REPUBLIQE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINESTERE DE L'ENSIEGEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE Dr. YAHIA FARES DE MADEA**
**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**
**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

# Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme **Master** en **Génie Mécanique**
Option **: Mécatronique**

Thème :

# Etude d'un Système de Contrôle et de Génération de Mouvement d'une Table Multiaxe. Application aux Moteur pas à pas

Proposé et dirigé par :

- **Dr. BOUMEHDI** Mouloud
- **Dr. BOUCHEHIDA** Wahid

Présenté par :

> **TRAI** Mustapha
> **GUERBA** Rabeh

**Année Universitaire 2011_2012**

# REMERCIEMENTS

AVEC LE PLUS GRAND HONNEUR QUE NOUS RÉSERVONS CETTE PAGE DE GRATITUDE ET DE RECONNAISSANCE À TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ DE PRÉS OU DE LOIN LE BON DÉROULEMENT ET À L'ÉTUDE DE NOTRE PROJET.

NOUS TENONS À REMERCIER SINCÈREMENT NOS ENCADREURS :

**$D_R$ BOUCHEHIDA** ET **$D_R$ BOUMEHDI** POUR LEURS AIDES INCESSANTES, DE LEURS CONSEILS, DE LEURS CONNAISSANCES INTÉRESSANTES ET POUR TOUS LES ÉCLAIRCISSEMENTS QU'ILS NOUS ONT FOURNIS ET DISPONIBILITÉ TOUT AU LONG DE NOTRE TRAVAIL.

NOUS VOUDRONS, À CETTE OCCASION, EXPRIMER NOTRE PROFONDE RECONNAISSANCE À TOUS NOS ENSEIGNANTS DE DÉPARTEMENT GÉNIE MÉCANIQUE POUR LEUR COLLABORATION, LEUR DISPONIBILITÉ ET LEUR SOUTIEN MORAL TOUT AU LONG DE NOTRE ÉTUDE.

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail, aux êtres les plus chers, et à qui je dois reconnaissance et en qui je ne cesserai de remercier à savoir : mes parents, mes frères et sœurs.

- A tous les amis qui m'ont soutenu durant tout mon cursus universitaire et avec les quels j'ai partagé des moments inoubliables.
- A tous ceux qui m'ont aidé de prés ou de loin a l'élaboration de ce mémoire de fin d'études.
- Enfin à vous qui prenez la peine de lire ce mémoire.

Trai Mustapha

# Dédicace

Je dédie ce travail à a ceux qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de me soutenir, à ceux qui leur amour m'a donné la volonté d'aller toujours de l'avant,

A mes très chers parents, que Dieu les protège

A mes chère sœurs et me très cher frère

A ma famille et à tous mes amis.

Guerba Rabeh

# Liste des symboles

$u_a$ et $u_b$ ……Tensions des phases A et B [v].

$i_a$ et $i_b$……..Courants des phases A et B [A].

$\Psi_b$ et $\Psi_a$…… ..Flux total dans les phases A et B [Wb].

$\Psi_{aa}$ et $\Psi_{bb}$……....Flux propres pour chaque phase [Wb].

$\Psi_{ab}$ et $\Psi_{ba}$……Flux mutuels entre les phases [Wb].

$\Psi_{am}$ et$\Psi_{bm}$…… ..Flux mutuels entre chaque phase et l'aimant du rotor [Wb].

$R$ ……..Résistance de la phase [Ω].

$L$……....Inductance de la phase [H].

$K_m$……Constante de couple [$V_S$ /rad] .

$K_v$……..Coefficient de frottement visqueux [$N_{ms}\ /rad$].

ω……Vitesse de rotation [rad/s].

β …….. Position mécanique du rotor [rad].

$N$……...Nombre de dents du rotor

$e_a$ et $e_b$……..Forces électromotrices des phases A et B [V].

$j$ ……Inertie du rotor [$K_{gm}^2$ ]

$T_d$ ……...Transformation de Park.

$K$……...Couple de détente [$Nm$].

$T_P(\beta)$……Transformation de Park.

$g$ ……..Grandeur électrique quelconque.

$u_a$ et $u_q$……Composants directe e en quadrature des tensions de phase.

$i_a$ et $i_q$ …….Composants directe e en quadrature des courants de phase.

U ……..Alimentation continue de double pont.

$C_i$……..Transistors du double pont H .

$T$…….....Transistor

H……...Le pas de vis [mim]

$L_X$ et $L_Y$…….Langueur de vis X et vis Y[mim]

$\rho$……La masse volumique [$kg/cm^3$]

$j_{rot}$ ……...Moment d'inertie de rotor

$j_{tra}$……Moment d'inertie de translation

$M_X$et$M_Y$……....La masse de vis X Y [g]

$H_1$…….....Profondeur du filet [mim]

# Liste des figures

## Chapitre Ⅰ

Figure-1.1 : Schéma bloc de principe du contrôle d'un moteur pas-à-pas

Figure-1.2 : Principe d'un moteur pas-à-pas à réluctance variable (MRV)

Figure-1.3 : Principe d'un moteur pas-à-pas à aimants permanents (MP)

Figure-1.4 : Principe d'un moteur pas-à-pas hybride (MH)

Figure-1.5. : Représentation d'un moteur pas à pas à réluctance variable

Figure-1.6 : moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques non dentés

Figure-1.7 : Moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques dentés

Figure-1.8 : Moteurs p à p à reluctance variable à plots statoriques dentés décalés

Figure-1.9: Moteur à aimants permanents (MP), structure de base

Figure-1.10: Moteur à aimants permanents (MP), structure de base

Figure-1.11 : Moteur pas à pas à rotor disque P532

Figure-1.12 : Moteur hybride (MH)

Figure-1.13 : Commande dans le mode 1

Figure-1.14 : Commande dans le mode 2

Figure-1.15 : Commande dans le mode 3

Figure-1.16 : Commande dans le mode 4

Figure-1.17 : commande dans le mode 5

Figure-1.18 : Couple en fonction de la position angulaire pour une phase alimentée

Figure-1.19 : couples en jeu lors de déplacement d'un pas

## Chapitre Ⅱ

Figure-2.1: Modèle électrique de moteur MPPH

Figure 2. 2 : Coupe du MPPH Coupe axial, (a) Couple transversale (b)

Figure-2.3: circuit d'alimentation

Figure-2.4 : schéma d'alimentation du MPPH

Figure-2.5 : Modèle électrique de moteur pas à pas

Figure-2.6 : principe de la commande MLI (a)schéma fonctionnel, (b) signal de commande

Figure-2.7 : repère (d, q)

## Chapitre Ⅲ

Figure-3.1.Schéma synoptique du positionneur X Y

Figure-3.2 : Vis-sans-fin

Figure-3.3 : crémaillère

Figure-3.4 : système vis-écrou

## Chapitre Ⅳ

Figure-4.1. Systèmes asservis

Figure-4.2. Asservissement de vitesse

Figure-4.3 Asservissement de position

Figure-4.4.Schéma-Modèle moteur pas à pas

Figure-4.5.Courant de la phase iq

figure-4.6. Courant de la phase id

Figure-4.7.Courant de phase Ia-Ib

Figure-4.8.de la vitesse

Figure-4.9.de position

Figure-4.10.Schéma de simulink du moteur pas à pas

Figure -4.11 .Couple électromagnétique(Nm)

Figure-4.12 .Vitesse de rotation ω (rad/s)

Figure-4.13 .Courants de phases id et iq (A)

Figure-4.14 .tension ud et uq (v)

Figure-4.15.de position

figure-4.16 .Courants ia et ib

Figure-4.17. Des exemples de commande d'une table traçant

# Liste des tableaux

## Chapitre Ⅰ

Tableau-1.1 : Comparaison des performances pour les trois types de moteurs pas à pas

## Chapitre Ⅲ

Tableau-2.1 : illustre les dimensions normalisées pour différents diamètres nominaux du système vis-sans fin

Tableaux-2.2 : construction des paramètres

# Introduction Générale

Les moteurs pas à pas doivent leur nom à leur aptitude à assurer un déplacement mécanique composé d'incréments unitaires appelés pas. Ainsi, dans ce type de moteur, l'application d'un ou plusieurs impulsions de commande provoque le déplacement d'un nombre équivalent de pas. De même, l'application d'impulsions de commande à fréquence fixes provoque le déplacement du moteur à une vitesse de rotation pratiquement constante. Le caractère synchrone du moteur pas à pas permet, par le contrôle de la position ou de vitesse, de garantir la conversion d'information numérique en un déplacement incrémental.

Le principe du moteur pas à pas est connu depuis le début des années trente, ce n'est toutefois que l'avènement de la microélectronique, et plus particulièrement du microprocesseur, qui à permis de mettre en valeur les propriétés des moteurs pas à pas.

Le caractère « digital » de leur commande en fait, en effet, un élément de l'liaison privilégié entre un système à microprocesseur et le monde extérieur.

On trouve ainsi des moteurs pas à pas de nombreux systèmes d'affichage, de réglage de commande. Nous pouvons citer à titre d'exemple les périphérique d'ordinateurs , le tables traçantes, les machines à commande numérique.

L'historique du développement et de l'utilisation des moteurs pas à pas souligne l'importance du système de commande associé ou moteur, Ainsi, un moteur avec une commande mal adoptée peut donner un comportement médiocre tandis que le même moteur, utilisé judicieusement, peut offrir des performances très satisfaisantes.

L'idée de la commande des moteurs pas à pas existait depuis les années 80. A cette époque, les scientifiques ont proposé plusieurs méthodes basées sur les forces électromotrices (f.é.m.) ou la variation de l'inductance en fonction de la position du rotor. Mais l'implantation de ces méthodes avec des composants analogiques ou des processeurs de la première génération a limité leur utilisation. Avec l'arrivée de la nouvelle génération des processeurs de signaux (DSP), rapides et bon marché, les industriels s'intéressent de plus en plus aux algorithmes de commande mécanique en boucle ouverte. Ces algorithmes sont généralement basés seulement sur les mesures des courants et des tensions de phase pour estimer la position et la vitesse du moteur.

L'objectif du présent travail est la commande de la position et de la vitesse d'un moteur pas à pas par Matlab/Simulink.

Puisque que le moteur pas à pas hybride (MPPH) domine le marché des applications de l'actionneur pas à pas, nous l'avons choisi comme application.

Dans notre travail, ce type de moteur possède l'avantage d'associer le phénomène de la réluctance variable à une excitation par aimant permanent.

Pour ce faire, nous avons divisé notre travail en 4 chapitres :

- Dans le 1er chapitre, nous avons donné quelques notions de base sur les moteurs pas à Pas. Nous avons montré les inconvénients et les avantages de trois types de moteurs et la structure de chaque moteur
- La modélisation du MPPH est étudiée dans le 2ème chapitre. Nous avons essayé de donner les équations électriques et mécaniques et avec le mode d'alimentation.
- Dans le $3^{éme}$ , nous avons proposé un mécanisme XY avec la structure mécanique, dans ce même chapitre vous avons expliqué la partie électronique pour la command de la positionneur XY.
- Dans le dernier chapitre nous avons donné une introduction générale aux systèmes asservis de la position et la vitesse. Nous avons aussi montré par des résultats de simulation en utilisant le logiciel Matlab/ Simulink.
- Et en fin, nous avons achevé notre travail par une conclusion générale où on a présenté quelques recommandations et perspectives.

## Chapitre I : Les moteurs pas à pas

**Page**

**1.1. INTRODUCTION**.....09
1.1.1. Définition d'un actionneur pas à pas.....09
1.1.2. Propriétés et applications .....12
1.2. **TYPE PRINCIPAUX DEMOTEURS**.....12
1.2.1. Moteur pas-à-pas à réluctance variable MRV.....12
1.2.2. Moteur pas à pas à aimants permanents MP .....16
1.2.3. Moteur pas-à-pas hybride MH .....19
1.2.4. Comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas.....21
1.3. **MODE DE COMMANDE DES MOTEURS PAS- À- PAS BIPHASÉS**.....21
1.3.1. Mode 1 : commande en pas entier, une phase ON .....22
1.3.2. Mode 2 : commande symétrique en pas entier, deux phases ON.....22
1.3.3. Mode 3 : commande asymétrique en demi pas, une ou deux phases ON……..23
1.3.4. Mode 4 : commande symétrique en demi pas, une ou deux phases ON.....24
1.3.5. Mode 5 : commande micro pas .....24
1.4. **COMPORTEMENT STATIQUE**.....26
1.4.1. Position d'équilibre .....26
1.4.2. Condition pour le déplacement d'un pas .....27
1.5. **COMPORTEMENT DYNAMIQUE**.....28
1.5.1. Généralités .....28
1.5.2. Déplacement autour d'une position d'équilibre .....28
1.6. **FONCTIONNNEMENT ET CARACTERISTIQUE DES MOTEURS PAS -À-PAS** .....28
a. pas angulaire ……29
b. vitesse de rotation ……...29
e. erreur sur le pas ……..29
d. couple de détente ……29
c. couple moteur……..……29

## 1.1. introduction :

### 1.1.1. Définition d'un actionneur pas à pas :

Le moteur pas à pas constitue un convertisseur électromécanique destiné à transformer le Signal électrique (impulsion ou train d'impulsions de pilotage) en déplacement (angulaire ou Linéaire) mécanique. Au point de vue électrotechnique, le moteur classique ressemble à la machine synchrone, dont le stator (le plus souvent à pôles saillants) porte les enroulements de pilotage et le rotor (presque toujours à pôles saillants) est soit muni d'aimants permanents (structure dite polarisée ou active), soit constitué par une pièce ferromagnétique dentée (structure dite réluctance ou passive). Entre le moteur et son alimentation, sont intercalés trois éléments essentiels (Figure-1.1)

- une unité de calcul, qui élabore les impulsions de commande ;
- un modulateur PWM, qui génère les commandes des contacteurs électroniques de commutation ;
- une électronique de commutation (puissance), qui, à partir d'une alimentation, fourni l'énergie vers les enroulements appropriés du moteur.

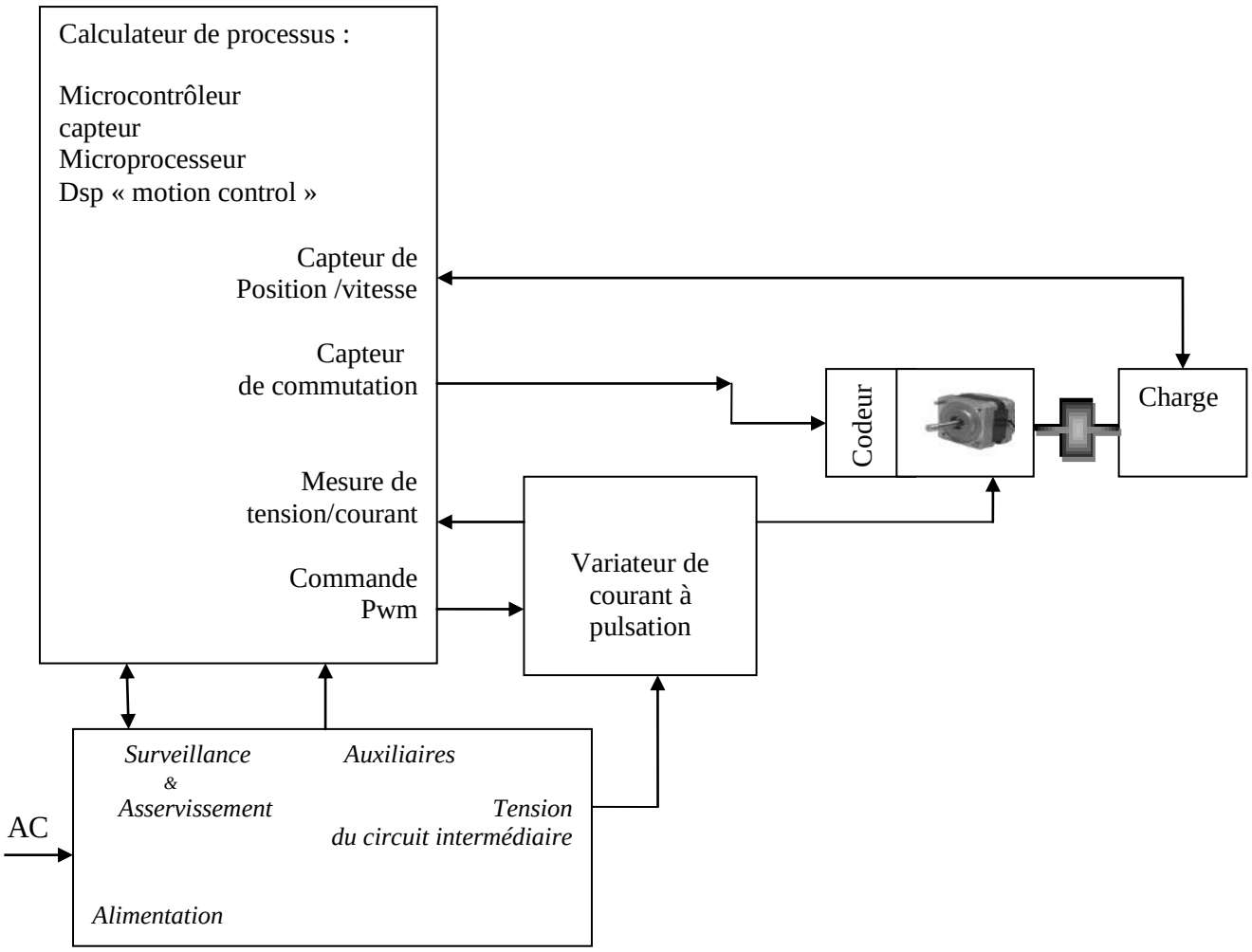



Figure-1.1 : Schéma bloc de principe du contrôle d'un moteur pas-à-pas

L'alimentation de chaque bobinage du moteur par une tension particulière provoque l'apparition d'un courant qui engendre un champ magnétique de direction précise. Le changement séquentiel des tensions particulières à chaque bobinage permet de déplacer la position du champ statorique selon une résolution élémentaire appelée pas. Autrement dit, toutes configurations des tensions aux bornes des bobinages correspondent à un déplacement de la position stable du rotor. Une série bien déterminée de commutation de tensions entraîne un déplacement sur un nombre correspondant de pas. La succession des configurations d'alimentation, à une fréquence donnée, impose un champ statorique tournant avec une résolution d'un micro pas, d'un demi pas ou d'un pas entier.

Le mouvement discret du champ d'entrefer est suivi par le rotor soumis au couple synchronisant. La nature du couple découle :

- soit d'interaction champ (courant) du stator - fer du rotor, lorsque ce dernier présente une structure dentée passive (Figure-1.2) ;
- soit d'interaction champ (courant) du stator - champ (aimant) du rotor, lorsque le rotor comporte un aimant (Figure-1.3).
- soit les deux interactions précédentes simultanément.

L'exemple de la Figure-1.2 (purement didactique, car la réalisation correspondante présenterait des performances médiocres) permet de définir le fonctionnement essentiel du moteur. Le stator à trois pôles saillants (nous dirons par la suite : "à trois plots statoriques" ; Nps = 3) comporte trois bobines (ou trois voies) pouvant être alimentées séparément. Une bobine (ou une voie) d'enroulement, pouvant être alimentée séparément, sera appelée une phase.

Dans le cas du rotor passif (qui, sur la Figure-1.2 , possède deux dents ; Ndr, = 2), le branchement de la phase 1 provoque l'établissement du champ magnétique, qui place le fer mobile dans la position du flux maximal ; ainsi, une dent du rotor s'aligne avec le plot alimenté (Figure-1.2a), la commutation de la tension sur la phase 2 avance le champ, et donc le rotor, d'un pas mécanique angulaire $\alpha_{pm}$, (Figure-1.2b), etc. Le couple synchronisant "courant-fer" est dû à la variation de l'inductance propre de la phase sous tension ou, ce qui revient au même, à la variation de la réluctance offerte au passage du flux statorique qu'elle a Créé. La machine à rotor ferromagnétique passif est appelée : "à réluctance variable" ou "MRV".

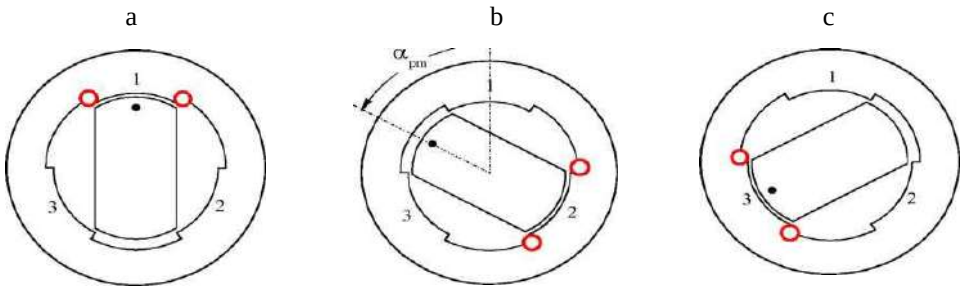



Figure-1.2 : Principe d'un moteur pas-à-pas à réluctance variable (MRV)

Lorsque le rotor est constitué par un aimant (bipolaire, soit na = 1 sur la Figure-1.3), il s'aligne naturellement sur l'axe magnétique du plot alimenté (Figure-1.3a). Le déplacement du champ statorique d'un pas provoque le déplacement du rotor d'un pas angulaire mécanique (Figure-1.3b). L'aimant du rotor étant à perméabilité constante et l'entrefer étant constant, le couple synchronisant "courant-aimant" est dû uniquement à la variation du flux mutuel entre l'aimant au rotor et la phase alimentée du stator. Un moteur tel que décrit ci-dessus (voir Figure-1.3) est appelée à "aimant permanent" ou "MP".

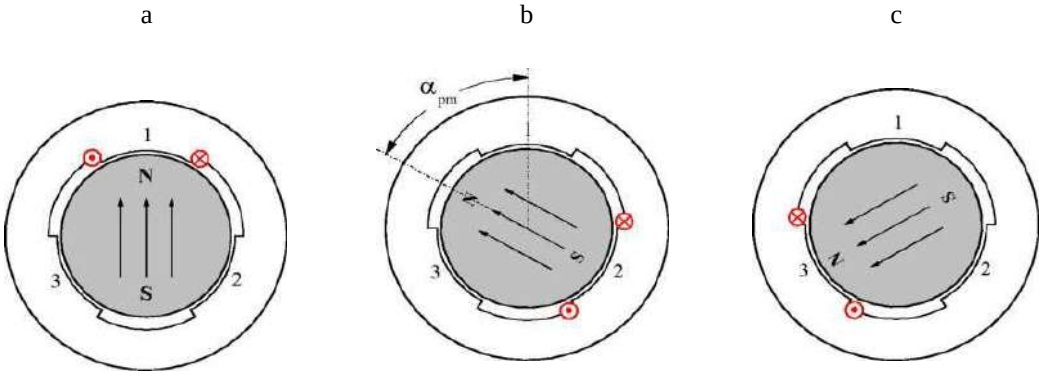



Figure-1.3 : Principe d'un moteur pas-à-pas à aimants permanents (MP)

Une autre structure polarisée, dite "hybride" ou "MH", est illustrée à la Figure-1.4 ; elle comporte un aimant permanent et son principe de fonctionnement est semblable à celui du moteur à aimants permanents MP. Il est toutefois à noter que le couple réluctant (variation de la perméance propre à l'aimant) est plus importante dans ce dernier cas.

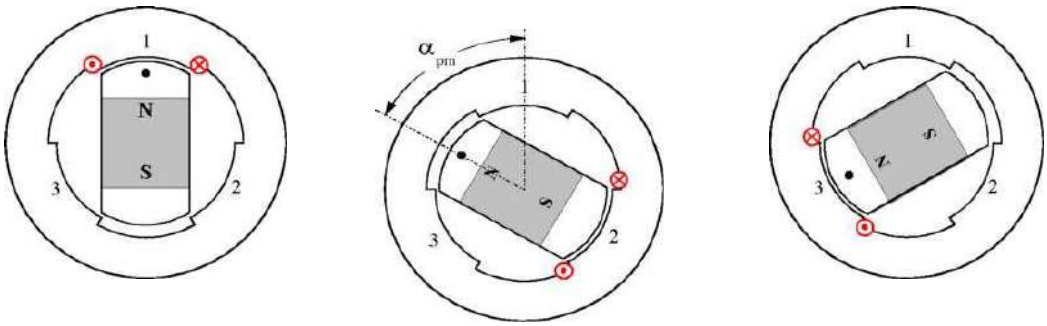



Figure-1.4 : Principe d'un moteur pas-à-pas hybride (MH)

### 1.1.2. Propriétés et applications :

Le moteur pas à pas a été conçu à partir de deux démarches logiques très différentes - d'une part, on a cherché un moteur capable de développer un couple important à faible vitesse, voire même à l'arrêt ;

- d'autre part, on a étudié un dispositif capable de convertir des informations de caractère discret.

Le convertisseur d'énergie à basse vitesse et le transmetteur de l'information sont devenus un moteur pas à pas moderne vers les années 1970, grâce au développement conjugué d l'électronique de puissance et, surtout, grâce à l'apparition de l'électronique numérique à forte intégration.

Le moteur pas à pas est actuellement le principal élément intermédiaire entre les dispositifs de traitement d'information et le monde électromécanique extérieur. Par ailleurs, ses capacités à contrôler la position et la vitesse, par un train d'impulsions de commande, assurent à ce convertisseur des applications comme

- la traction des robots mobiles,
- le fonctionnement en moteur couple de grande puissance,
- l'indexage rotatif ou liméaire.

Dans sa version classique, le moteur pas à pas est alimenté à partir d'une source (de courant ou de tension) continue et le contrôle de la vitesse ou/et de la position s'effectue en boucle ouverte. Le pilotage en boucle ouverte, qui constitue un des principaux avantages du moteur pas à pas, aussi bien du point de vue économique (coût et fiabilité d'installation) que fonctionnel (commande naturelle par "tout ou rien" à partir d'une horloge séparée ou intégrée dans un microprocesseur), présente un certain nombre d'inconvénients comme :

- la limitation du couple de démarrage,
- des instabilités de fonctionnement à certaines fréquences,
- des accélérations relativement modestes,

## 1.2.Type principaux de moteurs :

Trois types principaux de moteurs seront abordés, les moteurs pas-à-pas hybride MH, les moteurs pas-à-pas à aimants permanents MP, les moteurs pas à pas réluctants variable MRV.

### 1.2.1. Moteur pas-à-pas à réluctance variable MRV :

#### 1.2.1.1. Généralités MRV :

Un moteur à réluctance variable possède un rotor en acier doux non magnétique. Ce rotor est constitué d'un nombre de pôles supérieurs celui du stator. Ce dernier se commande à la façon d'un

modèle unipolaire, en alimentant une paire de pole du stator afin d'aligner les pièces polaires du rotor avec les enroulements alimentés.

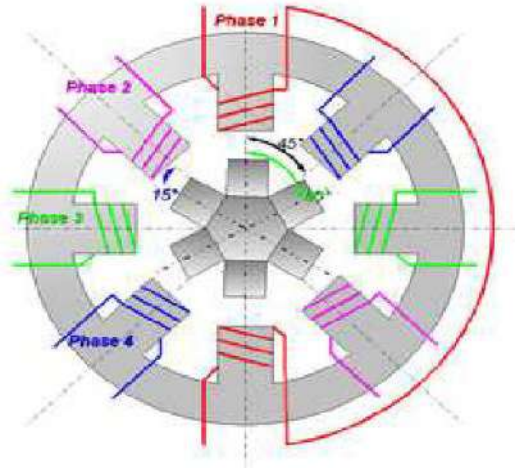



Figure-1.5 : Représentation d'un moteur pas à pas à réluctance variable

### 1.2.1.2. Technologie des moteurs pas-a-pas à réluctance variable :

Les circuits magnétiques du rotor et du stator sont assemblés à partir de tôles magnétiques de haute perméabilité (fer-silicium ou même fer-cobalt). Certaines machines, destinées au positionnement ou a une rotation très lente, peuvent avoir un rotor ou/et un stator en fer-Massif. Il existe un grand nombre d'astuces de construction pour augmenter le nombre de pas par tour, comme par exemple les structures bifilaires qui ne seront pas étudiées.

Pour minimiser la force magnétomotrice et augmenter la puissance massique, l'entrefer des Moteurs pas à pas à reluctance variable doit être aussi petit que possible. Plusieurs géométries Du rotor et du stator ont été ainsi imaginées par les constructeurs pour remplir des cahiers des Charges particuliers.

On distingue trois géométries de base, à savoir :

- Les moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques non dentés
- Les moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques dentés
- Les moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques non denté décalés

#### A) Les moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques non dentés :

Dans les moteurs pas à pas à reluctance variable à plots statoriques non denté, le pas des plots statoriques diffère du pas dentaire du rotor.

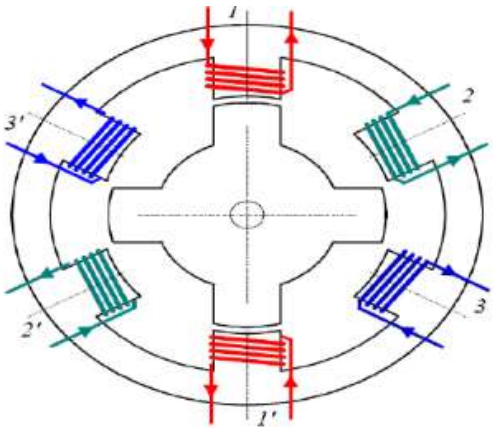
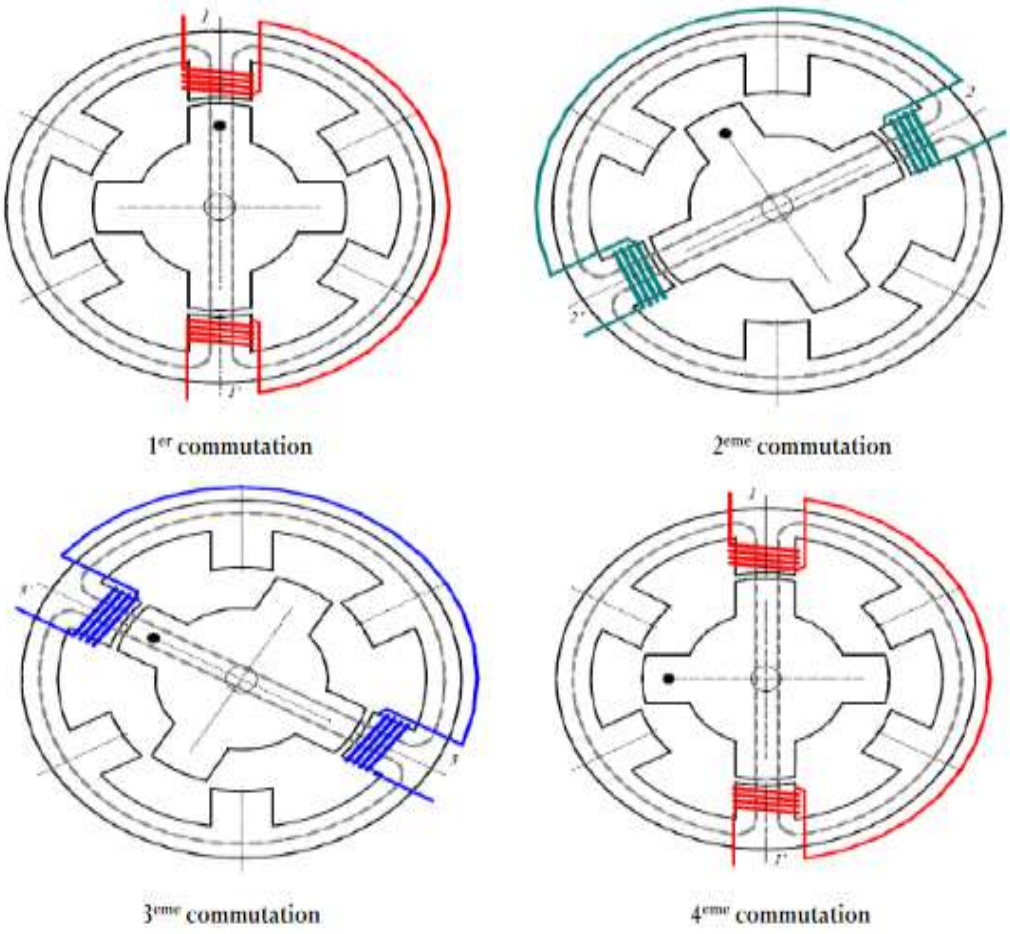



Figure-1.6 : moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques non dentés




## B) Moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques dentés :

Le rotor est uniformément denté et les plots du stator portent également un certain nombre de dents Ndps dont le pas dentaire est identique à celui du rotor Les plots du stator sont répartis symétriquement et le nombre de dents sur leur surface dépend de l·épanouissement des plots.

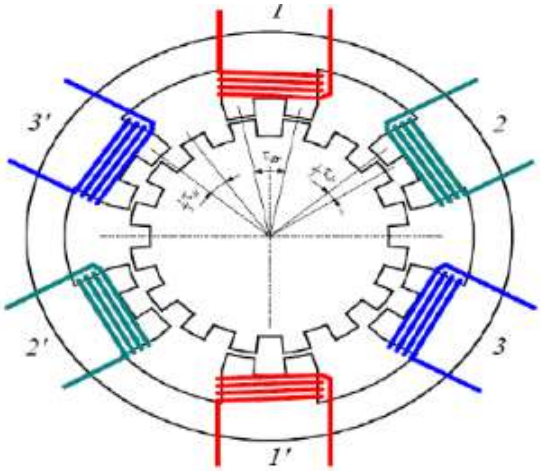



Figure-1.7 : Moteurs pas à pas à réluctance variable à plots statoriques dentés

C) Moteurs pas à pas à reluctance variable à plots statoriques dentés décalés :

Pour un moteur pas-a-pas à reluctance variable, chaque plot statoriques porte l·enroulement d'une phase, mais un seul plot voit ces dents alignées avec les dents du rotor.

La dissymétrie du champ magnétique dans l·entrefer provoque des forces radiales et par conséquent des contraintes dans les paliers et labre du moteur.

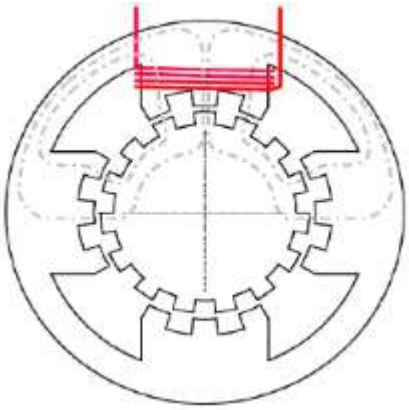


Figure-1.8 : Moteurs pas à pas à reluctance variable à plots statoriques dentés décalés

- **Caractéristique Principale :**

- Tolérance naturelle aux pannes
- Très peu de pertes au rotor
- Robustesse
- Coût de fabrication très faible
- Alimentation électronique relativement simple
- Puissance et couple massiques très élevés

- **Principale inconvénient :**

- Couple à fortes ondulations

- Bruit acoustique élevée
- Mauvais facteur de puissance

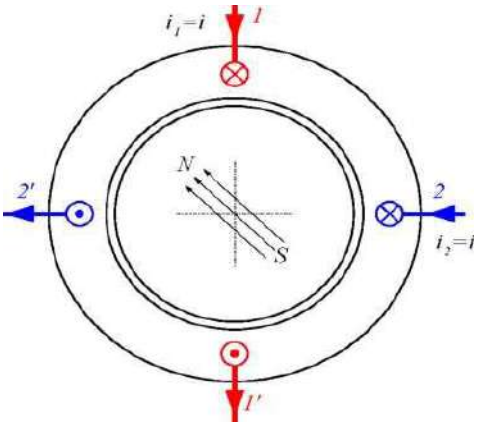
➢ **Utilisation des MRV :**

- L'électroménager
- Accessoires automobile
- Application de haute vitesse

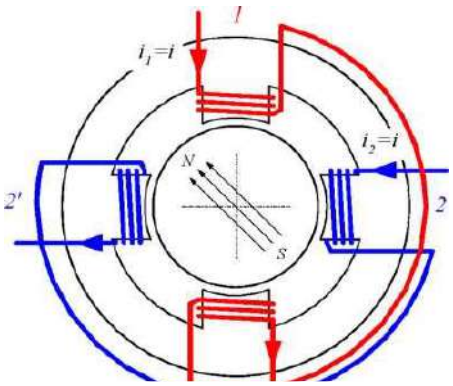
## 1.2.2. Moteur pas à pas à aimants permanents MP :

### 1.2.2.1. Généralités :

Contrairement au cas précédant, ici le moteur (*Permanent Magnet motor PM*).possède 2p aimants au rotor (p : nombre de paires de pôles). Dans ce cas, sans courant dans les m bobinages statoriques, il existe bel et bien un couple réluctant. En observant ce couple il est facile de déterminer le nombre de pas par tour du moteur. Dans sa version simple, le moteur pas à pas à aimants permanents peut être excité par un stator à structure saillante ou à structure lisse. Le rotor possède un seul aimant.




Stator à structure lisse




Stator à structure saillante

Figure-1.9: Moteur à aimants permanents (MP), structure de base

Les deux structures possèdent généralement un aimant permanent mobile, à aimantation Parallèle, qui, en fonction des courants injectés dans chaque voie d'enroulement, fait avancer ou/et positionner le rotor conformément aux axes du champ magnétique créé par la commutation. Le principe de fonctionnement de base est identique pour les structures saillantes et lisses. Par contre, la structure saillante peut présenter un couple réluctant supplémentaire, dit « couple de détente », provenant de l'action de l'aimant sur les plots statoriques. En excitant le stator phase par phase selon

La Figure-1.9., le vecteur représentant l'axe magnétique statoriques accomplit une rotation selon des Angles privilégiés dans le sens horaire ce qui fait avancer le rotor d'un angle incrémental élémentaire définit comme le pas

L'inversion du sens de rotation s'effectue par inversion du sens de rotation de l'axe magnétique statoriques ce qui correspond à une inversion de la séquence d'alimentation des enroulements des différentes phases

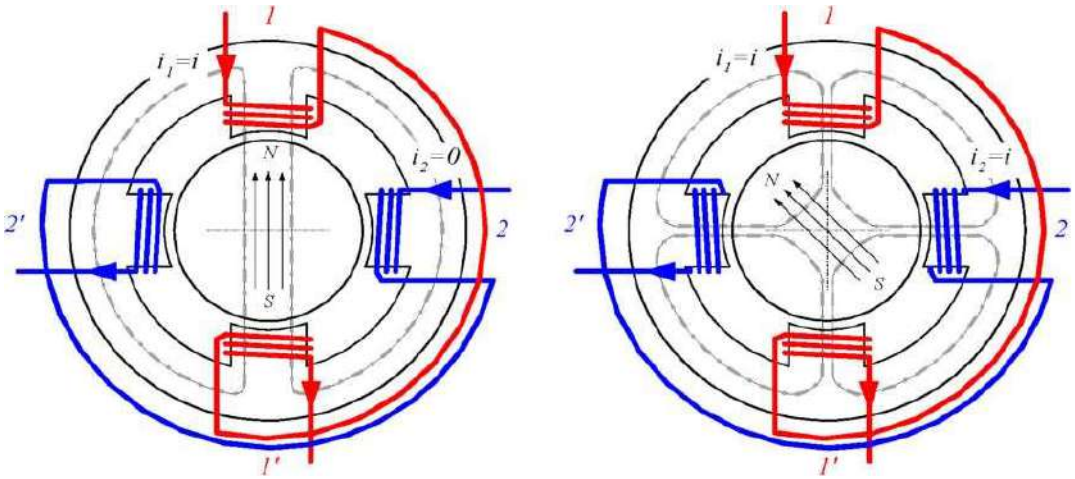



Figure-1.10: Moteur à aimants permanents (MP), structure de base

## 1.2.2.2. Technologie des moteurs pas à pas à aimants permanents :

La construction des moteurs pas à pas à aimants permanents obéit aux règles générales suivantes :

- Le stator, le plus souvent à pôles saillants, est assemblé à partir de tôles magnétiques en fer silicium, isolées par oxydation ou par un vernis.
- L'entrefer entre plots et aimant(s) est maintenu aussi petit que possible.
- Le rotor est constitué soit entièrement par un aimant permanent cylindrique dans lequel on usine une ouverture pour passer l'arbre, soit par une carcasse en fer le plus souvent feuilletée sur laquelle est frettée les aimants Les aimants actuellement employés sont à base de ferrite, de terre rare soit Néodyme – fer ou Samarium - Cobalt ; il s'agit de matériaux magnétique dont la perméabilité relative est proche de 1 et sont pratiquement non conducteurs ; ainsi, l'inductance des enroulements statoriques est indépendante de la position relative rotor – stator et par conséquent le couple dû à la variation des perméances propres et mutuelles des inductances statoriques est pratiquement nul. La Figure-1.2.2 illustre un tel moteur. Le rotor est un disque constitué de p aimants à polarités inversées

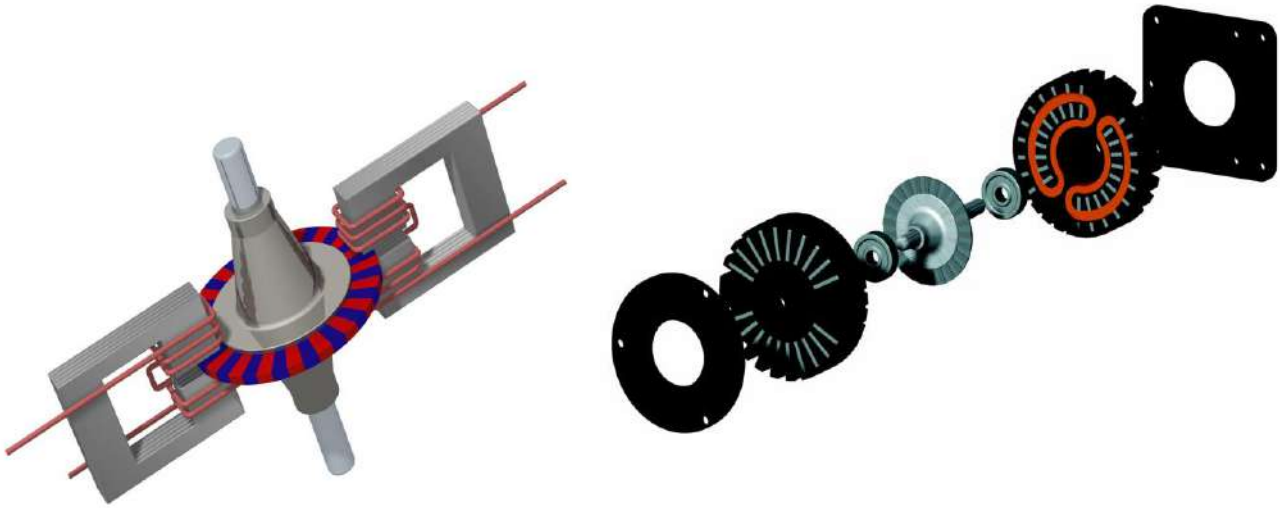


Figure-1.11 : Moteur pas à pas à rotor disque P532

Le rotor du moteur pas à pas présenté à Figure -1.11, consiste essentiellement en un mince disque en samarium-cobalt. Une technique particulière d'aimantation axiale permet d'obtenir un grand nombre de pôles magnétiques de polarité alternée, arrangé uniformément sur le disque. Ce dernier est placé dans l'entrefer entre deux moitiés du stator. L'induit de chaque phase comprend 2 enroulements indépendants qui peuvent être branchées en série ou en parallèle et permettent également l'utilisation d'une commande unipolaire. Il n'y a pas d'inductance mutuelle entre les deux phases. Le moteur à rotor disque possède un couple de détente dû aux variations de perméances propres et mutuelles vues par les aimants (circuit magnétique du stator). Grâce à des techniques de fabrication, il est possible de ramener le couple de détente à un faible niveau. La forme exacte de la distribution du couple en fonction de la position angulaire relative rotor– stator suit en général une fonction mathématique complexe. Grâce à des astuces de construction qui font l'objet de brevets le moteur pas à pas à rotor disque peut avoir une fonction de couple purement sinusoïdale. C'est important pour réduire l'erreur angulaire si on veut effectuer des positionnements sur des micros pas.

## 1.2.3. Moteur pas-à-pas hybride MH :

### 1.2.3.1. Généralités :

En combinant les structures des deux moteurs précédents, c'est à dire en plaçant les aimants du moteur à aimants permanents dans un circuit ferromagnétique on crée un nouveau type de moteur appelé moteur réluctant polarisé ou moteur hybride (***Hybride motor : HB***). Dans ce cas, il existe un couple réluctant provoqué par la variation de perméances propres associées à chaque aimant et à chaque bobine.

### 1.2.3.2. Technologie des moteurs pas à pas hybrides :

Les moteurs pas à pas hybrides réunissent, au moins en partie, les avantages des moteurs pas à pas à réluctance variable et à aimants permanents, à savoir :

- un grand nombre de pas par tour,
- une fréquence propre mécanique importante,
- un couple massique élevé,
- un amortissement interne important,
- une mémoire de position.

Dans sa configuration de base le moteur pas à pas hybride comporte un stator en fer feuilleté à plots saillants et deux couronnes rotoriques dentées en matériau ferromagnétique, géométriquement identiques et réunies par un aimant permanent cylindrique magnétisé axialement. Les lignes de champs de l'aimant se ferment à travers les dents du rotor. Vu du stator, le rotor présente autant de pôles magnétiques actifs qu'il possède de dents. Les dents sur une des couronnes sont décalées par rapport aux dents de l'autre d'un demi-pas dentaire **1/2τdr**. Le nombre de pôles vu au stator est lié au nombre de dents d'une couronne rotoriques par la relation :

$$P = N_{dr} \tag{1.1}$$

Le nombre de pas par tour prend donc la forme

$$N_{pt} = 2m * N_{dr} = 2mp \tag{1.2}$$

Avec :

- p : nombre de pôles magnétiques vu par le stator
- Ndr : Nombre de dents sur une couronne rotorique
- m : nombre de phases (doit être pair)

L'augmentation du nombre de plots statoriques alimentés simultanément permet d'augmenter le nombre de dents du rotor, et donc de diminuer le pas angulaire du rotor. Le même résultat s'obtient par la subdivision des plots en plusieurs dents. Les moteurs pas à pas hybrides comptent parmi les moteurs pas à pas les plus fabriqués. Ils existent aussi bien en structure à circuits simples (single stack), qu'en structure multiple (multi stack) Dans presque tous les cas, les plots dentés du stator présentent le même pas que les dents aimantées du rotor La Figure-1.2.3 illustre un tel moteur.

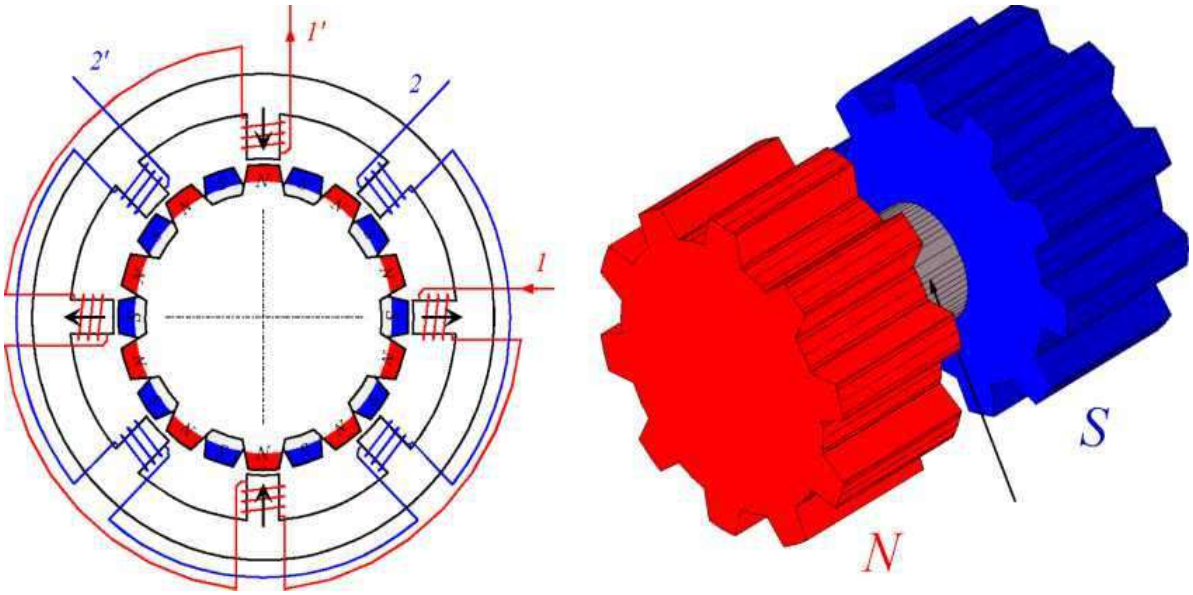



Figure-1.12 : Moteur hybride (MH**)**

Le couple est constitué par la variation des perméances mutuelles bobinages – dents aimantées du rotor (couple électromagnétique) et par un couple réluctant crée principalement par la variation de la perméance propre vu par les aimants (couple de détente) Les dents aimantées de chaque couronne rotorique sont perçues par le stator comme autant d'aimants permanents, l'interaction de ces aimants avec les courants statoriques engendre un couple électromagnétique identique à celui du moteur pas à pas à aimants permanents.

### 1.2.4. Comparaison entre les trois types de moteurs pas à pas :

Le Tableau-1.1 donne une comparaison entre les divers types de moteurs pas à pas :

| Type de moteur pas à pas | Moteur à réluctance variable | Moteur à aimants permanents | Moteur hybride |
|---|---|---|---|
| Résolution (nb de pas par tour) | Bonne | Moyenne | Elevée |
| Couple moteur | Faible | Elevée | Elevée |
| Sens de rotation | Dépend :<br>- de l'ordre d'alimentation des phases | Dépend :<br>- de l'ordre d'alimentation des phases<br>- du sens du courant dans les bobines | Dépend :<br>- de l'ordre d'alimentation des phases<br>- du sens du courant dans les bobines |
| Fréquence de travail | Grande | Faible | Grande |
| Puissance | Quelques Watts | Quelques dizaines de Watts | Quelques KWatts |
| Inconvénients | Pas de mémoire de position | | |

Tableau-1.1 : Comparaison des performances pour les trois types de moteurs pas à pas

## 1.3. Mode de commande des moteurs pas à pas biphasée :

La rotation du moteur s'effectue par une séquence d'alimentation des divers enroulements de phases en unipolaire ou en bipolaire. La génération d'un couple est intimement liée aux courants circulant dans les phases. Chaque commutation entraîne d'une phase transitoire dont la durée peut varier selon le type de contrôle (tension ou courant). Dans cette section seule le régime quasi statique est étudié. Par quasi statique on entend le comportement du moteur autour de ses points d'équilibre. Pour des raisons pédagogiques et vu leur forte utilisation, nous nous limiterons ici aux moteurs biphasés et par conséquent aux moteurs pas à pas à aimants permanents et hybrides

### 1.3.1. Mode 1 : commande en pas entier, une phase ON :

Une seule phase est alimentée à la fois par injection d'un courant nominal In. C'est dans ce mode que le fabricant définit le pas angulaire du moteur. La Figure-1.13 illustre la séquence des alimentations de phases pour un moteur à aimants permanents.

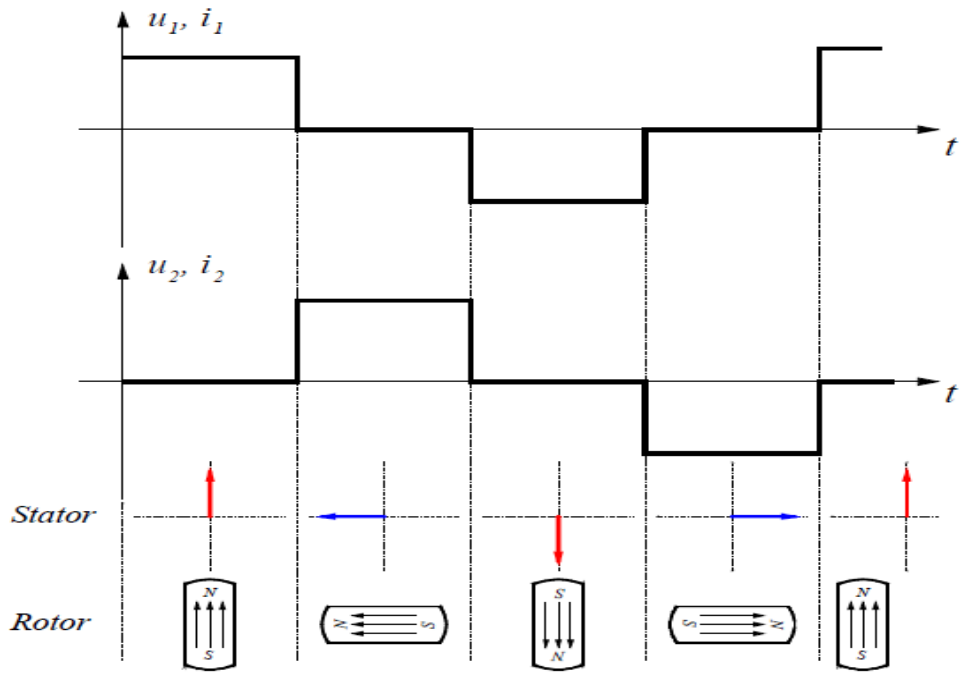



Figure -1.13 : Commande dans le mode 1

### 1.3.2. Mode 2 : commande symétrique en pas entier, deux phases ON :

Deux phases du moteur sont alimentées simultanément par un courant nominal In. Le couple moteur est multiplié par 2 par rapport au contrôle selon le mode 1. Le pas angulaire est identique au mode 1 mais les positions d'équilibre sont intermédiaires aux précédentes. La Figure-1.14 illustre la séquence des alimentations de phases pour un moteur à aimants permanents.

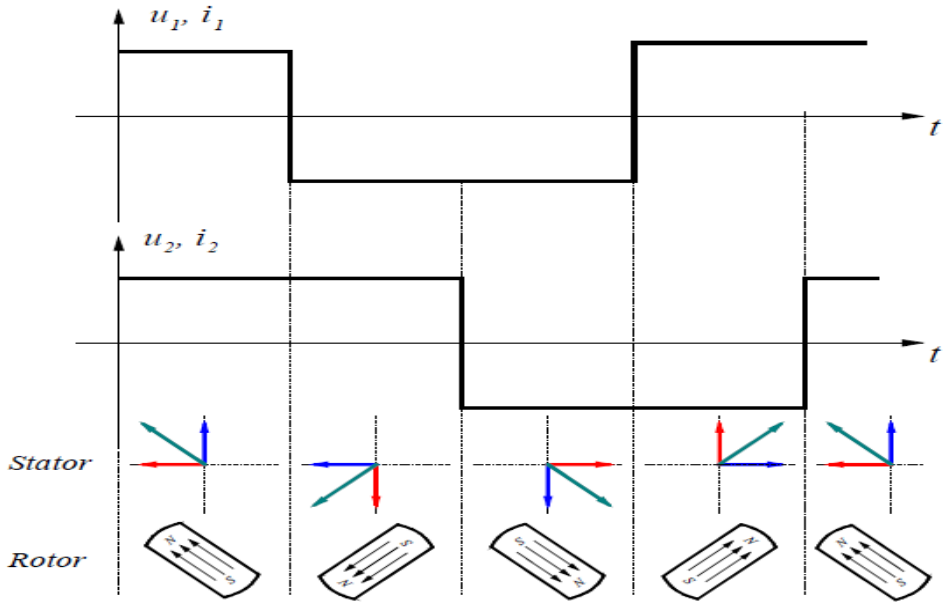



Figure-1.14 : Commande dans le mode 2

### 1.3.3.Mode 3 : commande asymétrique en demi pas, une ou deux phases ON :

La combinaison en alternance du mode 1 et du mode 2 permet le fonctionnement en demi pas. Pour effectuer un déplacement donné, il faut doubler le nombre d'impulsions de commande. Les couples quasi statiques ne sont pas identiques selon si une ou les deux phases sont alimentées. La Figure-1.15 illustre la séquence des alimentations de phases pour un moteur à aimants permanents.

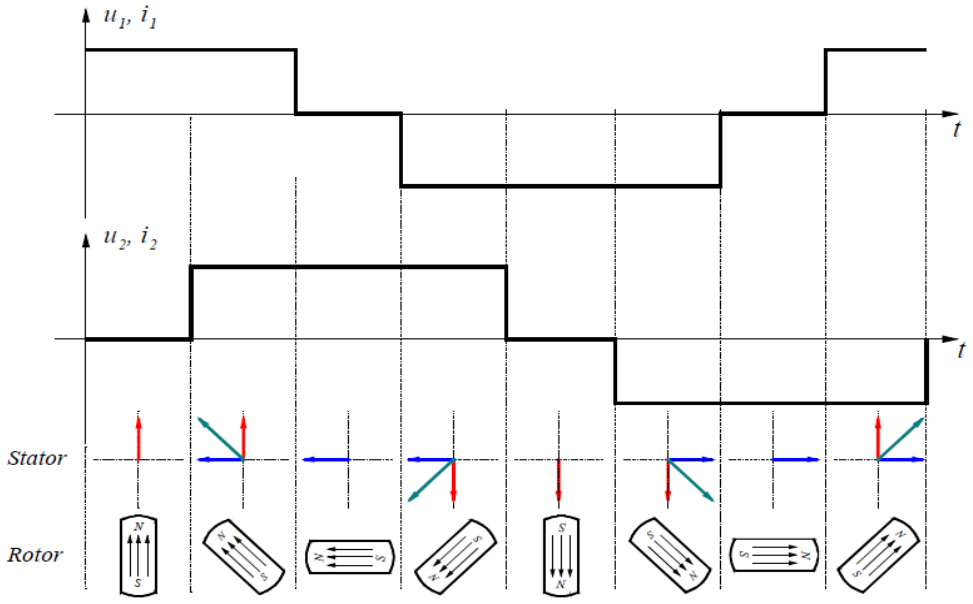



Figure-1.15 : Commande dans le mode 3

### 1.3.4. Mode 4 : commande symétrique en demi pas, une ou deux phases ON :

Pour un fonctionnement régulier en demi pas, il faut augmenter le courant d'un facteur 2 lorsqu'une seule phase est alimentée. On a ainsi les performances de couple du mode 2 mais avec deux fois plus de pas. La Figure-1.16 illustre la séquence des alimentations de phases pour un moteur à aimants permanents.

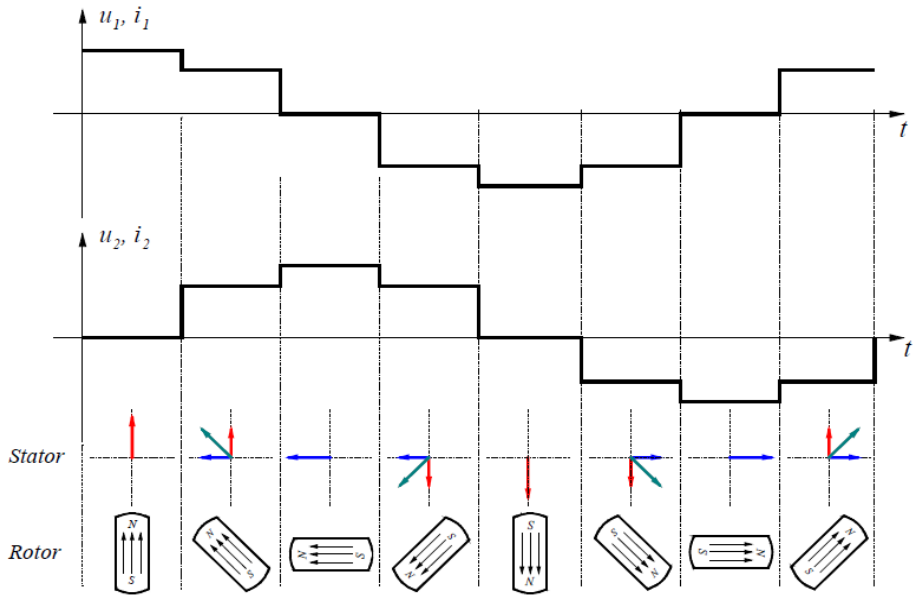



Figure-1.16 : Commande dans le mode 4

### 1.3.5. Mode 5 : commande micro pas :

Ce mode consiste à multiplier les positions intermédiaires en asservissant le courant de chaque phase. Il constitue une généralisation du mode 4. Si l'on contrôle les courants de phases dans le moteur selon les lois :

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= \sqrt{2} I_n \cos(\vartheta_{e0}) \\ i_2 &= \sqrt{2} I_n \sin(\vartheta_{e0}) \end{aligned}\right\} \qquad (1.3)$$

Et en admettant des distributions des constantes de couple suivantes :

$$\left.\begin{aligned} K_1(\vartheta_e) &= -K_T \sin(\vartheta_e) \\ K_2(\vartheta_e) &= K_T \cos(\vartheta_e) \end{aligned}\right\} \qquad (1.4)$$

Le couple devient :

$$T = -\sqrt{2} I_n K_T \sin\left((\vartheta_e - \vartheta_{e0})\right) \tag{1.5}$$

**V**e0 représente la position angulaire électrique d'équilibre pour des courants définis par les relations 1.3. En donnant à **V**e0 n valeur équidistante de $\boldsymbol{\pi/2n}$, on multiplie par n le nombre de position d'équilibre en mode 1. On obtient apparemment une précision aussi grande que l'on veut, mais celle-ci n'a de sens que si le couple de charge est très bien connu et sans fluctuation. De plus, une telle précision ne peut être atteinte qu'avec une loi de couple moteur parfaitement sinusoïdale, donc avec des moteurs spécialement construits et avec une alimentation en courant très précise, parfois réalisée avec des amplificateurs de puissance linéaires. Pour des moteurs classiques, le mode 5 permet une rotation continue entre deux positions d'équilibre, en amortissant les oscillations à basse fréquence de vitesse, causes de certaines instabilités dans une rotation incrémentale. En conclusion le mode 5, très performant, n'est pas économique

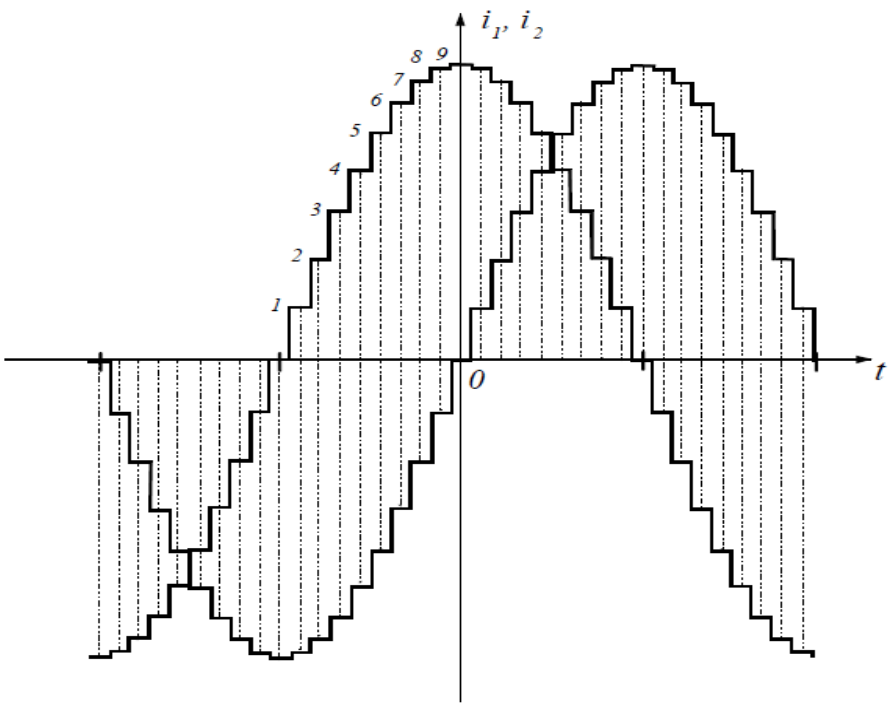



Figure-1.17 : commande dans le mode 5

## 1.4. Comportement statique :

### 1.4.1. Position d'équilibre :

Pour des raisons didactiques, on se limitera dans cette section aux moteurs pas à pas biphasés dont la caractéristique de couple permet de faire les hypothèses suivantes :

1) le couple de détente est négligeable par rapport au couple électromagnétique lorsque le courant nominal circule dans une ou les deux phases,

2) les constantes de couple de phases **K**Tk (k=1, 2) présentent des distributions sinusoïdales. Si une phase du moteur est alimentée, l'autre étant ouverte, et que le moteur est le siège d'un couple résistant externe, on peut poser la relation :

$$J\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = T_m - T_r \qquad (1.6)$$

**Avec :**

- **J** : moment d'inertie rapportée au rotor de l'ensemble des parties tournantes
- **T**m : couple moteur (couple électromagnétique)
- **T**r : Couple résistant agissant sur le rotor immobile

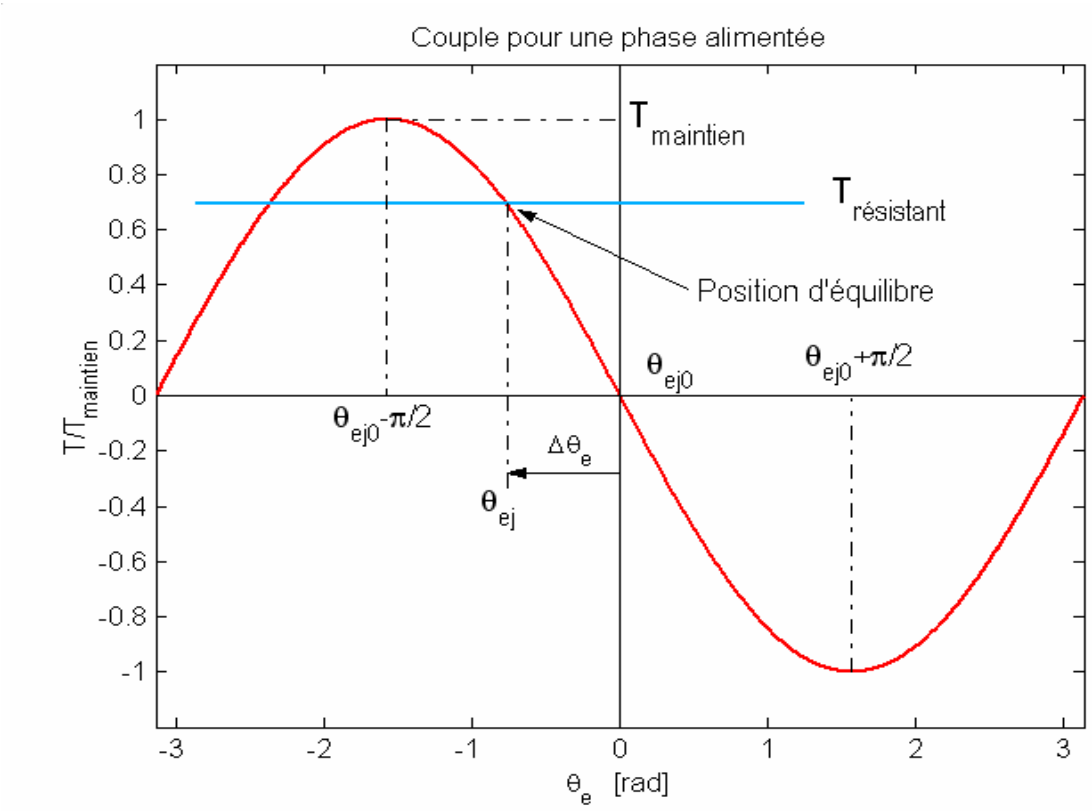



Figure-1.18 : Couple en fonction de la position angulaire pour une phase alimentée

L'équilibre impose une égalité du couple moteur et du couple résistant. La Figure-1.4.1 montre l'allure des deux couples en présence en fonction de la position angulaire électrique du rotor (la position angulaire mécanique est obtenue par la relation : **$v_m = 4/N_{pt}\, v_e$**). L'écart de position par rapport à la position d'équilibre s'exprime par :

$$\Delta\vartheta_{equilibe} = \vartheta_e - \vartheta_{e0} = \arcsin\left(\frac{T_r}{T_m}\right) \qquad (1.7)$$

L'équilibre n'est possible que si le couple résistant **T**r a une amplitude inférieure à **T**m ($T_{maintien}$ sur la Figure-1.18) que l'on appelle couple de **maintien**.

On appelle **raideur** la pente de la courbe de couple à la position d'équilibre. A couple résistant nul, sa valeur absolue est égale à $\mathbf{T}_{maintien}$.

## 1.4.2. Condition pour le déplacement d'un pas :

Lorsque le moteur, avec une seule phase alimentée, se trouve en position d'équilibre, il est possible de se déplacer d'un pas en alimentant la phase ouverte et en ouvrant la phase alimentée. On fait ici l'hypothèse que les courants s'établissent instantanément dans le moteur. Le nouveau couple moteur présente alors une courbe similaire à la précédente mais décalée d'un pas en avant ($\pi/2$ électrique). Selon les couples en présences, le moteur pourra avoir deux comportements distincts.

- A l'instant de la commutation le couple moteur $\mathbf{T}_{j+1}$ est supérieur au couple résistant $\mathbf{T}_{r1}$ ; le moteur va donc effectivement se déplacer d'un pas et se stabiliser après des oscillations autour de la nouvelle position d'équilibre.
- A l'instant de la commutation, le couple moteur $\mathbf{T}_{j+1}$ est inférieur au couple résistant $\mathbf{T}_{r2}$ et le moteur va partir dans le sens opposé à celui désiré pour ne plus s'arrêter. La séparation de ces deux cas a lieu pour une valeur du couple résistant égale au couple de démarrage **T**d. Ce couple correspond à l'intersection des caractéristiques de couple de chaque phase.

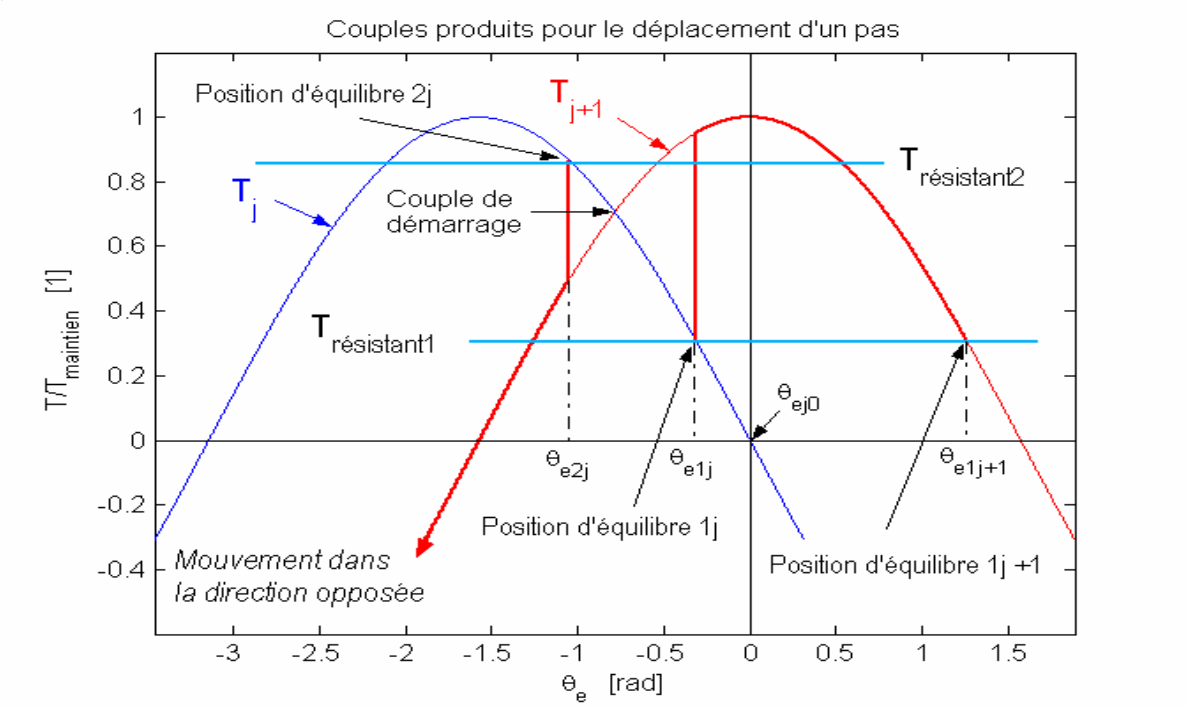



Figure 1.19.couples en jeu lors de déplacement d'un pas

## 1.5. Comportement dynamique :

### 1.5.1. Généralités :

Pour interpréter l'évolution oscillatoire lors d'un déplacement d'une position d'équilibre à une autre, il faut faire intervenir :

- Le couple de frottement visqueux F visqueux qui englobe toutes les pertes mécaniques et électriques proportionnelles à la vitesse de rotation
- Le frottement sec F fort dépendant du singe de la vitesse de rotation mais pas de son amplitude
- Le couple résistant, constant quelque soit la vitesse et son signe

### 1.5.2. Déplacement auteur d'une position d'équilibre :

Le couple moteur évolue en fonction de la configuration de l'alimentation du moteur.

En prenant pour origine la position $\mathbf{v}_{ej0}$ d'équilibre à vide correspondante à $\boldsymbol{\pi/2}$.

## 1.6. Fonctionnement et Caractéristique de moteur pas à pas :

Il excite différents caractéristiques de moteur pas à pas mais à ils tous un certain nombre de caractéristiques communes tant en fonctionnement statique que dynamique dues à leur alimentations particulier.

**a. pas angulaire** : c'est la valeur de l'angle de rotation effectué par la moteur sous l'action d'une commutation de l'alimentation, On définit le moteur par le nombre d de pas nécessaire pour effectuer un tour complet, Ce nombre de pas dépend à la fois du types de construction et du mode d'alimentation. Commutation de lamentation.

**b. vitesse de rotation** : elle est proportionnelle à fréquence de commutation, avec le nombre de pas par tour et une fréquence.

**c. couple moteur** : lorsque la machine est alimenté ; son rotor tend à s'aligner sur l'axe du champ ainsi créé et ; de la tentative de l'écarter de cette potion ; nait un couple croissant avec le décalage angulaire.

**d. couple de détente** : le couple maximal qui peu être appliqué sur l'arbre du moteur non alimenté sans qu'il y ait rotation d'un pas, ce couple n'exit que sur les machines à aimant.

**e. erreur sur le pas** : les imperfections de la réalisation mécanique sont la cause d'un écart de position par rapport à la position théorique définie par le pas par tour.

## Chapitre II : Modélisation moteur pas à pas

**page**

2.1. Introduction…….....31
2.2. Description du MPPH……...31
2.2.3Allimentation du moteur pas a pas hybride.....32
2.2.3.1. Circuit d'alimentation …….....32
2.2.3.1. Modes d'alimentation …….....33
2.3. Réglage des courants de phase……34
2.3.1Méthodes de réglage des courants……....34
2.3.2Modulation en largeur d'impulsion……..34
2.4. Modélisation du moteur pas à pas hybride (MPPH)……...35
2.4.1. Modélisation du MPPH ……35
2.4.2 .Modélisation dans le repère (a,b)…….....36
2.4.2.1. Equations électriques……....36
2.4.2.2. Equations mécanique ……...37
2.4.3. Modèle dans le repère (d, q) ……..39
2.4.3.1. Transformations de Park……39
2.4.3.1.1. Equation électriques……....40
2.4.3.1.2. Expression du couple électromagnétique……....41
2.5. Modélisation du double pont H……....42

## 2.1 Introduction :

Le moteur pas à pas hybride (MPPH) ou moteur réluctant polarisé possède l'avantage d'associer le phénomène de la réluctance variable à une excitation par aimant permanent, d'où le nom hybride. Parmi ses caractéristiques, on peut citer :

- un couple moteur élevé et proportionnel au courant,
- un couple de détente,
- un nombre de pas élevé ce qui permet d'éviter l'utilisation du réducteur,
- un couple massique élevé,
- une précision de positionnement.

A cause de ces avantages, le MPPH domine le marché des applications de l'actionneur pas à pas. Pour cette raison nous l'avons choisi dans notre application.

Dans ce chapitre, nous donnerons une description succincte du MPPH avec son alimentation. Son principe de fonctionnement.



Figure-2.1.model électrique de moteur MPPH

## 2.2 Description du MPPH :

Le MPPH est constitué d'un stator et d'un rotor dentés (comme le moteur à réluctance variable) et d'un aimant permanent dans son rotor. Les figures 2.1 et 2.2 montrent. la structure du MPPH.

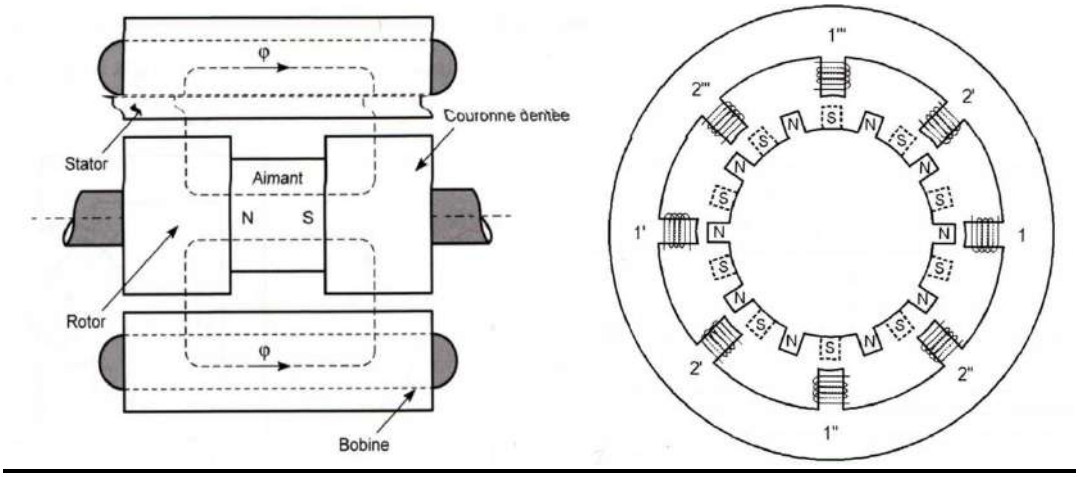



**Figure 2. 2.** Coupe du MPPH Coupe axial, (a) Couple transversale (b)

Le stator est feuilleté et muni de plots saillants (figure 2.2.b). Il contient les bobines qui forment, en général, deux phases avec une alimentation bipolaire (voir section 2.2.a). Le rotor comporte deux structures (deux sections) dentées en matériau ferromagnétique (Figure 1.2). Ces deux structures sont régulièrement décalées entre elles d'un demi-bas dentaire et sont fixées de part et d'autre d'un aimant. Hybride (MPPH).

## 2.2.3Allimentation du moteur pas a pas hybride :

### 2.2.3.1 Circuit d'alimentation :

L'alimentation du moteur pas a pas hybride doit être bipolaire afin d'assurer la circulation du courant dans une phase les deux sens. La structure la plus adaptée consiste à utiliser un double pont en H comme le montre la figure-2.3 suivante :

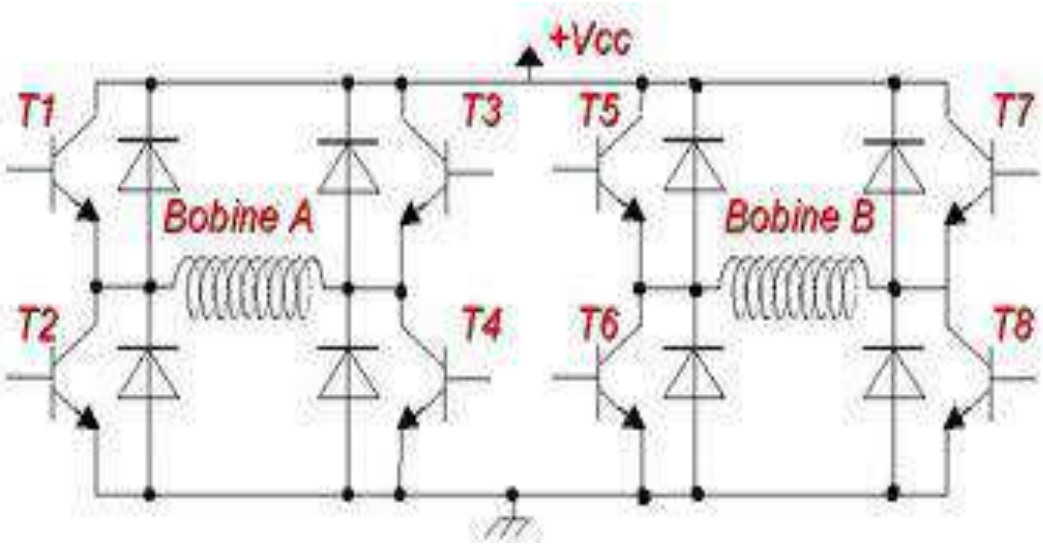



Figure-2.3.circuit d'alimentation

Dans la figure-1, on constate que chaque phase du moteur est alimentée par un pont H pour assurer un courant positif dans la phase A (bobine A) il faut fermer les transistors T1 et T4 (T2 et T3 étant ouverts) et fermer les transistors T2 et T3 si on veut que le courant circule dans le sens inverse (T1 et T4 étant ouverts).

### 2.2.3.2. Modes d'alimentation :

Afin de montrer le principe de fonctionnement du Moteur pas à pas hybride avec les différents modes d'alimentation, on considère le schéma simplifié du MPPH de la figure-2.4.

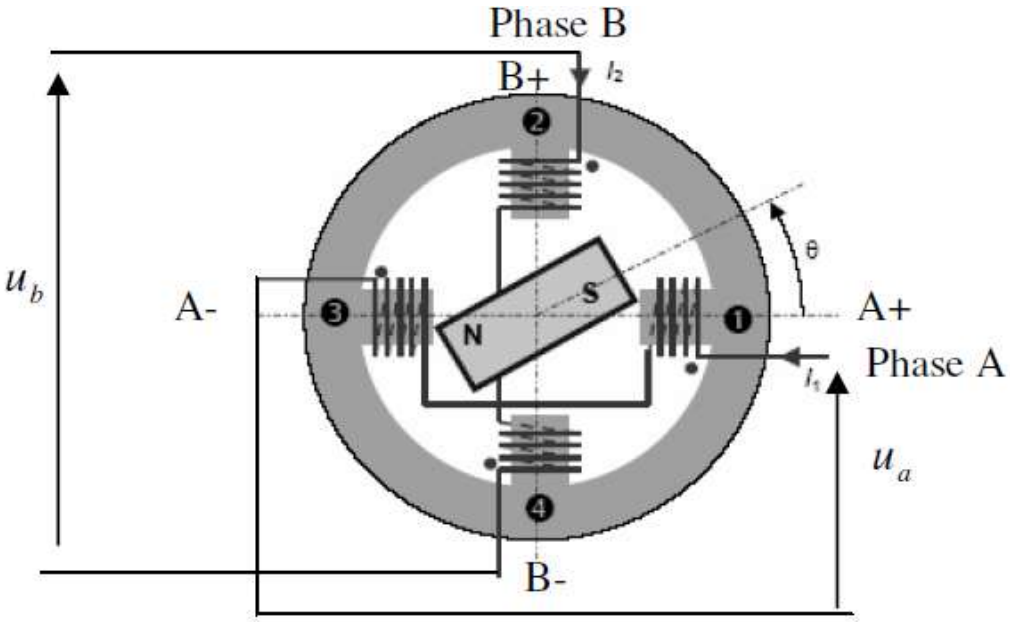



**Figure-2.4. Schéma d'alimentation du MPPH**

la rotation du moteur s'effectue par une séquence d'alimentation dans un sens ou dans l'autre, il existe plusieurs modes d'alimentation du MPPH :

- Mode 1 : la méthode la plus simple consiste à alimenter une seul phase à la fois suivant une séquence : A+ (la tension Ua est positive),B+ ,A-,B- .Si la séquence est inversée (A+,B-,A-,B+), le moteur tourne dans l'autre sens .
- Mode2 : deux phases son alimentées à la fois suivent la séquence : A+B+, B+A-,A-B-, B-A+. Si la séquence est inversée (A+B-,B-A-,A-B-,A-B+), le moteur tourne dans l'autre sens. Dans ce cas le couple du moteur est augmenté d'un facteur de $\sqrt{2}$ par rapport au mode 1.
- Mode 3 : Ce mode associe les deux modes précédents. La séquence d'alimentation est donc : A+, A+B+, B+,B+A- ,A- ,A-B- ,B-, B-A+, Dans ce cas ,le moteur fonctionne en demi-pas.
- Mode 4 : Ce mode consiste à augmenter le courant d'un facteur $\sqrt{2}$ si une seule

phase est alimentée à la fois, dans le mode 3, afin d'ajuster le couple.

- Mode 5 : ce mode constitue une généralisation du mode 4. Il consiste à créer plusieurs pas intermédiaires appelés micro-pas. Dans ce cas , les deux courants de phase sont presque sinusoïdaux et les oscillation du couple sont amorties.

## 2.3. Réglage des courants de phase :

Le bon réglage des courants de phase est la clé d'un bon fonctionnement de l'ensemble du Système. Dans ce cas, le courant doit être établi le plus rapidement possible et il doit suivre une certaine référence.

### 2.3.1. Méthodes de réglage des courants :

Il existe plusieurs techniques pour améliorer la réponse du courant :

1.Action sur la constante de temps : Pour diminuer la constante de temps, on peut ajouter une résistance en série avec la phase. L'inconvénient de cette méthode est la perte de puissance dans la résistance qui donne un mauvais rendement au système.

2.Action sur la tension d'alimentation: Une alimentation plus élevée est utilisée pendant la montée du courant et une autre pour le maintenir à une valeur nominale. L'inconvénient de cette méthode est l'utilisation de deux tensions d'alimentation.

3.Action directe sur le courant: Dans ce cas, la tension d'alimentation est plus élevée mais le courant est comparé avec une référence. Suivant la manière de comparer le courant avec sa référence, on distingue plusieurs techniques :

- Modulation à temps de coupure fixe: Si le courant dépasse la valeur de référence, il doit être coupé pendant un temps fixe. L'inconvénient de cette méthode est que l'ondulation du courant peut augmenter, ce qui n'est pas toujours souhaitable.
- Réglage par hystérésis: Le courant est fixé dans une fourchette au voisinage du courant de référence. Avec cette méthode, il est difficile de filtrer les bruits électromagnétiques à cause de la variation de la fréquence
- Modulation en largeur d'impulsion (MLI) : Le principe de cette méthode consiste à comparer une référence de tension avec une porteuse triangulaire

### 2.3.2. Modulation en largeur d'impulsion :

Un signal triangulaire à haute fréquence P(t) est comparé à chaque instant à un signal de référence. En utilisant la technique MLI. Pour mesurer les courants de phase, des ré-

sistances shunts sont placées dans les bras de chaque pont H. Les tensions mesurées aux bornes de ces résistances shunts sont amplifiées puis filtrées avant d'être appliquées aux convertisseurs analogiques numériques (CAN) de la carte de commande. L'avantage d'utiliser la technique MLI est de pouvoir synchroniser la lecture des CAN avec la période du signal MLI, ce qui permet d'éviter les bruits de commutation.

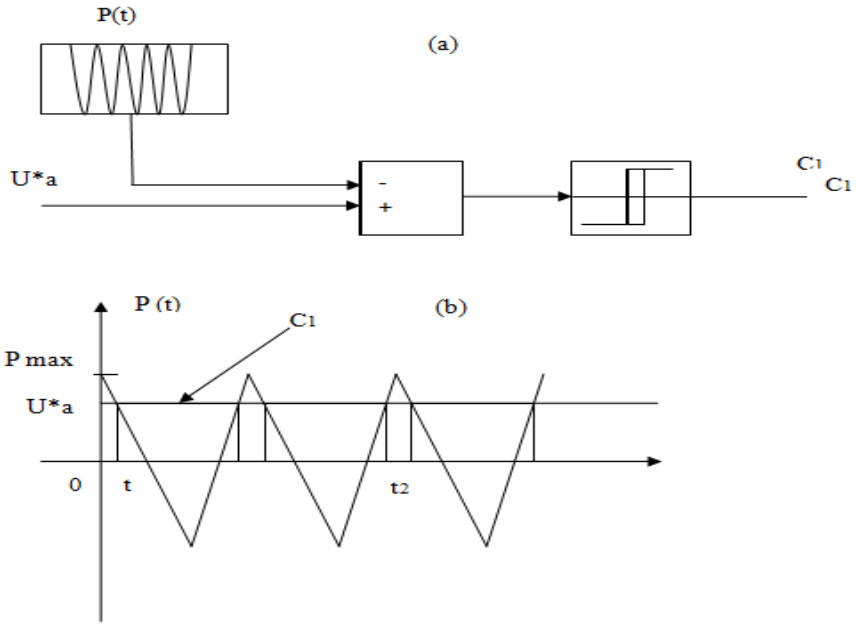



Figure -2.5. Principe de la commande MLI

(a)schéma fonctionnel, (b) signal de commande

## 2.4. Modélisation du moteur pas à pas hybride (MPPH) :

### 2.4.1. Modélisation du MPPH :

L e MPPH peut être représenté par un modèle complet qui tient compte de tous les phénomènes qui existe dans ce moteur, comme les effets de saturation, la variation de l'inductance en fonction de la position du rotor, les inductances mutuelles…..etc.

Dans notre application, on utilise un modèle qui représente les principaux phénomènes qui interviennent dans le fonctionnement du MPPH.

Le MPPH est constitué d'un stator et d'un rotor (comme le moteur à réluctance variable et d'un aiment permanent dans son rotor .

- Stator à pôles saillants bobinés et l'alimentation est bidirectionnelle
- Le rotor est constitué de deux roues dentées décalées entre elles d'une dime pas dentaire, relié par un aimant axiale

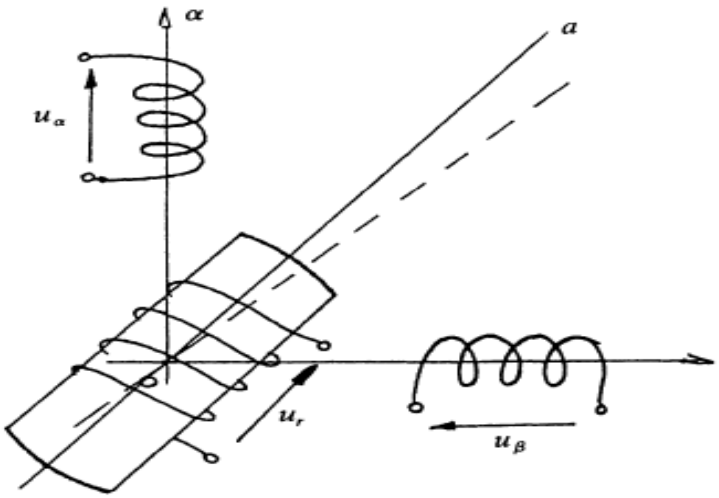



Figure-2.6.Modèle électrique de moteur pas à pas

### 2.4.2 : Modélisation dans le repère (a.b) :

#### 2.4.2.1 : Equations électriques :

Les équations électrique générale du MPPH sont données par :

$$\left.\begin{aligned} u_a &= Ri_a + \frac{d\Psi_a}{dt} \\ u_b &= Ri_b + \frac{d\Psi_b}{dt} \end{aligned}\right\} \qquad (2.1)$$

Avec : $i_a \; et \; i_b$: Courants des phases A et B [A]

$u_a \; et \; u_b$ : Tensions des phases A et B [V]

$\Psi_a \; et \; \Psi_b$ : Flux des phases A et B [WA]

R : Résistance de phase [Ω]

Les flux des deux phases peuvent s'exprimer comme suit :

$$\left.\begin{aligned} \Psi_a &= \Psi_{aa} + \Psi_{ab} + \Psi_{am} \\ \Psi_b &= \Psi_{bb} + \Psi_{ab} + \Psi_{am} \end{aligned}\right\} \qquad (2.2)$$

$Avec$: $\Psi_{aa}\ et\ \Psi_{bb}$: Flux propres

$\Psi_{ab}\ et\ \Psi_{ba}$ : Flux entre phases

$\Psi_{bm}\ et\ \Psi_{am}$ : Flux mutuels entre les phases et l'aimant du rotor.

Sachant que les deux phases A et B sont en quadrature, les flux mutuels entre elles sont nuls.

$$\Psi_{ab} = \Psi_{ba} = 0 \tag{2.3}$$

On suppose que les inductances propres sont constantes, les équations électriques (2.1) deviennent :

$$\left.\begin{aligned} u_a &= Ri_a + L\frac{di_a}{dt} - k_m\omega\sin(N\beta) \\ u_b &= Ri_b + L\frac{di_b}{dt} + k_m\omega\cos(N\beta) \end{aligned}\right\} \tag{2.4}$$

Avec : $L$ : Inductance de phase$[H]$

$k_m$ : Constante de couple $[Vs$ /rad]

$N$ : Nombre de dents du rotor

$\omega$ : Vitesse de rotation [rad/s]

$\beta$ : Position mécanique du rotor [rad]

A partir de (2.4), on peut déduire les expressions des forces électromotrices :

$$\begin{aligned} e_a &= -k_m\omega sin(N\beta) \\ e_b &= k_m\omega\cos(N\beta) \end{aligned} \tag{2.5}$$

### 2.4.2.2. Equations mécaniques :

L'équation mécanique du MPPH est donnée par :

$$T_m - T_l = j\frac{d\omega}{dt} + k_v\omega \tag{2.6}$$

Avec :

$T_m$ : Couple électromagnétique [Nm]

$T_l$ : Couple de charge [Nm]

$J$ : Inertie du rotor [$kgm^2$ ]

$k_v$ : Coefficient de frottement visqueux [Nms/rad]

En négligeant les pertes, le couple électromagnétique peut être obtenu à partir de l'expression suivante :

$$T_m = \frac{e_a i_a + e_{bi_b}}{\omega} + T_d \qquad (2.7)$$

Dans l'équation (2.7), le couple de dédente $(Td)$ est créé par l'aimant du rotor qui s'aligne Avec les dents du stator en absence du courant, L'équation de ce couple est donnée par la relation suivant

$$T_d = -ksin(4N\beta) \qquad (2.8)$$

K :est une constante.

$T_d$ est une généralement égal à 10% du couple nominal. Afin de simplifier le modèle du MPPH .nous avons négligé ce couple

$$T_d = 0 \qquad 2.9)$$

En utilisant (2.5) et (2.9) ; l'expression du couple devient :

$$T_m = k_m(-i_a sin(N\beta) + i_b cons(N\beta)) \qquad (2.10)$$

L'équation mécanique peut s'écrire sous la forme suivante :

$$k_m\left(-i_a sin(N\beta) + i_b\, cos(N\beta)\right) - T_l = j\,\frac{d\omega}{dt} + k_{v\omega} \qquad (2.11)$$

L'équation reliant la vitesse et la position est donnée par :

$$\omega = \frac{d\beta}{dt} \tag{2.12}$$

En regroupant, les équations (2.4), (2.11), (2.12) on obtient le modèle du MPPH dans le repère (a.b) comme suit :

$$\begin{cases} u_a = Ri_a + L\frac{di_a}{dt} - k_m\omega sin\,(N\beta) \\ u_b = Ri_b + L\frac{di_b}{dt} + k_m\omega co\,s(N\beta) \\ -k_m i_a sin(N\beta) + k_m i_b(N\beta) - T_l = j\frac{d\omega}{dt} + k_v\omega \frac{d\beta}{dt} = \omega \end{cases} \tag{2.13}$$

### 2.4.3 Modèle dans le repère (d, q) :

Pour obtenir le modèle du moteur dans ce repère, on doit utiliser la transformation de Park.

### 2.4.3.1 : transformation de Park :

La transformation de Park permet de passer du repère fixe (a.b), lié au stator ou repère ou rotor, le référentiel (d, q) s'obtient par la rotation d'un ongle électrique (Nβ) du repère (a.b).La transformée de Park, est un outil mathématique utilisé en électrotechnique afin de réaliser un changement de repère dans un système d'axe diphasé ou triphasé. Elle est généralement utilisée pour passer d'un repère « fixe » lié au stator d'une machine électrique à un repère tournant lié à son rotor ou au champ magnétique.

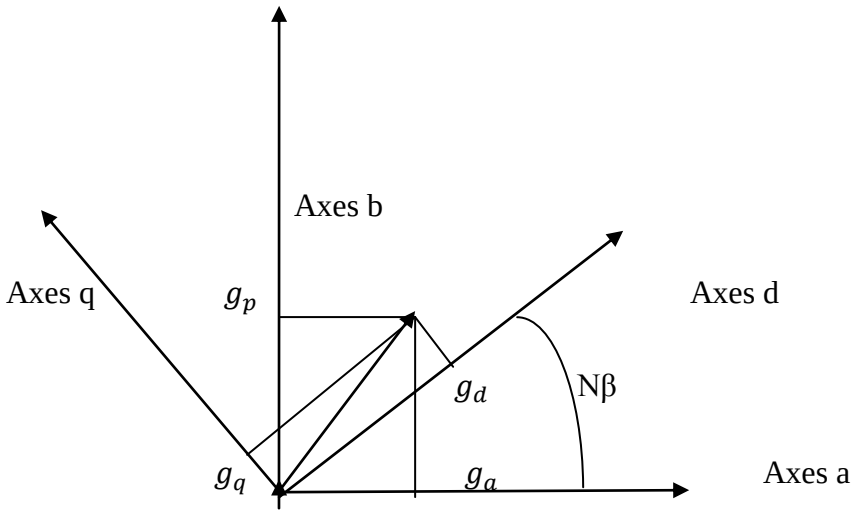



**Figure-2.7:** repère (d, q)

La matrice de Park est donnée par :

$$T_P(\beta) = \begin{bmatrix} \cos N\beta & -\sin N\beta \\ \sin N\beta & \cos N\,\beta \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Un système dans la repère (d,q) sera représente par :

$$\begin{bmatrix} g_d \\ g_q \end{bmatrix} = T_P(\beta) \begin{bmatrix} g_a \\ g_p \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

La transformation de Park inverse est donnée par :

$$T_P(-\beta) = \begin{bmatrix} \cos N\,\beta & -\sin N\beta \\ \sin N\beta & \cos N\beta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

En utilisant (2.16), un système dans le repère (a.b) sera représenté par :

$$T_P(-\beta) = \begin{bmatrix} \cos N\beta & -\sin N\beta \\ \sin N\,\beta & \cos N\beta \end{bmatrix}$$

En utilisant (2.16), un système dans le repère (a, p) sera représenté par :

$$\begin{bmatrix} g_a \\ g_p \end{bmatrix} = T_P(-\beta) \begin{bmatrix} g_d \\ g_q \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

### 2.4.3.1.1. Equation électriques :

Les équations électriques du MPPH (2.13) peuvent s'écrire sous la forme suivant :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + K_m \omega \begin{bmatrix} -\sin N\beta \\ \cos N\beta \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

En multipliant les termes de (2.18) par $T_P(\beta)$ , on obtient :

$$T_P(\beta) \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = RT_P(\beta) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + T_P(\beta) \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + K_m \omega T_P(\beta)$$

$$\begin{bmatrix} -\sin(N\beta) \\ \cos(N\beta) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

En utilisant (2.15) et (2.19) devient :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_p \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + T_P(\beta) \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dT} \left( T_P(\beta) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \right) + T_P(\beta) \begin{bmatrix} -\sin(N\beta) \\ \cos(N\beta) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Après développement on trouve :

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + T_P() \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \left( \frac{d\beta}{dt} \frac{d}{d\beta} \left( T_P(-\beta) \right) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + T_P(-\beta) \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + K_m \omega \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) \quad (2.21)$$

En utilisant (2.14) et (2.16), dans (2.21) on obtient les équations électriques dans le repère (d,q) comme suit :

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \mathrm{R} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -L \\ L & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \mathrm{N}\omega \begin{bmatrix} 0 & -L \\ L & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + K_m \omega \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$u_d$ et $u_q$ : Composantes directe et en quadrature des tensions de phase.

$i_d$ et $i_q$ **:** Composantes directe et en quadrature des tensions de phase.

L'équation (2.22) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} u_d = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - LN\omega i_d \\ u_q = \mathrm{R} i_q + L \frac{di_q}{dt} + LN\omega i_d + K_m \omega \end{cases} \quad (2.23)$$

### 2.4.3.1.2. Expression du couple électromagnétique :

L'expression du couple peut être obtenue à partir de l'équation de puissance instantanée.

$$P(t) = u_d i_d + u_q i_q \quad (2.24)$$

En remplaçant (2.23) dans (2.24) on obtient :

$$P(t) = R\left(i_d^2 + i_q^2\right) + L \left( i_d \frac{di_d}{dt} + i_q \frac{di_q}{dt} \right) + \omega K_m i_q \quad (2.25)$$

*(Pertes joule)* *(Puissance électromagnétique)* *(Puissance mécanique)*

Le couple électromagnétique peu être obtenu à partir de l'expression de la puissance mécanique ($3^{éme}$terme de l'équation (2.25)) comme suit :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} \tag{2.26}$$

Avec $P_m$ : Puissance mécanique.

D'après le $3^{éme}$ terme de (2.25), le couple peut s'écrire sous la forme suivante :

$$T_m = K_m i_q \tag{2.27}$$

En résumé, le modèle du MPPH dans le repère (d, q) est donné par :

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L\frac{di_d}{dt} - LN\omega i_q \\ u_q = Ri_q + L\frac{di_q}{dt} + LN\omega i_d \\ K_m i_q - T_L = j\frac{d}{dt} + K_v\omega\frac{d\beta}{dt} = \omega \end{cases} \tag{2.28}$$

## 2.5. Modélisation du double pont H :

Dans notre travail, le modèle du double pont H est utilisé seulement pendant la simulation, la modélisation du double pont H, consiste à calculer les tensions de phase en fonction des signaux de commande des transistors.

Le double pont H alimente de MPPH à partir d'une source de tension continue(U), les tensions aux bornes des phases peuvent s'obtenir par les expressions suivantes :

$$u_a = (c_1 - c_2)\, U$$

$$u_b = (c_2 - c_4)U$$

Avec $c_i$ : signale de commande du transistor$T_i$

## Chapitre III : Etude du mécanisme d'une table traçante

**Page**

**3.1. Introduction……...44**

**3.2. description du mécanisme……..44**

**3.3. Distinction entre transmission et transformation du mouvement…….45**

3.3.1. Type de transmission de mouvement ……45

A). Vis-sans –fin……..46

B) .crémaillère ……46

C). Système vis+ écrou ……...46

**3.4. Cahier des charges……..47**

**3.4.1. Partie mécanique ……47**

A. Chois des systèmes d'entraiment :……..47

A.1. Choit des vis……...47

A.2. Choix du moteur pas à pas…….50

**3.5. calcul du moment d'inertie pour le mécanisme d'entraiment X …...…51**

3.5.1. Le moment d'inertie de la vis X…….…..51

3.5.2. Le moment d'inertie global du mécanisme d'entraiment X……..……...52

**3.6. Calcul du moment d'inertie pour le mécanisme d'entrainement Y .....52**

3.6.1. Le moment d'inertie de la vis Y ……52

**3.**6.2. Le moment d'inertie global du mécanisme d'entraiment Y…….….52

## 3.1. Introduction :

En industrie on utilisé de plus en plus des machines numériques, elles sont constituées de deux parties une partie purement mécanique qui fait le travail, plus une partie électronique qui fait le contrôle des différentes taches de cette machine. Dans notre projet, la mécanique doit être réalisée d'une manière bien précise, avec un minimum d'erreur déplacement. Il existe deux genres de tables traçantes, des tables avec des supports rectangulaires plan, et des tables a support rotatif constitué d'un axe cylindrique qui va faire le rôle de l'un des axes x ou y. dans notre réalisation, on a conçu une table a support plan rectangulaire.

## 3.2. description du mécanisme :

Le mécanisme **x y** est construite par des planches métalliques, montées sous forme d'un bâti rectangulaire sur lequel viennent se loger une travers fixe représentant l'axe des **x** et une autre mobile, perpendiculaire à la précédente qui représente l'axe des **y**.

Durant le fonctionnement ; deux types de déplacement peuvent être exécutés :

a) Un déplacement horizontal du chariot (travers y) ; suivant l'axe des coordonnées **x** du à l'entraînement du moteur **x**

b) Un déplacement vertical de l'outil de travail, suivant l'axe des coordonnées **z**, après Commande de la bobine de chargement- déchargement.

c) Un déplacement horizontal de la bobine charge – outil, suivant l'axe des coordonnées **y**, du à l'entrainement du moteur **y**.

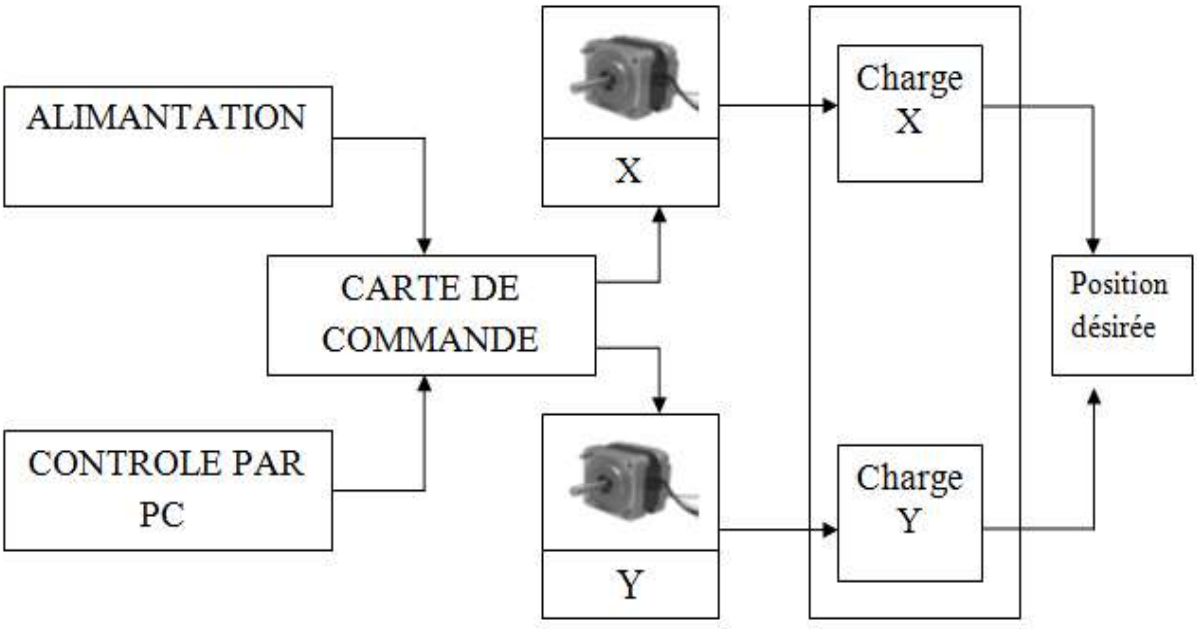



Figure-3.1.Schéma synoptique du positionneur X Y

## 3.3. Distinction entre transmission et transformation du mouvement :

On parle de mécanisme de transmission du mouvement, lorsque sert transmettre le mouvement du point d'entrée au point de sortie sans modifier la nature (rotation ou translation) du mouvement.

Les mécanismes de transmission peuvent changer la vitesse ou le sens de mouvement mais ne le modifient pas. Par exemple, sur vélo, le mouvement de rotation des pédales est transmis à la chaine qui entraine la roue arrière.

Lorsqu'un mécanisme transforme la nature du mouvement entre le point d'entrée et le point de sortie, on parle de mécanisme de transformation du mouvement. Une bielle – manivelle transforme un mouvement de translation en un mouvement de rotation

### 3.3.1. Type de transmission de mouvement :

❖ Transmission des puissances : courroie synchrone, chaines et roues dentées, engrenages.

❖ Transformation des formes des mouvements :

Changer la vitesse, transformer le mouvement de rotation en mouvement rectiligne, transformer le mouvement de rotation, transformer le mouvement de rotation en mouvement oscillant

Un système assure la transmission d'un mouvement à distance (entre l'entrée et la sortie d'un mécanisme) Il faut au moins deux éléments et un système de transmission.

Rapport de transmission :

$$\frac{\text{Nombre de tours de la roue B}}{\text{Nombre de tours de la roue A}} = \frac{\text{diamètre de la roue A}}{\text{diamètre de la roue B}} = K$$

Si $K < 1$ réducteur de vitesse

Si $K > 1$ multiplicateur de vitesse

Dans cette section, nous allons aborder différents mécanismes de transmission du mouvement, nous représentant ici les plus courants.

***A).Vis-sans –fin :*** Transmission par roue dentée et vis tangente (on passe d'une rotation à une autre rotation)

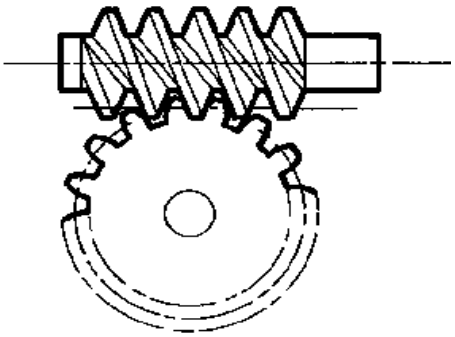


Figure-3.2 : Vis-sans-fin

***B).Crémaillère*** : transformation d'un mouvement de rotation en mouvement de transformation et inversement :

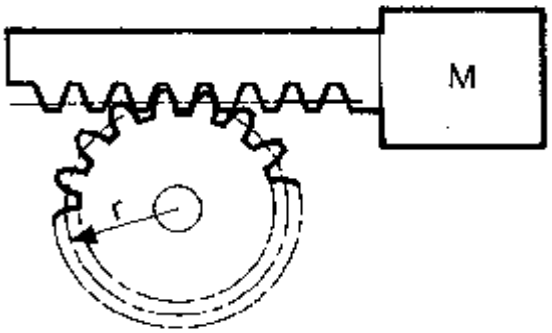



Figure-3.3 : crémaillère

### *C). Système vis+ écrou :*

En tournant, la vis déplace l'écrou à droit ou à gauche le sens de rotation, ce système développe grande force, on l'emploie notamment pour les étaux, les serre-joints, les vérins à vis, les crics, sans oublier le serrage par boulon

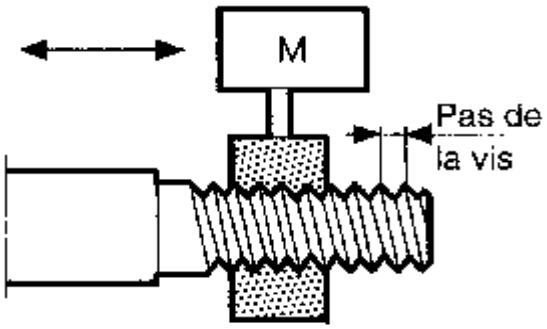



Figure-3.4: système vis-écrou

Dans notre étude ; nous avons opté un système de transformation du mouvement assuré par pièces filetées d'utilisation très fréquente en construction mécanique.

## 3.4. Cahier des charges :

Deux moteurs pas à pas sont utilisés dans notre étude, le moteur **x** couplé à la vis **(x)** pour l'entraiment du chariot, et le moteur y couplé à la vis de **(y)** l'entraiment de la bobine charge outille.

La masse totale en translation est évaluée à $m$ = 0,50kg ; elle est solidaire de l'écrou appelé encore *noix*. Durant les cycles de fonctionnement de la machine-outil, deux types de déplacement seront particulièrement étudiés : le marc en charge à $v$c = 2 cm/s avec une force de travail $F$ T = 250 N et le retour rapide à vide à $v$v = 12 cm/ s.

### 3.4.1. Partie mécanique :

### A. Chois des systèmes d'entraiment :

***A.1.Choit des vis :*** Parmi les caractéristiques mécaniques de la vis, qui permettent son choix, on note :

- ***Le pas du filet :***

Le pas du filet est la distance mesurée parallèlement à l'axe de la vis, entre deux points correspondants de deux filets consécutifs.

La profondeur du filet est donnée par

$$\frac{H_{1=}\ (D_1 - D_2\ )}{2} = 0{,}5412h \qquad (3.1)$$

D'où le pas du filet :

$$h = H_1/0{,}5412 = (D_1 - D_2)/1{,}0824 \qquad (3.2)$$

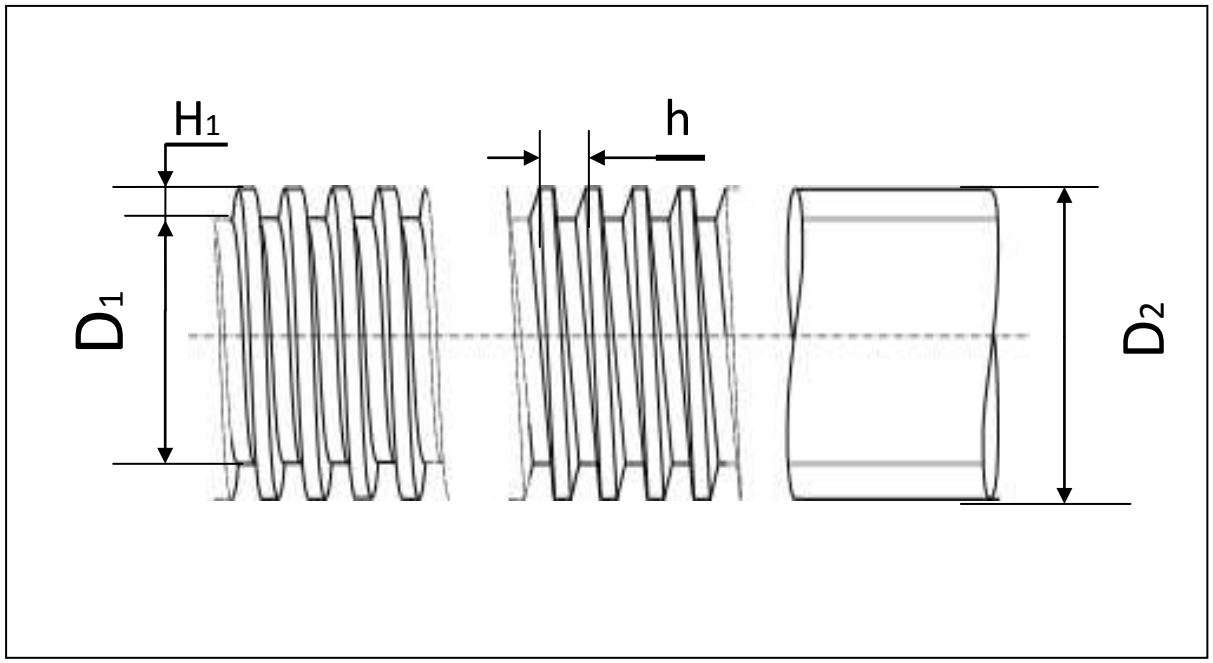



Figure-3.5 : filet de la vis

❖ ***Diamètre nominaux de filetages :***

- ***Pour la vis :***

Diamètre nominal d mesuré aux sommets des filets.

- ***Pour le taraudage :***

Diamètre nominal D mesuré à fond filet.

Tableau-3.1: illustre les dimensions normalisées pour différents diamètres nominaux du système vis-sans fin :

Tableau-3.1 : Les dimensions normalisées

| **Diamètre nominal d =D (mm)** | **Pas nominal h (mm)** | **Section du noyau de la vis s (mm)** |
|---|---|---|
| 1 | 0,25 | 0,460 |
| 1,2 | 0,25 | 0,732 |
| 1,6 | 0,35 | 1,27 |
| 2 | 0,4 | 2,07 |
| 2,5 | 0,45 | 3,39 |
| 3 | 0,5 | 5,03 |
| 4 | 0,7 | 8,78 |
| 5 | 0,8 | 14,2 |
| 6 | 1 | 20,1 |
| 8 | 1,25 | 36,6 |
| 10 | 1,5 | 58 |
| 12 | 1,75 | 84,3 |
| 14 | 2 | 115 |
| 16 | 2 | 157 |

Les exigences de précision et de distance du chier de charge imposent les caractéristiques mécaniques suivantes pour la vis -écrou, choisie comme système de transmission :

- Le pas, h = 2 mm
- Le diamètre, D = 14 mm
- La longueur de la vis x, $L_X$ = 800 mm

- La langueur de la vis x, $L_y$ = 600 mm

Avec aussi :

- masse volumique de l'acier, ρ= 7,85 $10^{-3}$ $kg/cm^3$

## A.2. Choix des moteurs pas à pas :

Le choix d'un moteur pas à pas nécessite le calcul du moment d'inertie du système mécanique extérieur entrainé par ce moteur. Une conduction d'adaptation moteur charge postule que le moment d'inertie du rotor seul $(j_{mot})$ ne doit pas être trop rapport à celui de la charge entrainée $(j_{sys})$.

Donc, la relation suivante est à vérifier :

$$j_{mot} < j_{syst} < 4 j_{mot} \quad (3.3)$$

Deux moteurs pas à pas sont utilisés dans notre étude; le moteur x couplé à la vis (x) pour l'entraiment du chariot, et le moteur y couplé à la vis (y) pour l'entrainement de la bobine charge- outil. Ces moteurs chacun comporte quatre enroulements Couplés deux à deux, en série.

Tableaux-3.2 : construction des paramètres suivants :

| paramètres | Moteur x | Moteur y |
|---|---|---|
| Résistance d'un enroulement | 4Ω | 12Ω |
| Inductance d'un enroulement | 10 Hm | 32 mH |
| Courant nominal | 0,7 A | 0 ,4 A |
| Couple de maintien | 205 mNm | |
| Couple sans courant | 28 mNm | |

| | |
|---|---|
| Pas angulaire | 3°.6 |
| Inertie du rotor | $12.10^{-7}$kg$M^2$ |
| Type | P532 |
| Fréquence propre | 330 H |

Sachant que, le moment d'inertie du rotor seul est : $\boldsymbol{j_{mot} = 12.10^{-7}\ Kgm^2}$ .

Celui de la charge, ou système entrainé, reste à déterminer :

La vis est considérée comme un cylindre plein de rayon R de masse M, de longueur L et de masse volumique ρ.

- Le moment d'inertie de vis par rapport à l'axe du rotor vaut :

$$j_{rot}=\frac{\pi.R^4.L\rho}{2} \qquad (3.4)$$

Ou bien

$$j_{rot}=\frac{M.R^2}{2} \qquad (3.5)$$

- Le moment d'inertie de la translation par rapport à l'axe du rotor est :

$$j_{tans} = M(h/2\pi)^2 \qquad (3.6)$$

- Le moment d'inertie global de la charge entrainée, par rapport à l'axe du rotor, vaut :

$$j_{(syst)}= j_{rot}+ j_{trans} \qquad (3.7)$$

## 3.5. calcule du moment d'inertie pour le mécanisme d'entraiment :

### 3.5.1. Le moment d'inertie de la vis X :

Le rayon et la masse de la vis X sont respectivement :

$R_X$ = 5 mm et $M_X$ = 200g

Ce qui donne :

$$j_{X(rot)} = 25\ g\ .cm^2$$

Le moment d'inertie du chariot en translation suivent l'axe Y :

Le pas de vis, ainsi que la masse du chariot étant respectivement :

*h = 2 mm ;* *Mch = 2000 g.*

Il vient : $j_{X(trans)} = 2{,}028\ g.cm^2$

### 3.5.2. Le moment d'inertie global du mécanisme d'entraiment x :

$$\boldsymbol{j_{X(syst)} = j_{(rot)} + j_{X(trans)}}$$

D'où : $\boldsymbol{j_{x(syst)} = 27{,}028\ g.cm^2}$

La conduction (4.3) est vérifiée.

## 3.6. Calcule du moment d'inertie pour le mécanisme d'entrainement Y :

### 3.6.1. Le moment d'inertie de la vis Y :

Le rayon et la masse de la vis Y sont respectivement :

$$Ry = 5mm \ \ et \ \ M_y = 250\ g$$

D'où : $j_{y(rot)} = 31.5\ g.cm^2$

Le moment d'inertie du chariot en translation suivant l'axe Y

$h = 2\ mm$, et la masse de la bobine charge- outil est $= M_{bco} 150\ g$

Ce qui donne : $j_{y(trans)} = 0{,}152 g.cm^2$

### 3.6.2. Le moment d'inertie global du mécanisme d'entraiment y :

$$j_{y(syst)} = j_{y(rot)} + J_{y(syst)}$$

D'où : $j_{y(syst)} = 31{,}65\ g.cm^2$

La condition (3.3) est vérifiée.

# Chapitre IV : Commande de la table traçante

**Page**

**4.1. Système de commande……...55**

4.1.1. Exemple de système de commande……...55

4.1.2. Classification des systèmes de commande ……...55

**4.2. Systèmes asservis……....56**

4.2.1. Classification des systèmes asservis …….....57

4.2.1. A. Asservissement de vitesse ……....57

4.2.1. B. Asservissement de position ……58

Conclusion ……..59

**4.3. Command du moteur pas à pas ……..60**

4.3.1 Simulation……60

4.3.2 Détermination des coefficients des régulateurs PI .....60

4.3.3 Bloc du moteur pas à pas……61

4.3.4. Résultat de la simulation……67

**4.4. Commande de la table traçante……70**

## 4.1. Système de commande :

Un système est un assemblage ; un ensemble ou une collection d'objet relié ou' branché les uns aux autres de façon à une entité ou un tout, le mot asservis est en général prés dans le sens commandé ou' diriger d'après cette définition on obtient :

Un système de command est un assemblage de constituants physiques branchés ou reliés les uns aux autres de telle sorte qu'il puisse se commander, se diriger ou se régler lui –même ou bien commander, diriger un autre système.

Le sens le plus abstrait c'est qu'il est possible de considérer tout objet physique comme un système de commande, toute chose peut modifier son environnement d'une façon ou d'une autre

## 4.1. 1 Exemple de système de commande :

Pour cela définissions d'abord le signal d'entrée et signal de sortie qui aider à définir ou à identifier un de command.

- ***Signal d'entrée*** : est l'excitation appliquée au système de commande à parties d'une source d'énergie extérieur en générale, afin d'y provoquer une repose spécifique.
- ***Signale de sortie*** : c'est la réponse effective obtenue à partir du système de commande elle peut coïncider ou nom avec la réponse que doit normalement provoquer le signal d'entrée

La fonction du système de commande permet d'identifier ou bien de définir le signal d'entée et le signal sortie.

## 4.1.2 Classification des systèmes de commande :

Les systèmes de commande entrent dans les deux catégories générales :
Les systèmes en boucle ouverts et les systèmes on boucle fermée. Cette distinction est fondée sur la nature du signal de commande, qui est la quantité donnant au système l'impulsion nécessaire à la formation du signal de sortie on peut dire :

- Qu'un système de command est on boucle ouvert quand le signal de commande est indépendant du signal de sortie.
- Un système de commande est en boucle fermée quand le système de commande dépend d'une façon ou d'une autre signal de sortie.

Le système on boucle fermer- on d'un peut l'appelé couramment un système asservis.

et le pouvoir de classer un système de commande en système en boucle ouverte ou en Système en boucle fermée ; les constituants du système doivent être clairement distingués de ceux qui influent sur le système mais n'en fait pas partie.

## 4.2. Systèmes asservis

Les systèmes asservis ; longtemps considérés comme solution à certains problèmes spécifiques ; voient leur utilisation se généralise dans toutes les spécialités. Dans le cas système asservis on conçoit facilement que l'opérateur humain puisse être remplacé par un système physique capable :

- D'effecteur la mesure de la grandeur de sortie.
- De comparer celle-ci à la grandeur de consigne.
- D'en extraire l'écart ou erreur qui sert à commander le système de telle sort que celui-ci tend à réduire cet écart

Le système asservis se représente dans le schéma suivent :

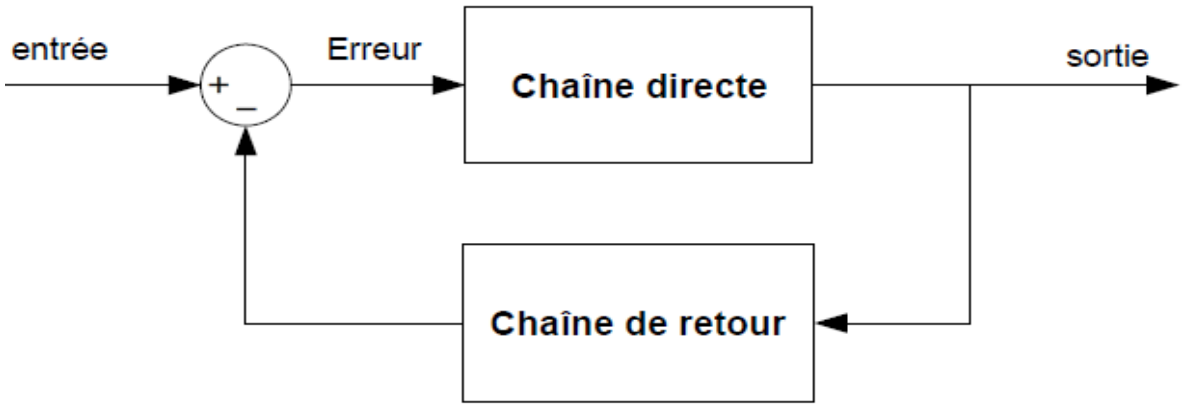



Figure-4.**1. Systèmes asservis**

✓ ***Le Comparateur*** : Son rôle consiste à élaborer une grandeur Ɛ appelée (grandeur d'erreur). Pour cela, il lui faut comparer des informations de même nature (tensions).

La chaine de commande (gain de puissance élevée) encor appelée chaine directe, c'est elle qui fait correspondant à une grandeur d'entrée X…

La chaine de commande (gain en puissance élevée) encore appelée chaine directe, c'est elle qui fait correspondre à une grandeur d'entée ***X***, la grandeur de strie ***S*** : elle comprend :

- Le détecteur.

- L'amplificateur.
- Le moteur.
- Comparateur

✓ ***Chaine de retour*** : Elle est encor appelé chaine de réaction ; son rôle est d'assurer l'asservissement en prélevant une partie de la puissance sortie par ramener sur le comparateur, l'élément essentiel de cette chaine est le traducteur, celui-ci transforme la vitesse de rotation du moteur en une tension pour permettre au comparateur de traiter deux grandeurs homogènes.

### 4.2.1. Classification des systèmes asservis :

On distingue essentiellement :

- Les systèmes ou la grandeur de sortie doit suivre une gradeur de consigne variant rapidement :

Les servomécanismes de position ; les amplificateurs contre réaction ……..etc.

- Les systèmes ou la grondeur de consigne varie peu et ou on s'attache à étudier l'influence des perturbations se sont en général les régulateurs de vitesse ; de tension ; de débit ……etc.

### 4.2.1. A. Asservissement de vitesse :

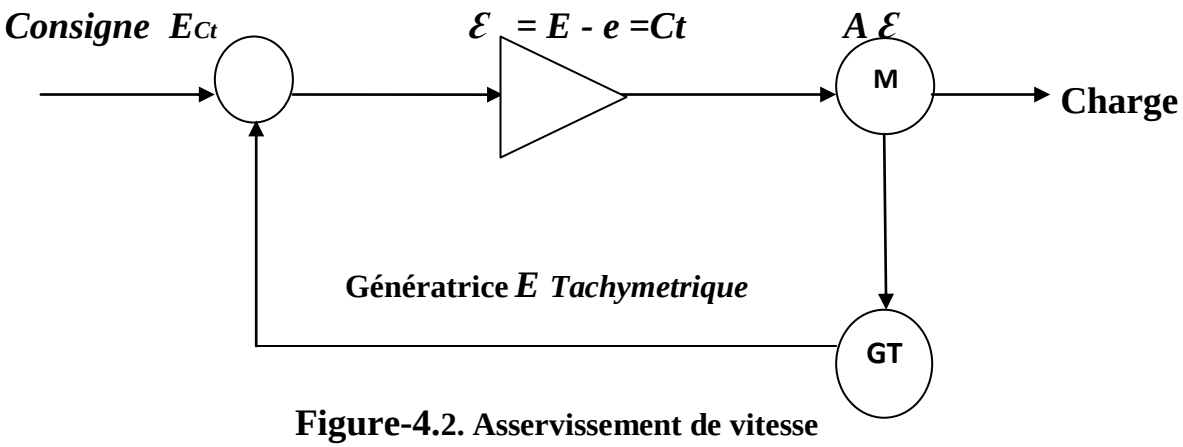



**Figure-4.2. Asservissement de vitesse**

Le moteur doit tourner à vitesse constante.

- La génératrice tachymetriqeu est le (traducteur) qui transforme la vitesse de rotation du moteur en une tension proportionnelle(e)

- Si la charge augmente la vitesse de rotation ou' le moteur diminue.

La génératrice tachymetrique fournit une tension (e) inférieur
Ɛ Augmentent et l'amplificateur fournit davantage de puissance ou le moteur afin qu'il retrouve sa vitesse de rotation initiale.

Le but de l'asservissement de vitesse est donc d'obtenir un régime de fonctionnement stable pendant le quel $\mathcal{E} = E - e = ct.$

### 4.2.1. B. Asservissement de position :

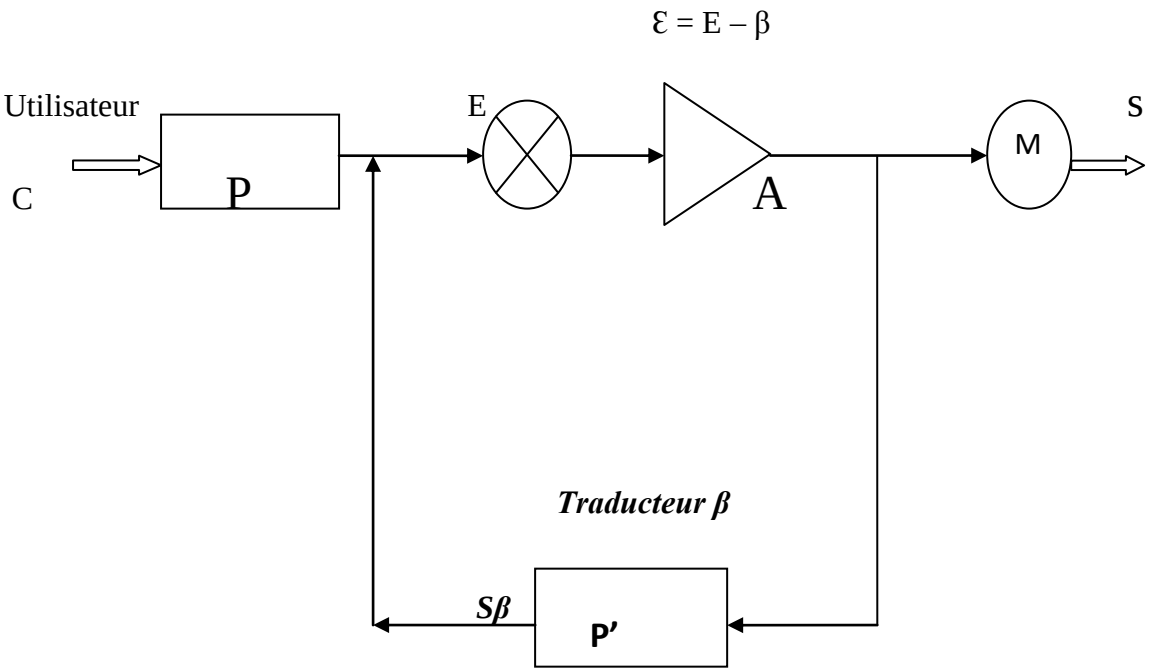



**Figure-4.3. Asservissement de position**

Pas d'action sur l'état stable alors le moteur n'est pas alimenté
$\mathcal{E} = E - S\beta = 0.$

On suppose une action sur la commande qui produise une augmentation de
$E$ ; $\mathcal{E} = E - S\beta$
augmenté ; le moteur est alimenté ; Sβ augmenté également ; lorsque

**Sβ = E ; Ɛ** est nul, le moteur s'arrête. La sortie à recopie l'entrée.

Le but d'asservissement de positions est donc d'obtenir un régime de fonctionnement stable pendant lequel

$\mathcal{E} = E - S\beta = 0$

## Conclusion

Un système asservi comporte une de chaine de réaction qui contrôler la bonne exécution de commande par la chaine d'action. Elle permet de corriger l'écart entre le résultat obtenu et le résultat à obtenir.

La chaine d'action et celle de réaction constatant un système bouclée dont la supériorité sur les systèmes directes « ouverts » provient de la spécialisation de fonctions :

- La chaine d'action fournit la puissance.
- La chaine de réaction assure la précision.

Cette précision constituera des caractéristiques essentielles d'un système asservi.

## 4.3. Commande du moteur pas à pas :

Pour obtenir de meilleures performances, on peut utiliser la commande par boucle ouvert avec régulateur PI . Un autre avantage de la commande par boucle ouvert est que les grandeurs dans le repère (d, q) sont :

continues, donc la régulation des courants de phase se fait de la même manière qu'avec un moteur à courant continu (CC). Dans ce cas, le MPPH peut utiliser son couple maximal et devient moins bruité, ce qui permet d'éviter tous les problèmes de la commande.

### 4.3.1 Simulation :

Dans cette section, Nous avons réalisé la simulation avec le logiciel Matlab/Simulink . on donne quelques exemples de simulation de la commande du MPPH décrite par son modèle (2.28). es paramètres du moteur utilisé dans notre application sont :

$R$ = 0.37 Ω ; $L$ = 0.9 mH; $K_m$= 0.157 Vs/rad

$K_v$ = 3.07 $10^{-4}$ Nms/rad; J = 15.62 $10^{-5}$ $Kgm^2$.

### 4.3.2. Détermination des coefficients des régulateurs PI :

Les régulateurs utilisés sont de type PI. Ce type de régulateur est constitué de deux actions: une action proportionnelle qui agit sur la rapidité de la réponse du système et une action intégrale qui élimine l'erreur statique

Action proportionnelle $K_P$ :

- mettre l'action intégrale hors service;
- mettre une valeur de $K_P$ faible ($K_P << 1$) puis augmenter cette valeur avec des petits pas jusqu'à l'obtention de la réponse du système, à une entrée échelon, la plus rapide possible avec un faible dépassement.

Action intégrale:

- maintenir la valeur de $K_P$trouvée dans (1).
- augmenter l'action intégrale$K_I$ jusqu'à l'élimination de l'erreur en régime Permanent avec un premier dépassement d'environ 10 à 15 %.

### 4.3.3. Bloc du moteur pas à pas :

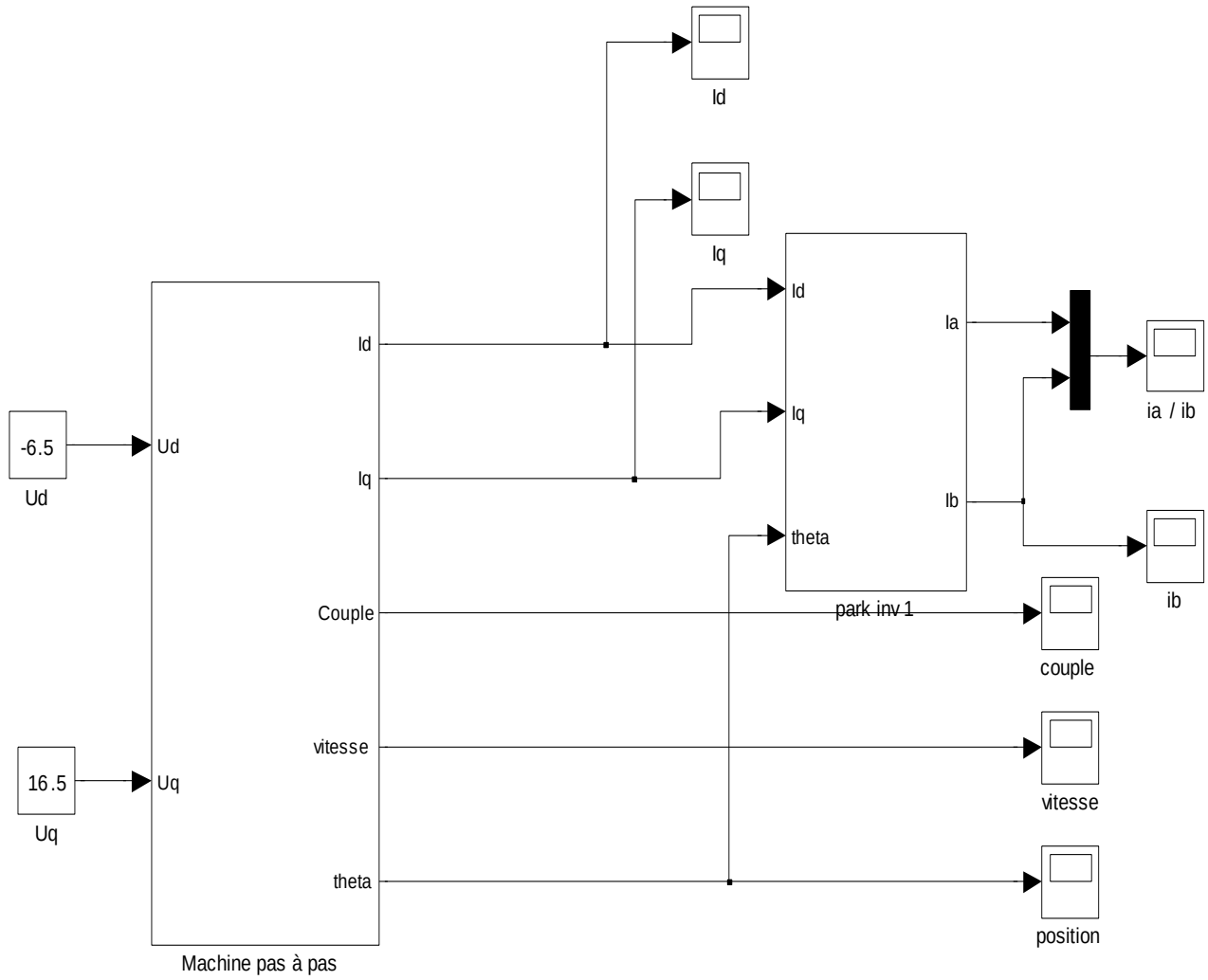



Figure-4.4.Schéma-Modèle moteur pas à pas

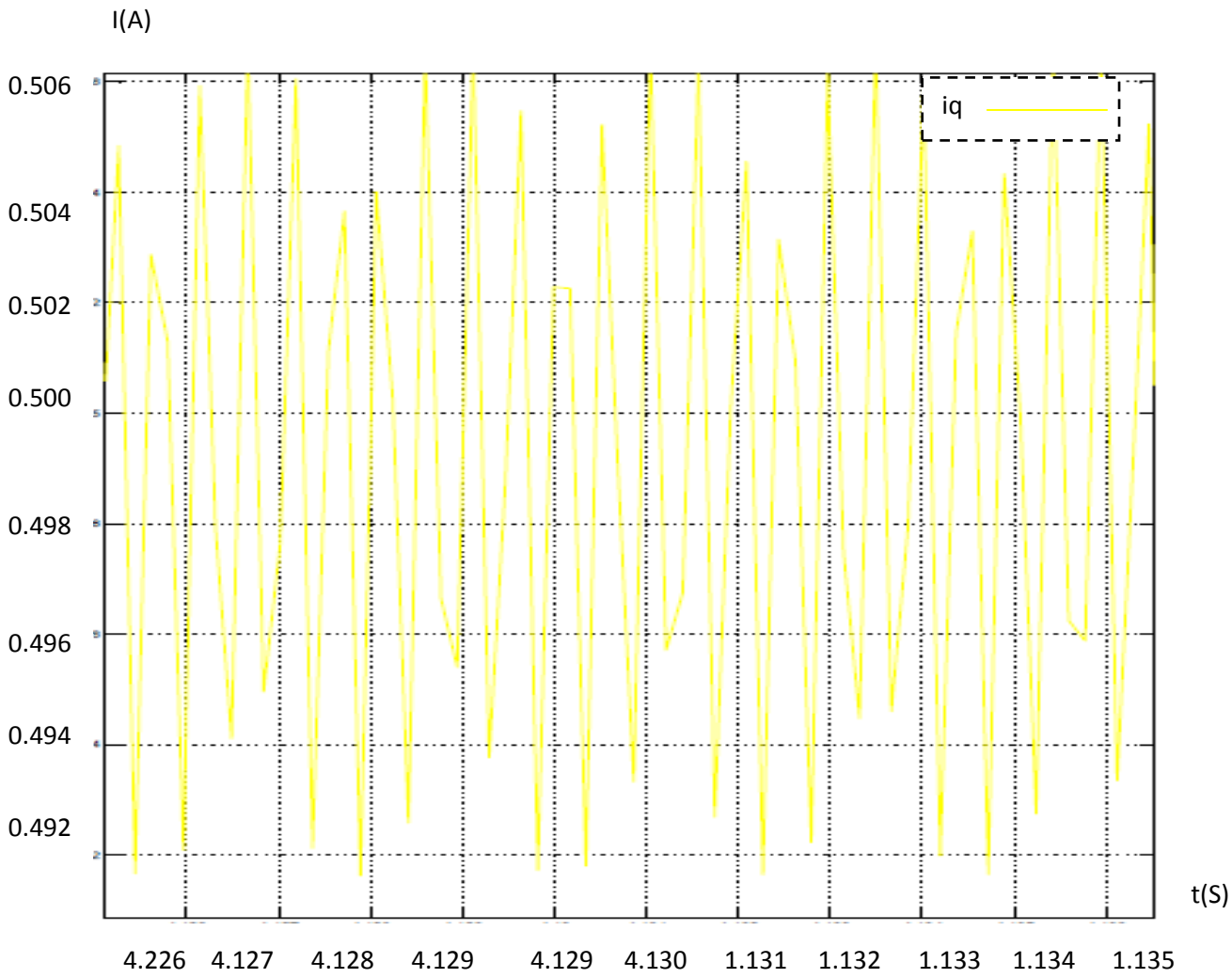



Figure-4.5.Courant de la phase iq

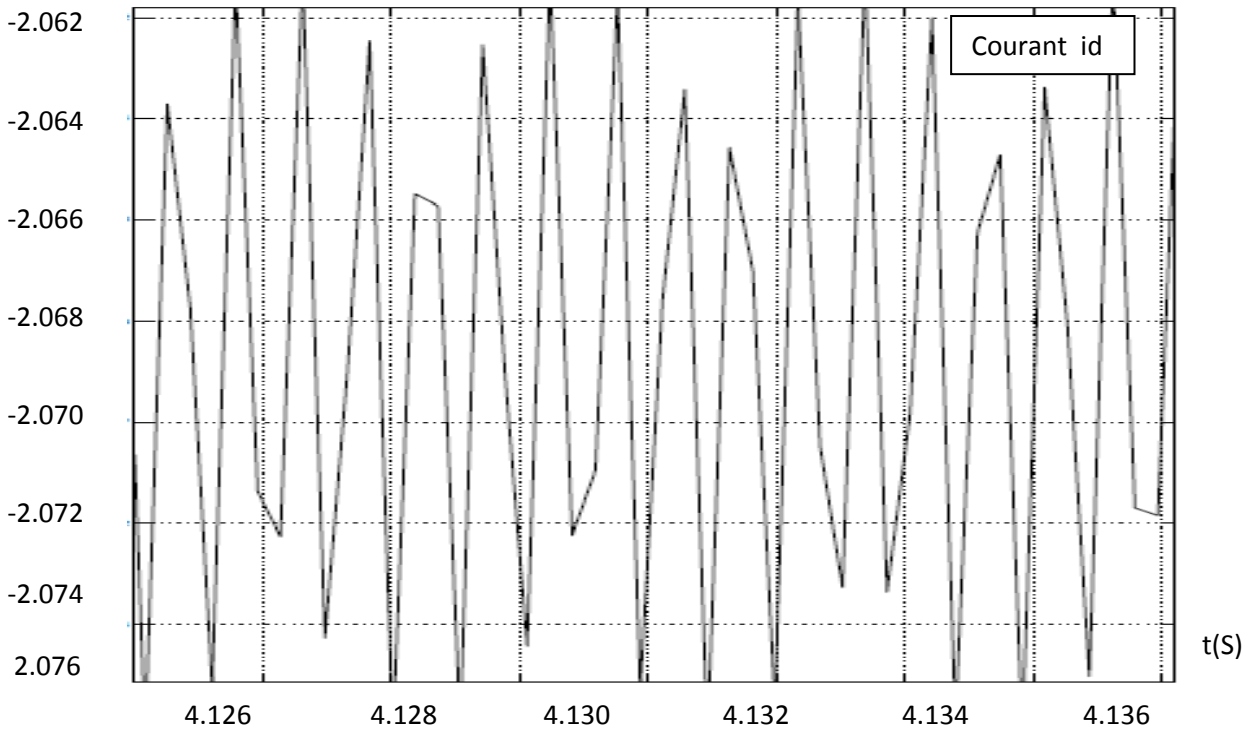



figure-4.6.Courant de la phase id

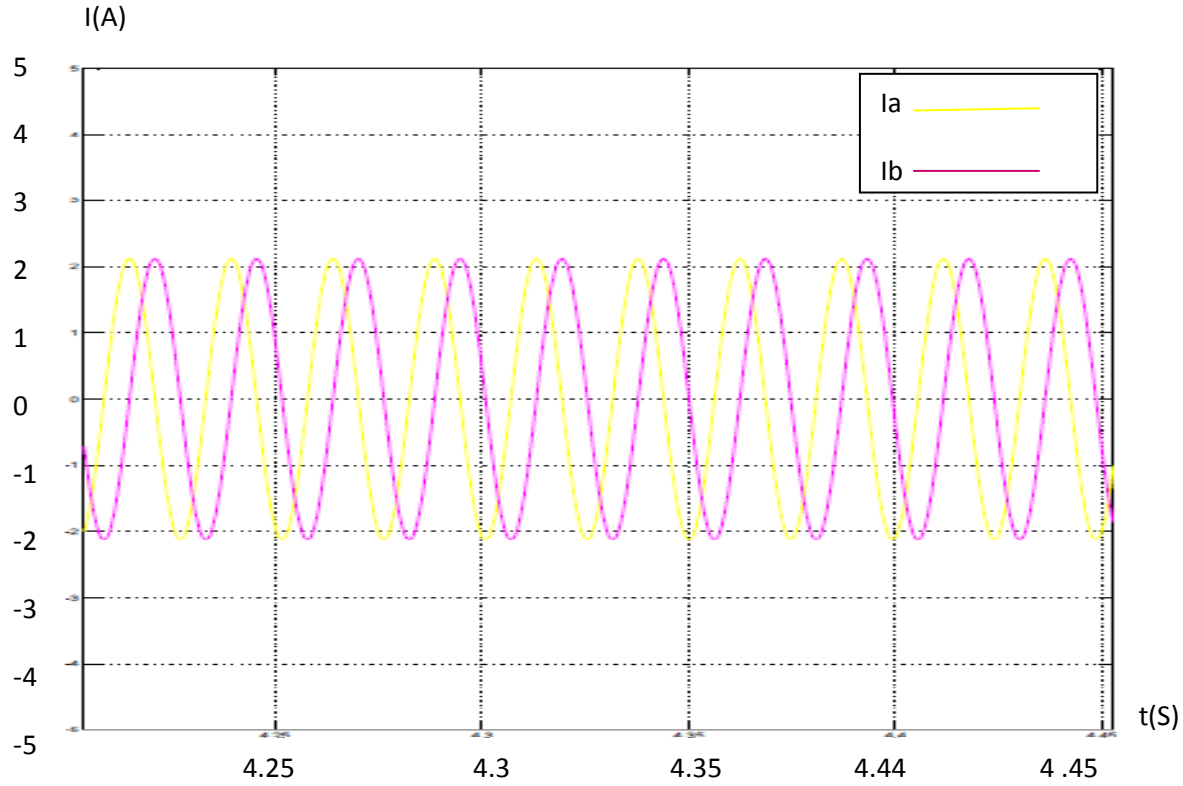



Figure-4.7.courant de phase Ia-Ib

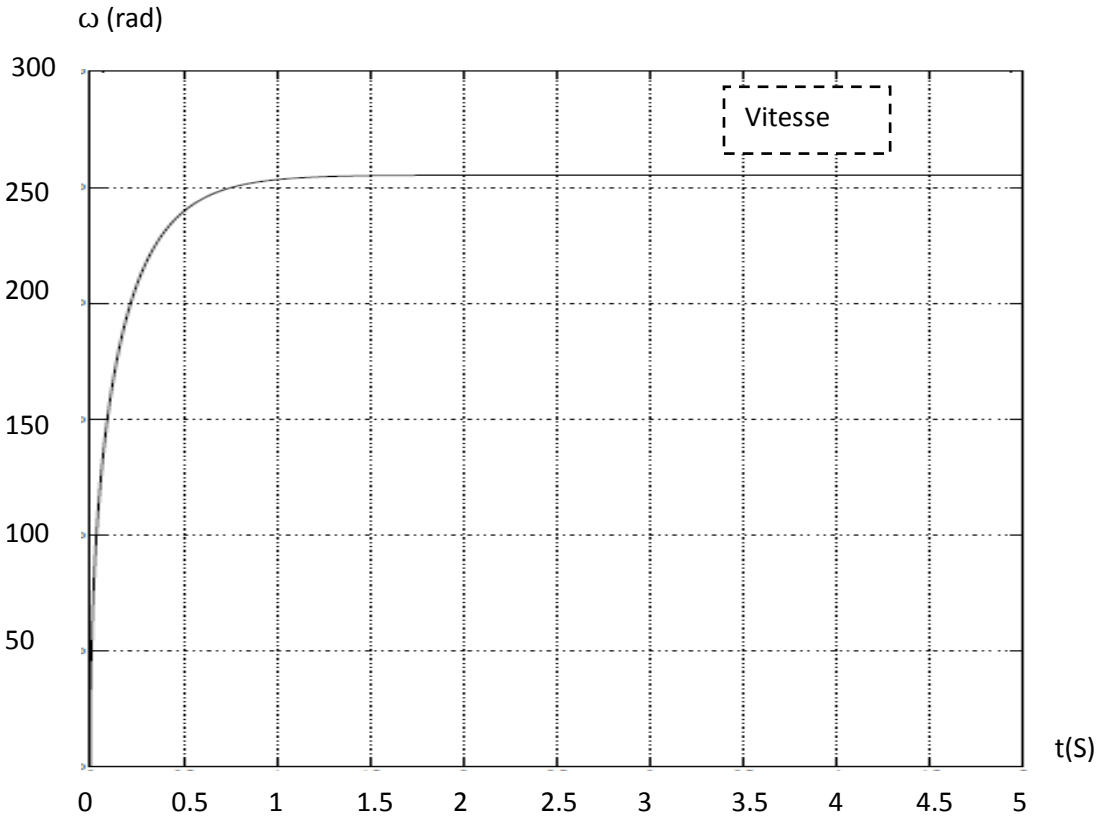



Figure-4.8. La vitesse

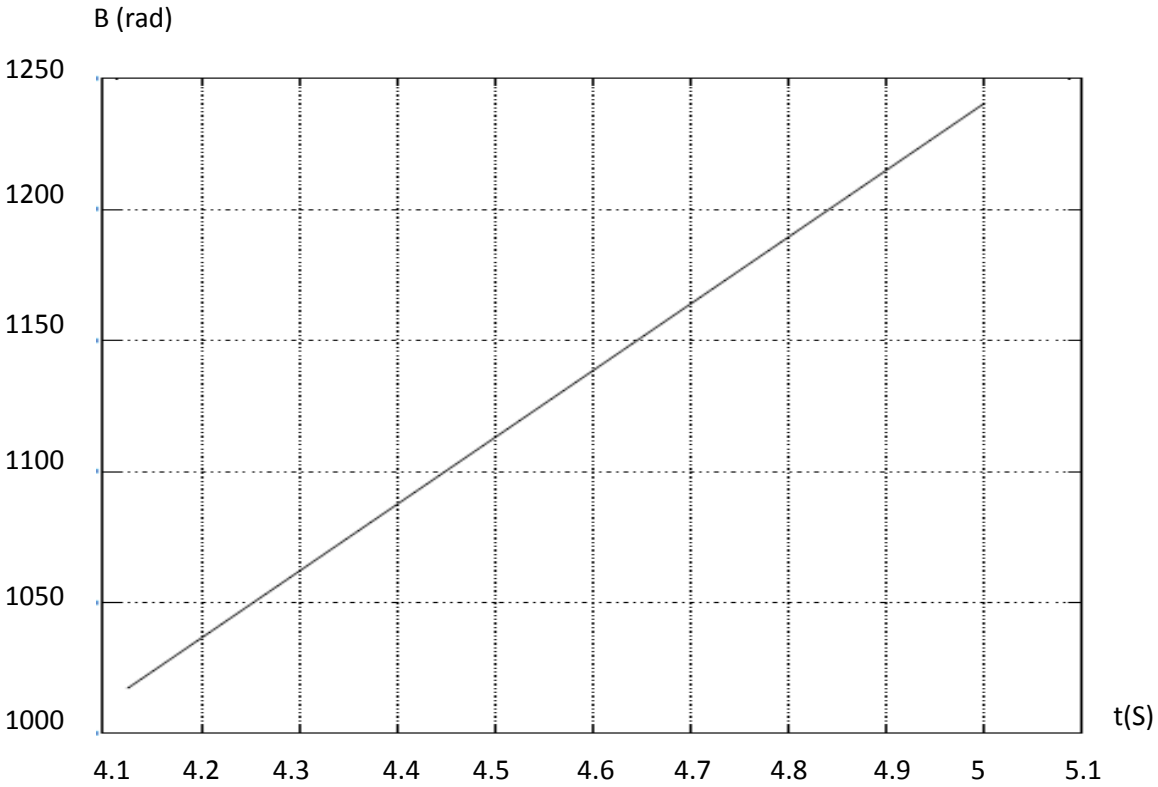



Figure-4.9. Position

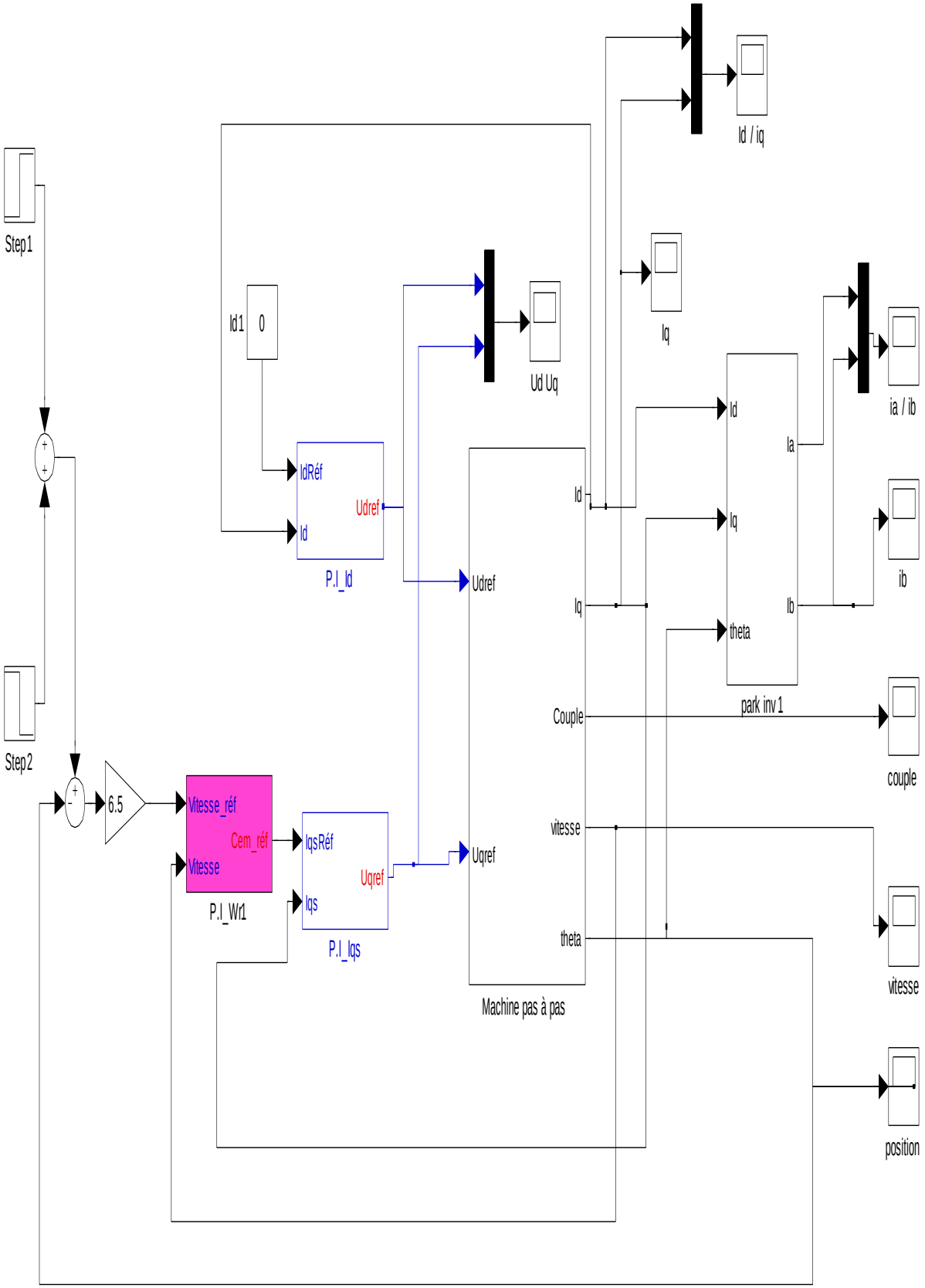



Figure-4.10.Schéma de simulink du moteur pas à pas

### 4.3.4. Résultat de la simulation :

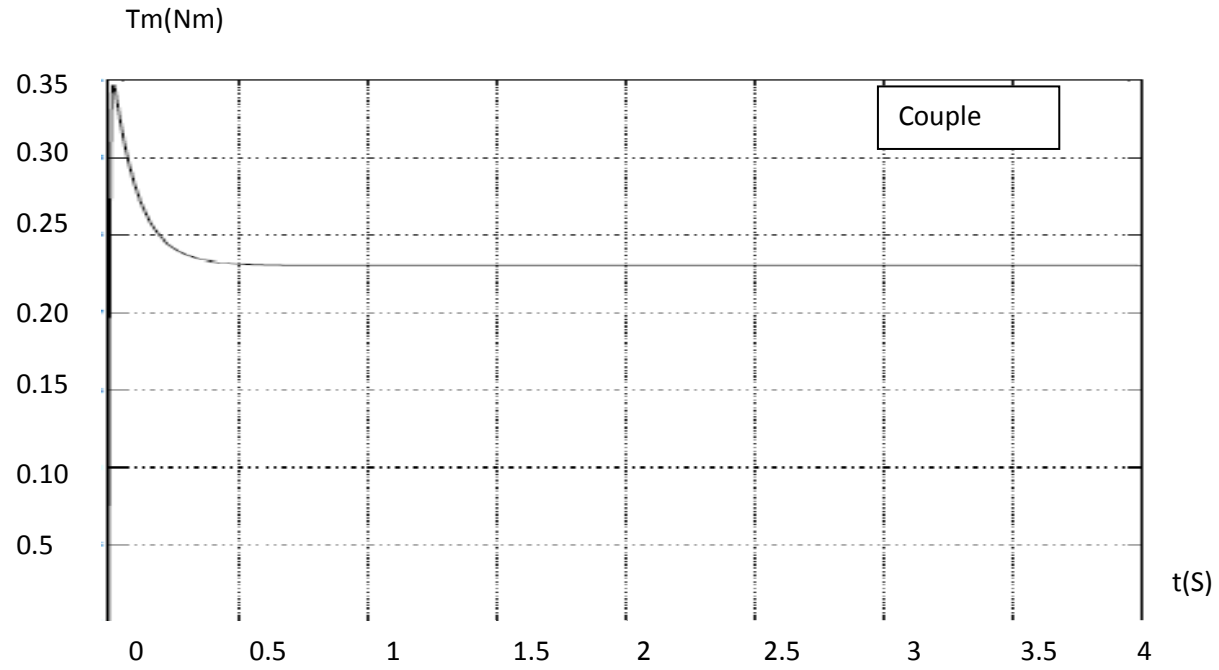



Figure –4.11 : Couple électromagnétique(Nm)

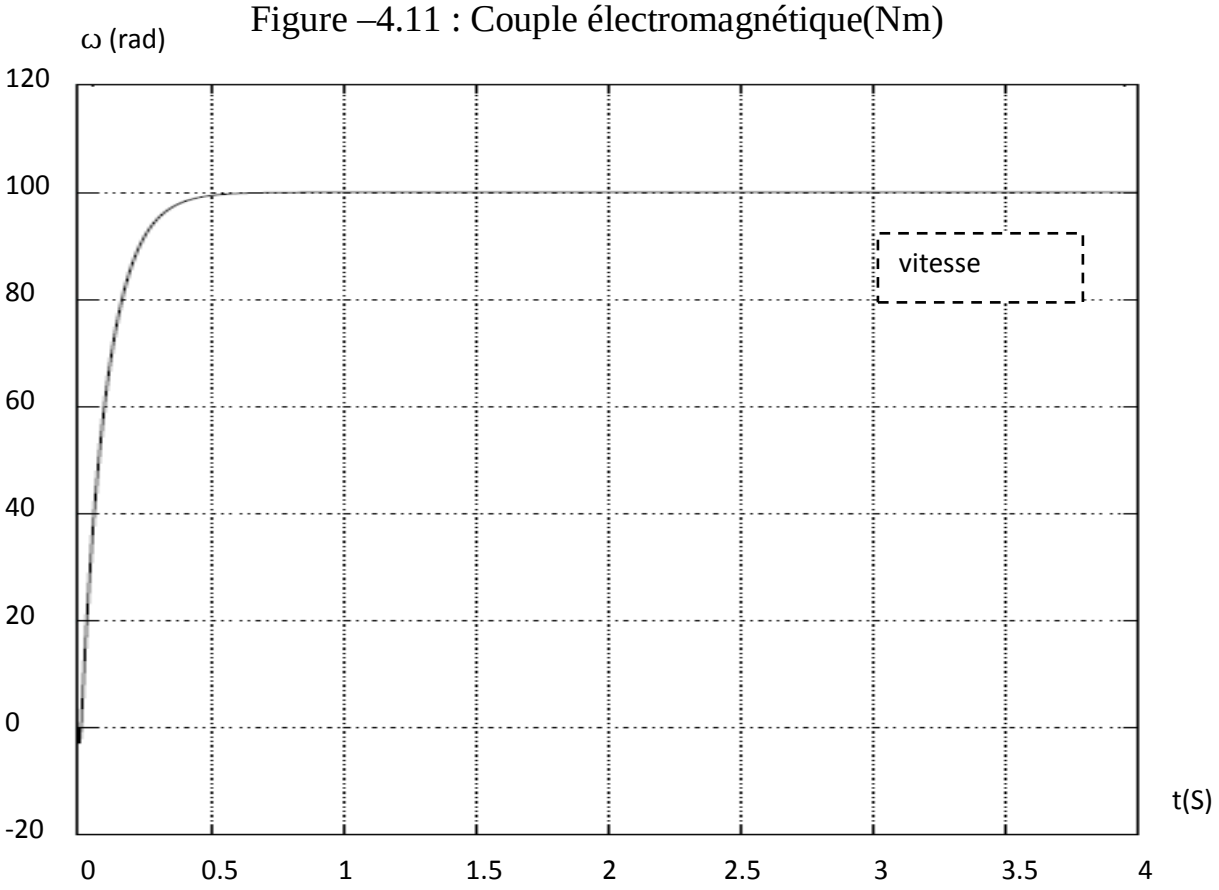



Figure-4.12 : Vitesse de rotation ω (rad/s)

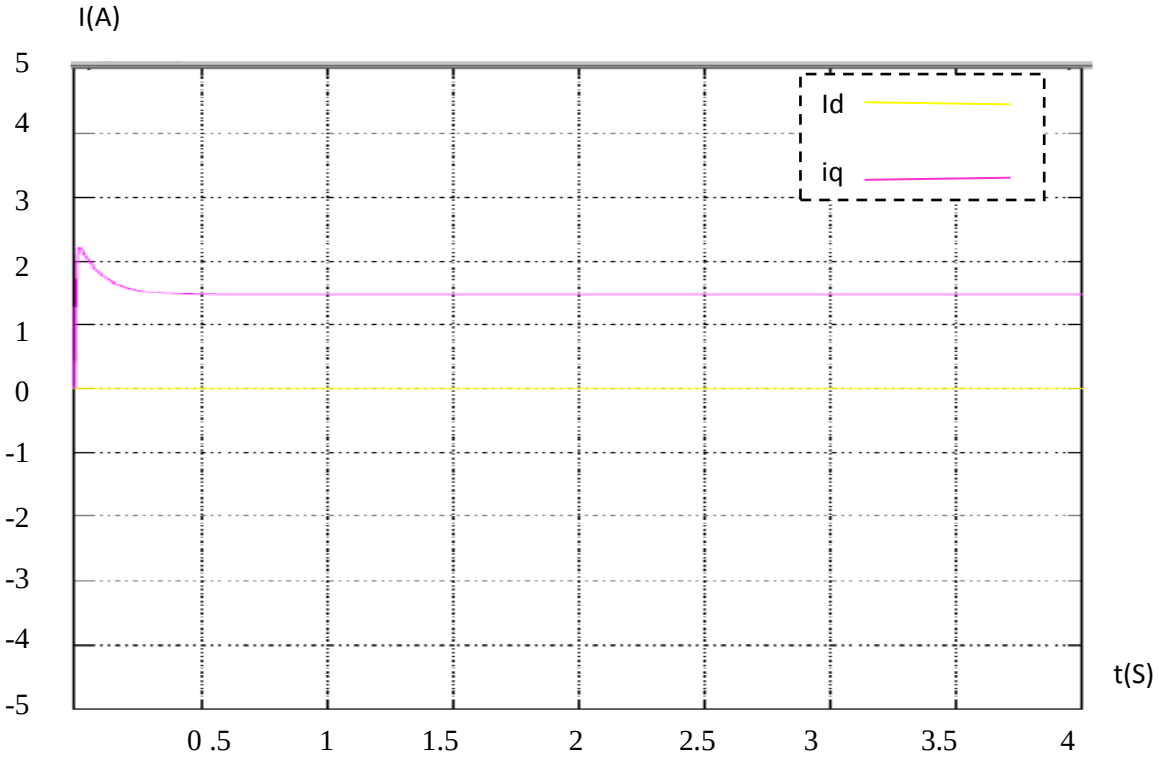



Figure-4.13 : Courants de phases id et iq (A)

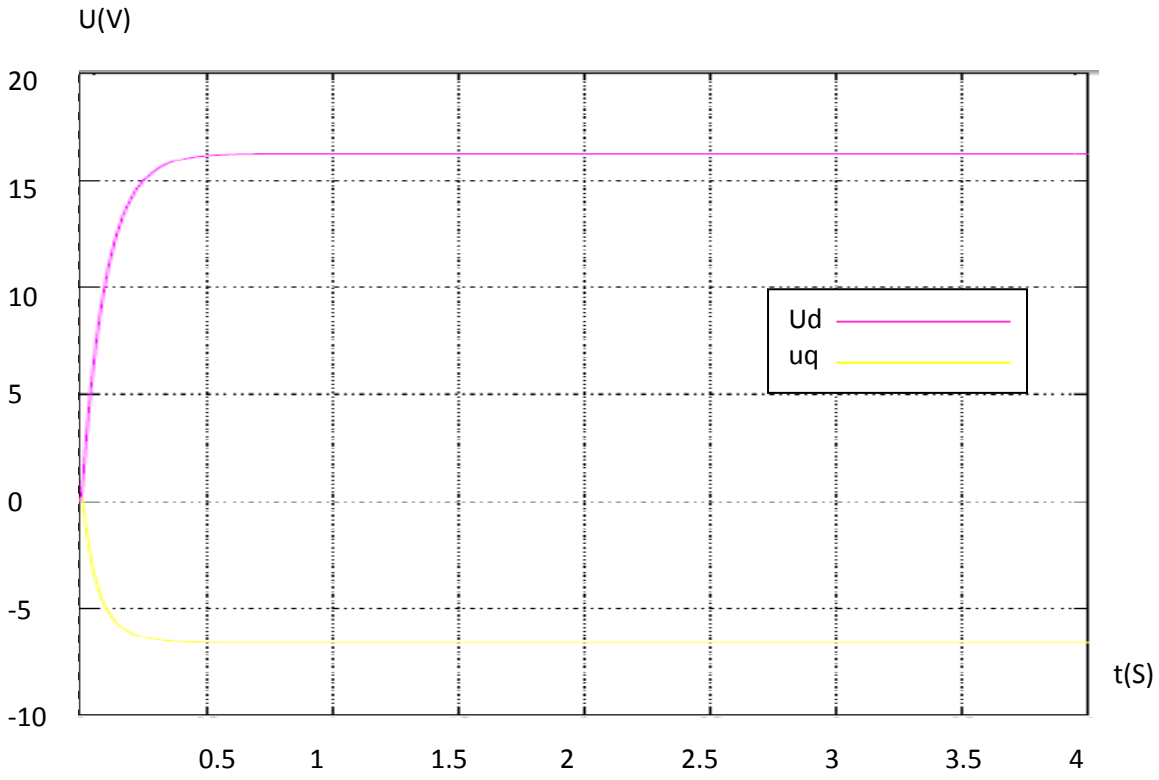



Figure-4.14 : tension ud et uq (v)

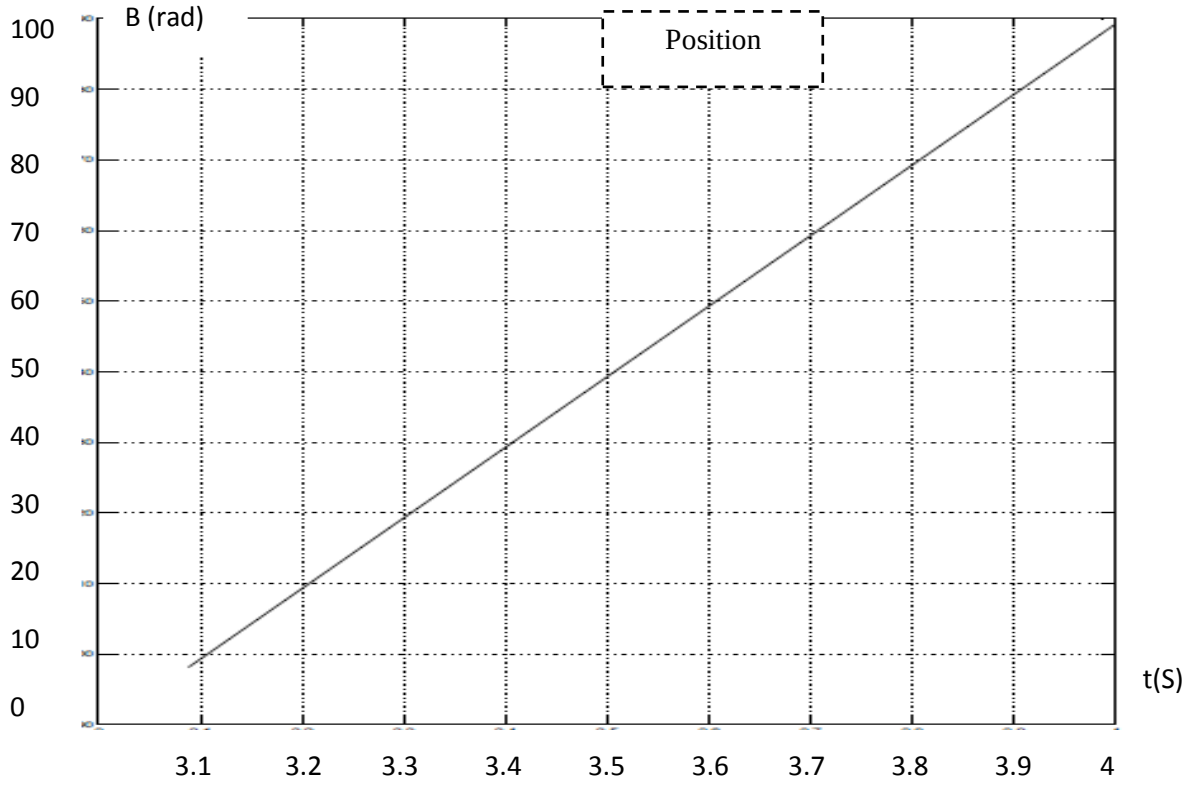



Figure-4.15 : de position

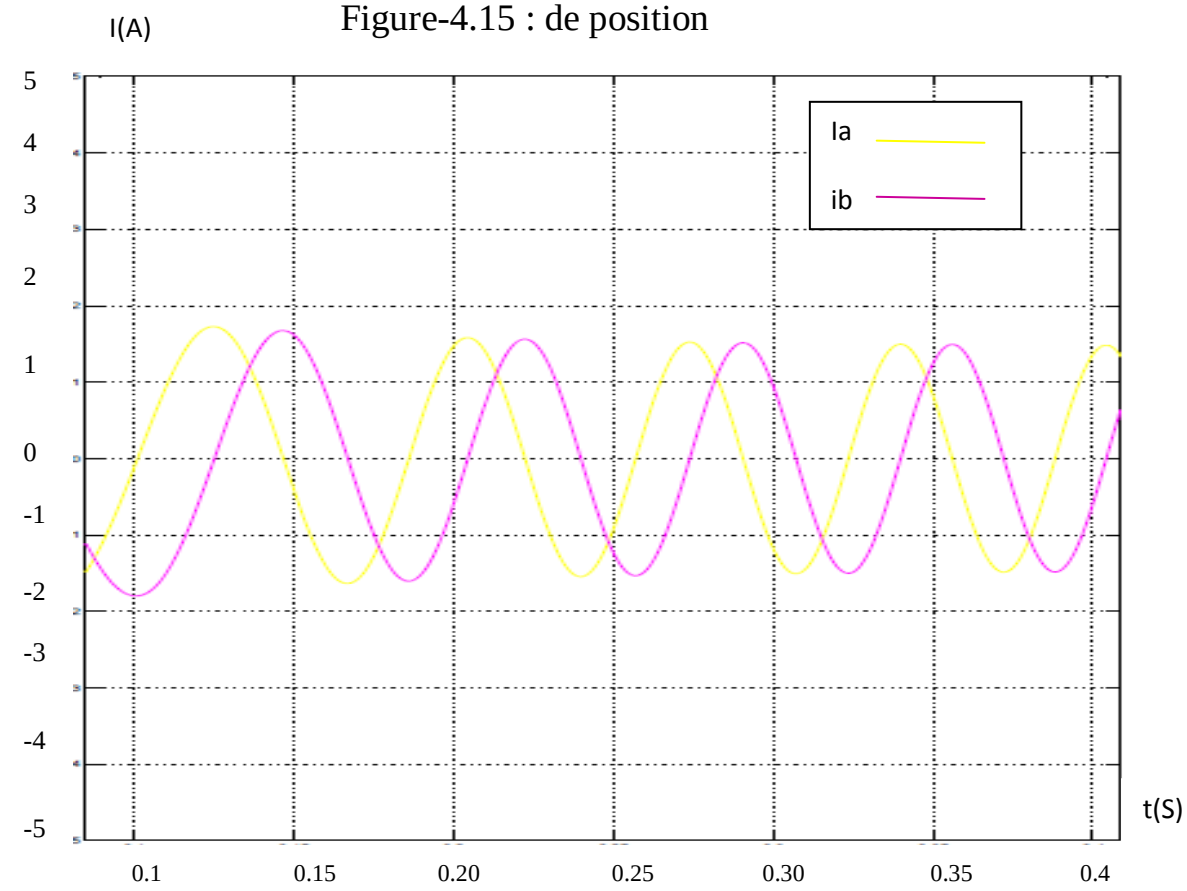



figure-4.16 : Courants ia et ib

Dans la figure-C on remarque que le courant Id est maintenu égal à zéro, par contre le courant Iq augmente pendant la phase d'accélération puis diminue pour atteindre une valeur constante en régime permanent. La figure- A montre que le couple électromagnétique ($T_m$) est proportionnel au courant Iq .

Dans la figure-F on constate que les courants de phases ia et ib sont sinusoïdaux. Avec Cette commande, le bruit du MPPH est réduit et le couple devient constant.

## 4.4. commande de la table traçante :

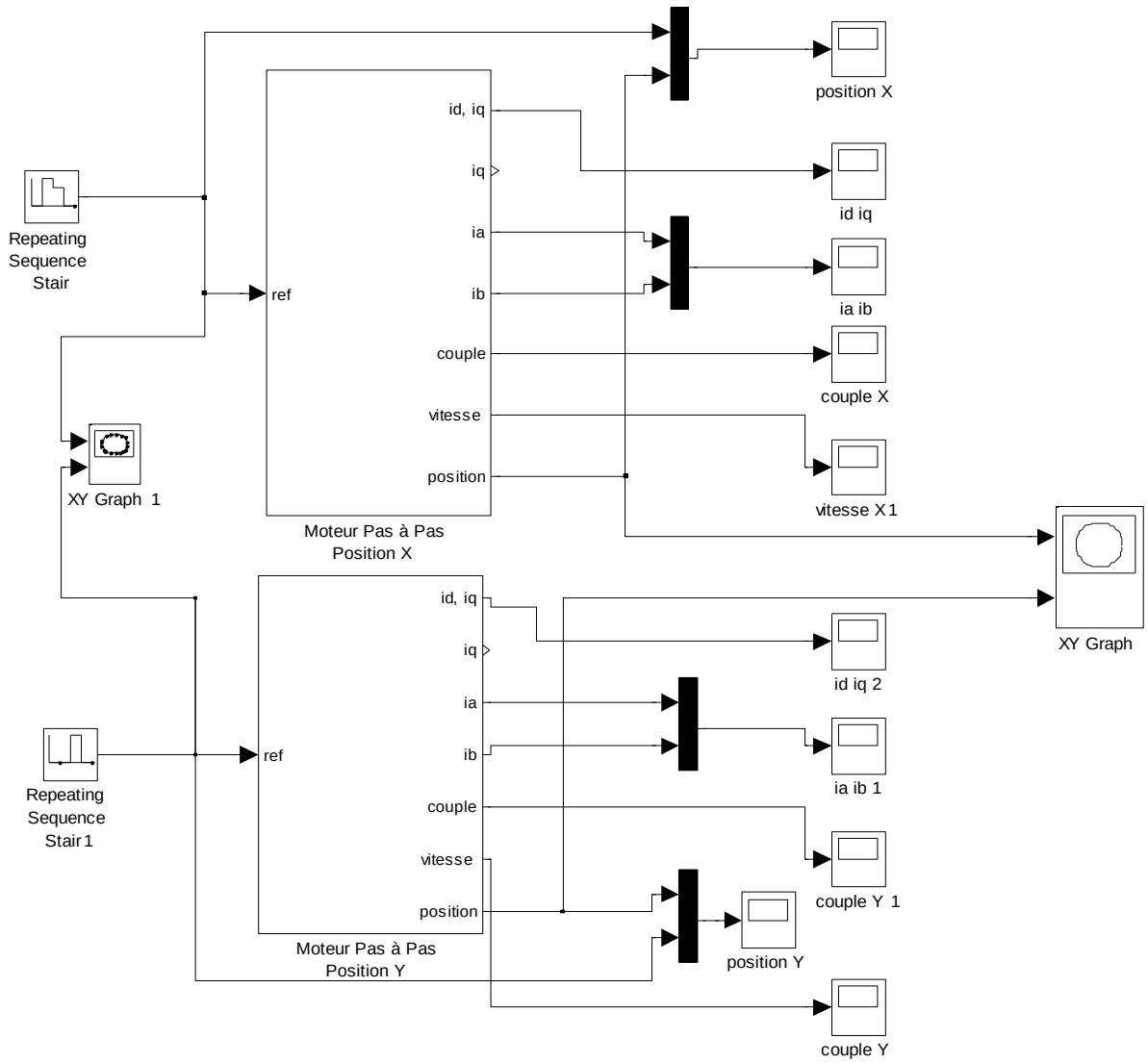



Figure-4.17.Schéma Commande table traçante

Figure-4.18. Des exemples de commande d'une table traçant X ,Y :

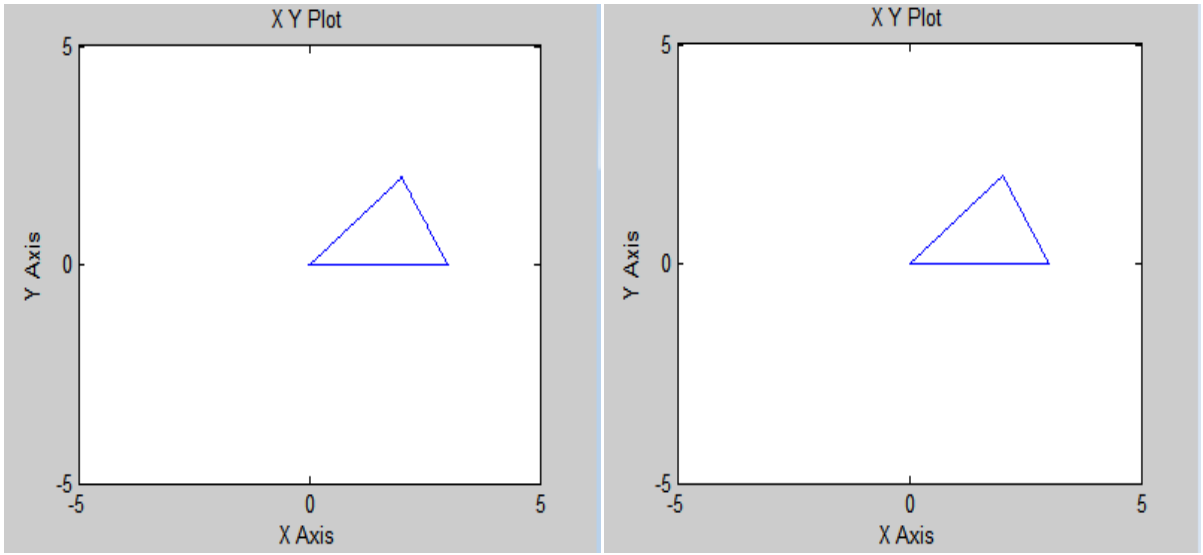



Figure –a

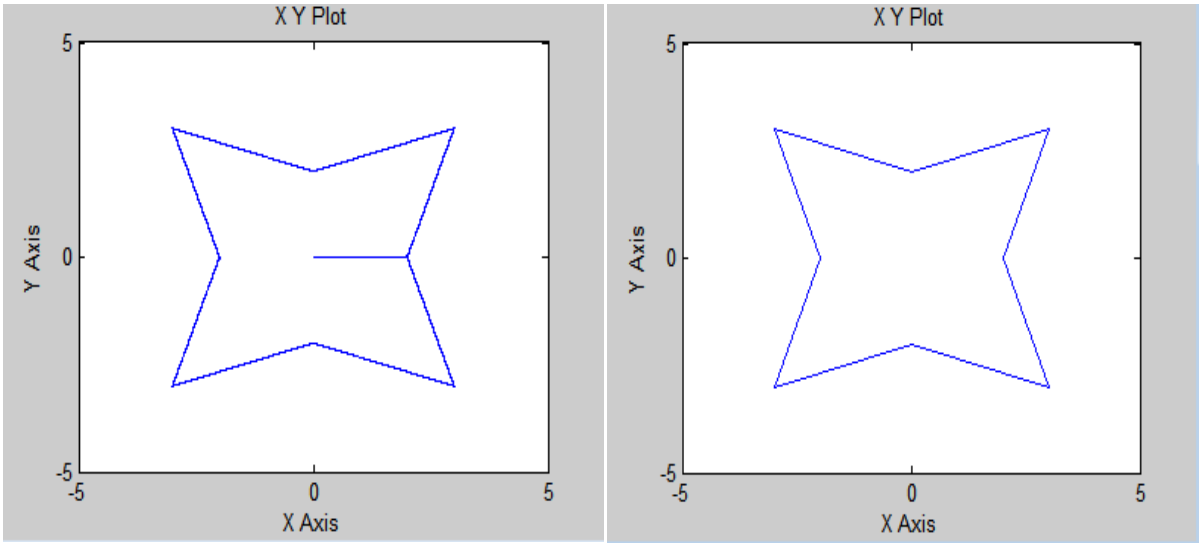



Figure-b

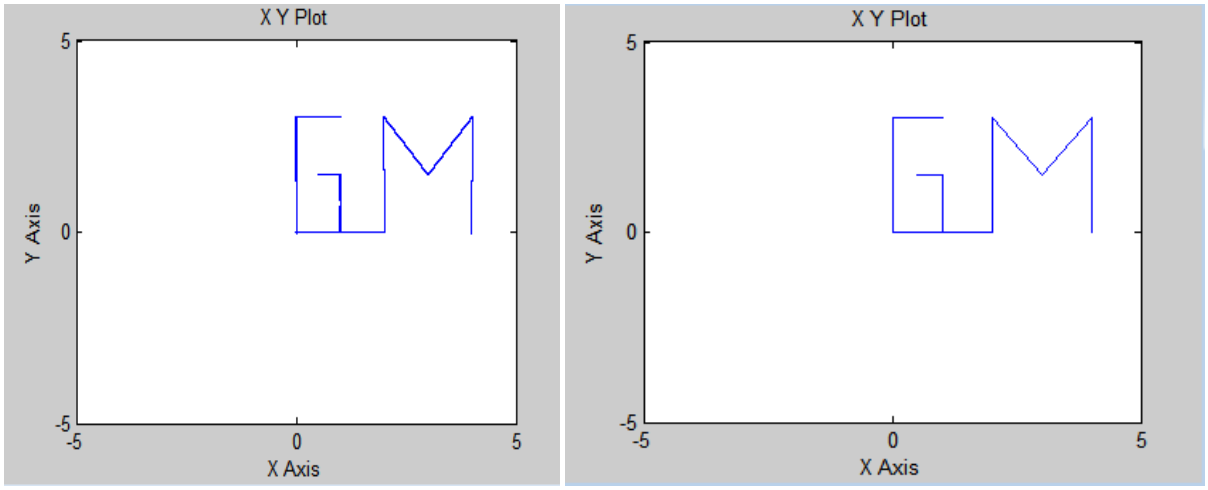



Figure-c

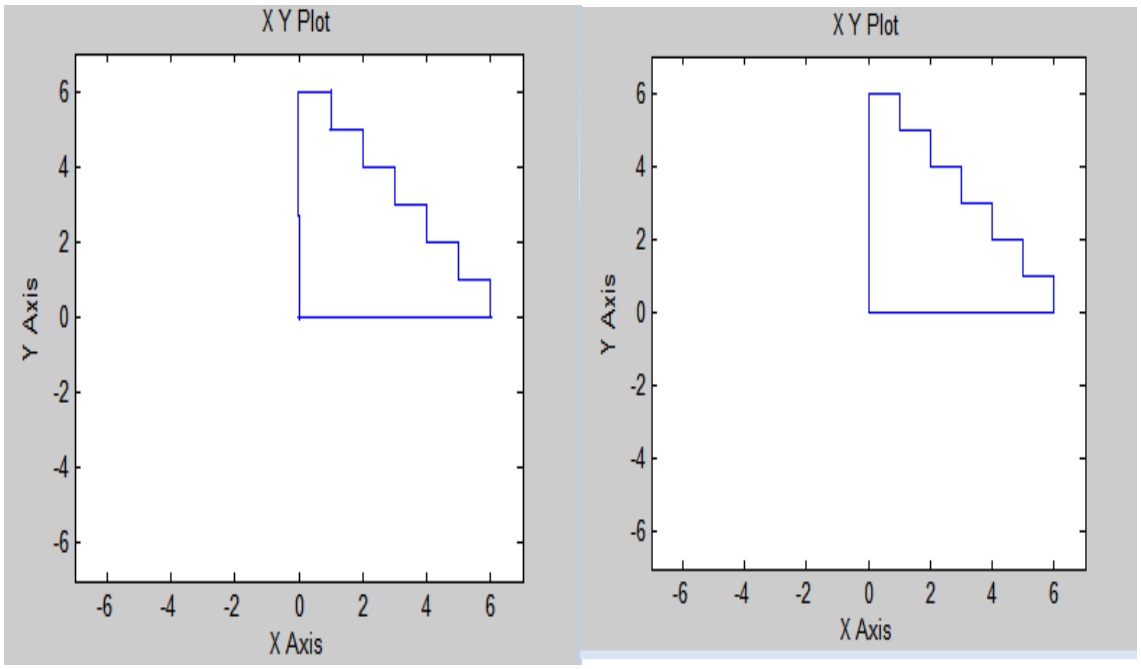



Figure-d

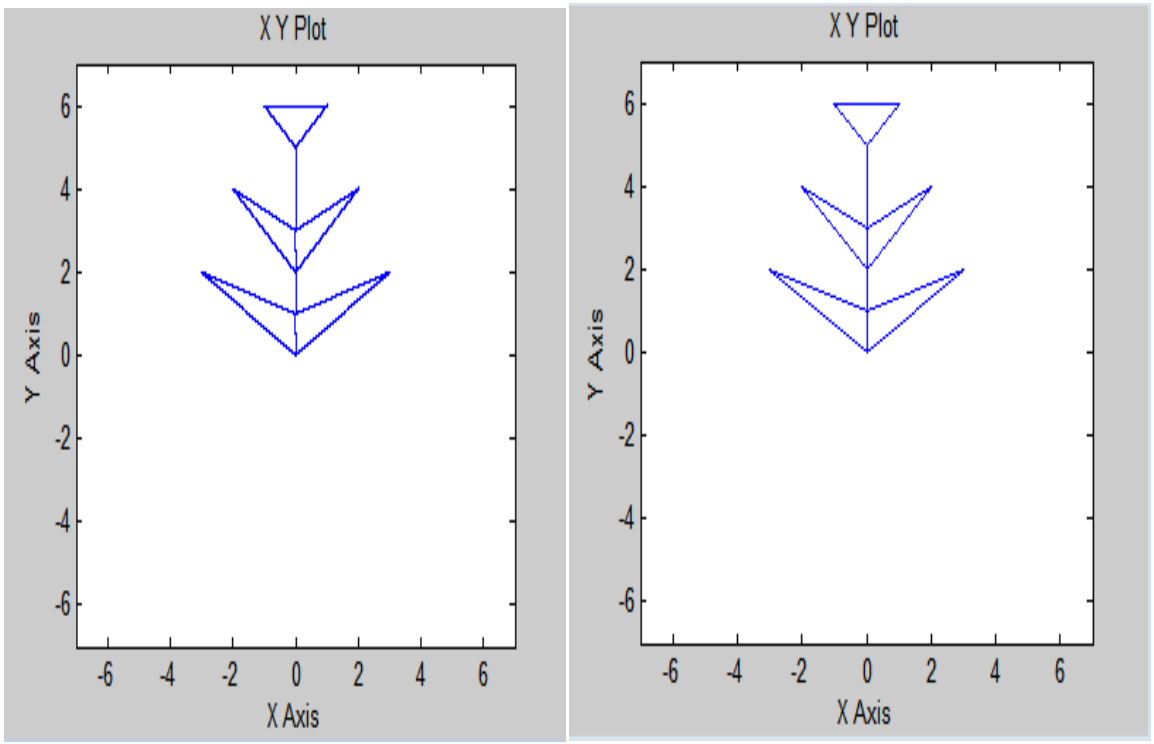

X Y Plot
Y Axis
X Axis
6
4
2
0
-2
-4
-6
-6 -4 -2 0 2 4 6
X Y Plot
Y Axis
X Axis
6
4
2
0
-2
-4
-6
-6 -4 -2 0 2 4 6

Figure-e

# Conclusion générale

L'étude de ce projet nous a permis d'explorer divers domaines de la technologie d'une manière générale. En effet, le travail demandé nécessite la fabrication mécanique de la table d'une part par un logiciel à travers une interface électronique qui il faut concevoir.

L'utilisation des moteurs pas à pas pour la génération du mouvement de la tête porte charge nous a permis d'obtenir une précision appréciable. Grâce à la souplesse de notre logiciel, l'opérateur peut choisir les paramètres de la commande, en occurrence : la vitesse de déplacement de la tête et le type de courbes à tracer.

Les résultats obtenus à l'issu de ce projet répondent au cahier des charges et nous permettent aussi d'être très optimistes pour envisager la conception d'autres systèmes basés sur le même principe tels que les machines à dessiner ou bien une fraiseuse travaillant en trois dimensions en ajoutant un troisième moteur générant l'axe z .

On note ici que la commande présentée dans ce travail ne peut être évaluée efficacement que si on l'intègre dans la table routeur conçue mécaniquement. Les mises en marche de cette table montreront certainement les performances de notre commande. Un calcul de précision s'impose alors.

En plus, l'intégration d'une interface type CNC s'avère indispensable pour compléter notre travail.

Finalement, on espère que ce projet soit un point de départ pour d'autres projets qui traitent le domaine du contrôle numérique assisté par ordinateur.

# Bibliographie

[1]-Thèse doctorat : synthèse d'algorithmes de commande sons capteur de moteur pas à pas et implantation sur architecteur programmable thèse doctorat, [Réalisé par Moussa Bendjedia], l'université de France, comte 2007.

[2] - Livre chevalier guide de dessinateur industriel édition 2004.

[3] - Livre moteur électriques pour la robotique [pierre mayé].

[4] - Livre formulaire de mécanique.

[5]-Thèse ingénieur : asservissement de position d'un moteur pas à pas [Mouali Zakia 1999].

[6]-Thèse ingénieur : commande d'un moteur pas à pas travers le port parallèle [khnolad karim].

[7]-Thèse ingénieur : conception et réalisation d'une table traçante [Université de Blida institut D'électronique 2002].

[8]-WWW.CD\SEM\Cours\Chap7.com.

[9]- Coures technique d'ingénieur France 1999