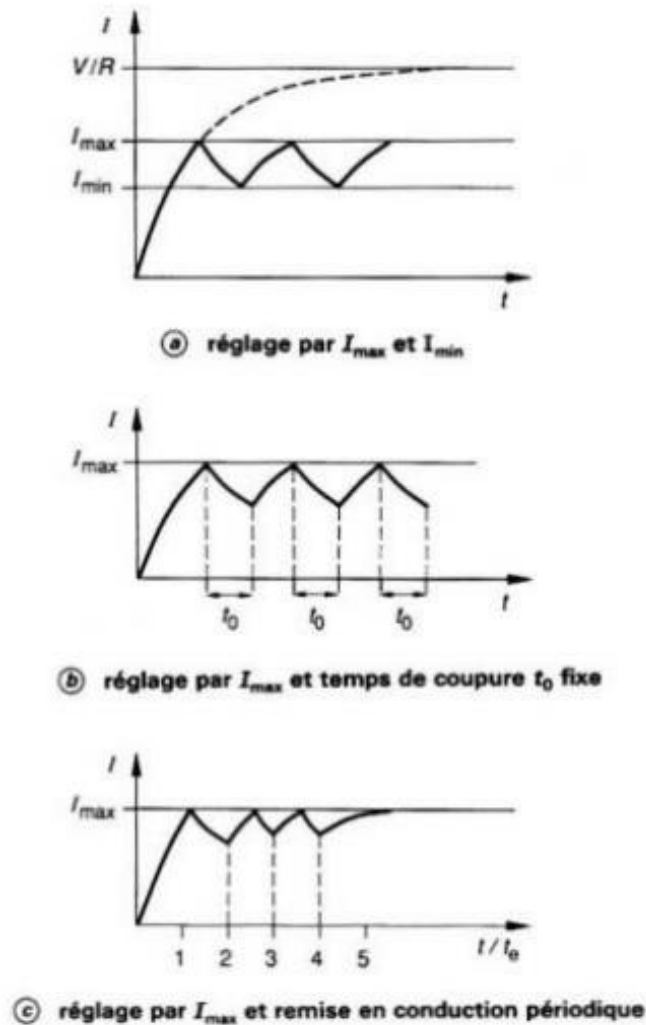
Tous les systèmes de fourniture précédents ont été améliorés par expérience, mais cela a fréquemment abouti à une complexité croissante des structures. Étant donné que le couple moteur est directement lié au courant (ou à son carré), une gestion du courant apparaît comme l'option la plus bénéfique. Cette régulation incorpore un hacheur de courant au sein d'une alimentation haute tension V , généralement bipolaire, comme le démontre la figure 13.

Dans ce dispositif, un enroulement reçoit une alimentation par courant positif. Les transistors **T2** et **T4** sont en mode conducteur, ce qui autorise le flux de courant à augmenter en fonction de V . Quand le courant atteint un maximum I_{max} , qui est légèrement au-dessus de I_n , **T4** se bloque et le courant diminue en traversant d'abord **T2** puis **T1**.

Il existe trois méthodes pour procéder à la remise en conduction :

- Quand l'intensité atteint un seuil I_{min} , **T4** reprend sa conduction, ce qui procure un courant caractérisé par une valeur moyenne et une ondulation clairement définie. Toutefois, la fréquence de hachage est déterminée par la vitesse et l'emplacement du rotor.
- Après une période d'interruption **T0**, **T4** est rétabli en conduction. Ce genre de contrôle est incorporé dans des circuits tels que le PBL3717 (Rifa ou SGS Thomson), comportant un pont en H et capable de traiter des courants pouvant atteindre **1A**, nécessitant deux circuits pour un moteur.
- Une horloge synchronise **T4** en conduction avec une période t_e , comme le montre la figure 13. Cette régulation est effectuée par le circuit L297 (SGS Thomson). Lié à

deux ponts **H** intégrés dans le circuit L298 (SGS Thomson



FigI.13:: Hachage du courant [3].

Dans ces deux cas finaux, le courant ne possède pas une valeur moyenne et une ondulation constante, étant donné qu'ils sont influencés par la vitesse et la position du rotor (par le biais de la force électromotrice ou de la réductance). Toutefois, la commande contrôle le taux de hachage, et il suffit de mesurer uniquement la valeur I_{max} . Le processus d'annulation ou d'inversion du courant dans une phase est semblable à celui de l'alimentation en tension.

Il est également possible d'envisager une commande de hachage par modulation de largeur d'impulsion. Elle correspond à une source d'alimentation en tension variable de 0 à V grâce au facteur de cycle de conduction de l'hacheur.

Cependant, elle montre des performances très médiocres en condition de variation de courant, et le courant est fortement influencé par la vitesse du rotor. [3]

I.8. Comparaison des trois catégories de moteurs pas à pas :

Cette comparaison peut se résumer selon le tableau suivant : [5]

Table I.1: Comparaison entre les différents types des moteurs pas à pas [5].

Type de moteur pas à pas	Moteur à réluctance variable	Moteur à aimant permanents	Moteur hybride
Résolution (nombre de pas par tour)	Bonne	Moyenne	Elevée
Couple de rotation	Faible	Elevée	Elevée
Sens de rotation	Dépend : De l'ordre d'alimentation des phases	Dépend : De l'ordre d'alimentation des phases	Dépend : De l'ordre d'alimentation des phases
Fréquence de travail	Grande	Faible	Grande
Puissance	Quelque Watts	Quelques dizaines de Watts	Quelque K Watts

I.9. Principe de fonctionnement du moteur pas à pas :

Un moteur pas à pas est un dispositif dans lequel les différents enroulements sont alimentés successivement, chaque excitation provoquant un déplacement angulaire (ou linéaire) spécifique, appelé « pas », qui constitue la caractéristique principale du moteur. Le sens de rotation est déterminé par la direction d'excitation des enroulements ou groupes d'enroulements.

Un moteur pas à pas rotatif peut être comparé à une série d'étapes qui, lorsqu'elles sont excitées successivement, entraînent une rotation du rotor d'un angle précis.

Il existe deux types de moteurs pas à pas :

- Les premiers fonctionnent par interaction entre un champ électromagnétique et un rotor avec aimant permanent (M.A.P.).

Les autres, appelés moteurs à réluctance variable (M.R.V.), fonctionnent par réaction entre un champ électromagnétique et un rotor en fer doux.

Le mélange des deux principes de fonctionnement donne naissance aux moteurs hybrides, qui combinent les avantages des deux technologies. Ces moteurs permettent un positionnement précis sans système de contrôle en boucle fermée.

Chaque impulsion du signal de commande correspond à un déplacement angulaire défini du rotor, appelé « pas » ou « incrément mécanique ». La vitesse de rotation est fonction de la fréquence des impulsions. [8]

I.10. Fonctionnement d'un moteur pas à pas :

Le rotor et le stator constituent les deux éléments principaux du moteur pas à pas. Le stator est un composant immobile, alors que le rotor, qui est fixé à l'arbre avec un palier, tourne à l'instar du champ magnétique tournant généré autour du stator. Le stator, qui est en acier ou en autre métal, constitue le support pour un groupe d'électroaimants. Ces bobines sont disposées à des emplacements précis autour du rotor. Un champ magnétique est généré autour des bobines du stator lorsque le courant les traverse. Certaines directions et magnitudes de flux magnétiques dépendent de l'intensité et de la direction du courant qui traverse une bobine spécifique.

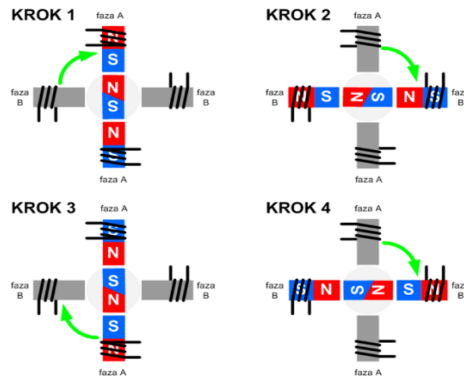
Lorsque la bobine est alimentée, l'électroaimant généré exerce une attraction sur un aimant (dent) fixé au rotor, qui est décalé de manière spécifique par rapport à celui-ci. Le rotor et l'arbre tournent donc selon l'angle qui s'oppose le moins au flux magnétique ou à la combinaison de plusieurs flux. Suite au déplacement de ce décalage, un autre électroaimant (bobine ou bobines) sur le stator est mis en marche et le rotor est repositionné à sa nouvelle place. En alternant des bobines successives, on peut aussi avancer ou reculer par étapes, ou réaliser une rotation totale ou partielle du rotor et de l'arbre qui y est attaché.

D'après l'explication fournie, nous pouvons visualiser un moteur pas à pas en tant que succession d'électroaimants attirant l'aimant du rotor. Cependant, en vérité, la situation est bien plus complexe, car l'aimant est attiré par le champ résultant créé autour de l'ensemble d'électroaimants. Cela permet non seulement un fonctionnement en pas complet, mais aussi un fonctionnement en demi-pas (division de la course par 2) ou même moins, ce qui est connu sous le nom de fonctionnement en micropas. [9]

I.10.1. Fonctionnement en pas complet :

La figure I.13 illustre le fonctionnement du moteur pas à pas en mode pas complet. Dans ce mode, le moteur pivote d'un angle qui découle de sa conception, tel qu'un décalage potentiel de $1,8^\circ$. Comme nous pouvons le constater aisément, dans ce genre de situation, il est nécessaire d'effectuer 200 pas pour réaliser un tour entier ($200 \times 1,8^\circ = 360^\circ$).

L'exécution de la course de l'arbre est réalisée une fois que l'une ou deux bobines ont été mises sous tension. Lors de l'utilisation d'une alimentation à bobine unique, il est indispensable d'appliquer une puissance minimale du driver. En mode biphasé, en alimentant des bobines opposées, le besoin en puissance double, cependant, la vitesse et le couple s'accroissent aussi. [9]

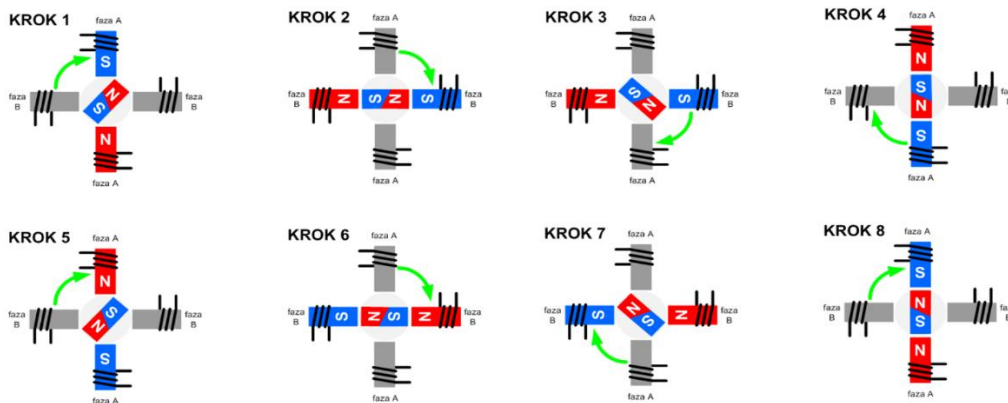


FigI.14 : Principe de fonctionnement du moteur pas à pas en pas complet avec alimentation biphasée. [9]

I.10.2. Fonctionnement en mode demi-pas :

La figure I.14 illustre le fonctionnement du moteur en mode demi-pas. Comme le suggère son appellation, en mode discret, la course du rotor est divisée par deux. Ainsi, lors d'une unique course, il effectue la moitié de l'angle prévu. En prenant exemple sur ce qui précède, une unique course sera exécutée tous les $0,9^\circ$, alors que le total des courses pour un tour complet s'élèvera à 400.

Pour fonctionner en mode demi-pas, il est indispensable d'avoir une alimentation alternative à deux phases (bobines). Par conséquent, nous constatons une élévation du couple en comparaison avec l'utilisation d'une alimentation monophasée, un fonctionnement « plus doux » du moteur et une double amélioration mentionnée de la résolution angulaire. [9]



FigI.15:Principe de fonctionnement du moteur en mode demi-pas avec une alimentation biphasée. [9]

I.10.3. Fonctionnement en mode micropas (microstep) :

En mode micropas, le parcours nominal est segmenté en sections plus courtes que dans le mode demi-pas. La plus grande valeur possible pour le coefficient de division est 256. Les positions spécifiques du rotor sont déterminées par le flux magnétique qui découle des bobines alimentées par l'onde en escalier. Dans les applications nécessitant un fonctionnement « doux

» du moteur et/ou une grande précision dans le positionnement, l'utilisation de micropas est recommandée.

Lors de l'utilisation du moteur en mode micropas, il est crucial de respecter les spécificités de l'application relatives à la vitesse de rotation du moteur. Comme indiqué précédemment, l'augmentation de la fréquence de commutation du courant dans les bobinages du moteur entraîne une augmentation de la réactance inductive de la bobine. Une fréquence de rotation accrue nécessite une commutation plus régulière, ce qui entraîne une augmentation de la fréquence de commutation des bobinages. Cela entraîne une hausse de l'impédance de la bobine, ce qui provoque une réduction du courant moyen circulant à travers les bobinages. C'est un facteur crucial pour l'opération du moteur - lorsque le courant traversant les bobinages se réduit, le couple s'affaiblit également, ce qui peut provoquer une oscillation, l'arrêt du rotor ou la perte des cours du moteur, et donc de l'élément entraîné de la machine. Ainsi, lors de l'utilisation du moteur en mode micropas, il est essentiel de prêter une attention spéciale à sa fiche technique qui doit inclure un graphique illustrant la relation entre le couple et la fréquence du courant traversant la bobine. [9]

I.11. Applications des moteurs pas à pas :

Les moteurs pas à pas sont des moteurs électriques capables de diviser une rotation complète en un nombre précis de pas, ce qui permet un contrôle très précis de la position, de la vitesse et de l'accélération. Voici quelques-unes de leurs applications courantes :

- Robotique et automatisation
- Informatique et périphériques
- Équipements médicaux
- Industrie et automatisation des processus
- Domotique et électronique grand public
- Aéronautique et spatial
- Instruments de mesure et de laboratoire. [10]

I.12. La comparaison de Moteur pas à pas avec le moteur à courant continu :

Dans plusieurs applications, les moteurs pas à pas rivalisent avec les servomoteurs à courant continu. On a étudié le comportement de ces individus depuis longtemps, ce qui confère un avantage considérable.

L'énumération ci-dessous met en évidence divers aspects comparatifs entre ces deux sortes de moteurs.

Table I.2: La comparaison avec le moteur à courant continu

Moteur pas à pas	Servomoteur en courant continu
Commande relativement complexe.	Commande simple.
Pas de réinjection pour le repérage de la position (régulation en boucle ouverte).	Nécessite un repérage (potentiomètre, codeur, tachymètre).
Robuste usure lente, moteur pouvant être étanche.	Usure des balais.
Bonnes caractéristiques d'immobilisation asservie électriquement.	Blocage par dispositif mécanique.
Couple massique important obtenu à faible fréquence de commutation.	
La vitesse dépend uniquement de la fréquence d'alimentation	La vitesse dépend de la tension d'alimentation.
Il y a un champ tournant et une position définie	Il n'y a pas de champ tournant car celui-ci est sans cesse maintenu en quadrature par le collecteur, et pas de position définie.
C'est un moteur de positionnement	C'est un moteur d'entraînement et d'asservissement
La position est définie par la séquence de commutation.	Couple indépendant de la position et la vitesse.

I.13. Avantages du moteur pas à pas :

- Contrôle de la position ou de la vitesse en boucle ouverte
- Couple élevé à basse vitesse
- Facilité d'utilisation
- Positionnement précis à l'arrêt
- Fiabilité
- Coût réduit
- Moteurs synchrones
- Moteurs à courant continu sans balais
- Moteurs d'impulsions (intégrateurs). [2]

I.14. Les inconvénients du moteur pas à pas :

- Vitesse restreinte
- Puissance limitée
- Moins facile à utiliser qu'un moteur à courant continu
- Couple relativement faible, diminuant rapidement à mesure que la vitesse augmente
- Positionnement discret
- Vitesse de pointe limitée
- Puissance faible. [10]

I.15. Couple et vitesse d'un moteur pas à pas :

Le couple d'un moteur pas à pas dépend de plusieurs facteurs :

- L'intensité du courant traversant les bobines.
- La position angulaire du rotor à un instant donné lors du passage d'une bobine à l'autre.
- La vitesse de pilotage.

On définit deux vitesses limites :

- **La vitesse limite au démarrage et la vitesse limite de fonctionnement**, au-delà desquelles le moteur décroche. Cette limitation est principalement due à l'effet d'auto-induction des bobines.

La valeur du couple est généralement spécifiée pour **5 pas par seconde**.

Types de couple :

- **Le couple de maintien** : mesuré lorsque le moteur est à l'arrêt avec les bobines alimentées.
- **Le couple de détente** : mesuré lorsque les bobines ne sont pas alimentées.

Le couple varie également selon le mode de fonctionnement :

- **En mode biphasé**, le champ magnétique généré dans les bobines est **1,4 fois plus élevé** qu'en mode monophasé, ce qui entraîne un couple plus important.

Oscillations du positionnement angulaire

Lors de chaque pas, le rotor présente une oscillation : il dépasse légèrement la position souhaitée avant de revenir en oscillant autour de celle-ci. Ce phénomène peut être problématique à certaines vitesses.

Application en astronomie

Dans le domaine de l'astronomie, un moteur pas à pas doit fonctionner à **deux vitesses** :

- Une vitesse lente pour assurer le suivi des étoiles.
- Une vitesse rapide pour se repositionner rapidement sur un astre.

Le mode rapide doit rester dans la zone de démarrage pour garantir un fonctionnement optimal.

I.16. Conclusion :

Dans cette partie nous avons présenté les trois grandes familles du moteur pas à pas, et les caractéristiques de chacun. Ces moteurs sont simples à réaliser et peuvent présenter une faible inertie, ce qui nous permet d'avoir une accélération importante. Les moteurs à réluctance variable sont beaucoup moins utilisés actuellement, car ils nécessitent un usinage très précis ; par conséquent leur prix est élevé pour un nombre de pas par tour important. La modélisation de moteur pas à pas à aimant permanent fera l'objet du prochain chapitre.

A decorative scroll frame with a black outline and grey shading on the top and bottom edges, containing the chapter title.

CHAPITRE II : COMMANDE DES MOTEURS PAS A PAS

I.1. Introduction :

Différentes techniques de commande sont disponibles pour faire fonctionner les moteurs pas à pas. L'option la plus économique, bien qu'elle puisse être plus complexe à mettre en œuvre et pas forcément la plus efficace, repose sur l'utilisation de transistors. En revanche, la solution la plus avancée s'appuie sur des circuits développés spécifiquement pour ce type d'application.

II.2. Commande des moteurs pas à pas :

Les moteurs pas à pas présentent l'atout de transformer directement un signal électrique numérique en un positionnement angulaire progressif. Néanmoins, leur principal problème découle de l'instabilité engendrée par les phases d'accélération et de décélération.

Lors de l'implémentation des moteurs pas à pas, diverses méthodes de commande peuvent être envisagées. L'option la plus économique, même si elle n'est pas forcément la plus performante et indubitablement la plus compliquée, se base sur l'emploi de transistors. En revanche, l'option la plus avancée utilise des circuits intégrés spécifiques à ce genre d'application.

L'approche suggérée ici est la plus facile à implémenter et favorise une interface conviviale avec un PC ou un microcontrôleur. L'emploi de transistors nécessite un calcul sophistiqué des séquences pour changer la direction de rotation ou activer le mode demi pas, ce qui alourdit la commande. Cependant, on peut simuler un circuit intégré spécifique en utilisant des circuits logiques, ce qui rend possible l'usage de transistors puissants tout en simplifiant la gestion du moteur, bien que cela implique un circuit plus sophistiqué.

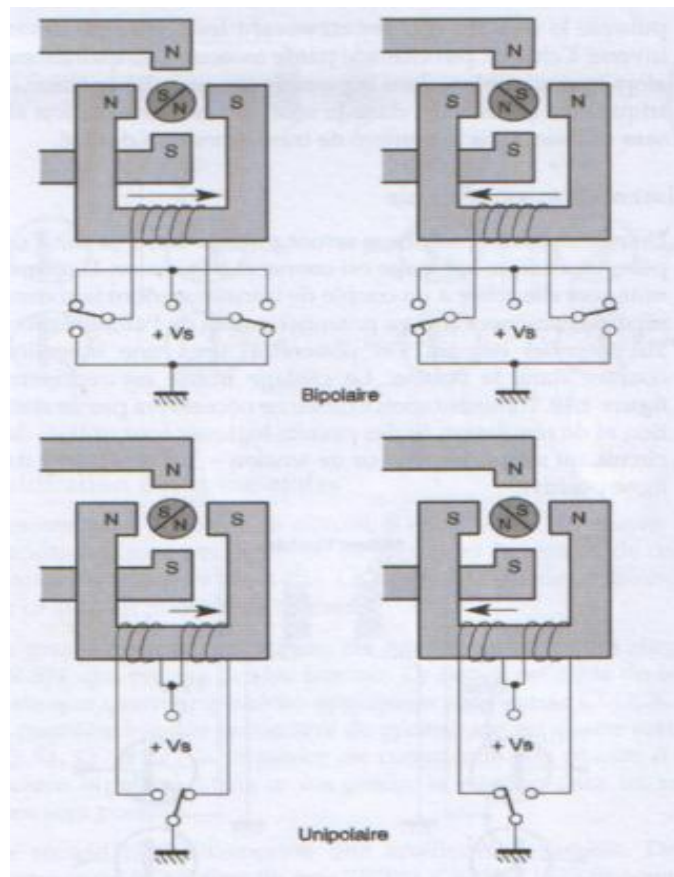
De nombreux exemples de circuits seront exposés dans le but d'assister au choix de la solution la plus appropriée à l'application.

Un des atouts majeurs du moteur pas à pas est sa capacité à opérer en mode ouvert, chaque série d'impulsions induisant un mouvement angulaire exact. Toutefois, en fonction du genre de moteur et de son utilisation, une électronique plus sophistiquée peut être indispensable. De plus, la gestion des moteurs pas à pas nécessite un contrôle rigoureux du courant, étant donné que celui-ci a un impact direct sur le couple produit.

Plusieurs critères doivent être respectés lors de la commande en boucle ouverte des moteurs pas à pas :

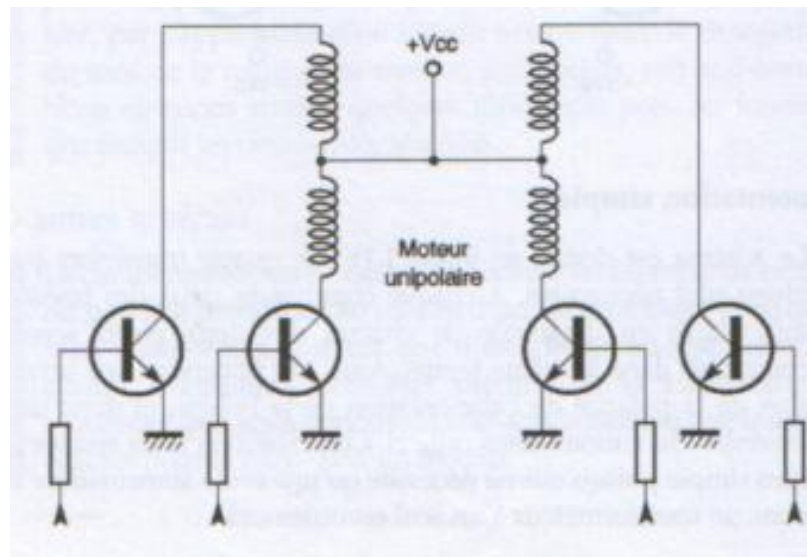
- Le changement de position doit se faire en un minimum de temps.
- Le fonctionnement doit demeurer synchronisé pour éviter toute perte de pas.
- La position finale doit être atteinte sans causer de fluctuations.

Figure II.1 illustre les commandes requises pour divers types de moteurs. La commande d'un moteur unipolaire est illustrée par le dessin qui se trouve dans la section inférieure de la figure. On constate qu'il est simplement nécessaire de fournir de l'énergie, en connectant à la masse, l'extrémité d'une des phases, l'autre extrémité étant constamment reliée au pôle positif de l'alimentation. Il s'ensuit donc qu'un seul transistor suffit pour cette Commutation. Étant donné que le moteur comporte quatre bobinages et quatre transistors, la commande est particulièrement aisée. [11]



FigII.1:: commande des moteurs unipolaires et bipolaires. [11]

Figure II.2 résume, d'une façon plus pratique, les différentes connexions à réaliser.



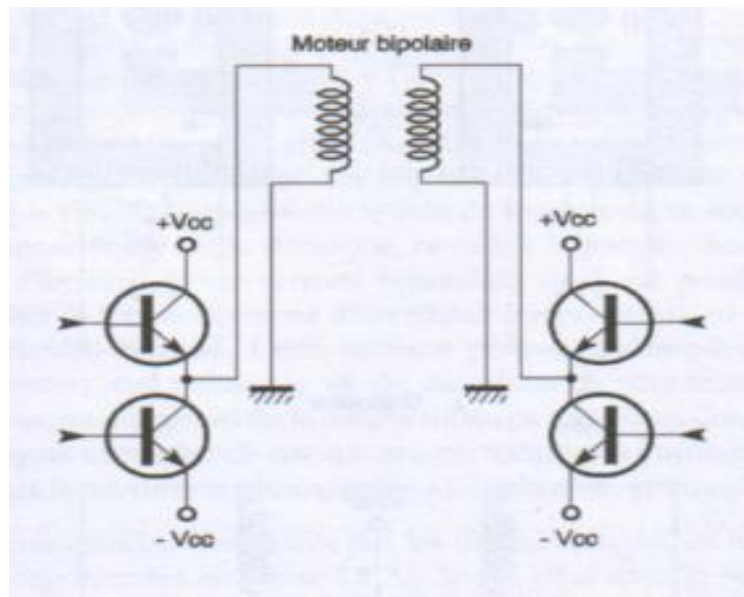
FigII.2:commande d'un moteur unipolaire par transistors [11].

Sur figure II.1, Le diagramme ci-dessus dépeint le contrôle d'un moteur bipolaire. Dans ce scénario, les complexités augmentent légèrement, car la direction du courant passant à travers les bobinages doit être changée à chaque mouvement exécuté par le moteur. Deux options sont alors possibles : dans la première situation, une alimentation symétrique est indispensable ; tandis que dans la seconde, une alimentation simple peut être employée, cependant le nombre de transistors doit être multiplié par deux. [11]

II.2.1. Alimentation symétrique :

On utilisera deux transistors pour chaque phase. Dans cette situation, un pôle de chaque enroulement est relié à la terre. L'autre extrémité est connectée à une paire de transistors, dont le contrôle distinct permet de la brancher soit au potentiel positif de l'alimentation, soit au potentiel négatif. Cela entraîne donc une inversion du flux dans la bobine. Le câblage employé est illustré en figure II.3.

L'alimentation ne nécessitera ni stabilisation ni régulation. Toutefois, si des circuits logiques sont intégrés dans le montage, un simple régulateur de tension +5 V devra être inséré sur la ligne positive. [11]

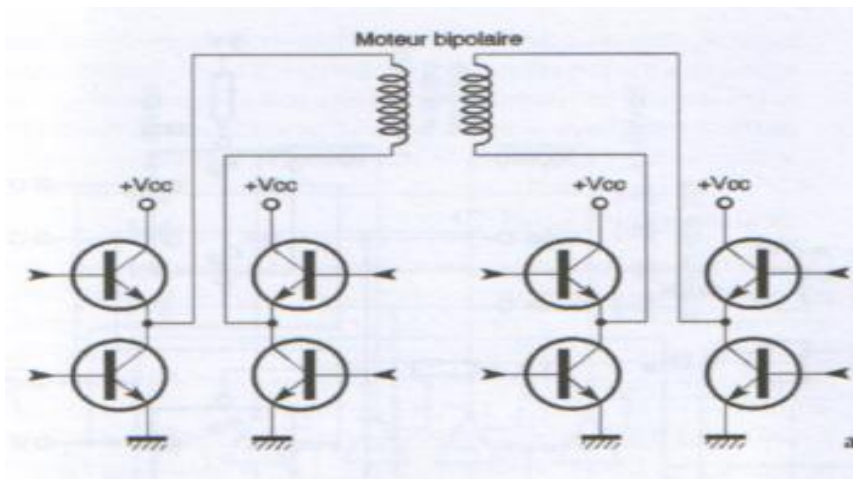


FigII.3:commande d'un moteur bipolaire avec alimentation symétrique [11].

II.2.2. Alimentation simple :

Le schéma est présenté en figure II.4. Dans ce montage, quatre transistors par phase sont nécessaires. À chaque commande, deux transistors placés en diagonale dans chacun des deux ponts sont commutés simultanément. Cela permet de changer la polarité de l'alimentation de la bobine, et par conséquent, la direction du courant qui la traverse.

Cette option nous paraît la plus facile, car elle exige seulement une unique source d'alimentation, donc un transformateur à un unique enroulement. [11]



FigII.4: Commande d'un moteur bipolaire avec alimentation simple [11].

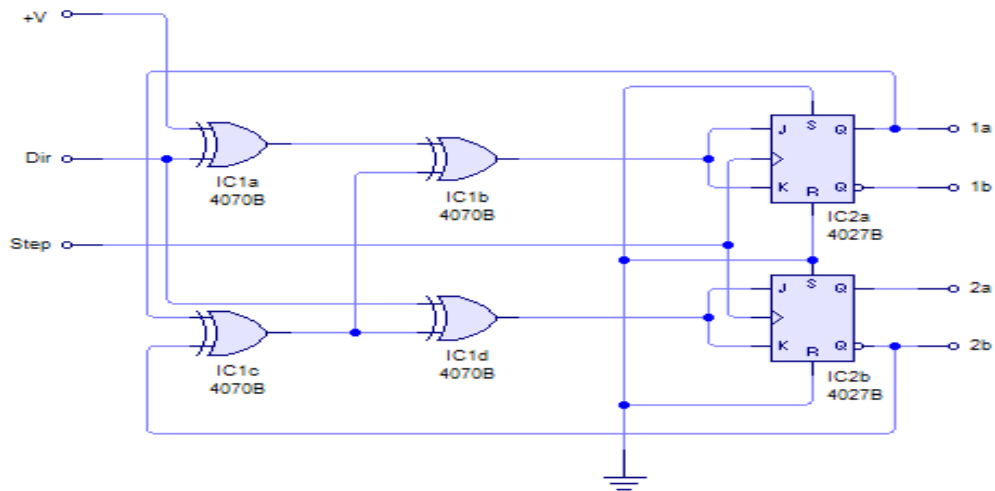
II.3. Commande des moteurs pas à pas par des circuits intégrés non spécialisés :

L'emploi de circuits logiques conventionnels facilite la gestion des moteurs pas à pas tout en diminuant les dépenses. Au lieu d'utiliser des composants spécialisés, cette méthode s'appuie sur des circuits intégrés standard tels que les portes logiques, les bascules et les amplificateurs opérationnels, combinés à des transistors pour gérer le basculement des phases du moteur.

Comme indiqué précédemment, le logiciel de commande pour moteurs pas à pas peut être simplifié en recourant à des circuits logiques abordables. Cette commande s'appuie exclusivement sur des transistors et des circuits intégrés non spécifiques, comme les portes logiques, les flip-flops et les amplificateurs opérationnels. L'image ci-dessous présente une solution possible.

Dans figure II.5, la bascule fonctionne en mode J-K plutôt qu'en mode classique. Son principe repose sur la mise à la masse des entrées S et R, tandis que la fréquence souhaitée pour le moteur est appliquée à l'entrée T. Les sorties Q et \bar{Q} s'inversent en fonction de l'état des entrées J et K.

- Si J et K sont à 0, l'état des sorties Q et \bar{Q} reste inchangé.
- En revanche, si J et K sont à 1, alors l'état de la sortie Q devient celui de la sortie \bar{Q} , et la sortie \bar{Q} prend la valeur que Q avait juste avant l'impulsion envoyée sur l'entrée T. [11]



FigII.5: Commande d'un moteur à base des bascules JK [11].

II.4. Commande des moteurs pas à pas par des circuits intégrés spécialisés :

Nous allons maintenant examiner le contrôle des moteurs pas à pas au moyen de circuits intégrés dédiés. Comme nous le démontrerons ultérieurement, ces circuits offrent une solution compacte, particulièrement avec le L297 et L298 pour les moteurs bipolaires ainsi que le EDE1200 pour les moteurs unipolaires. Ils requièrent moins de composants et proposent des performances supérieures en matière de puissance et de facilité d'utilisation. [11]

II.4.1. La commande avec le couple L297 et L298 :

Les composants L297 et L298 sont fréquemment employés pour contrôler les moteurs pas à pas bipolaires. Bien qu'ils soient conçus pour être utilisés en synergie, ils peuvent également être employés individuellement selon les exigences. La société SGS Thomson est en charge de la mise sur le marché de ces circuits.

Exécution d'une commande numérique d'un moteur pas à pas assistée par ordinateur 33. [11]

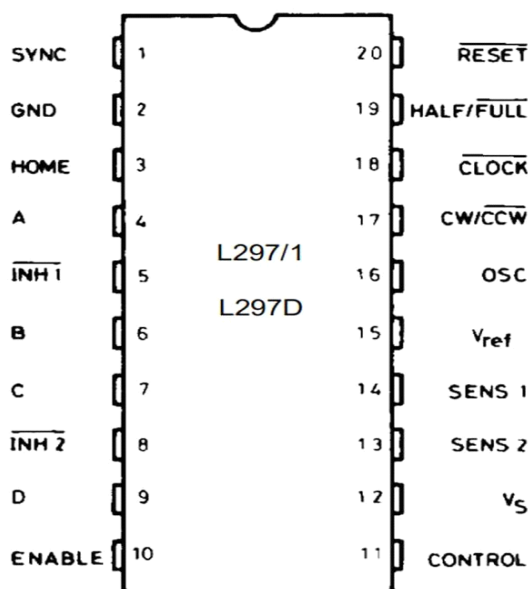
II.4.1.1. Présentation et brochage du circuit intégré L297 :

Le L297 est un circuit intégré, également connu sous le nom de translateur, qui a été conçu pour produire les séquences d'alimentation destinées aux différentes phases du moteur pas à pas. Voici ses principales caractéristiques :

- Contrôle de la vitesse de rotation et du déplacement par impulsions (Step Clock).
- Sélection du mode de fonctionnement : demi-pas ou pas entier (Half/Full).
- Définition du sens de rotation : horaire (CW) ou anti-horaire (CCW).
- Programmation du courant de charge.
- Nécessite un nombre réduit de composants externes.
- Dispose d'une entrée de remise à zéro (RAZ).

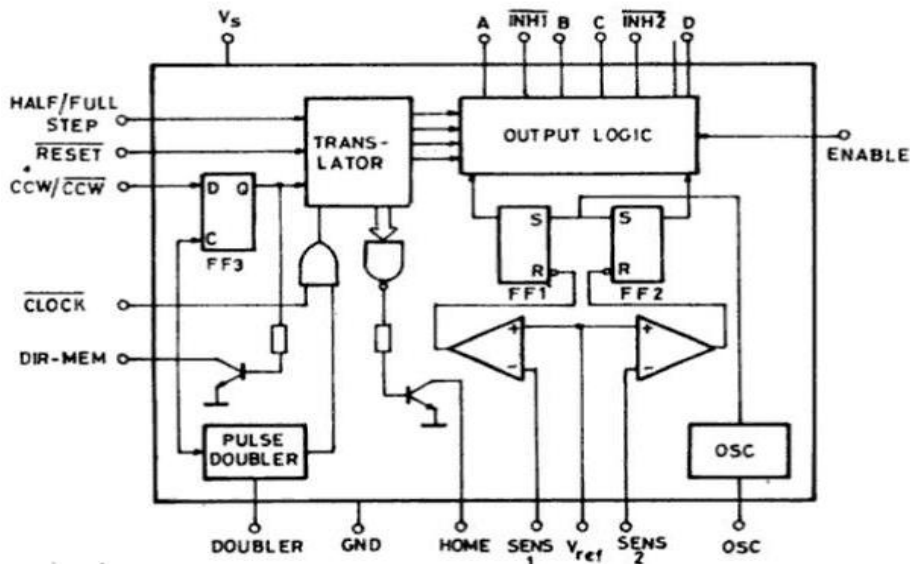
- Une sortie HOME indiquant la position de départ.
- Une entrée d'activation permettant la validation du circuit.

Figure II.6 illustre le brochage du circuit L297, Prévu pour opérer avec un pilote en double étage, un réseau de quatre Darlington de puissance ou des éléments discrets. Le moteur pas à pas est contrôlé par les signaux CLOCK (qui gèrent l'avancement des étapes), de direction et de mode de fonctionnement. En réaction, il produit la séquence de commande requise pour le niveau de puissance.



FigII.6: Brochage du circuit L297 [11].

« Comme illustré dans la figure II.7 représentant sa structure interne, le circuit se compose de deux étages principaux : l'un chargé de générer les différentes séquences de commande, et l'autre, un double hacheur PWM (Pulse Width Modulation), permettant de réguler le courant traversant les bobinages du moteur. »

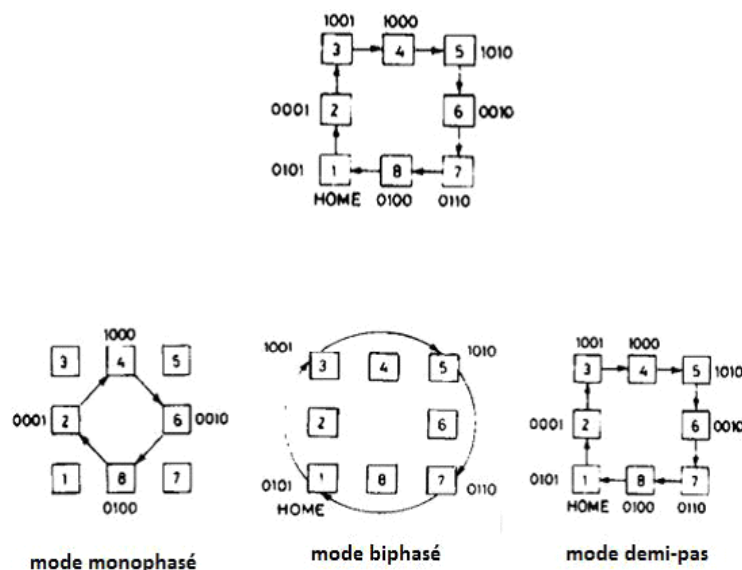


FigII.7: Structure interne du circuit L297 [11].

Le translateur intègre un compteur ou un automate interne permettant de générer une séquence de huit pas, comme illustré dans la figure II.8. Il est capable de produire trois types de séquences distinctes, déterminées par le niveau logique appliqué à l'entrée HALF/FULL :

- Mode monophasé : une seule phase est alimentée à la fois.
- Mode biphasé : deux phases sont alimentées simultanément.
- Mode demi pas : alternance entre l'alimentation d'une seule phase et de deux phases.

Ces séquences correspondent à l'alimentation successive des enroulements du moteur. Par exemple, si les sorties de commande du circuit L297 affichent la valeur 0101, cela signifie que le premier et le troisième enroulement seront alimentés.



FigII.8: Les séquences du translateur du L297 [11].

Le circuit L297 produit aussi deux signaux d'inhibition, INH1 et INH2, lorsqu'il opère en mode monophasé ou demi pas. Ces signaux sont directement dirigés vers les entrées de

validation du L298, ce qui favorise une chute rapide de courant dans les bobinages du moteur une fois qu'ils ne sont plus alimentés.

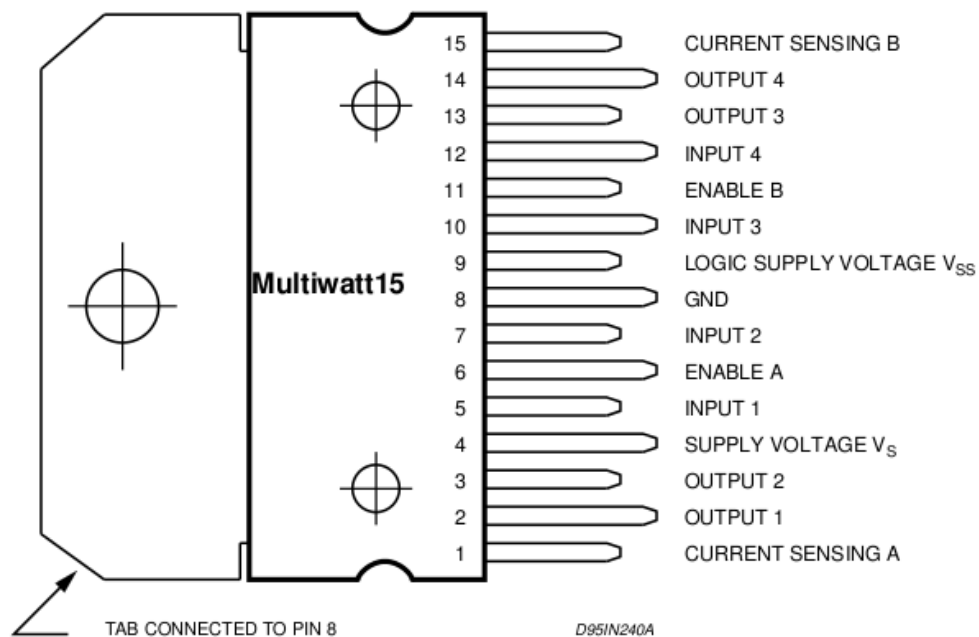
Lorsqu'il est utilisé pour commander un moteur unipolaire, les hacheurs interviennent sur ces lignes. L'entrée CONTROL détermine si l'hacheur doit agir sur les sorties A, B, C et D, ou sur les entrées INH1 et INH2.

L'oscillateur interne du L297 est responsable de la commande des hacheurs. Quand le courant passant par la bobine atteint la tension définie (spécifiée par les résistances de mesure reliées aux entrées SENS1 et SENS2), le comparateur associé interrompt l'alimentation du moteur jusqu'à la prochaine impulsion de l'oscillateur.

Un diviseur de tension connecté à la broche 15 (V_{ref}) du L297 fournit une tension de référence, déterminant ainsi le courant, aux deux comparateurs. Ce diviseur peut se constituer d'une résistance fixe et d'une résistance variable, offrant la possibilité d'ajuster précisément le courant. [11]

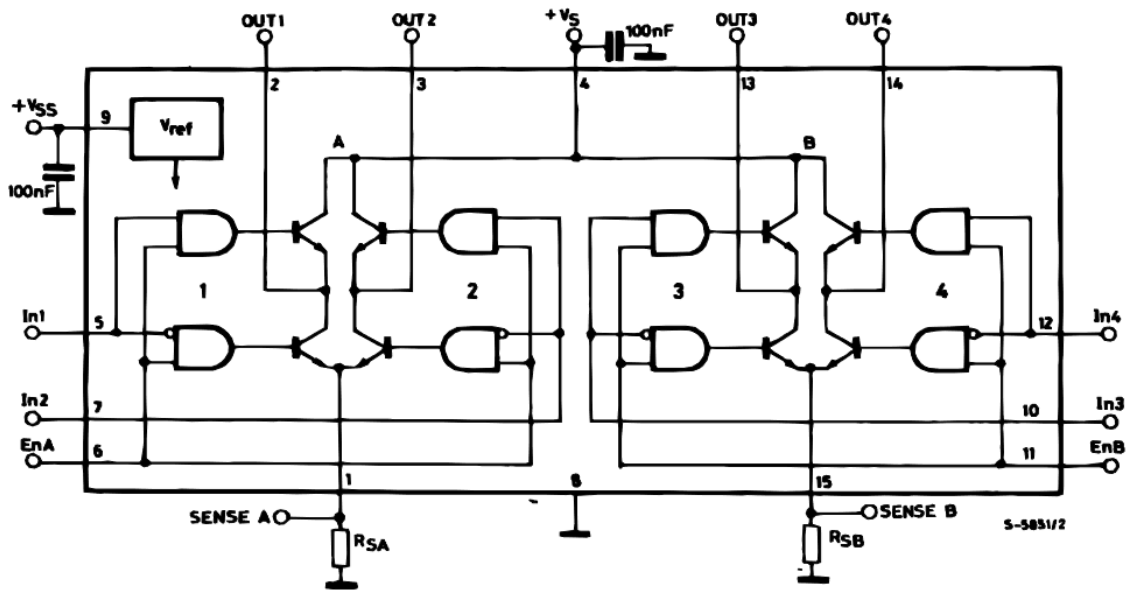
II.4.1.2. Présentation et brochage du circuit intégré L298 :

Le L298 figure II.9 est un circuit intégré conçu pour fonctionner en complément du L297. Il s'agit d'un double pont de commande de puissance, permettant de piloter un moteur pas à pas. Ce circuit intègre des sorties de mesure du courant consommé ainsi que des entrées de validation, simplifiant ainsi son utilisation. Grâce à sa conception, il requiert très peu de composants externes, ce qui facilite grandement sa mise en œuvre.



FigII.9:Brochage du circuit L298 [11].

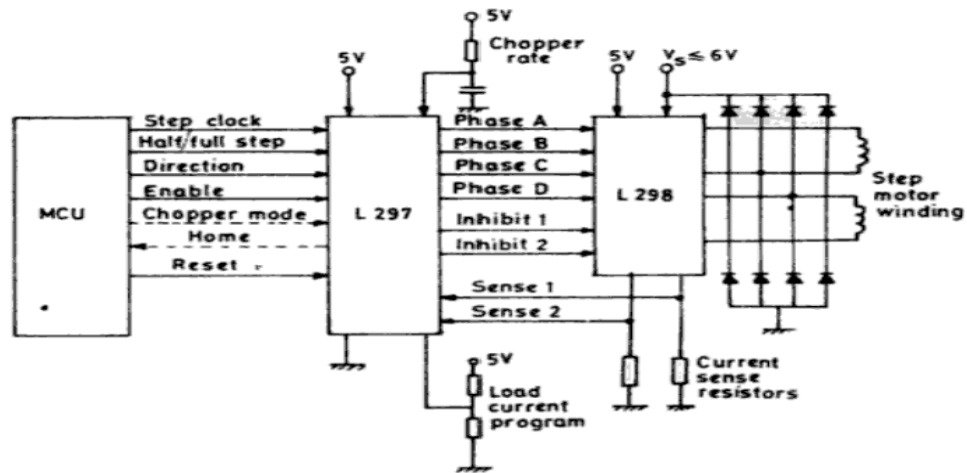
Le schéma interne du L298, illustré en figure II.10, met en évidence les deux ponts en H, chacun composé de quatre transistors de puissance pilotés par des circuits logiques. On y observe également la connexion des résistances de mesure du courant consommé par la charge, lesquelles sont reliées aux émetteurs de chaque paire de transistors. [11]



FigII.10 : Structure interne du circuit L298 [11].

II.4.1.3. Circuit de commande avec le couple L297/L298 :

Figure II.11 illustre une configuration typique d'un circuit de commande pour moteur pas à pas utilisant l'association des circuits L297 et L298.



FigII.11: Commande des moteurs pas à pas avec le couple L297 et L298 [11].

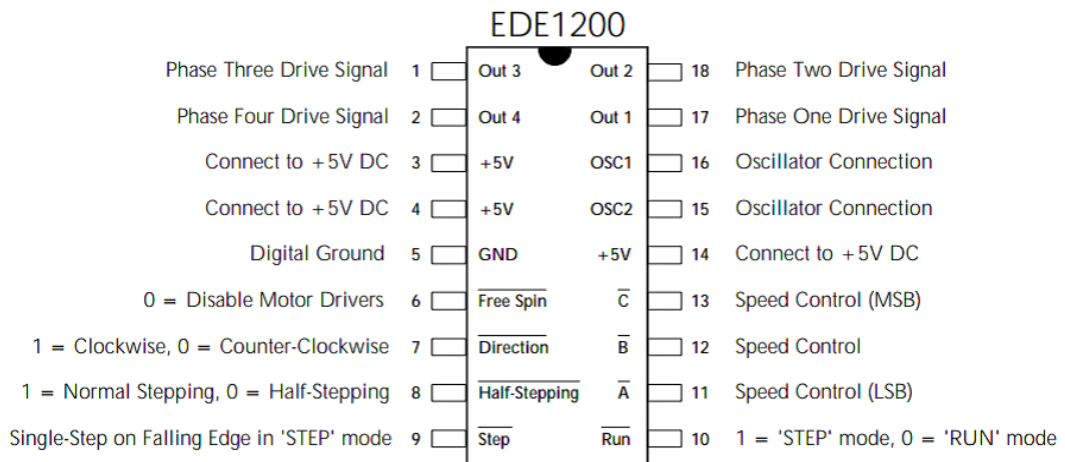
Dans la documentation technique du circuit L297, le schéma électrique de la carte est inclus. Cette dernière propose une illustration de câblage pour contrôler un moteur pas à pas en utilisant les circuits L297 et L298.

Étant donné l'absence de diodes de protection pour ses transistors internes dans le L298, il est crucial d'inclure ces diodes externes dans le circuit. Ces dernières doivent être dotées d'une commutation rapide et être à même de supporter un fort courant. [11]

II.4.2. Commande d'un moteur pas à pas unipolaire avec l'EDE1200 :

4.2.1. Présentation et brochage :

Le brochage du circuit EDE1200 est illustré dans figure II.12. Ce composant est commercialisé par la société E-LAB Digital Engineering. [11]



FigII.12: Brochage de l'EDE1200 [11].

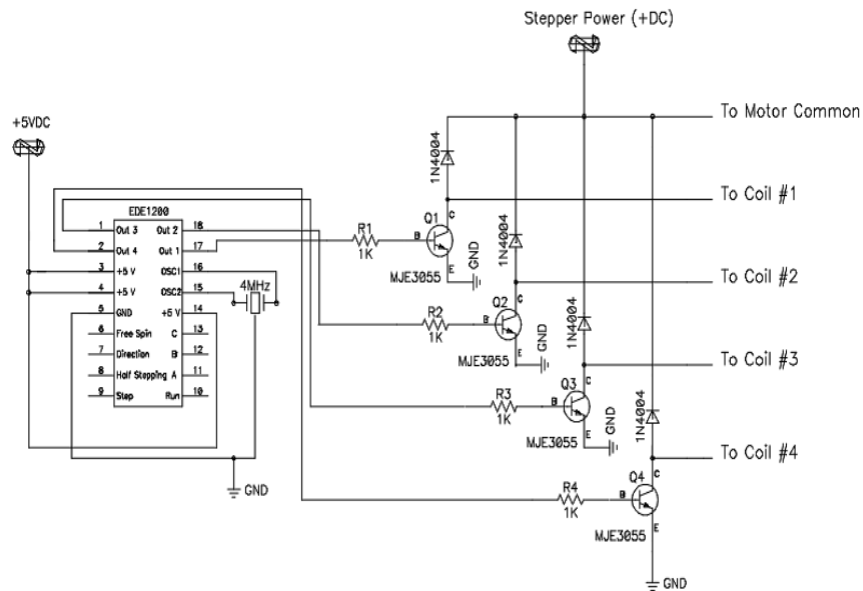
Table II.1: Fonctions des broches de circuit EDE1200 [11]

N de la broche	Fonction
1 ,2 ,17 et 18	Sorties de commande du circuit d'interface avec le moteur pas à pas.
6	Désactivation de l'alimentation du moteur.
7	Un niveau haut (TTL) appliqué sur cette entrée permet une rotation dans le sens horaire, tandis qu'un niveau bas aura pour conséquence une rotation en sens anti-horaire.
8	Un niveau haut (TTL) présent sur cette entrée permet un fonctionnement en mode pas entier et un niveau bas fera tourner le moteur en mode demi pas.
9	Dans le mode pas par pas, un front descendant permet l'avance d'un pas ou d'un demi pas, en fonction du niveau présent sur l'entrée en broche 8.
10	Cette entrée permet le choix entre deux fonctions. Si un niveau haut lui est appliqué, le circuit fonctionne en mode <i>step</i> , Par contre, si un niveau bas lui est appliqué, le circuit fonctionne en mode <i>run</i> ,
11, 12 et 13	Ces trois entrées permettent de fixer la vitesse de rotation du moteur lorsque le circuit est configuré en mode <i>run</i> .
15 et 16	Connexions de l'oscillateur (résonateur céramique)

II.4.2.2. Différentes possibilités d'utilisation de circuits EDE1200 :

Nous présenterons quelques exemples de schémas permettant une utilisation quasi universelle du circuit EDE1200.

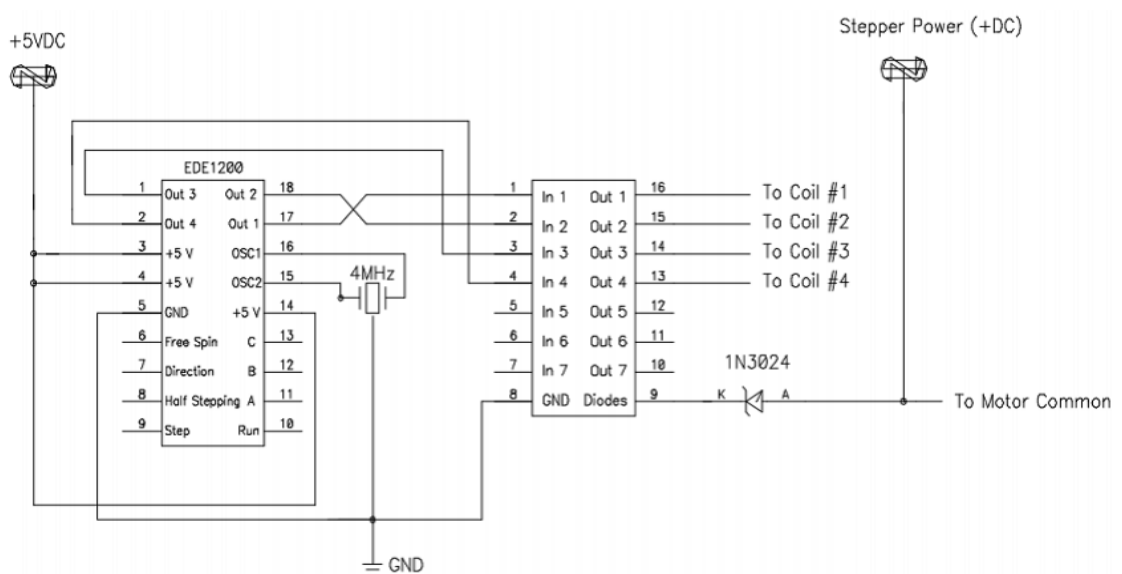
Le schéma illustré en figure II.13 repose sur quatre transistors MJE3055, chacun associé à une diode de protection et une résistance de base. Ce circuit est conçu pour piloter des moteurs pas à pas à forte consommation de courant. Les huit broches de commande de l'EDE1200 doivent être connectées soit à la sortie parallèle d'un ordinateur, soit à un port de sortie 8 bits d'un microcontrôleur.



FigII.13: Commande de quatre transistors par l'EDE1200 [11].

Le deuxième schéma, illustré en figure II.14, utilise le circuit intégré ULN2003A avec l'EDE1200 pour alimenter un moteur à faible consommation de courant.

Si une intensité plus grande est requise, l'ULN2803A peut être sélectionné, car ses 8 entrées et 8 sorties peuvent être reliées en parallèle pour accroître le courant de sortie. Dans cette situation, il n'est pas requis d'ajouter des résistances ou des diodes de protection, car elles sont déjà incorporées dans le boîtier du composant. [12]



FigII.14: Association de l'EDE1200 et ULN2003A [11].

II.5. Commande des moteurs pas à pas par microprocesseur :

La commande des moteurs pas à pas par microprocesseur est une application courante en électronique et en automatisation. La dernière approche se concentre sur la commande de ces moteurs à l'aide des microcontrôleurs PIC. [11]

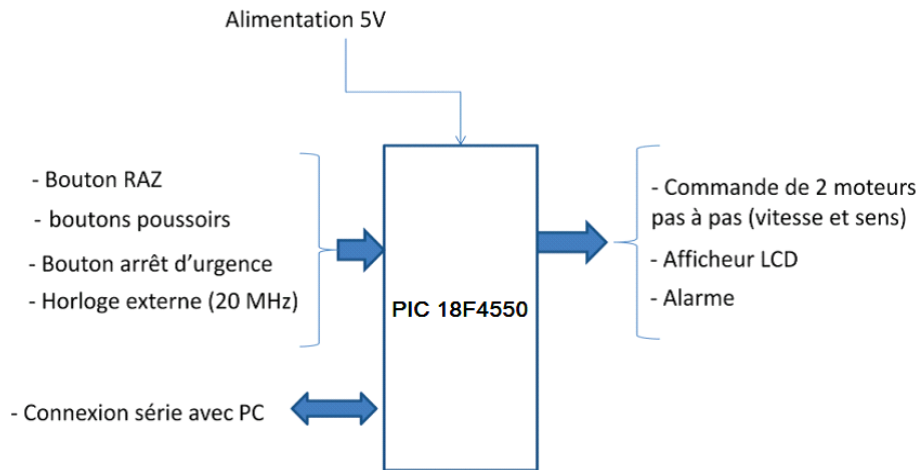
II.5.1. La présentation des microcontrôleurs PIC :

Les microcontrôleurs PIC, élaborés et produits par Microchip, s'appuient sur une architecture RISC (Reduced Instruction Set Computer) qui se distingue par un jeu d'instructions restreint, à l'opposé de l'architecture CISC (Complex Instruction Set Computer) qui recourt à une collection d'instructions plus sophistiquée. L'architecture Harvard qu'ils emploient se caractérise par le recours à deux bus séparés pour la transmission des données et des instructions, ce qui permet l'exécution d'une instruction tout en accédant à la suivante en mémoire. Ce traitement en parallèle permet d'accélérer considérablement l'exécution des opérations comparé aux microprocesseurs CISC.

Les commandes des microcontrôleurs PIC, habituellement codées sur 12 ou 14 bits, sont réalisées en un seul cycle d'instruction, permettant ainsi une exécution rapide. En outre, ces microcontrôleurs possèdent des caractéristiques avancées comme le système de surveillance et le mode veille. Le watchdog représente un dispositif de sécurité qui autorise la réinitialisation automatique du microprocesseur en présence d'une anomalie dans le programme. Quand il est en marche, le logiciel doit le réinitialiser de temps à autre, sous risque d'entraîner une RÉINITIALISATION du système.

Concernant la fonction SLEEP, elle offre une façon de minimiser l'utilisation d'énergie en mettant le microcontrôleur en mode veille : l'horloge interne s'interrompt tandis que les lignes de sortie maintiennent leur état logique. Le microcontrôleur ne peut être sorti que par un reset ou à l'issue du délai du watchdog. Ces attributs positionnent les PIC comme des options fiables et performantes pour une multitude d'applications électroniques.

La structure générale de la carte de commande est illustrée dans le schéma synoptique de figure II.15. Une description plus détaillée de cette interface sera abordée dans le chapitre suivant. [11]



FigII.15: Schéma synoptique de la carte de commande [11]

II.6. Commande des moteurs pas à pas avec une carte d'acquisition :

L'emploi d'une carte d'acquisition pour contrôler un moteur pas à pas offre une maîtrise fine du mouvement en rendant l'interaction avec un ordinateur ou un microcontrôleur plus aisée. Elle sert d'interface en produisant les signaux nécessaires pour l'activation séquentielle des bobines du moteur, assurant ainsi un mouvement contrôlé et fluide.

II.6.1. Mode de fonctionnement :

La carte d'acquisition déchiffre les directives d'un logiciel ou d'un microcontrôleur et les transforme en impulsions électriques qui seront envoyées aux pilotes du moteur. Ces impulsions régulent :

- Le sens de rotation, en fonction de la séquence appliquée.
- La vitesse, déterminée par la fréquence des impulsions.
- Le mode de fonctionnement, qu'il s'agisse du pas entier, du demi pas ou du micropas.

II.6.2. Les applications :

Les moteurs pas à pas, gérés par une carte d'acquisition, sont couramment employés dans différents secteurs, tels que :

- L'automatisation industrielle, pour une maîtrise précise des machines et des procédés.
- L'impression 3D et les machines CNC, où ils garantissent un mouvement exact et reproductible.
- Les outils de mesure et d'analyse scientifique requièrent un placement précis.

- Les équipements biomédicaux, dans lesquels un mouvement précisément maîtrisé est primordial.

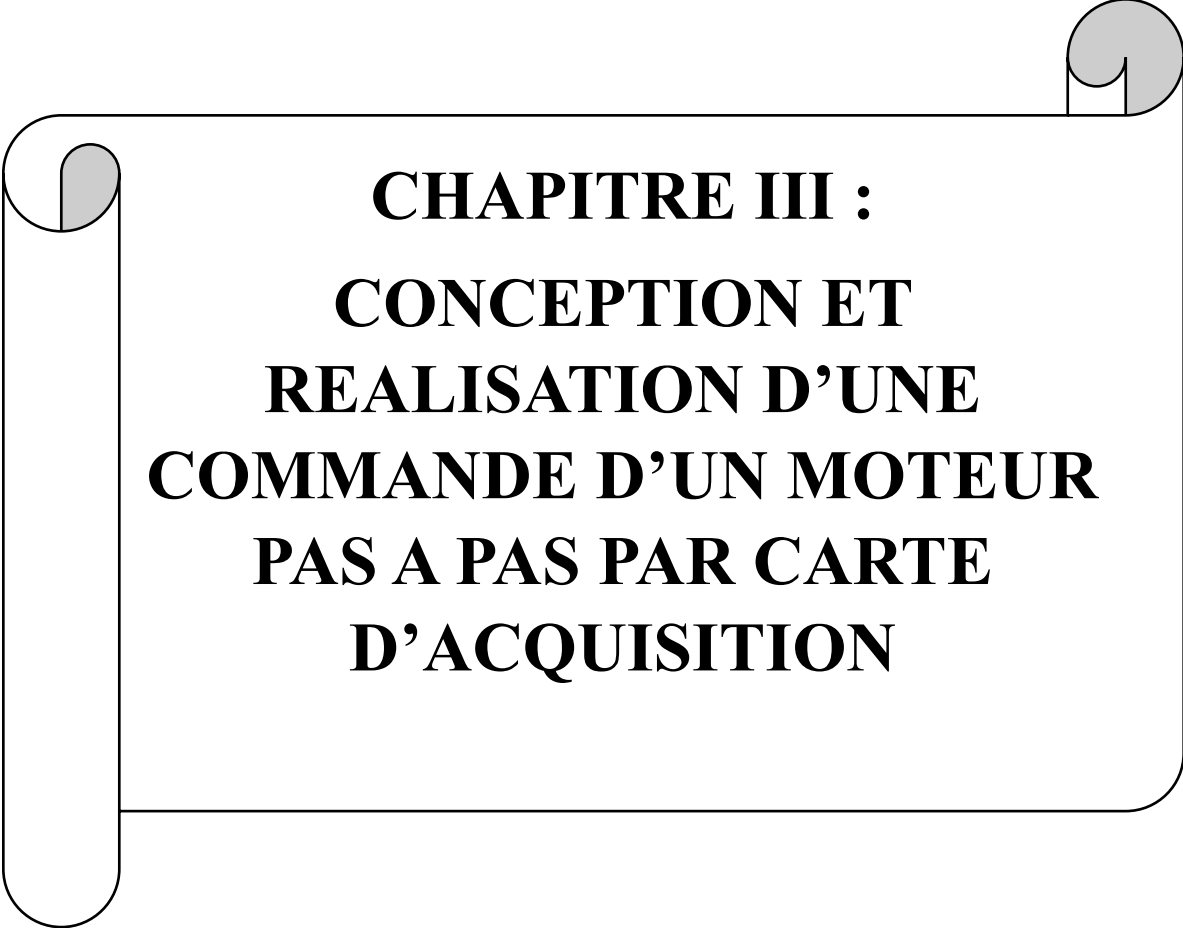
Pour résumer, le recours à une carte d'acquisition pour contrôler un moteur pas à pas offre une grande souplesse, augmente la justesse du pilotage et facilite l'interconnexion avec d'autres systèmes électroniques et informatiques.

II.7. Conclusion :

Les moteurs pas à pas sont un choix efficace pour les applications qui nécessitent un positionnement précis et un contrôle strict des mouvements. Il existe plusieurs façons de les contrôler, comme l'utilisation de circuits logiques standards, de microcontrôleurs ou de circuits intégrés spécialisés. Chaque option présente des avantages et nécessite des compromis en termes de coût, de simplicité et de performances.

L'utilisation de circuits non spécialisés améliore la rentabilité tout en offrant une plus grande flexibilité de conception. Cependant, afin de garantir des performances stables et d'éviter les pertes par paliers, il est nécessaire de gérer avec précision le courant et les signaux de contrôle.

Pour résumer, la sélection du mode de commande devrait se faire en fonction des besoins spécifiques de l'application, tout en considérant la précision, la rapidité et la fiabilité, pour assurer une performance optimale du moteur pas à pas.



**CHAPITRE III :
CONCEPTION ET
REALISATION D'UNE
COMMANDE D'UN MOTEUR
PAS A PAS PAR CARTE
D'ACQUISITION**

III.1. Introduction :

La commande des moteurs pas à pas représente un enjeu fondamental dans de nombreuses applications industrielles, notamment en robotique, en automatisation et dans les systèmes de positionnement de haute précision. Ces moteurs se caractérisent par leur aptitude à réaliser des déplacements angulaires par pas fixes, offrant ainsi un contrôle précis sans nécessiter l'utilisation de capteurs de position sophistiqués.

Dans le cadre de ce projet, l'objectif est de développer un système de commande pour un moteur pas à pas en utilisant un driver L298N, une carte d'acquisition de données, ainsi que le logiciel de programmation graphique LabVIEW. L'objectif principal est de concevoir une interface utilisateur intuitive sous LabVIEW, permettant de contrôler en temps réel les paramètres essentiels du moteur : l'angle de rotation, le sens de rotation et la vitesse.

Le driver L298N assure l'alimentation et le pilotage des bobines du moteur, tandis que la carte d'acquisition établit la communication entre l'environnement logiciel LabVIEW et le système physique. LabVIEW, quant à lui, permet la création d'une interface interactive ainsi que la génération des signaux de commande nécessaires au bon fonctionnement du moteur.

Ce projet vise ainsi à approfondir la compréhension du fonctionnement des moteurs pas à pas, du rôle des drivers de puissance tels que le L298N, ainsi que des méthodes d'interfaçage entre un environnement logiciel et un système physique à travers LabVIEW.

III.2. Composants principaux du montage :

III.2.1. Définition du moteur pas à pas NEMA 17 :

Le moteur pas à pas NEMA est un moteur pas à pas couramment utilisé, qui fait référence à un type de moteur dont les dimensions externes sont de 42 mm x 42mm. Il a une précision de positionnement élevée, d'excellentes performances de contrôle et des caractéristiques de fonctionnement stables et fiables, il est donc largement utilisé dans les systèmes de contrôle de mouvement de divers équipements mécaniques.

La caractéristique du moteur pas à pas NEMA 17 est qu'elle a 4 phases, la différence de phase de chaque phase est de 90 degrés, et une étape est l'excitation d'une phase. Chaque moteur pas à pas peut produire un mouvement de pas précis, ce qui le rend très adapté aux applications qui nécessitent un contrôle précis du mouvement. Dans le contrôle de l'équipement mécanique, les moteurs pas à pas NEMA 17 peuvent contrôler avec précision la vitesse et la direction du mouvement du moteur en contrôlant le courant. [13]



Fig III.1: Moteur pas à pas NEMA 17. [13]

III.2.1.1 Les caractéristiques :

Phase nombre : 2

Pas : 1.8° (standard) ou 0.9° (haute résolution)

Poids du moteur : 357g

Hauteur du corps du moteur : 48mm

Courant nominal : 1.8A

Couple de maintien (N.m) : 0.52N.m

Résistance par phase : 1 à 5 ohms. [13]

III.2.2. Définition du driver L298N :

Le L298N est un circuit intégré (CI) conçu pour le pilotage de moteurs électriques, principalement des moteurs à courant continu (DC) et des moteurs pas à pas bipolaires. Il fait partie de la catégorie des drivers de puissance, permettant d'interfacer un microcontrôleur (comme Arduino ou Raspberry Pi) avec des moteurs, tout en assurant une adaptation de courant et de tension entre les deux.

Le L298N repose sur l'architecture du double pont en H, une topologie électronique qui permet de contrôler indépendamment la direction et la vitesse de rotation d'un moteur électrique.



FigIII.1:Driver L298N.

III.2.2.1. Les caractéristiques :

Type : Double pont en H

Tension d'alimentation (moteurs) : 5V à 35V

Tension logique : 5V

Courant de sortie : Jusqu'à 2A par canal (1-1.5A conseillé en continu avec dissipateur)

Nombre de moteurs contrôlables : 2 moteurs DC **ou** 1 moteur pas à pas bipolaire

Nombre de canaux : 2 canaux indépendants

Fréquence PWM maximale : Environ 25 kHz

Protection thermique : Oui (intégrée)

Régulateur 5V intégré : Oui (activable via jumper "5V EN")

Chip : L298N

III.2.3. Définition carte d'acquisition NI USB-6009 DAQ :

L'USB-6009 est un équipement multifonction pour l'acquisition de données à prix abordable. Il est équipé de ports d'entrée/sortie analogiques et numériques ainsi que d'un compteur de 32 bits. L'USB-6009 propose des fonctions de base pour des applications comme la collecte de données basiques, les mesures sur le terrain et les expériences pratiques destinées à l'éducation. Il est présenté dans un boîtier mécanique léger et fonctionne grâce au bus, ce qui facilite son déplacement. Il est possible de relier aisément des capteurs et signaux à l'USB-6009 grâce à une connexion par bornier à vis. Le logiciel pilote NI-DAQmx et l'outil de configuration intégré facilitent la configuration et la prise de mesures. [14]



FigIII.2: Carte d'acquisition NI USB-6009 DAQ. [14].

III.2.3.1. Les caractéristiques :

Entrées analogiques

- Nombre de canaux :
- 8 canaux différentiels
- 14 canaux référencés à la terre
- Résolution : 14 bits
- Plages de tension : ± 10 V, ± 5 V, ± 2 V, ± 1 V
- Taux d'échantillonnage max : 48 kS/s (partagé entre tous les canaux).

Sorties analogiques

- Nombre de canaux : 2
- Résolution : 12 bits
- Plage de tension : 0 à 5 V
- Taux de mise à jour : 150 S/s (échantillons par seconde)
- Entrées/sorties numériques
- Nombre de lignes : 12
- Type : bidirectionnelles (configurables en entrée ou sortie)
- Niveau logique : TTL (0–5 V)

Compteur

- Nombre : 1
- Taille : 32 bits
- Fonctions : comptage d'événements, mesure de fréquence, détection de période

Connectivité

- Interface : USB 2.0 (alimentation et communication via USB)
- Connecteur : Bornier à vis 37 broches (DB-37)

Autres caractéristiques

- Alimentation : par le port USB (pas de source externe nécessaire)
- Boîtier : léger, compact et portable
- Température de fonctionnement : 0 à 55 °C
- Poids : environ 120 g

Compatibilité logicielle

- Pilote : NI-DAQmx
- Logiciels compatibles :
- LabVIEW
- LabWindows/CVI
- NI SignalExpress

- MATLAB
- Python (avec le paquet nidaqmx). [14]

III.2.4. La plaque d'essai :

Une planche à essais, également appelée « breadboard » ou « protoboard », est un dispositif composé de perforations électriquement interconnectées en interne. Cette plaque permet l'insertion de composants électroniques et de fils pour le montage et la création de prototypes de circuits électroniques. Elle est conçue à partir de deux substances, un isolant et un conducteur qui assure la connexion électrique entre les ouvertures, en adoptant une configuration horizontale ou verticale. Elle est utilisée pour concevoir et tester des prototypes de circuits électroniques avant leur intégration mécanique dans les systèmes de production commerciale. Le but est de tester nos projets de manière simple sur elle, étant pleinement opérationnelle, et également d'avoir la possibilité de les ajuster aisément si besoin. [15]



FigIII.3:Une plaque d'essai. [15]

III.2.4.1. Les caractéristiques :

Tension maximale : 5 V à 12 V (parfois jusqu'à 24 V selon le modèle)

Courant maximal par contact : 500 mA (en général)

Résistance de contact : 10 m Ω à 50 m Ω

Fréquence max recommandée :

En dessous de 10 MHz (au-delà, risque de parasites)

Matériau conducteur interne :

Alliage de cuivre ou phosphore-bronze, parfois nickelé

Isolation : Bonne isolation entre les bandes non connectées. [15]

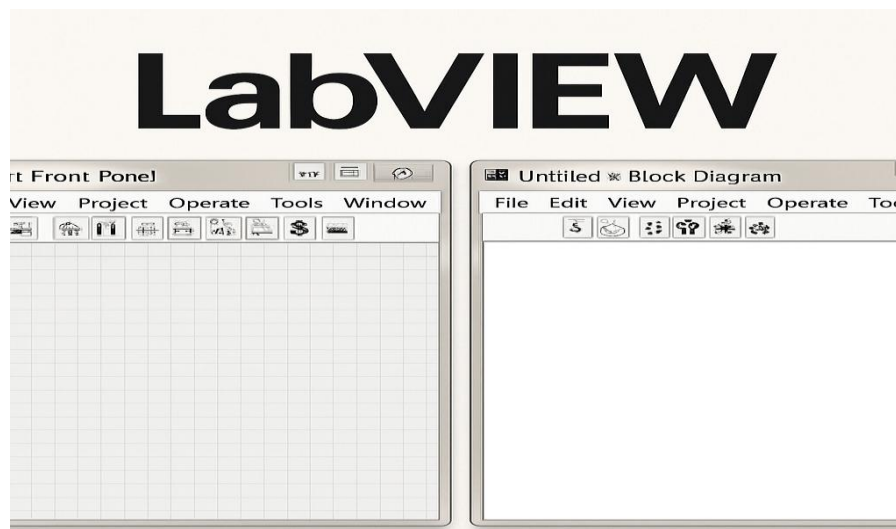
III.2.5. Alimentation :

En électronique, une alimentation est un dispositif ou un circuit fournissant l'énergie nécessaire au fonctionnement des composants d'un montage ou d'un système. Elle convertit de manière régulée une source d'énergie. En fonction de la source, elle adapte la tension ou le

courant afin que ceux-ci correspondent à ceux du circuit. Les valeurs les plus courantes sont 5 volts ou 12 volts ainsi que le type de courant continu ou alternatif.

III.3. Définition de LabVIEW :

LabVIEW (abréviation de Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) constitue le noyau d'une plateforme dédiée à la conception de systèmes de mesure et de contrôle, reposant sur un environnement de développement graphique proposé par National Instruments. Sur cette plateforme, on utilise un langage graphique dénommé « G ». Initialement développé pour Apple Macintosh en 1986, LabVIEW est principalement employé dans le domaine de la mesure via l'acquisition de données, la gestion d'instruments et l'automatisation industrielle. La plateforme de développement fonctionne sur divers systèmes d'exploitation tels que Microsoft Windows, Linux et Mac OS X. LabVIEW est capable de produire du code non seulement pour ces systèmes d'exploitation, mais aussi pour des plateformes en temps réel, des systèmes intégrés ou des éléments FPGA reprogrammables. [16]



FigIII.4:LabVIEW.

III.3.1. Les principaux usages de LabVIEW :

LabVIEW permet de :

- Rassembler et stocker des données physiques (comme la température, la pression, la vitesse, etc.) grâce à des capteurs et des cartes d'acquisition, telles que le modèle NI USB-6009 ;
- Visualiser ces données en temps réel (graphiques, indicateurs, compteurs, etc.) ;
- Contrôler des actionneurs tels que des moteurs, des relais, des LED, etc. ;
- Concevoir des interfaces utilisateur interactives (boutons, curseurs, indicateurs, etc.) ;
- Manipuler et analyser les signaux. [17]

III.4. Les modes de fonctionnement :

III.4.1. Full Step (Couple Normal):

En mode opérationnel, une seule bobine est alimentée à la fois.

C'est l'option la plus facile, mais elle présente un couple inférieur.

III.4.1. 1. Caractéristiques :

- Nombre de pas par rotation : 4
- Dégréé par pas : 90°
- Puissance : Faible
- Usage : Minime
- Flexibilité du mouvement : Moyenne

À chaque étape, une seule bobine est mise en marche.

Table III.1.: Étapes d'activation des bobines pour rotation horaire (Full Step-couple normal)

Etape	Phase A	Phase B	Phase C	Phase D
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1

III.4.1.2. Code LabVIEW :

Structure « Cas » (Conditionnel)

- Elle contrôle si l'option de fonctionnement est activée (True).
- Dans ce cas, la séquence de rotation est mise en œuvre.

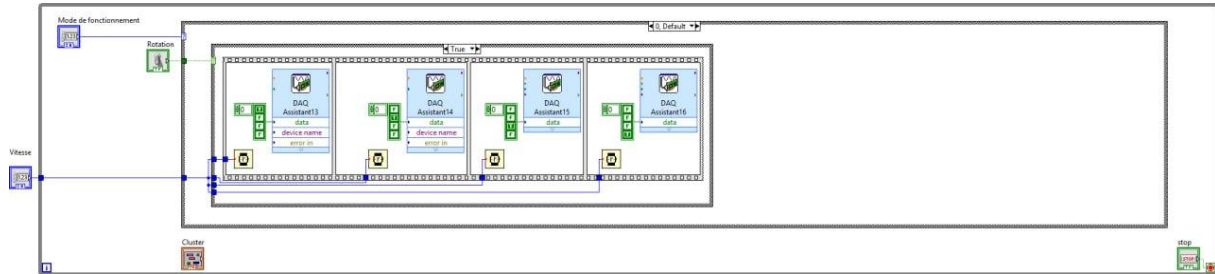
Structure de séquence à plat (Flat Sequence Structure) :

- Comprend 4 étapes, qui transmettent chacune un signal distinct à travers un Assistant DAQ.
- Chaque étape correspond à l'activation d'un bobinage du moteur.
- Une pause (delay) est effectuée après chaque signal en fonction de la vitesse sélectionnée.
- Pas de boucle While à l'horizon ici, par conséquent, le code exécute une seule série de 4 étapes à chaque occurrence.
- Pour assurer une rotation continue, il est nécessaire d'incorporer une boucle While autour de la séquence.

Chapitre III : Conception et réalisation d'une commande d'un moteur pas à pas par carte d'acquisition

- Un bouton « Arrêter » offre la possibilité de mettre fin au programme de manière ordonnée.

C'est le code que nous avons utilisé sur LabVIEW :



FigIII.5:Code de commande d'un moteur pas à pas Full Step (Couple Normal) sur block diagram (Boucle while true).

III.4.1.3. Contrôle du Sens de Rotation (Orientation) :

Pour faire le contraire (sens horaire ↔ antihoraire), il est nécessaire de lire la suite dans l'ordre inversé.

- Direction horaire : de la phase 1 à 4
- Sens inverse : de l'étape 4 à 1 (ordre contraire)

III.4.1.4. Contrôle de vitesse :

Ajustable en modifiant le délai entre 4 étapes. Plus le délai est petit, plus la vitesse du moteur augmente.

III.4.2. Full Step (Couple Maximum):

Dans ce mode, à chaque étape, deux bobines sont activées en même temps.

Cela augmente le couple moteur.

III.4.2.1 Caractéristiques :

- Nombre de pas par rotation : 4
- Angle par rotation : 90°
- Couple : Maximum
- Consommation : De moyenne à forte
- Flexibilité du mouvement : Moyenne
- Avantage : plus de couple (peut tourner plus rapidement sans perdre de pas)

Pour un couple plus élevé, deux bobines sont mises en marche en même temps à chaque étape.

Table III.2:Étapes d'activation des bobines pour rotation horaire (Full Step-couple maximum)

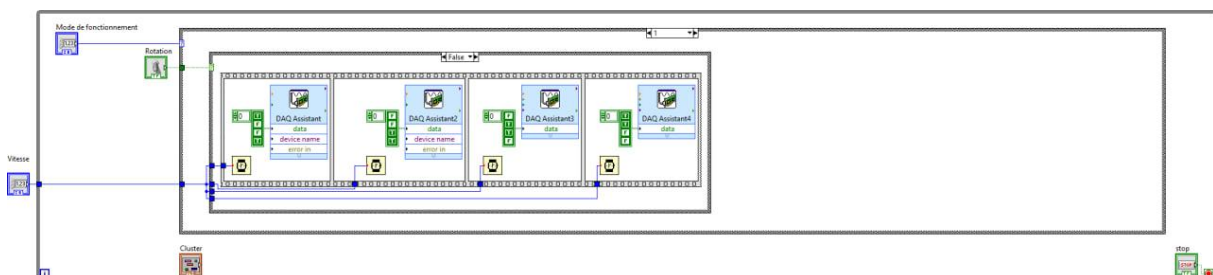
Etape	Bobine A	Bobine B	Bobine C	Bobine D
1	1	1	0	0
2	0	1	1	0
3	0	0	1	1
4	1	0	0	1

Le programme s'exécute dans une boucle While, en continu. Il s'arrête quand on clique sur le bouton "Stop".

"Clutter" est visible mais non utilisé dans le code.

Objectif : Lire automatiquement plusieurs capteurs selon le mode sélectionné (Rotation activée ou non).

C'est le code que nous avons utilisé sur LabVIEW :



FigIII.6:Code de commande d'un moteur pas à pas Full Step (Couple Maximum) sur block diagram (Boucle while false).

III.4.2.2. Contrôle du Sens de Rotation (Orientation) :

Inverser la séquence pour modifier le sens de rotation.

- Direction horaire : respecter la séquence 1 → 2 → 3 → 4
- Direction inversée : respecter la séquence 4 → 3 → 2 → 1

III.4.2.3. Contrôle de la vitesse :

En surveillant le chronométrage entre les pas.

III.4.3. Demi-pas (Half Step) :

On alterne entre :

- Une bobine uniquement activée (couple faible)
- Deux bobines activées (couple fort)

III .4.3.1Caractéristiques :

- Étapes par rotation : 8
- Degré par étape : 45°
- Couple : variable (de minimal à maximal)
- Consommation : Variable
- Variabilité du mouvement : Parfaite

On alterne entre une et deux bobines activées pour multiplier la résolution par deux.

Table III.3:Étapes d'activation des bobines pour rotation horaire (Demi-pas (Half Step))

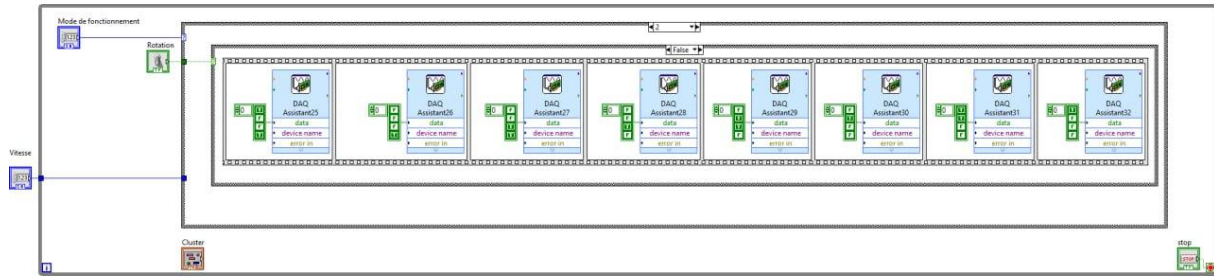
Etape	Phase A	Phase B	Phase C	Phase D
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1

III.4.3.2. Résumé du fonctionnement :

- Ce programme recueille les informations de 8 capteurs à l'aide de blocs DAQ Assistant.
- Il opère en se basant sur un mode de fonctionnement choisi par l'utilisateur (dans ce cas précis, le mode 2).
- Les lectures sont effectuées dans une boucle For, une pour chaque capteur.
- Il fait également appel à une valeur nommée Rotation et une autre dénommée Vitesse.
- Un bouton d'arrêt sert à mettre fin au programme.

Objectif : Lire simultanément plusieurs capteurs en suivant un mode prédéfini.

C'est le code que nous avons utilisé sur LabVIEW :



FigIII.7:Code de commande d'un moteur pas à pas Demi-pas (Half Step) sur block diagram (Boucle while false).

III.4.3.3. Contrôle du Sens de Rotation (Orientation) :

- Dans Sens horaire : étape 1 à 8
- Sens antihoraire : étape 8 à 1

III.4.3.4. Contrôle de la vitesse :

Un nombre accru de pas par rotation offre une précision plus élevée, néanmoins, cela exige plus de cycles pour accomplir un tour complet – il est donc essentiel de coordonner le timing avec exactitude pour conserver une vitesse de rotation constante.

III.4. 4. Vitesse et orientation :

Il est possible d'ajuster chaque mode d'opération pour changer la vitesse et la direction du moteur. Le contrôle de la vitesse se fait par la fréquence des impulsions, tandis que l'orientation est déterminée par la direction des impulsions.

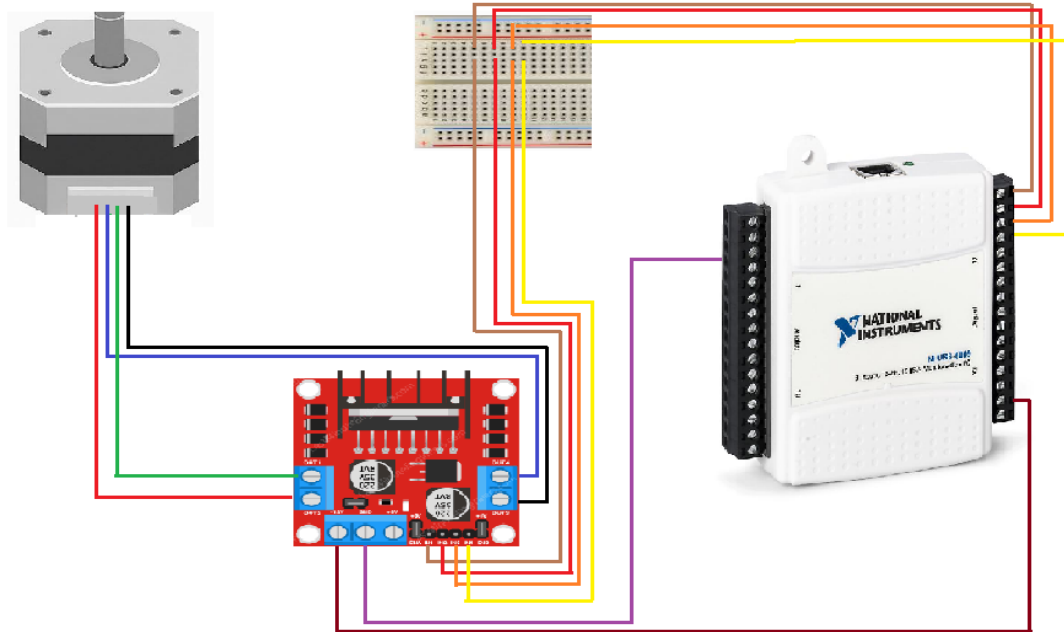
III.5. Commande d'un moteur pas à pas avec NI USB-6009 :

Une fois que le montage est effectué correctement et que la carte NI USB-6009 est paramétrée pour transmettre des signaux numériques, le moteur pas à pas entame son déplacement. Le dispositif NI USB-6009, habituellement contrôlé par un logiciel tel que LabVIEW, envoie des signaux binaires (0 et 1) aux entrées du contrôleur de moteur (qui est fréquemment un module ULN2003 ou L298N). Ce dispositif fonctionne comme un amplificateur de puissance : il prend les signaux faibles provenant de la carte NI et les transforme en courants assez puissants pour activer les bobines du moteur pas à pas. En actionnant les bobinages de manière séquentielle, le rotor du moteur effectue des rotations par paliers successifs (par exemple $1,8^\circ$ par pas), offrant ainsi une maîtrise extrêmement précise de la position.

Plus la fréquence des signaux envoyés est élevée, plus le moteur tourne rapidement. En manipulant cette fréquence à travers des temporisations programmées, on peut aisément moduler la vitesse de rotation. De plus, le changement de direction de rotation du moteur est réalisable en inversant la séquence des signaux logiques, Si vous inversez l'ordre des signaux envoyés (par exemple, au lieu de A-B-C-D, vous transmettez D-C-B-A), le moteur tourne dans l'autre sens.

Si nous voulons :

- **Changer la vitesse** : en modifiant le temps entre deux impulsions.
- **Modifier la direction de rotation** : en inversant l'ordre des étapes.
- **Faire un nombre de tours précis** : en dénombrant les pas (par exemple : 200 pas équivalent à 1 tour complet pour un moteur ayant un pas de 1.8°).
- **Ajouter des capteurs** : pour automatiser l'arrêt du moteur ou déterminer la localisation.



FigIII.8:Commande d'un moteur pas à pas avec NI USB-600

III.6. Conclusion :

Ce chapitre expose la conception et l'implémentation d'un système de contrôle pour moteur pas à pas, en se servant d'une carte d'acquisition comme intermédiaire entre le moteur et l'ordinateur. L'approche suivie a permis de traiter tant les éléments matériels, par la sélection et le raccordement des composants, que les éléments logiciels, en intégrant la programmation de la carte et l'élaboration de l'interface de contrôle.

L'utilisation de la carte d'acquisition s'est révélée essentielle pour un contrôle précis du moteur, en facilitant une interaction rapide et sûre avec le système informatique. Les résultats confirmés appuient les décisions techniques et démontrent que le système instauré satisfait aux exigences de précision, de fiabilité et de flexibilité.

Ce travail sert de fondation robuste pour des progrès futurs, tels que l'automatisation de mouvements sophistiqués, l'incorporation dans des systèmes plus étendus ou encore la commande à distance par le biais d'interfaces modernes.

Conclusion Générale :

Dans ce mémoire, nous avons mené à bien la conception et la réalisation d'un système de commande pour un moteur pas à pas, réalisé grâce à une carte d'acquisition NI USB-6009 et un driver de puissance L298N. Ce projet vise à développer une solution de commande numérique simple, économique et adaptable, destinée à des applications qui requièrent un contrôle précis de la position et de la vitesse.

Au cours d'une première phase d'analyse théorique, nous avons étudié le fonctionnement des moteurs pas à pas, leurs modes d'excitation (pas complet, demi-pas) et les contraintes associées à leur contrôle. Nous avons aussi examiné les caractéristiques techniques des composants utilisés. Initialement conçue pour l'acquisition de signaux, la carte NI USB-6009 a démontré sa capacité à produire des signaux logiques de commande. Le driver L298N, pour sa part, a été essentiel pour l'adaptation de la puissance entre la carte et le moteur.

Sur le plan matériel, nous avons élaboré une interface électronique garantissant la bonne transmission des signaux de la carte au moteur. D'un point de vue logiciel, une application de contrôle a été conçue pour produire les séquences requises à la rotation bidirectionnelle du moteur, en permettant l'ajustement de la vitesse et du nombre d'étapes.

Les études expérimentales ont validé l'efficacité du système, en démontrant un pilotage stable, réactif et répondant aux attentes. Grâce à l'interface élaborée, le moteur a pu être manipulé avec exactitude, attestant ainsi de la pertinence de la méthode suggérée

Bibliography

- [1] Djedouani.Belal et Ould amhed haiballa mohamed lemine, «Moteur pas à pas le vrai,» Université de Tébessa – Faculté de Technologie – Département d'électrotechnique, Tébessa, Algérie, 2016.
- [2] O. Engineering, «Moteur pas à pas,» [En ligne]. Available: <https://www.omega.fr/prodinfo/Moteur-pas-a-pas.html>.
- [3] C. GOELDEL, moteur pas à pas, Paris: Techniques de l'ingénieur, 1991.
- [4] EEEGuide, «Features of Stepper Motor,» [En ligne]. Available: <https://www.eeeguide.com/features-of-stepper-motor/>.
- [5] y. mahdi, « Moteur PAP,» [En ligne]. Available: <https://fr.scribd.com/document/503288085/Moteur-PAP>.
- [6] F. Nollet, «Lois de commande par modes glissants du moteur pas à pas,» Ecole Centrale de Lille et Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, 2006 (soutenue le 7 décembre 2006).
- [7] P. Mayé, Moteurs électriques pour la robotique, Dunod, 2006.
- [8] GeeksforGeeks, «Applications of Stepper Motor,» [En ligne]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/applications-of-stepper-motor/>.
- [9] steppempotor.fr, «Structure et principe de fonctionnement des moteurs pas à pas à aimant permanent,» [En ligne]. Available: <https://www.steppermotor.fr/article-1266-Structure-et-principe-de-fonctionnement-des-moteurs-pas-%C3%A0-pas-%C3%A0-aimant-permanent.html>.
- [10] P. OGUIC, Moteur pas à pas et PC, Dunod, 2004.
- [11] P. OGUIC, "Moteur pas à pas et PC" 2eme Edition, Dunod, 2004.
- [12] I. E-LAB Digital Engineering, «EDE1200 Unipolar Stepper Motor IC,» E-LAB Digital Engineering, Inc., 1996.
- [13] H. Motor, «Qu'est-ce qu'un moteur pas à pas NEMA 17 ?,» [En ligne]. Available: <https://www.holrymotor.com/fr/what-is-nema-17-stepper-motor.html>. [Accès le 30 mai 2025].
- [14] I. ES-France, « "779026-01 : USB-6009 Boîtier d'E/S multifonction faible coût et driver NI-DAQmx," [En ligne].,» [En ligne]. Available: https://www.es-france.com/14978-779026-01-usb-6009-boitier-d-e-s-multifonction-faible-cout-et-driver-ni-daqmx.html?srsId=AfmBOooBNSQNVtaouOQMYANkKjwMsFDEUxBh50mGjzV0amsf_RVfnjsv6.
- [15] M. M. Abdelkader et . D. M. IZERE Alain, Réalisation d'un système automatisé de la surveillance des paramètres d'un bâtiment d'élevage bovin, Université de Tizi-Ouzou, Département d'Automatique, 2022.
- [16] <https://fr.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>

[17] N. Instruments, «NI (National Instruments),» 7 Aug 2012. [En ligne]. Available: <https://www.ni.com/en/shop/labview.html>.