



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN
« MOHAMED BOUDIAF »

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID - TLEMCEM

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE
ECOLE DOCTORALE DE GENIE ELECTRIQUE (EDGE)
OPTION : AUTOMATIQUE

MEMOIRE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MAGISTER

**ETUDE, REALISATION ET COMMANDE D'UN MOTEUR A
RELUCTANCE VARIABLE LINEAIRE**

Présenté Par :
KADA KLOUCHA Omar

Soutenance prévue en Décembre 2011
Devant le jury composé de:

- Président :
 - A. OMARI Maître de conférences – A– USTO, Oran
- Examineurs :
 - M. BOUHAMIDA Maître de conférences –A– USTO, Oran
 - M.K ZAMALACHE Maître de conférences –A– USTO, Oran
 - M. ZERIKAT Maître de conférences –A– ENSET, Oran
- Encadreurs :
 - A.MEGHABBAR Maître de conférences –A– UABT, Tlemcen
 - L.BAGHLI Maître de conférences– A– UABT, Tlemcen

REMERCIEMENTS

Je remercie Monsieur B. Cherki, Directeur du Laboratoire d'Automatique de Tlemcen, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire et avoir financé la construction du MRVlin.

Nous remercions Monsieur M. Djellab, pour la prestation et la réalisation du mobile, du rail, des bandes de roulement et des essieux.

Je tiens à remercier vivement messieurs : A. OMARI, Maître de conférences à l'USTO, pour avoir accepté de présider ce jury, M. BOUHAMIDA, Maître de conférences à l'USTO, M.K. ZAMALACHE Maître de conférences à l'USTO, et M. ZERIKAT Maître de conférences à l'ENSET Oran, pour l'intérêt qu'ils ont porté pour examiner mon travail d'une façon minutieuse.

J'adresse mes sincères remerciements à Messieurs M. MEGHABBAR, pour sa bienveillance, ses précieux conseils ainsi que son suivi de l'avancement de ce projet.

Monsieur L. BAGHLI pour m'avoir fait l'honneur de proposer ce sujet et diriger ce travail, pour la réalisation de la carte de commande et pour son aide, sa disponibilité et ses nombreux conseils.

Que tous les enseignants de l'université sciences et technologie – Mohammed Boudiaf - d'Oran, se trouvent ici remercié, et plus particulièrement ceux de l'école doctorale de génie électrique 2007-2008 option automatique pour leurs efforts durant toute la formation théorique que nécessite cette thèse.

Dédicace

*A mes parents pour leurs sacrifices et leur soutien matériel et moral.
A ma famille et mes amis.*

RESUME

L'objet de ce projet est d'étudier, de réaliser et piloter un moteur à réluctance variable linéaire afin de perfectionner sa commande et de pouvoir l'utiliser au-delà des applications classiques de moteur pas à pas, grâce à un observateur de position amélioré, basé sur un capteur infrarouge.

Le travail demandé consiste en une étude bibliographique sur les moteurs pas à pas en général, moteurs linéaire et les moteurs à réluctance variable linéaire, ensuite l'analyse de la machine dont la structure sera définie par un calcul par éléments finis à l'aide d'un logiciel libre (FEMM), permettant la prédiction des caractéristiques électromagnétiques et mécaniques pour aboutir à un dimensionnement et une réalisation expérimentale.

La partie commande du dispositif sera simulée à l'aide du logiciel Matlab mais en utilisant la bibliothèque d'interface avec FEMM, de manière à calculer au plus juste, les forces en fonction de la position relative des dents du mobile par rapport aux dents du rail (partie fixe).

Le moteur sera piloté en boucle ouverte au moyen d'un dspic, un microcontrôleur de la famille des dspic qui contient un noyau DSP (Digital Signal Processing) et alimenté via un onduleur triphasé embarqué.

Un capteur infrarouge sera également embarqué sur la partie mobile, permettant d'avoir un retour afin de réguler sa vitesse et connaître sa position, sa vitesse et autres données relatives à son fonctionnement.

La transmission des données sera réalisée à travers une liaison Bluetooth (communication série en profil SPP) avec le PC et une interface Matlab que nous avons réalisé.

Cette machine, à caractère pédagogique, sera utilisée comme démonstrateur pour les TP ou lors des manifestations scientifiques mais également pour tester différents algorithmes d'observation de position et de vitesse.

Abstract

The purpose of this project is to study, implement and control a linear switched reluctance motor to improve his command and to use it beyond the traditional applications of stepper motor thanks to an improved position observer, based on an infrared sensor.

The work consists of a literature study on the stepper motors in general, linear motors and linear variable reluctance motors, then the analysis of the machine whose structure will be defined by a finite element method analysis using a freeware (FEMM), allowing the prediction of electromagnetic and mechanical characteristics to achieve a design and experimental realization.

The MRVlin will be simulated using the Matlab software thanks to an interface library with FEMM, in order to calculate, as accurately as possible, the forces depending on the relative position of the teeth of the movable relative to the teeth of rail (fixed part).

The motor will be controlled, in open loop, using a dsPIC33F, a microcontroller of the family of dsPIC who contains a DSP core (Digital Signal Processing) and powered by a three-phase inverter.

An infrared sensor is also embedded on the mobile part, allowing for a feedback to control its speed and know its position, speed and other data relating to its operation.

The data transmission will be established through a Bluetooth link (Serial Peripheral Profile SPP) with the PC interface and Matlab that we have achieved.

This machine will be used as a demonstrator for practical work or in scientific events, but also to test different algorithms to observe position and velocity.

ملخص

الغرض من هذا العمل هو دراسة ، إنجاز و التحكم في محرك خطوة خطوة خطي متغير الممانعة، حتى نتمكن من اتقان قيادته واستخدامها خارج نطاق التطبيقات التقليدية من خلال وضع المراقبة المحسنة ، استنادا إلى استشعار الأشعة تحت الحمراء.

العمل المطلوب يتكون من مراجعة الأدبيات على سائر المحركات الخطوية بشكل عام، سيتم تعريف المحركات الخطوية والمحركات الخطوية متغيرت الممانعة ، ثم تحليل هيكل الآلة باستخدام طريقة العناصر المتناهية باستعمال برنامج حاسوب خاص (FEMM) ، للسماح بالتنبؤ بالخصائص الكهرومغناطيسية والميكانيكية لتحقيق التصميم النهائي و تصنيعه فيما بعد.

سوف يتم محاكاة جهاز التحكم باستخدام برنامج ماتلاب (MATLAB) ولكن باستعمال مكتبة الربط مع FEMM، وذلك لحساب بأكبر قدر ممكن من الدقة القوى المحاطة بالمحرك اعتمادا على وضعية أسنان الجزء المتحرك بالنسبة لأسنان الجزء الساكن.

وسيتم تشغيل المحرك في حلقة مفتوحة باستخدام متحكم dspic ، يحتوي على نظام DSP (معالجة الإشارات الرقمية) ومدعوم بعكس ثلاثي المراحل. أيضا سيتم تزويد الجزء المحمول بجهاز استشعار الأشعة تحت الحمراء ، للسماح بعودة المعلومات إلى dspic للتحكم في السرعة والمسافة وغيرها من البيانات المتعلقة بعمل المحرك. وسيتم نقل البيانات عبر وصلة بلوتوث مع واجهة الكمبيوتر باستعمال ادات GUI في الماتلاب.

هذا المحرك ذو الطابع البيداغوجي، سيتم استخدامه في الأعمال التطبيقية و في المناسبات العلمية ولكن أيضا لاختبار مختلف الخوارزميات لمراقبة المسافة والسرعة.

INTRODUCTION GENERALE

Depuis longtemps, les moteurs électriques étaient aperçus comme des machines à structure rotative et ne peuvent produire des mouvements linéaires qu'à l'aide de dispositifs de conversion de mouvement.

En effet, un moteur linéaire est essentiellement un moteur électrique qui a été «déployé» de sorte qu'au lieu de produire un couple (rotation), il produise une force linéaire sur sa longueur en installant un champ électromagnétique de déplacement. Il offre la possibilité d'effectuer un mouvement de type rectiligne en s'affranchissant d'une quelconque transformation mécanique d'un mouvement rotatif en un mouvement linéaire.

Il demande donc beaucoup moins d'adaptations mécaniques que les approches classiques où le mouvement linéaire est obtenu en couplant un moteur rotatif à une vis à bille ou à une crémaillère. Ainsi le moteur linéaire s'impose lorsque la vitesse et la précision importent vraiment.

Ce n'est qu'au milieu des années 1970, (principalement dans le domaine des entraînements électriques) [1], que les actionneurs linéaires sont présentés comme l'une des plus grandes innovations technologiques. Depuis, leur évolution ne cesse d'augmenter dans plusieurs axes d'applications et en différents types et modèles, allant des machines outils jusqu'aux trains à lévitation magnétique, passant notamment par les applications de la robotique dont ils représentent aujourd'hui un marché important grâce à leurs vitesse et précision sans rival.

De ce fait, le travail proposé dans cette étude touche un type de moteur linéaire pas à pas en occurrence le moteur à réluctance variable - conçu spécialement - afin d'éclaircir les phénomènes qui le régissent puisque sa structure est ouverte contrairement aux moteurs classiques et afin d'accompagner cet engouement nouveau et contribuer à la compréhension de ce type d'actionneur resté jusqu'à présent ignoré par beaucoup d'étudiants.

Le cahier des charges que nous nous sommes fixé [3] prévoyait de faibles dimensions afin de rendre la machine facilement manipulable et transportable. Le niveau de tension ($< 15V$) permettrait à l'actionneur de pouvoir être alimenté par une alimentation standard de table de salle de TP ($30V / 2.5A$). Ce niveau de tension offre aussi l'avantage de ne pas poser de

problème de sécurité et d'isolation particulier et ainsi permettre aux étudiants de mettre les doigts sur la machine et sur la carte de commande, d'aller observer, à l'oscilloscope, les signaux de commande et de puissance.

Le mémoire se compose de cinq chapitres :

Le premier chapitre entamera un bref historique sur les moteurs pas à pas en général et à réluctance variable en particulier.

Le second touchera l'étude théorique comportant une étude détaillée sur le fonctionnement de ce type d'actionneurs, les différences entre un moteur pas à pas classique et un moteur pas à pas linéaire, son modélisation, notion d'énergie et coénergie.

Dans le troisième chapitre, nous allons aborder la modélisation et le dimensionnement électromagnétique du moteur, sa conception et son bobinage puis la validation avec l'étude théorique.

Le quatrième chapitre sera consacré à la méthode de commande et aux organes de la carte de commande.

Un cinquième chapitre sera consacré à l'étude et l'analyse des résultats expérimentaux ainsi que leur comparaison avec l'étude théorique.

1^{ère} CHAPITRE :
ETAT DE L'ART
BREF HISTORIQUE

I. Etat de l'art :

Les moteurs pas à pas viennent d'entrer de plus en plus dans leur phase d'utilisation en grande série. Ce sont des moteurs de conception très ancienne mais leur principe est resté très marginal. Il fut surpassé par les machines synchrones permettant la réalisation des plus grands générateurs, par les machines asynchrones (seuls moteurs pouvant se mettre en marche sans dispositif auxiliaire et fonctionner sur le réseau alternatif) et par les machines à courant continu à collecteur. Ces dernières possèdent les mêmes qualités sur une alimentation en courant continu et permettent aussi la variation de vitesse la plus aisée et la mieux contrôlable.

Ils n'ont cependant jamais complètement disparu. A cette époque déjà, leur intérêt résidait dans leurs qualités de simplicité et de robustesse.

Ainsi, ils ont actionnés des systèmes d'horlogerie (horloge Froment, 1854), des jouets (petits moteurs Froment monophasés) vers 1900-1910, des dispositifs de transmission électrique (1920, synchronomachines dans les bateaux de guerre), des rasoirs (Remington) ou encore, des tourne-disques 78 tr/mn. [2] Ces moteurs étaient soit de type pas à pas, soit autopilotés mécaniquement, soit synchrones selon les contraintes de fonctionnement et le principe d'alimentation retenu.

Les premiers moteurs pas à pas furent employés, naturellement, dans les systèmes d'horlogerie (années 1850), mais c'est seulement dans les années 1910 qu'ils furent appliqués à des entraînements différents. Une invention originale de l'ingénieur écossais WALKER C.L fit l'objet d'un dépôt de brevet au Royaume-Uni en 1919. La structure proposée est présentée à la **figure 01**.

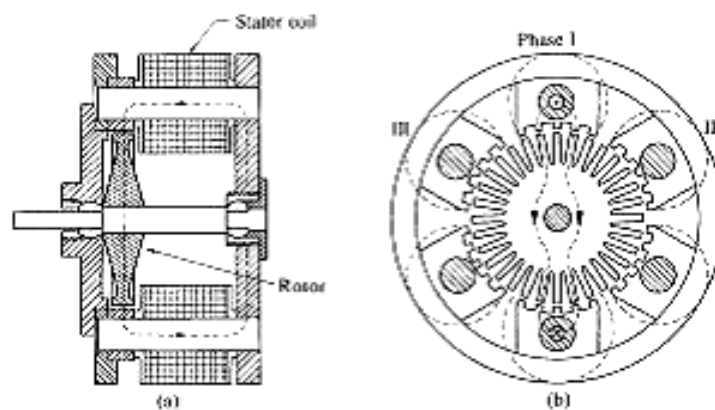


Fig. 01 : Moteur pas à pas (Walker) 1919

Il semble que les premières structures à double saillance, telles que nous les connaissons aujourd'hui, soient apparues dans les années 1920. Un article de 1927 sur les applications de l'électricité dans les bateaux de guerre décrit un moteur de type 6/4 pareil à ceux que nous étudions actuellement. Il était utilisé comme transmetteur de mouvement entre deux points éloignés (**figure 02**).

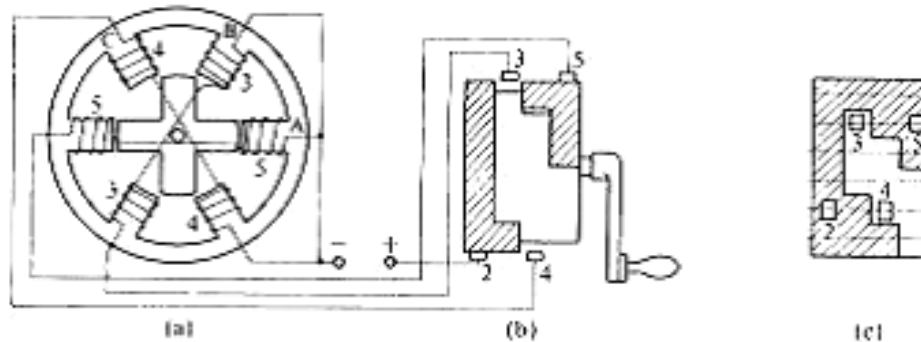


Fig. 02 : Moteur à réluctance variable 1920

Dans les années 1960, en Angleterre, on s'intéressa de nouveau à ces moteurs; ce fut probablement le point de départ des travaux des équipes de plusieurs universités anglaises, notamment celles de Leeds LAWRENSON et Nottingham. Ensuite, sont apparus les moteurs synchrones à réluctance variable à rotor segmenté, à barrières de flux et à rotor axialement laminé: ces techniques avaient pour but d'augmenter le rapport de saillance et, par là, le facteur de puissance et les performances. A la même époque, naissait en France, avec les frères JARRET, un nouvel engouement pour les moteurs à réluctance variable à grand nombre de dents et fort couple massique: ces moteurs semblaient particulièrement adaptés à la réalisation d'entraînements directs à basse vitesse, par exemple, pour des roues de véhicules électriques.

Quant au moteur à réluctance variable à double saillance auto commuté, le terme équivalent anglo-saxon : "**Switched Reluctance Motor**" semble être apparu en 1969; c'est aujourd'hui le terme employé dans la littérature scientifique internationale pour qualifier ces machines.

[2]

L'expérience acquise par les utilisateurs de ces moteurs amènera d'autres applications ou le moteur pas à pas fut essentiellement traité en moteur à courant continu, sans balais bien

entendu. Il sert, par exemple, au déroulement d'antennes, de panneaux de batteries solaires, ou même de moteur d'asservissement pour la commande de vannes.

Ces applications spatiales ouvrirent la voie aux applications aéronautiques, puis militaires ou le moteur pas à pas est essentiellement utilisé en moteur d'asservissement. Il ne présente pas que des avantages par rapport à un moteur d'asservissement biphasé ou à courant continu mais a cette particularité fondamentale de permettre des asservissements où la vitesse est indépendante de la position.

En plein essor des moteurs pas à pas, on a développé les moteurs pas à pas linéaire, qui utilisent les mêmes principes de fonctionnement, et qui viennent de rendre leurs utilisations encore plus intéressantes notamment lorsqu'il s'agit d'applications de précision.

Ainsi, plusieurs applications apparaissent: matériel de laboratoires, de cinéma, de prospection pétrolière,... où le moteur pas à pas est utilisé suivant les cas en moteur d'asservissement, en moteur à courant continu sans balais, en moteur à vitesse variable, en moteur synchrone, en moteur à rotation discontinue, en moteur de positionnement.

Enfin vient l'utilisation en informatique et en robotique, qui représente aujourd'hui, et de loin, le marché le plus important. Dans tous les cas les exigences actuelles en vitesse rendent pratiquement impossible l'utilisation de moteurs ordinaires associés à des freins pour réaliser les mouvements discontinus qui sont presque toujours nécessaires.

Plusieurs laboratoires universitaires français, dont le GREEN ou le LESIR (SATIE depuis 2002), ont travaillé récemment dans le domaine des machines à réluctance variable linéaires à double saillance à alimentation électronique.



Fig. 03 : Train à lévitation magnétique et à moteur linéaire, inauguré le 31 décembre 2002, Le parcours de 30 km s'effectue actuellement en 8 minutes (vitesse moyenne = 225 km/h). La vitesse maximale d'exploitation a été fixée à 420 km/h.

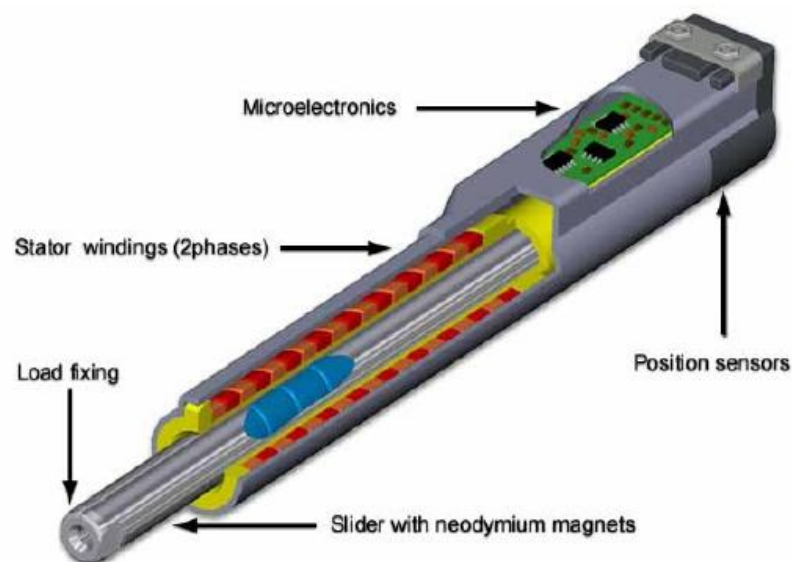


Fig. 04 : Bras de lecture des disques durs, CD-ROM et DVD

Les moteurs linéaires sont très présents comme actionneurs des bras de lecture des disques durs de nos microordinateurs, en raison de leur compacité, de la rapidité et la précision de leurs mouvements.

2^{ème} CHAPITRE :
ETUDE THEORIQUE PRINCIPE DES MOTEURS PAS A
PAS

II.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons aborder les principes de modélisation et de fonctionnement des moteurs pas à pas en général, à réluctance variable et linéaire en particulier.

II.2 Fonctionnement des moteurs pas à pas

Un moteur pas à pas est un appareil dont les différents enroulements sont alimentés l'un après l'autre, chaque commutation provoquant un déplacement angulaire (ou linéaire) donné, appelé "pas" et qui est la caractéristique du moteur. Le sens de rotation est évidemment défini par le sens dans lequel les enroulements ou groupes d'enroulements sont excités.

Un moteur pas à pas rotatif peut être comparé à une série d'enroulements disposés en cercle qui, lorsqu'ils sont excités successivement, réagissent en le faisant tourner d'un angle θ .

Le couple ou la réaction n'ont pas une valeur constante pendant le déplacement θ (ou x : déplacement linéaire). Cependant, la variation du couple entre le point 1 et le point 2 sera répétée du point 2 au point 3; et ainsi de suite.

Il y a deux types de moteurs pas à pas. Les premiers fonctionnent par réaction entre un champ électromagnétique et un aimant permanent. Ce type est désigné sous le nom de moteur pas à pas à aimant permanent (M.A.P). Les seconds fonctionnent par la réaction entre un champ électromagnétique et un rotor en fer doux. Ils sont désignés sous le nom de moteurs pas à pas à réluctance variable (M.R.V) et qui seront le centre de notre étude.

L'assemblage des deux principes de fonctionnements donne naissance au troisième type, qui regroupe les moteurs hybrides.

Les moteurs pas à pas ont beaucoup d'avantages sur les systèmes linéaires, ils offrent:

- Une réponse très rapide (temps de réponse jusqu'à moins de 1 milliseconde);
 - Insensibilité aux variations linéaires;
 - Longue durée de vie (jusqu'à 1 milliards de cycles);
 - Positionnement précis;
 - Insensibilité aux variations de la tension et de l'amplitude des impulsions.
 - La versatilité de ces moteurs est aussi très importante. Ils peuvent être utilisés comme:
-

- Moteurs à fréquence variable (élimination du variateur de vitesse);
- Moteurs à courant continu sans balais;
- Servomoteurs en circuit ouvert pour éliminer la boucle de retour;
- Moteur à entraînement numérique;
- Moteurs synchrones;
- Compteurs d'impulsions (intégrateurs).

Ils permettent en particulier un positionnement précis sans asservissement.

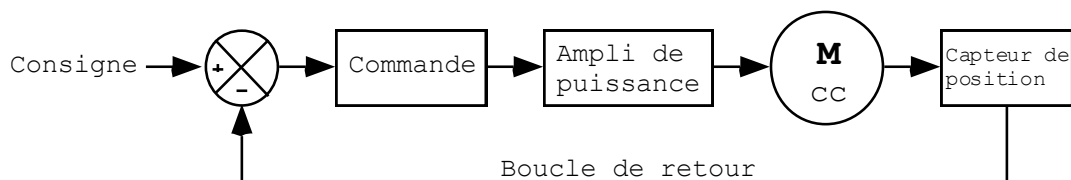


Fig 05 : Principe de commande en position d'un moteur à courant continu

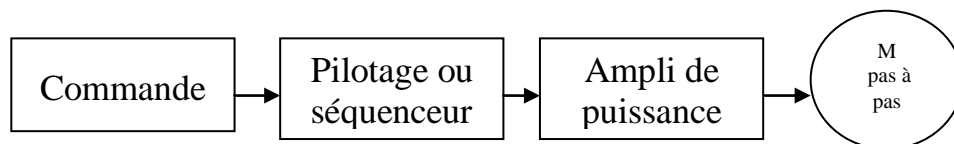


Fig 06 : Principe de commande d'un moteur pas à pas.

On constate que le système est beaucoup plus simple.

A chaque impulsion du signal de commande correspond au niveau du rotor un déplacement défini appelé « pas » ou « *incrément mécanique* ».

La vitesse de rotation est fonction de la fréquence des impulsions.

II.3 Moteur à Reluctance Variable

Il utilise le principe physique du flux maximum : Le stator constitué de fer doux, va se placer de telle sorte que le flux magnétique qui le traverse soit maximum.

Quel que soit le type de machine à réluctance variable étudié (cylindrique, linéaire, Vernier à grosses dents...), le principe de fonctionnement est toujours identique si les couplages magnétiques entre phases sont négligeables. Il peut être décrit à partir de l'étude d'une structure monophasée élémentaire, identique à celle représentée (fig. 07).

Il s'agit d'un circuit magnétique simple constitué de deux pièces ferromagnétiques, l'une fixe (stator) comportant un enroulement à N spires parcourues par un courant I et l'autre mobile (rotor) autour d'un axe fixe. Soit θ_m l'angle entre l'axe longitudinal de la pièce mobile et celui interpolaire de la pièce fixe. [1]

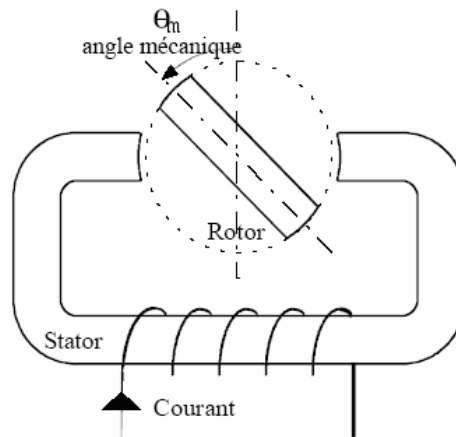


Fig07 : Machine à réluctance monophasée : Structure élémentaire

Le circuit magnétique est fermé s'il ne comprend que des pièces ferromagnétiques. S'il est interrompu par des intervalles d'air, ou entrefers, il est dit ouvert.

Le circuit est exempt de fuites magnétiques si le flux Φ de l'induction B à travers une de ses sections S est partout le même. Φ est alors de la forme :

$$\Phi = \frac{\sum I}{\oint \frac{dl}{\mu S}} = \frac{NI}{R}$$

Le nombre d'ampères-tours inducteurs $NI=F$ est la force magnétomotrice du circuit et l'intégrale est la réluctance R , avec μ est la perméabilité d'un élément du circuit de longueur dl .

Si des pièces du circuit magnétique sont mobiles, elles vont se placer de telle sorte que la réluctance soit minimum et donc le flux est maximum; Ce qui revient en fait à réduire les entrefers.

II.3.1 Constitution

Rotor : cylindre en fer doux dans lequel sont taillées des dents (pôles du rotor)

Stator : empilage de tôles découpées, encochées.

Les enroulements en série sont diamétralement opposés afin que les attractions simultanées n'engendrent pas une usure prématurée des paliers du rotor.

N_s = nombre de dents du stator

N_r = nombre de dents du rotor

N_p = nombre de pas par tours

$$N_p = \frac{N_s \cdot N_r}{N_s - N_r}$$

Exemple :

Pour un moteur 6/4 : $N_s = 6$; $N_r = 4$; $N_p = 12$.

II.3.2 Fonctionnement

A chaque impulsion de la commande, la phase suivante du stator est alimentée.

On constate que les pôles les plus proches des bobines alimentées se positionnent en face de ces dernières. Suivant l'ordre d'alimentation des phases du stator, on peut choisir le sens de rotation. [6]

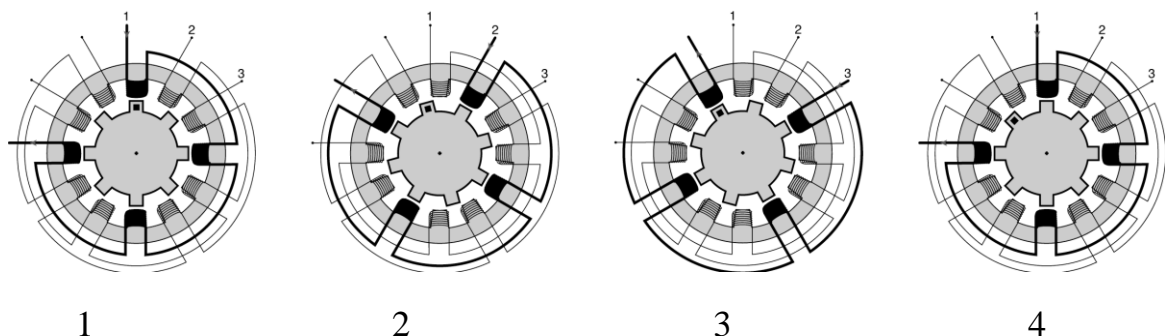


Figure 08 : Séquences de fonctionnement d'un moteur à réluctance variable 6/4

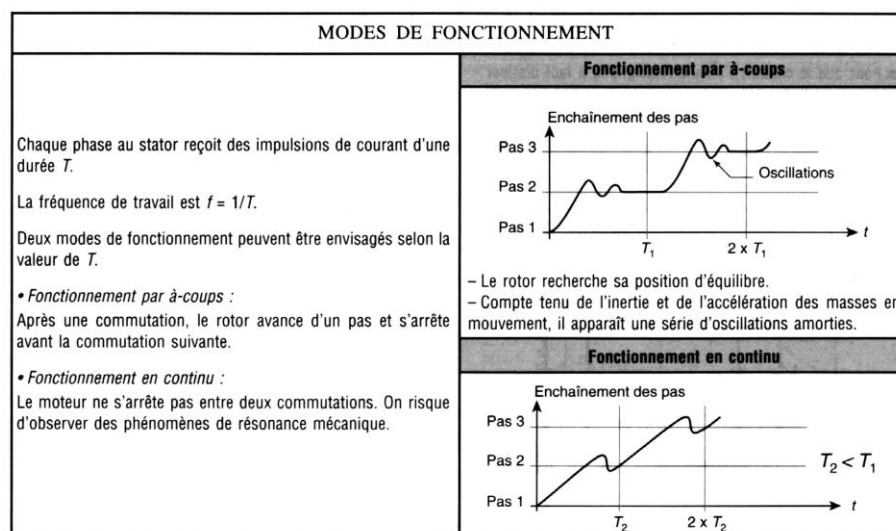


Fig. 09 : Mode de fonctionnement des moteurs pas à pas [6]

Fonctionnement par à-coups : le positionnement du rotor s'amortit entre chaque pas, ce qui ne pose aucun problème de fonctionnement.

Fonctionnement en continu : si on élève assez la fréquence de commutation, on arrive à un régime de vitesse quasi constant. C'est le régime synchrone. C'est la vitesse limite de bon fonctionnement du moteur.

II.4 Moteur à Reluctance Variable Linéaire :

Comme tout actionneur électrique, le moteur pas à pas à réluctance variable, peut créer deux types de mouvements: un mouvement de rotation (moteur pas à pas rotatif classique) ou un mouvement de translation (moteur pas à pas linéaire).

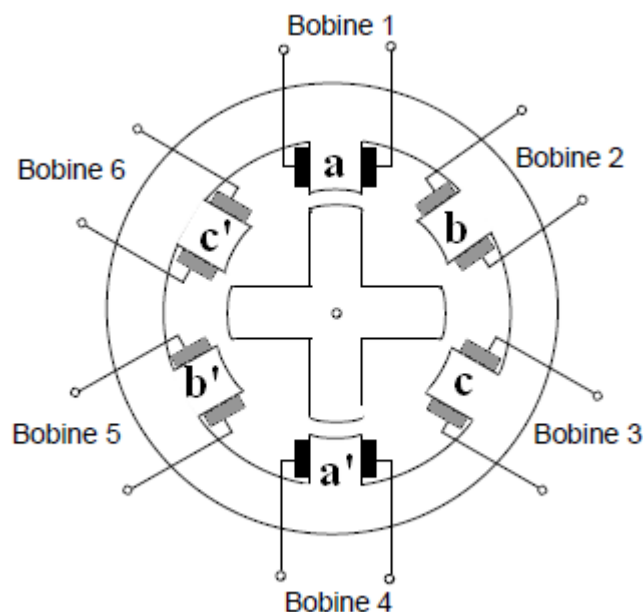


Fig10 : Structure rotative d'un moteur à réluctance variable 6/4

La figure précédente présente une structure habituelle d'un moteur à réluctance variable, il répond à l'alimentation de chaque paire de bobine par un déplacement angulaire du rotor par rapport au stator.

Tout comme pour les versions rotatives, les moteurs pas à pas linéaires se composent d'un stator, on parle de partie fixe, et d'une partie mobile portant les bobinages se déplaçant cette fois-ci linéairement.

Cette partie mobile peut être réalisée à partir d'une pièce ferromagnétique dentée, on parle dans ce cas d'un moteur à réluctance variable linéaire.

Il se peut que la partie mobile est munie d'aimants permanents et dans ce cas on parle d'un moteur à aimant permanent linéaire ou moteur synchrone linéaire.

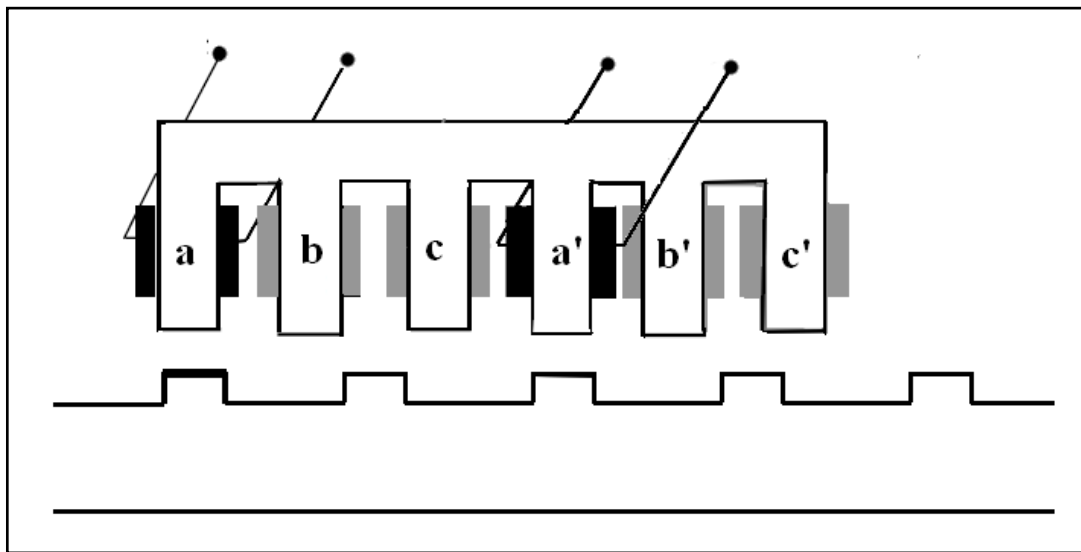


Fig. 11 : Structure linéaire d'un moteur à réluctance variable 6/4

La figure 11 représente la structure élémentaire d'un moteur à réluctance variable linéaire, on observe que pour les six dents de la partie mobile on aura quatre dents de la partie fixe d'où la structure d'une MRV 6/4 linéaire.

Par leur structures et contrairement aux moteurs ronds qui sont fermés, ces machines linéaires permettent une vue "écorchée" y compris lorsque la machine est en plein fonctionnement.

II.4.1 Mode d'alimentation

Pour avoir un pas entier et une bonne exploitation des forces électromagnétiques les bobines sont alimentées par paires deux par deux (a, a'), (b, b') et (c, c'). À chaque alimentation d'une paire, le moteur avance d'un pas, on aura ainsi trois séquences d'alimentation avant de revenir à la première séquence fig (12), il n'y aurait pas un tour complet comme dans les moteurs ronds mais un déplacement linéaire en continu.

Pour faire avancer l'actionneur (sens de gauche vers la droite) et après avoir alimenté la bobine (a,a'), les bobines (b,b') étant plus proches aux dents correspondantes de la partie fixe, une fois alimentées, elles viennent se positionner en vis-à-vis afin de minimiser la réluctance, (c,c') seront alimentées à leur tour on aura ainsi le premier sens de mouvement.

Pour faire reculer l'actionneur linéaire, après avoir alimenté la bobine (a,a'), les bobines (c,c') puis (b,b') seront alimentées à leur tour. On aura ainsi un mouvement dans le sens inverse du mouvement antérieur.

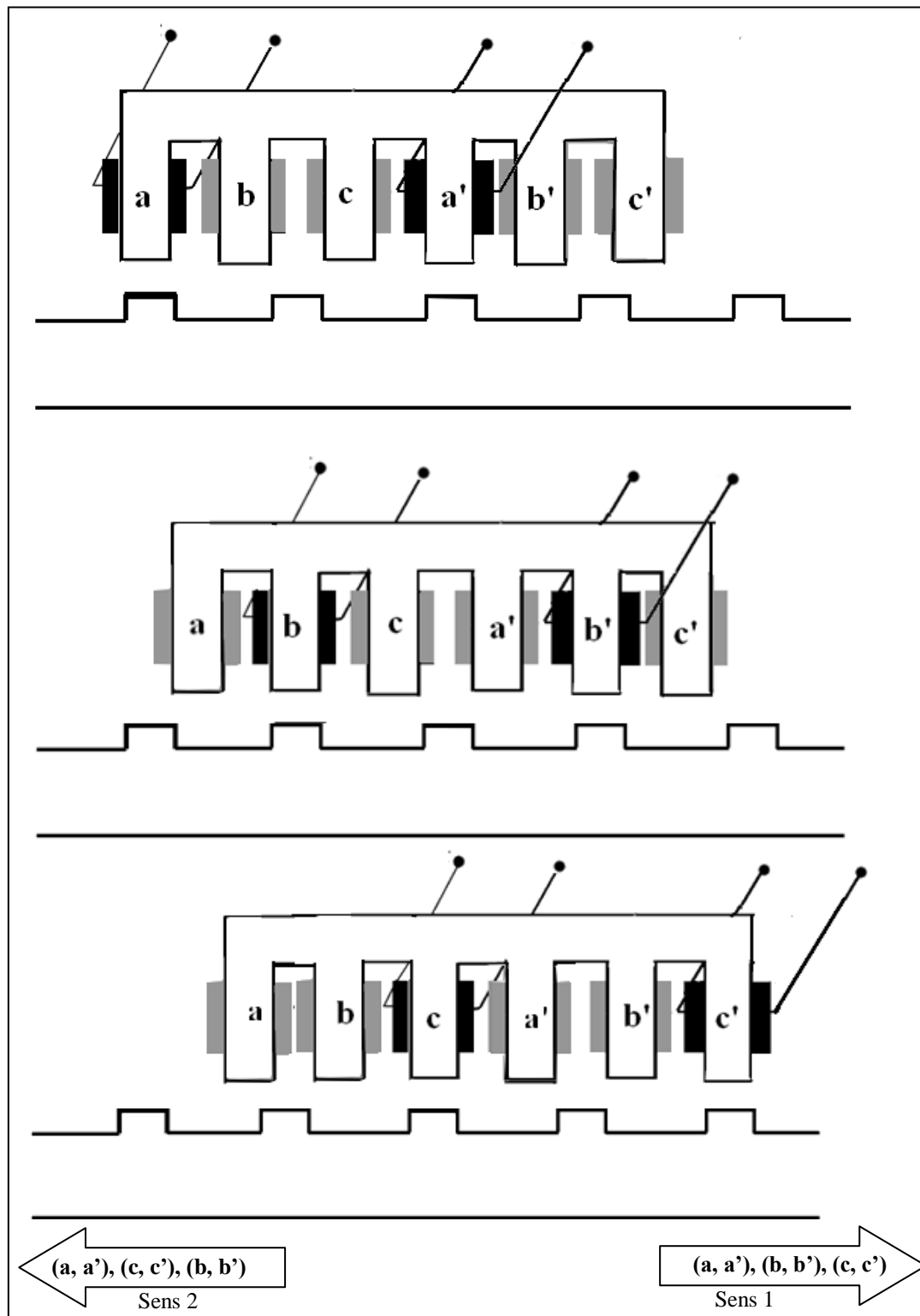


Fig. 12 : Configurations successives d'alimentation des bobines

II.4.2 Caractéristiques spécifiques aux MRV linéaires :

Dans le cas d'un moteur rotatif classique et afin de pouvoir convertir le mouvement primitif du moteur en un mouvement linéaire (translation), un dispositif complexe est utilisé pour en arriver. Ces dispositifs sont des engrenages, des crémaillères, des courroies ou des vis à billes. Dans certaines applications, ces systèmes atteignent souvent leurs limites techniques en termes de dynamique et de précision. Le moteur linéaire, vient alors pour remédier à ces handicaps puisqu'il n'y a aucune pièce pour convertir un mouvement d'une autre nature (rotatif) en mouvement linéaire. Le mouvement et l'effort sont directement appliqués au niveau de la charge.

Disposition de la partie fixe et mobile

Contrairement au cas des machines rotatives où le rotor et le stator sont généralement coaxiaux, les machines linéaires se présentent sous forme plate. Elles sont constituées d'une partie mobile et d'un stator fixe dont les positions peuvent être inversées.

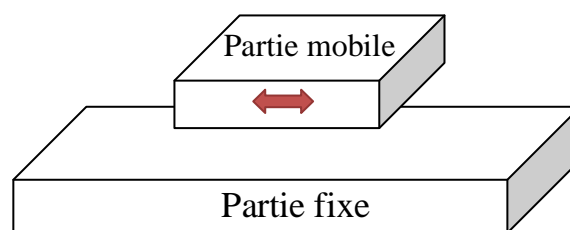


Fig. 13 : disposition de la partie fixe et mobile

Pour bien se faire une idée de l'intérêt d'un moteur linéaire, comparons-le à un système moteur rotatif associé pour des raisons de précision à une vis à bille [12].

Guidage :

Le centrage d'un rotor dans une structure rotative par des roulements est beaucoup plus simple et efficace que le guidage sur une structure linéaire pour laquelle la résultante des forces d'attraction peut être importante et difficile à maîtriser à cause de la distance entre les appuis. Toutefois, certaines structures permettent de s'affranchir de cette force d'attraction et de faciliter ainsi le guidage.

Entrefer :

Les échanges d'énergie électromagnétique entre partie mobile et la partie fixe se font à travers l'entrefer de la machine. Aussi, le choix de l'épaisseur de l'entrefer (e) reste prépondérant car il influe fortement sur les performances électromagnétiques de la machine. Il est bien connu, que la minimisation de e permet de maximiser la force à pertes Joule données.

Compte tenu du système de guidage entre les parties fixes et mobiles d'un moteur linéaire, il est difficile de réaliser un entrefer aussi faible que dans une variante tournante. L'entrefer rapporté au pas de déplacement est, par conséquent, plus élevé. Il en résulte une force par unité de surface plus faible.

Effets d'extrémités :

Le stator d'un moteur rotatif est fermé sur lui-même. Il assure donc la continuité des phénomènes électromagnétiques contrairement à tout moteur linéaire caractérisé par une discontinuité à ses extrémités. Cette discontinuité crée des différences de trajet pour les lignes de champs circulant dans le fer, selon qu'une phase d'extrémité ou une phase centrale est excitée.

La vitesse :

La vitesse maximale d'une vis à bille dans les moteurs rotatifs se situe aux environs de 1,5 m/s alors que la vitesse standard d'un moteur linéaire est de 5 m/s. d'où l'utilisation de ces moteurs dans des applications à grande vitesse.

Les moments d'inertie :

Le système rotatif cumule les différents moments d'inertie (axe moteur, couplage, vis...) et la force n'est pas directement appliquée à la charge. L'accélération est limitée par les inerties, alors que pour le moteur linéaire, la force est directement appliquée à la charge et l'accélération peut être beaucoup plus importante.

Les jeux :

Dans un entraînement classique, le codeur se situe dans le moteur, il tient compte d'une position angulaire, mais il ne peut pas déterminer la position exacte de la charge à cause des jeux des différents éléments d'entraînement. De plus, ces jeux ne se cumulent pas de la même façon dans les deux sens, varient suivant la température (dilatation) et évoluent dans le temps.

Le moteur linéaire dispose d'une tête de lecture optique ou magnétique du codeur linéaire (appelée aussi règle) sur le chariot de la bobine. La précision de lecture de la position réelle est inférieure au micromètre.

La course utile :

Les longues vis à bille nécessitent une mécanique parfaite. Les mécanismes vibratoires sont difficiles à gérer. Le diamètre doit être augmenté pour éviter ces vibrations. Mais alors l'inertie augmente fortement (elle varie comme le carré du rayon) et donc le couple et la puissance du moteur doivent être augmentés. Pour le moteur linéaire, la force n'a pas à être réévaluée, il suffit d'ajouter des modules de chemin linéaire (des contraintes de planéité de la surface sont tout de même à respecter).

La maintenance.

La vis à bille, plus bruyante, en contact mécanique constant, requiert une maintenance périodique. De plus, en moyenne, la durée de vie d'une vis à bille est de 1/10ème de la durée de vie d'un moteur linéaire. Le moteur linéaire nécessite peu de maintenance, mais il faut tout de même s'assurer de la qualité des câbles utilisés, car ces derniers sont en constant mouvement pour alimenter la bobine.

Propreté.

La vis à bille a besoin de graisse et de lubrifiants qui sont proscrits dans certains process. Pour les applications nécessitant une extrême propreté, le moteur linéaire, plus propre, utilise des systèmes de refroidissement des guidages à air filtré. A l'inverse, des environnements trop pollués obligeront à une mise sous carter du moteur linéaire.

La chaleur.

La chaleur du moteur rotatif se dissipe à distance de la charge, alors que pour le moteur linéaire, la chaleur se dissipe au niveau de la charge. Dans les calculs de dimensionnement du moteur, cette contrainte doit être évaluée. Le cas échéant, un système de refroidissement est à considérer.

Les forces.

Les moteurs linéaires ont la particularité d'avoir une importante force de collage sur l'axe z perpendiculaire à l'axe de déplacement x . Cette caractéristique est souvent perçue comme un handicap puisque dans la pluparts d'applications, elle ne sert à rien et freine la force de traction. Dans un moteur rond, elle se compense de part et d'autre des roulements.

L'attrait pour l'entraînement linéaire provient directement des avantages intrinsèques de l'entraînement direct qui sont donc : une grande dynamique de mouvement, une bonne précision de positionnement, une durée de vie importante, une grande fiabilité, la réduction de composants, une bonne flexibilité et une grande souplesse.

Toutefois, ces moteurs linéaires, présentent des spécificités dues à la disposition de leurs parties mobiles par rapport à leurs parties fixes, notamment des systèmes de guidage particuliers, entraînant de nouvelles contraintes au niveau de l'entrefer magnétique. De plus, de part leur structure géométrique, les moteurs linéaires présentent des effets d'extrémités. Ces différences technologiques par rapport aux moteurs rotatifs doivent être prises en compte au moment de la conception et la réalisation pratique. [12]

II.5 Étude théorique

Dans ce qui suit, nous aborderons les questions les plus générales sur le plan théorique. Les difficultés tiennent au fait que, d'une part, la mise en équation est délicate car les phénomènes physiques sont très complexes et que, d'autre part, ces phénomènes sont très difficiles à résoudre. [1]

II.5.1 Équation mécanique : Équation du mouvement:

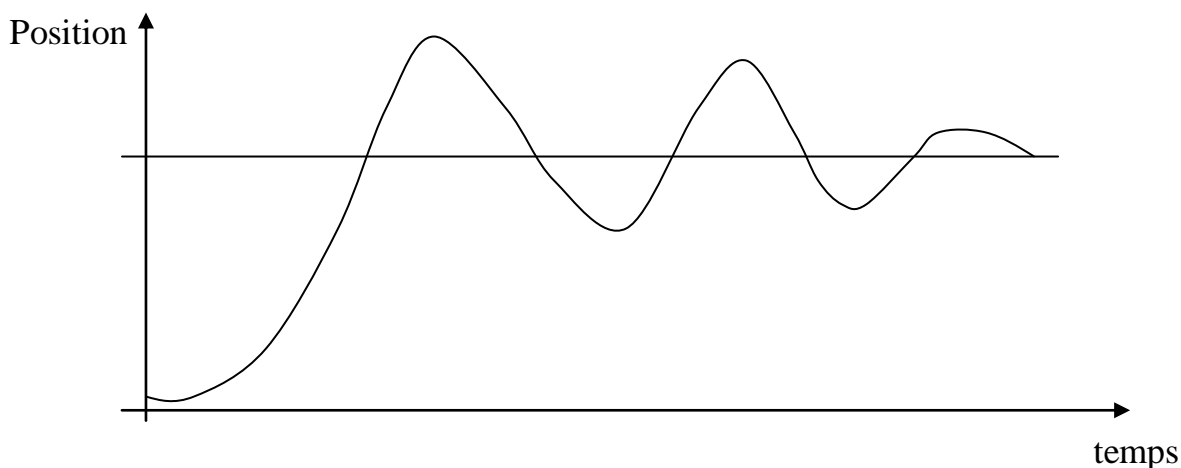


Fig. 14: Réponse en position d'un MRV

L'observation du mouvement du rotor sur un seul pas est conforme à l'allure d'un phénomène oscillatoire amorti et répond à une équation générale de second degré de type:

$$J\ddot{\theta} + K_A\dot{\theta} - C + C_r = 0 \quad \text{-----} \quad : \text{cas du mouvement rotatif}$$

$$M\ddot{X} + K_A\dot{X} - F + F_r = 0 \quad : \text{Cas du mouvement linéaire}$$

Où tous les coefficients sont positifs

J est l'inertie du rotor.

- K_A est l'ensemble des coefficients d'amortissement (frottements, pertes par hystérésis dans le rotor, etc.) l'amortissement étant supposé être une fonction linéaire de la vitesse.
- C, F étant l'effort moteur.
- C_r, F_r étant l'effort résistant.

II.5.2 Équation Électrique :

L'équation électrique aux bornes de chacune de chaque phase statorique est [3]:

$$U = Ri + \frac{d\psi}{dt}$$

Où :

R : représente la résistance de l'enroulement.

U et i : la tension et le courant de la phase.

Ψ : le flux total traversant le bobinage

Dans l'hypothèse de linéarité des matériaux, l'inductance n'est fonction que de la position (angulaire θ dans le cas d'un moteur à structure rotative, x dans le cas d'un moteur linéaire).

Dans ce cas, et en supposant négligeable le couplage magnétique entre les phases, l'équation précédente devient :

$$U = Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt}$$

Les différents termes de cette équation représentent :

La tension relative à l'inductance de chaque phase (f.e.m. statique).

$$U_L = L \frac{di}{dt}$$

La force électromotrice due à la variation de l'inductance en fonction de la position x . (f.é.m. dynamique).

$$U_r = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dx} \frac{dx}{dt}$$

II.5.3 Définition des grandeurs électromagnétiques, notion d'énergie et coénergie:

Pour déterminer le comportement électromagnétique de notre moteur on doit définir les grandeurs électromagnétiques qui le régissent. On arrivera par le biais des relations de base au calcul de la grandeur de sortie de notre actionneur qui est la force de poussée.

Dans le cas parfait, cette étude consiste souvent en la décomposition du domaine en tubes de flux magnétiques, chaque tube est caractérisé par une réluctance R et une différence de potentielle ε . [23]

Le tube de flux magnétique est défini par l'ensemble des lignes d'induction d'une part, s'appuyant sur un contour fermé et d'autre part limité par deux section S_A et S_B perpendiculaire aux lignes d'induction.

Le théorème de conservation du flux à travers la surface fermée (S) du tube de flux limité par les sections S_A et S_B permet d'écrire [31] :

$$\varphi = \int_{S_A} \vec{B}_{SA} \cdot \overrightarrow{dS_A} = \int_{S_B} \vec{B}_{SB} \cdot \overrightarrow{dS_B} = \int_S \vec{B}_S \cdot \overrightarrow{dS} \quad (1)$$

On définit la différence de potentiel magnétique ε_{AB} entre les deux surfaces l'intégration de la circulation du champ magnétique \vec{H} sur une ligne joignant un point de la surface S_A à un point de la surface S_B , elle est alors donnée par :

$$\varepsilon_{AB} = \varepsilon_B - \varepsilon_A = \int \vec{H} \cdot \overrightarrow{dl} \quad (2)$$

ε_B et ε_A Étant les potentiels magnétiques des surfaces S_A et S_B [21], ils représentent les courant résultants créant le champ magnétique en A et B. en considérant N spires traversées par une densité surfacique de courant \vec{J} , le potentiel magnétique peut ainsi être écrit sous la forme :

$$\varepsilon = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = N \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} = Ni \quad (3)$$

Avec :

Ni : nombre d'ampères-tours d'alimentation.

S : la section d'un conducteur

On définit la réluctance qui permet de quantifier une propriété physique : l'aptitude d'un circuit magnétique à s'opposer à sa pénétration par un champ magnétique.

Cette grandeur a été créée par analogie avec la notion de résistance dans les circuits électriques.

$$R = \frac{\varepsilon_A - \varepsilon_B}{\varphi} \quad (4)$$

En remplaçant les équations de H et B dans la réluctance magnétique on aura :

$$R = \frac{\int_A^B \vec{H} \cdot d\vec{l}}{\int_A \vec{B} \cdot d\vec{s}} \quad (5)$$

En supposant le tube de flux suffisamment étroit on a :

$$\vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot dl \quad (6)$$

De même le flux d'induction à travers la section S peut être exprimé à partir de l'induction moyenne B :

$$\varphi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = B \cdot S \quad (7)$$

De plus pour une section S supposée petite \vec{H} peut être assimilé à un champ moyen, de ce fait son module est lié à l'induction moyenne B par la relation :

$$B = \mu \cdot H \quad (8)$$

μ Étant la perméabilité moyenne du tube de champ donc du matériau ferromagnétique.

D'après les équations (5), (6), (7), et (8) l'expression de la réluctance devient :

$$R = \int_A^B \frac{dl}{\mu \cdot S} \quad (10)$$

De ce fait on définit La réluctance d'un entrefer :

$$R = \frac{e}{\mu_0 \cdot S} \quad (11)$$

Avec :

e Épaisseur de l'entrefer,

μ_0 Perméabilité du vide,

S Section de l'entrefer.

Si l'épaisseur de l'entrefer est grande, il n'est plus possible de considérer que les lignes de champ magnétique restent perpendiculaire à l'entrefer. On doit alors tenir compte de l'épanouissement du champ magnétique c'est-à-dire considérer que la section S est plus grande que celle des pièces métalliques de part et d'autre de l'entrefer.

Relation entre réluctance et inductance

Une formule relie l'inductance d'un enroulement réalisé autour d'un circuit magnétique, la réluctance de ce circuit magnétique et le nombre de spires de l'enroulement :

$$L = \frac{N^2}{R}$$

L inductance de l'enroulement en H

N nombre de spires de l'enroulement.

II.5.4 Calcul de la force :

La force développée par un moteur à réluctance variable linéaire résulte de la transformation d'une partie de l'énergie électrique absorbée par la machine en énergie mécanique. Cette transformation, est généralement accompagnée de pertes Joule occasionnant des échauffements.

I.5.5 Bilan énergétique :

Un bilan énergétique est donc nécessaire, faisant intervenir toutes les formes d'énergie susceptible à influencer la dynamique du moteur. On distingue quatre formes d'énergie : une énergie électrique, énergie mécanique, énergie thermique et une énergie magnétique cette dernière est indispensable à l'interaction entre partie fixe et partie mobile au niveau de l'entrefer.

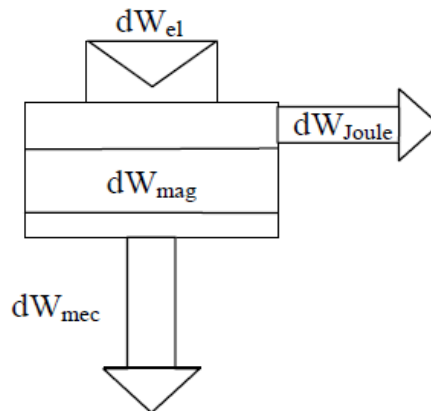


Fig. 15 : Conversion d'énergie

On résume ainsi le bilan énergétique par l'équation suivante :

$$dW_{el} = dW_{mec} + dW_{joule} + dW_{mag} \quad (12)$$

En reprenant l'équation électrique qui régit le moteur à réluctance variable sous forme matricielle, on peut déterminer l'expression des différentes formes de puissance mise en jeu, on aura :

$$[u] = [r] \cdot [i] + \frac{d}{dt} [\Phi] \quad (13)$$

Avec :

$[\Phi]$: Vecteur des flux totalisé dans chaque phase.

$[i]$: Vecteur des courants.

$[u]$: Vecteur des tensions.

$[r]$: matrice diagonale des résistances des phases.

La puissance totale fournie à la machine est donc :

$$[i]^t [u] = [i]^t [r] [i] + [i]^t \frac{d}{dt} [\Phi] \quad (14)$$

Elle est répartie en :

Pertes Joule, dissipées dans les conducteurs :

$$P_j = [i]^t [r] [i] \quad (15)$$

Variation d'énergie magnétique:

$$\frac{dW_{mag}}{dt} \quad (16)$$

Puissance mécanique fournie à l'extérieur au moyen d'un travail de la force électromagnétique F_x au cours d'un déplacement dx :

$$P_{méc} = F_x \frac{dx}{dt} \quad (17)$$

Les équations (15), (16) et (17) permettent d'évaluer le travail de la force électromagnétique :

$$P_{méc} = F_x \frac{dx}{dt} = [i]^t \frac{d}{dt} [\Phi] - \frac{dW_{mag}}{dt} \quad (18)$$

Ou sous forme variationnelle :

$$F_x \partial x = [i]^t [\partial \Phi] - \partial W_{mag} \quad (19)$$

A partir de cette équation, il est possible de déterminer la force électromagnétique développée par la MRV à partir d'une variation d'énergie sur une variation de position linéaire :

A flux constant :

$$F_x = - \frac{\partial W_{mag}}{\partial x} \quad (20)$$

A courant constant :

$$F_x = \frac{\partial ([i]^t [\Phi] - W_{mag})}{\partial x} \quad (21)$$

Ces deux formules permettent d'obtenir la force de poussée pour une position x définie et moyennant les hypothèses sur le courant ou le flux. On définira ainsi **l'énergie** et la **coénergie** magnétique:

La quantité $-\frac{\partial W_{mag}}{\partial x}$ s'appelle **l'énergie magnétique** tandis que la quantité $\frac{\partial ([i]^t [\Phi] - W_{mag})}{\partial x}$ est généralement appelée **coénergie**, c'est une forme virtuelle d'énergie plus facile à exploiter dans certaines applications où il sera plus aisé de manipuler les courants que les flux.

3^{ème} CHAPITRE :
ETUDE ELECTROMAGNETIQUE ET
DIMENSIONNEMENT DE L'ACTIONNEUR

III.1 Introduction :

Afin de pouvoir réaliser notre machine à réluctance variable, nous allons l'étudier et la dimensionner à l'aide de la méthode des éléments finis, qui va nous permettre de calculer les grandeurs électromagnétiques de la machine et les valider ensuite, pour répondre aux exigences d'un cahier de charge donné.

III.2 Dimensionnement et choix technologique:

Le concepteur de l'actionneur électrique est conduit à faire des choix décisifs dès le départ de la phase de conception. Il a notamment la responsabilité de choisir la structure de base de son actionneur à partir de ses connaissances, son prix et des matériaux disponibles sur le marché. Ensuite, il lui faut encore choisir ses outils de dimensionnement et de modélisation.

III.3 Paramètres Dimensionnels et Physiques du MRV:

Il est primordial, en particulier, d'avoir une perméabilité et une induction à saturation élevées. Les contraintes de coût et de la disponibilité des matériaux sur le marché nous ont guidés vers de l'acier ferromagnétique, dont les performances magnétiques remplissent convenablement nos contraintes.

Nous avons choisi comme matériau une barre en acier standard (1,50m x 25 mm x 15 mm) qui, une fois usinée, donnerait le mobile et le rail, de sorte à avoir un moteur à réluctance variable 6/4, c.à.d. 6 dents à la partie mobile auxquelles correspondent 4 dents à la partie fixe.

III.3.1 Épaisseur de l'entrefer:

La minimisation de e est limitée par les contraintes mécaniques, de précision de guidage et d'usinage. En effet, la minimisation de e permet une bonne interaction électromagnétique entre partie fixe et partie mobile. D'autre part, si l'entrefer mécanique est faible, on aura une force de collage importante sur le mobile. On voit apparaître ici un compromis assez fréquent dans les machines électriques linéaire.

Pour avoir de bonnes performances [5], on choisit alors une épaisseur d'entrefer assez faible et que l'on pourra par la suite pour notre MRV didactique :

$e=0.5\text{ à }3\text{ mm}$

III.3.2 Partie mobile : c'est la partie qui se déplace le long d'un parcours linéaire appelé rail, c'est la partie qui comporte le bobinage, elle comporte six dent donc six bobines ; une autour de chaque dent.

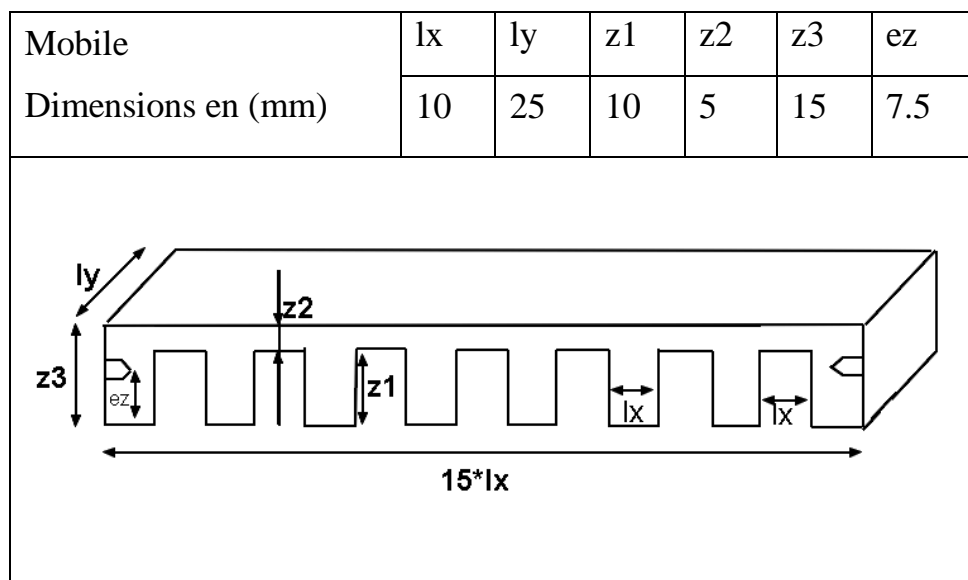


Fig. 16 : Dimensions de la partie mobile

III.3.3 Le rail c'est la partie fixe qui entre en interaction avec la partie mobile par le biais de champs magnétique.

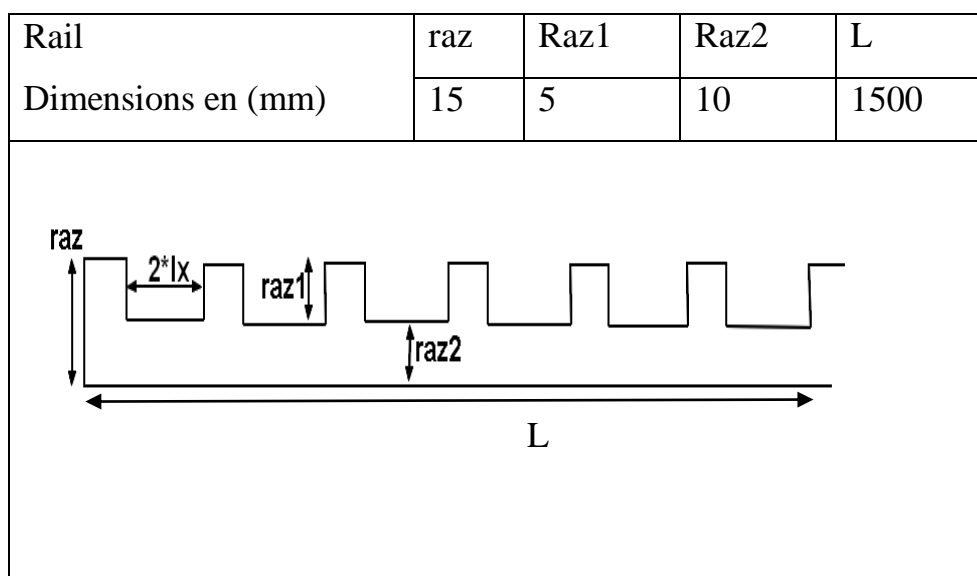


Fig. 17 : Dimensions de la partie fixe

Une bande de roulement est réalisée afin que les roulements puissent se déplacer facilement le long du parcours:

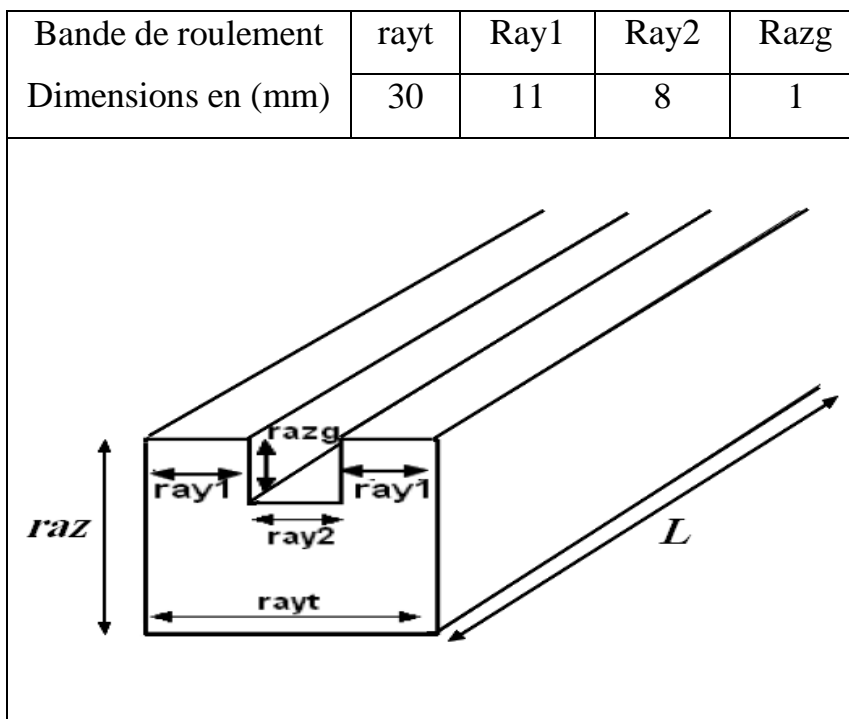


Fig. 18 : Dimensions de la bande de roulement.

Les essieux qui comportent les roulements de part et d'autre de la partie mobile:

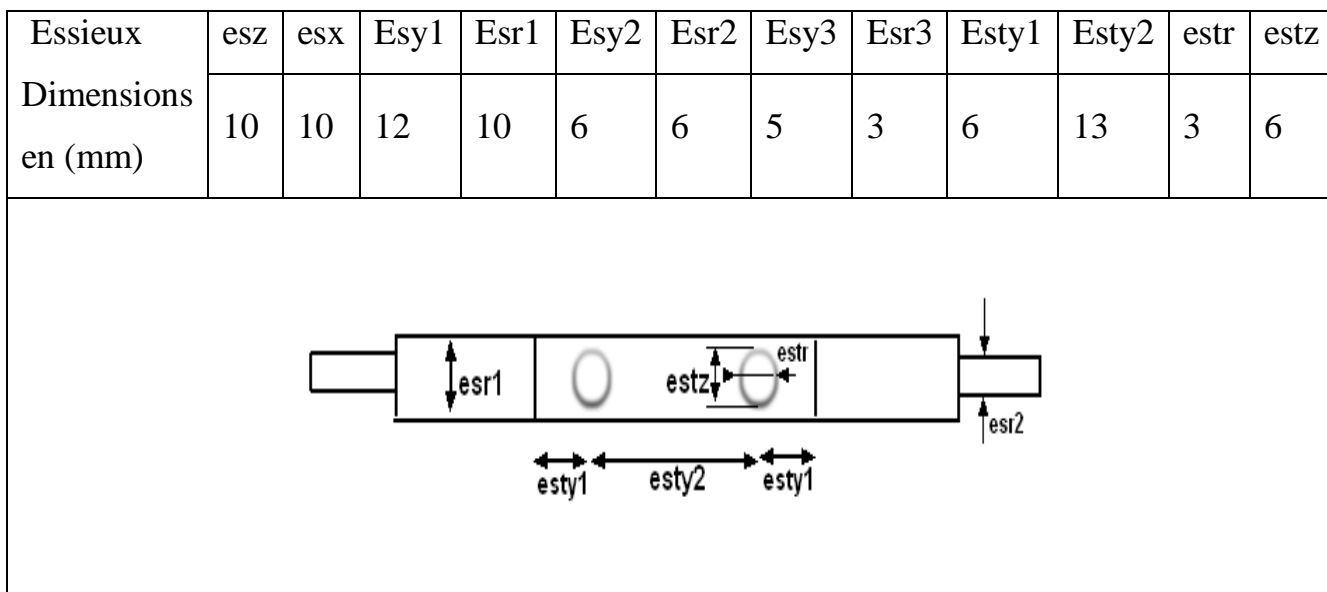


Fig. 19 : Dimensions de des essieux

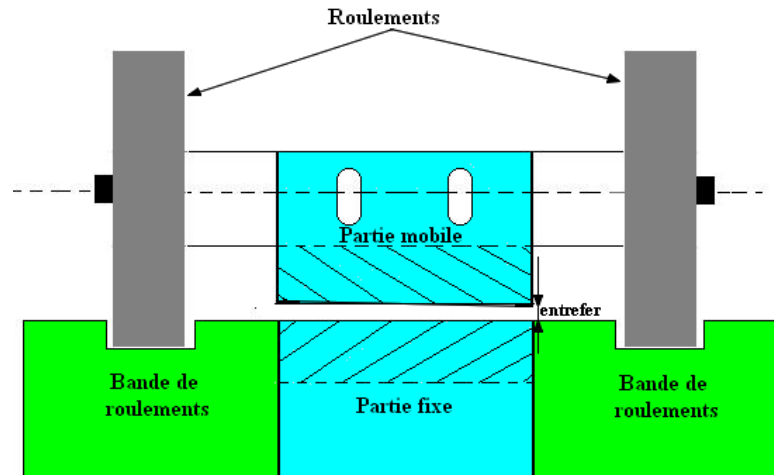


Fig. 20 : Croquis global du MRV linéaire - Vue de face

III.4 USINAGE :

Nous remercions Monsieur M. Djellab, pour la prestation et la réalisation du mobile, du rail, des bandes de roulement et des essieux. Malgré quelques imperfections sur les bandes de roulement, que nous verrons plus tard, le système fonctionne relativement bien.

III.5 Détermination des grandeurs électromagnétiques :

III.5.1 Approches de Modélisation:

La modélisation est une étape primordiale dans la conception des machines électriques, parmi les nombreux types de modèles existant on distingue: les circuits électriques équivalents, les bond-graphs, les réseaux de réluctances et les éléments finis.

Pour étudier le comportement électromagnétique de notre actionneur linéaire, on va utiliser, en premier lieu, les équations théoriques de base développées dans le chapitre précédent. Et par la suite utilisant la méthode des éléments finis.

Par simplicité de calcul on borne notre étude au cas où une seule bobine est alimentée. Considérons le circuit magnétique de notre MRV suivant :

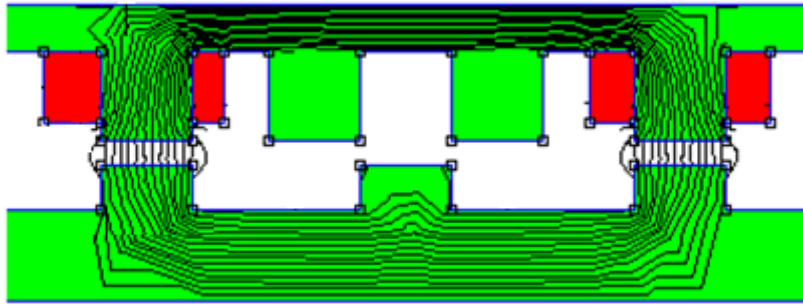


Fig. 21 : Circulation du flux magnétique sur le MRV

Lorsqu'un courant circule dans la bobine un flux magnétique circule dans la partie mobile provoquant une force susceptible de la déplacer afin de minimiser la réluctance du circuit magnétique.

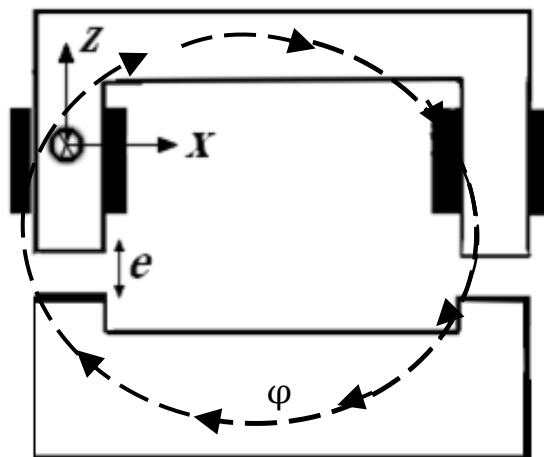


Fig. 22 : Circuit magnétique

Si l'on prend des hypothèses simplificatrices: non saturation du matériau ferromagnétique, chute de force magnétomotrice dans l'acier nulle, énergie magnétique entièrement stockée dans le volume délimité par les deux surfaces des dents [3] et une perméabilité relative du fer infinie alors les équations électromagnétiques abordées dans le chapitre précédent donnent les résultats suivants:

De l'équation (3) : $\oint H \cdot dl = N \cdot i$ on aura

$l = z = \text{épaisseur de l'entrefer}$

$$\rightarrow H \cdot 2 \cdot z = 2N \cdot i$$

$$\rightarrow H = \frac{2N \cdot i}{2 \cdot z}$$

$$B = \mu_0 H$$

Puisqu'on a deux surfaces de dents en regard; alors on a 2 z. De plus, on a 2 bobines autour des dents d'où le $2N \cdot I$

$$\text{on a } B = \frac{2 \cdot \mu_0 \cdot N \cdot i}{2 \cdot z}$$

Le champ d'excitation \vec{H} : il rend compte de l'influence du milieu magnétique (l'acier linéaire) sur les grandeurs.

Ainsi, dans le vide ou dans l'air: l'induction et l'excitation magnétique sont colinéaires.

$$\text{On a alors } B = \mu_0 H \rightarrow H = \frac{B}{\mu_0}$$

Par définition l'énergie magnétique stockée est $dW = P \cdot dt$ or la puissance instantanée reçue :

$$P = u \cdot i = i \cdot N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = L \cdot i \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\text{donc } dW = L \cdot i \cdot di \rightarrow W = \int_0^i L \cdot i \cdot di$$

$$\rightarrow W = \frac{1}{2} L \cdot i^2$$

$$\text{De l'expression de la réluctance on aura: } L = \frac{N^2}{R} \rightarrow L = \frac{N^2 \mu S}{l}$$

$$W \text{ Sera donc : } W = \frac{1}{2} \left(\frac{N^2 \cdot \mu \cdot S}{l} \right) i^2$$

$$W = \frac{1}{2} l \cdot S \cdot \mu \frac{N^2 i^2}{l^2}$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot v \cdot H^2 \cdot \mu$$

$$W = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \frac{B^2}{\mu}$$

Le volume: $v = 2z(lx - x)ly$

Dans l'entrefer $\mu = \mu_0$

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0} v = \mu_0 v^2 \frac{(lx - x)ly}{z}$$

De l'équation (20) on calcul la force suivant l'axe z : $F_z = -\frac{\partial W}{\partial z} = \mu_0 N^2 \frac{l^2 (lx - ly) ly}{z^2}$

Et la force de traction suivant l'axe x : $F_{x_{max}} = -\frac{\partial W_e}{\partial x} = \mu_0 N^2 I^2 \frac{ly}{z}$

III.5.2 Calcul numérique

Pour un entrefer $z=e = 2$ mm, $l_x = 10$ mm et $l_y = 25$ mm $I=2$ A et N : nombre de Spires =150

$\mu_0 = 12,566\ 370\ 614 \times 10^{-7}$ on aura:

$B_{max} = 0.18849555$ T

$H_{max} = 1.5 \cdot 10^5$ A/m

$$F_{z_{max}} = \mu_0 N^2 \frac{I^2 \cdot l_x \cdot l_y}{e^2} = 7.068N \text{ à } x = 0\text{mm}$$

$$F_{x_{max}} = \mu_0 N^2 I^2 \frac{l_y}{e} = 1.413675N$$

La force de traction F_x n'admet alors que 3 valeurs discrètes : ($F_{x_{max}}$, $-F_{x_{max}}$ ou 0) en

fonction de x :

$$F_x = \begin{cases} F_{x_{max}} & x \in]-l_x, 0[\\ -F_{x_{max}} & x \in]0, l_x[\\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

On verra plus loin que les calculs numériques montrent qu'en réalité, la force de traction F_x a plutôt le profil suivant (Fig22):

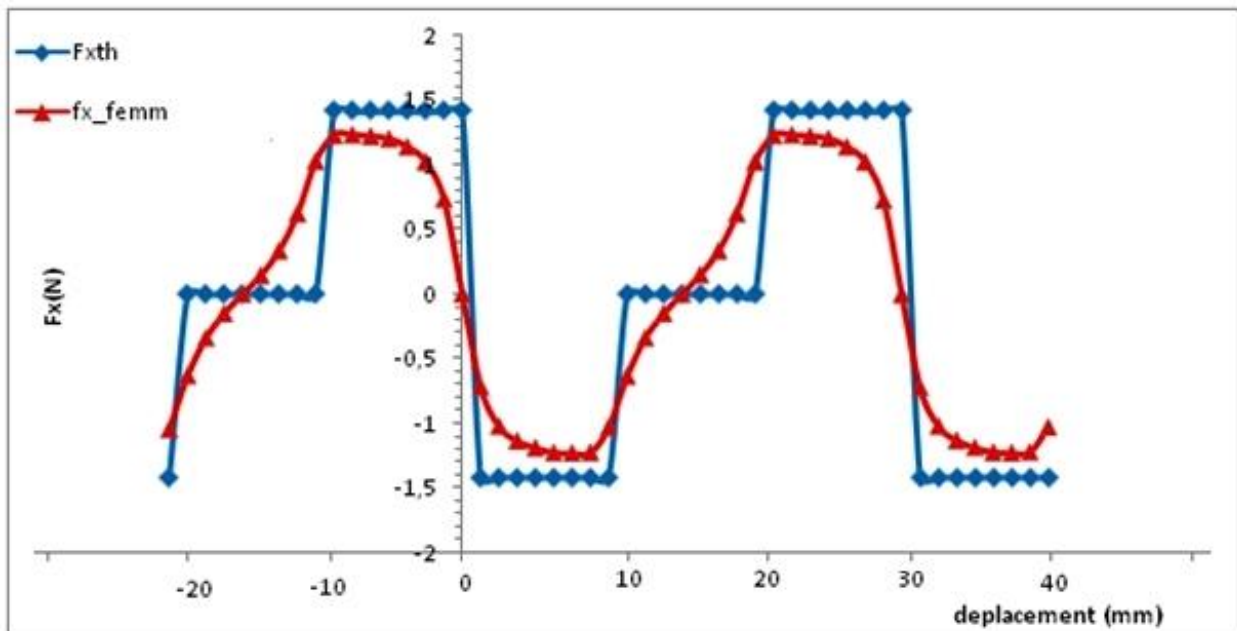


Fig. 23: Caractéristique de la force sur le mobile par rapport au rail

En bleu : Profil de la force de traction en fonction du modèle théorique

En rouge: Profil de la force calculée par la méthode des éléments finis

III.6 Bobinage :

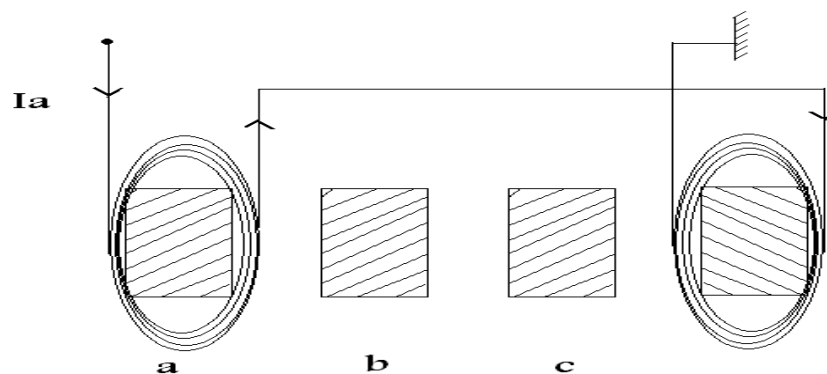


Fig. 24 : Principe de bobinage

Nous avons choisi de connecter nos bobines deux pas deux, en série. Cette façon d'alimenter les bobines permet d'avoir un pas complet, on aura ainsi un maximum de force de traction pour le déplacement de notre mobile.

Le cahier de charge nous impose d'utiliser un fil émaillé sous les contraintes des dimensions de la machine et du courant qui, rappelons le ne doit pas dépasser 2.5 A. Pour cela, on a utilisé un fil émaillé en cuivre de diamètre 0.4mm (code AWG: 26). Le nombre de spires est de $N=150$. Les encoches sont fermées par des clavettes en matériau non-ferromagnétiques. La formule de la force en x [3] donne :

$$F_x = \mu_0 N^2 i^2 \frac{ly}{z}$$

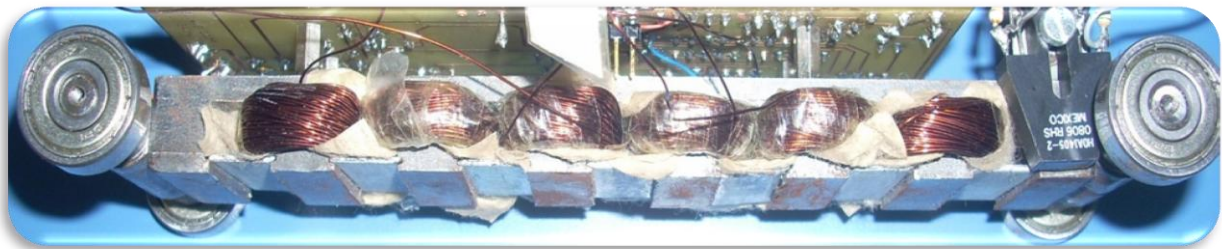


Fig. 25 : Bobinages de 6 dents du mobile MRV

III.7 Étude électromagnétique de l'actionneur par la MEF:

III.7.1 Méthode des éléments finis:

Appliquée à la conception des structures électromagnétiques, la méthode des éléments finis (MEF) est devenue un outil très répandu. Elle consiste à chercher une solution approchée à partir d'une discrétisation du domaine d'étude sur lequel les équations de Maxwell sont résolues.

Elle permet de déterminer un champ scalaire ou vectoriel satisfaisant à un ensemble d'équations aux dérivées partielles et d'équations ordinaires en tout point du domaine d'étude et à tout instant, tout en respectant les conditions aux limites.

Le domaine dans lequel est effectuée la simulation, est décomposé en éléments sur lesquels sont construites des solutions approchées dont les inconnus sont les valeurs de la solution en un ensemble de points finis qui sont les nœuds de la discrétisation. Sur chaque point est calculé un potentiel. [26]

Principe général

La méthode des éléments finis permet donc de résoudre de manière discrète une EDP (Équation aux dérivées partielles) dont on cherche une solution approchée « suffisamment » fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

Sauf cas particuliers, la discrétisation passe par une redéfinition et une approximation de la géométrie, on considère donc le problème posé sur la géométrie approchée par un domaine polygonal ou polyédrique par morceaux. Une fois la géométrie approchée, il faut choisir un espace d'approximation de la solution du problème, dans la MEF, cet espace est défini à l'aide du maillage du domaine (ce qui explique aussi pourquoi il est nécessaire d'approcher la géométrie). Le maillage du domaine permet d'en définir un pavage ou partition dont les pavés sont les *éléments finis*. Un élément fini est la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation dont le support est l'élément, et définies de manière à être interpolantes [15]

Une fois la solution trouvée, il reste cependant à déterminer les caractéristiques de la méthode ainsi développée, notamment l'unicité de l'éventuelle solution ou encore la stabilité numérique du schéma de résolution. Il est essentiel de trouver une estimation juste de l'erreur liée à la discrétisation et montrer que la méthode ainsi écrite converge, c'est-à-dire que l'erreur tend vers 0 si la finesse du maillage tend elle aussi vers 0.

Plus ce maillage est resserré plus la solution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie » solution de l'équation aux dérivées partielles.

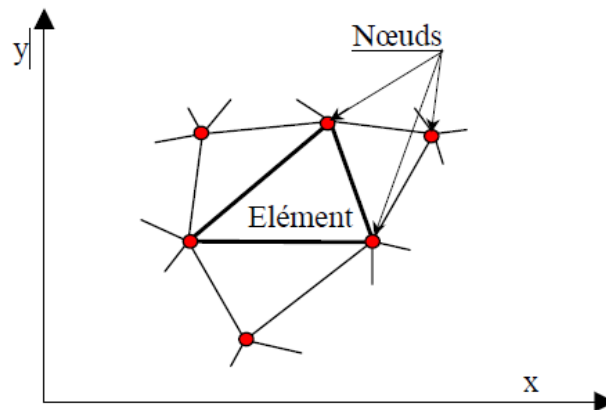


Fig. 26: Discrétisation par éléments finis en deux dimensions

Pour aboutir à un plan définitif de la structure qui va représenter notre actionneur linéaire, et valider les résultats théoriques, on va l'étudier et le définir à travers un logiciel de calcul par élément finis « FEMM » [9] qui permet la prédiction des caractéristiques, électromagnétiques et mécaniques de l'actionneur et d'évaluer les forces qu'il va générer ainsi que les niveaux d'induction magnétique dans les parties ferromagnétique.

III.7.2 Description du logiciel FEMM (Finite Element Method Magnetics):

C'est un logiciel de modélisation par la méthode des éléments finis 2D cartésien et 2D axisymétrique dédié à la résolution de problèmes électromagnétiques dans le domaine des basses fréquences.

Il est constitué de trois modules principaux [9] :

- Un module "Pré-processeur et Post-processeur". Ce module permet, au travers d'une interface graphique, la saisie de la géométrie et la définition du problème en vue de sa résolution par la méthode des éléments finis. La saisie de la géométrie peut se faire avec la définition de points clefs que l'on relie pour former des régions ou par l'importation de structures AUTOCAD au format DXF. Ce module intègre également des outils de post-traitement : visualisation et différents calculs inhérents au problème (inductance, flux, pertes Joule, etc...)
- Un module de maillage qui permet d'obtenir une triangulation de chaque région du domaine de calcul.
- Un module de résolution par éléments finis : ce solveur 2D cartésien et axisymétrique permet de résoudre des problèmes d'électrostatique linéaires, de magnétostatique

linéaires et non linéaires, de magnétodynamique en régime harmonique linéaires et non linéaires et de thermique en stationnaire.

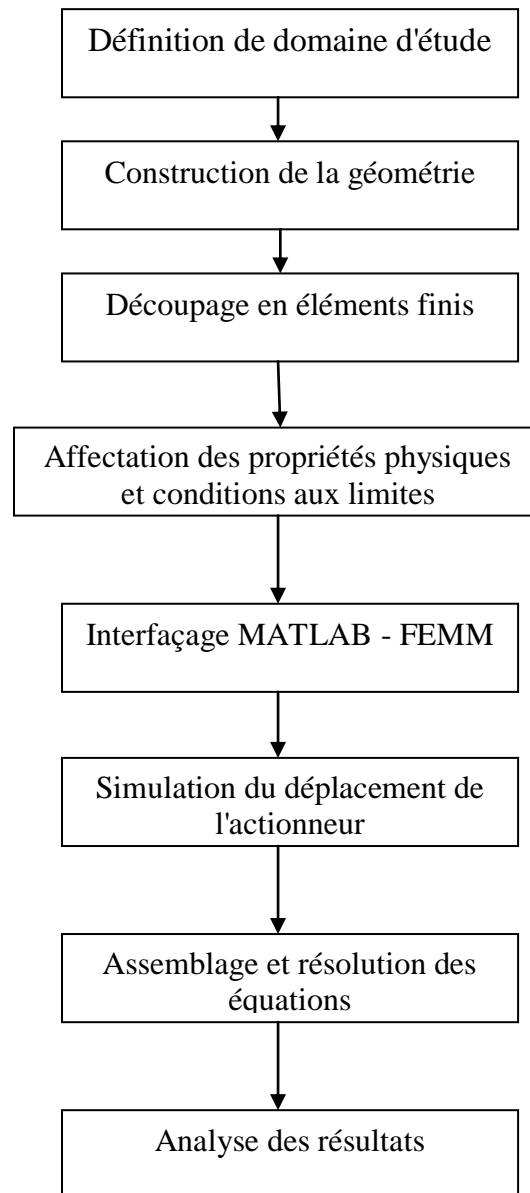
Il peut être utilisé sans interface graphique au travers du langage script "LUA".

Ce logiciel est dédié aux problématiques du génie électrique : ses menus utilisent le vocabulaire du domaine et il possède un ensemble de pré et de post-traitement dédié à ces problématiques (introduction de la courbe $B(H)$ pour les matériaux magnétiques non linéaires, conditions de périodicité, calcul des pertes par effet Joule, visualisation des champs électromagnétiques, calcul de forces électromagnétiques, etc.). Il est possible de mettre en place un couplage magnétique-thermique via le langage script LUA.

Par contre il ne possède pas de techniques permettant la prise en compte du mouvement dans les actionneurs électromécaniques (par exemple mouvement du rotor par rapport au stator). Il existe une bibliothèque de matériaux magnétiques.

La version FEMM 4.2 contient une boîte à outils, qui permet d'interfacer FEMM avec Matlab ou Mathematica.

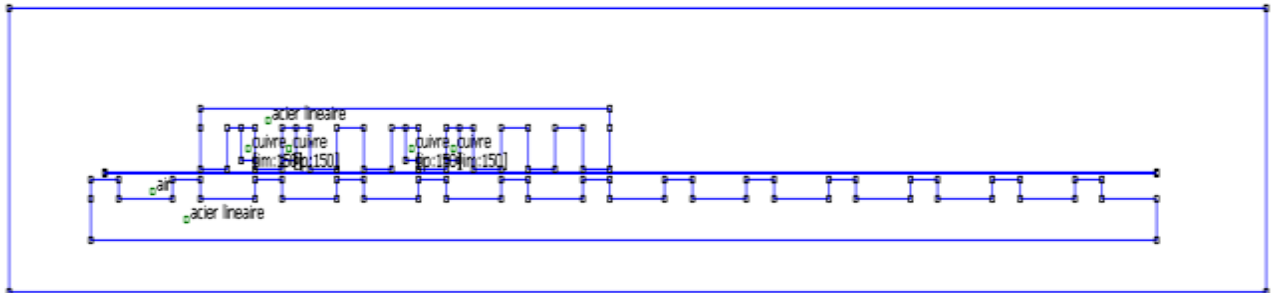
III.7.3 Étapes de résolution avec FEMM:



La modélisation de notre machine à réluctance variable à double saillance (MRVDS 6/4) par la méthode des éléments finis va nous permettre de résoudre les équations et de déterminer la densité de flux magnétique sur le domaine et les forces électromagnétiques suivant les axes x et z , en utilisant comme paramètres la position du mobile x et le courant de phase i .

III.7.4 Définition de la géométrie :

On définit la géométrie de notre structure, les caractéristiques des matériaux et la géométrie du domaine.



**Fig. 27 : Définition du domaine et de la structure du moteur sur FEMM :
(Position particulière où les dents de la phase 2 du mobile sont en vis-à-vis total
avec des dents du rail).**

En effet, la méthode s'adapte bien pour calculer le potentiel vecteur magnétique sur des structures avec une géométrie complexe et avec des caractéristiques des matériaux magnétiques non linéaires.

Moyennant les hypothèses simplificatrices couramment utilisées, notamment négliger les effets d'extrémité, nous travaillerons en géométrie 2D, saturation du matériau ferromagnétique négligée, chute de force magnétomotrice dans l'acier nulle, énergie magnétique entièrement stockée dans le volume délimité par les deux surfaces des dents. C'est le logiciel FEMM qui va résoudre les équations du système. Il choisit automatiquement un maillage de 14768 nœuds comme illustré sur la figure:

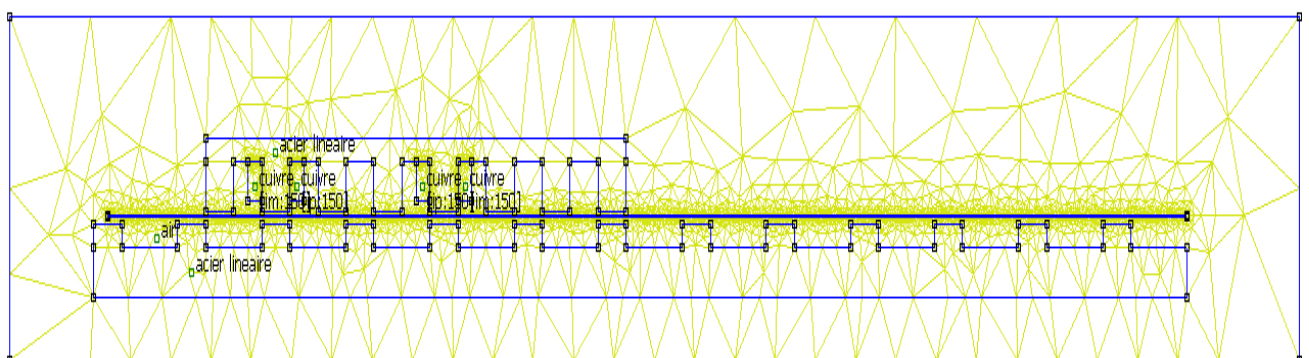


Fig. 28 : Maillage de la structure avec la méthode des éléments finis

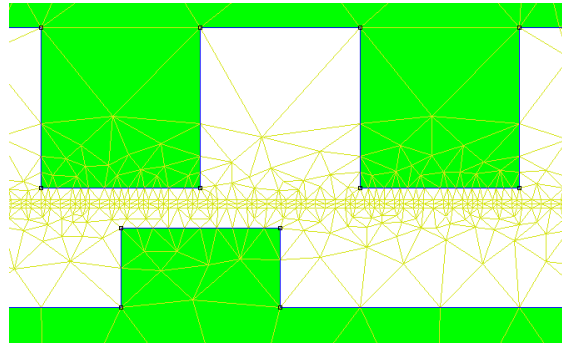


Fig. 29 : Maillage de l'entrefer (zoom)

Le maillage dans l'entrefer est plus important que le reste du domaine, par le fait d'un changement de milieu ainsi il y aura une bonne approximation des solutions.

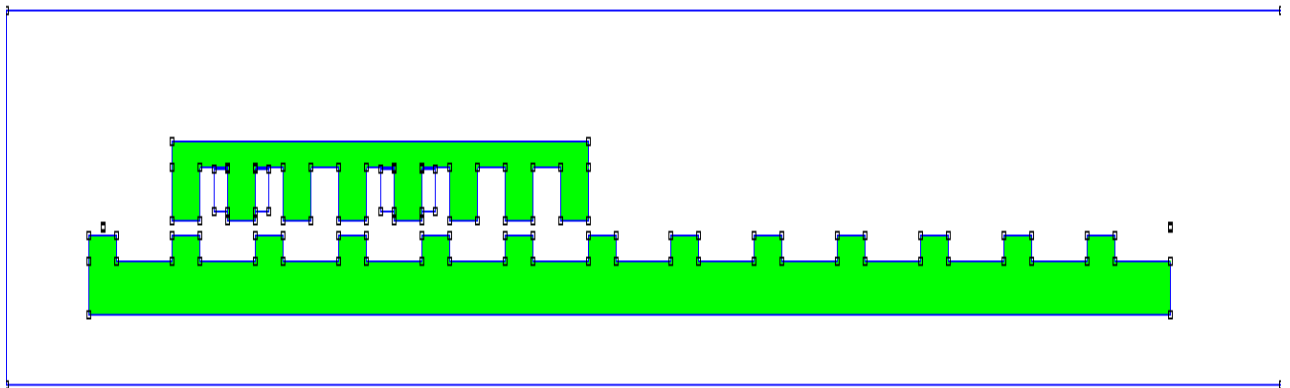


Fig. 30 : Structure finale.

III.7.4 Distribution du champ d'induction :

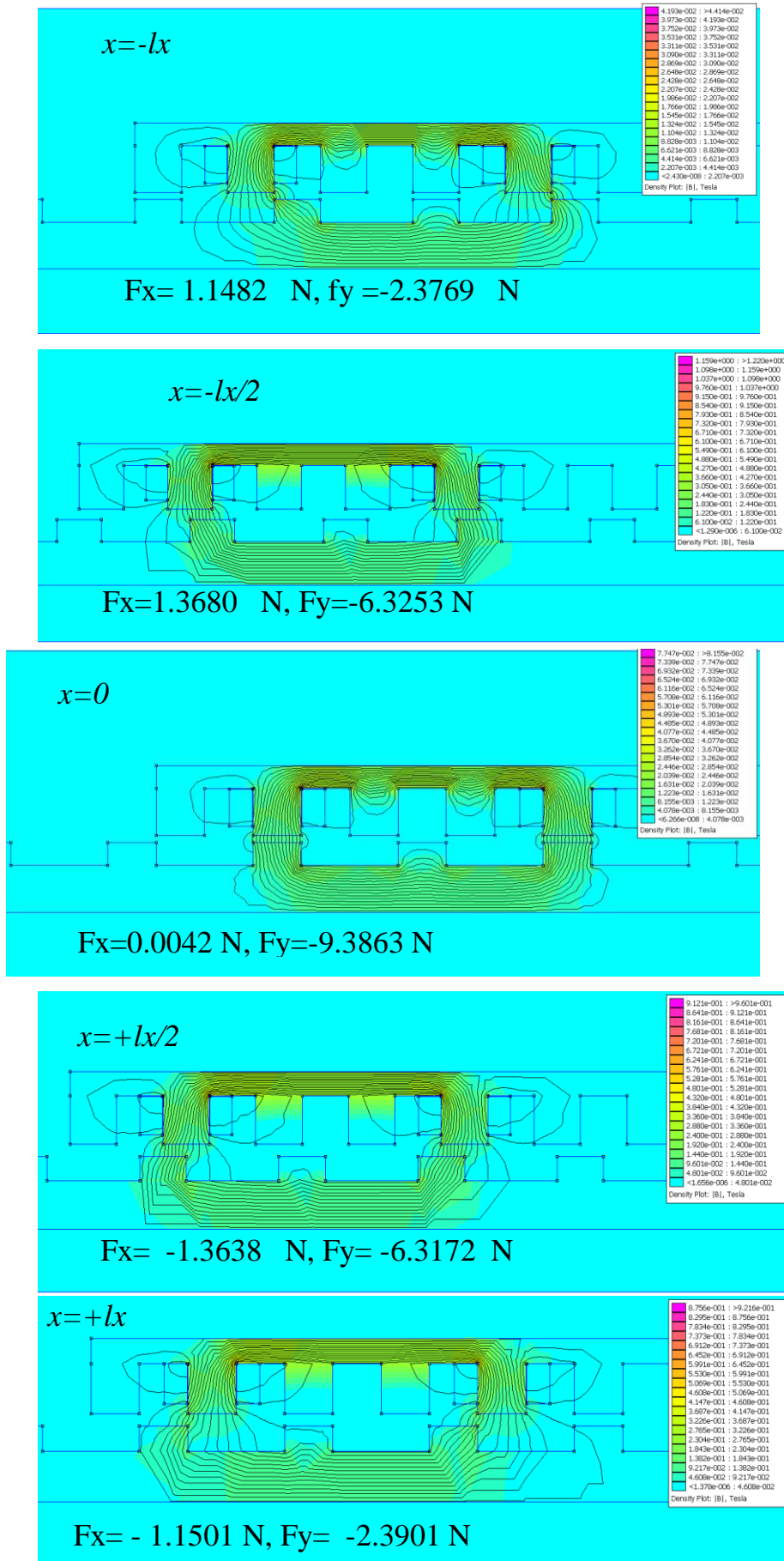
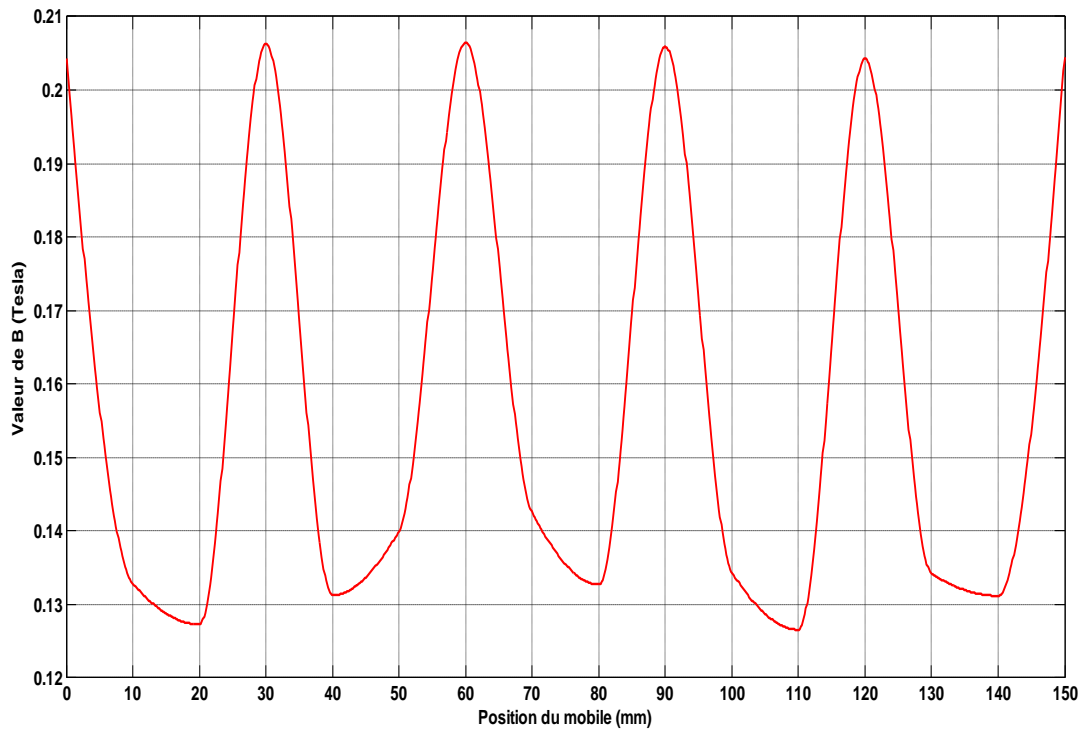


Fig. 31: Distribution du champ d'induction sur les 5 positions critiques du MRVlin Obtenu avec la MEF

On observe que pour ces cinq positions distinctes, la distribution des lignes de champs est maximale lorsque les dents de la phase alimentée de la partie mobile sont en vis-à-vis total avec les dents du rail. Ainsi, on peut valider les calculs théoriques, faits auparavant.



**Fig. 32 : Allure du champ d'induction en fonction de la position du mobile
(Obtenu avec MATLAB-FEMM)**

On voit bien que le champ d'induction est maximal lorsque les pôles de la partie fixe et mobile coïncident si on considère un doublet de bobines alimentées : à $x=0$ et $x=30$, $x=60$, $x=90$, $x=120$..etc correspond aux positions de la dent alimentée lorsque le mobile se déplace d'un pas de 10 mm.

III.7.5 Distribution du champ d'excitation :

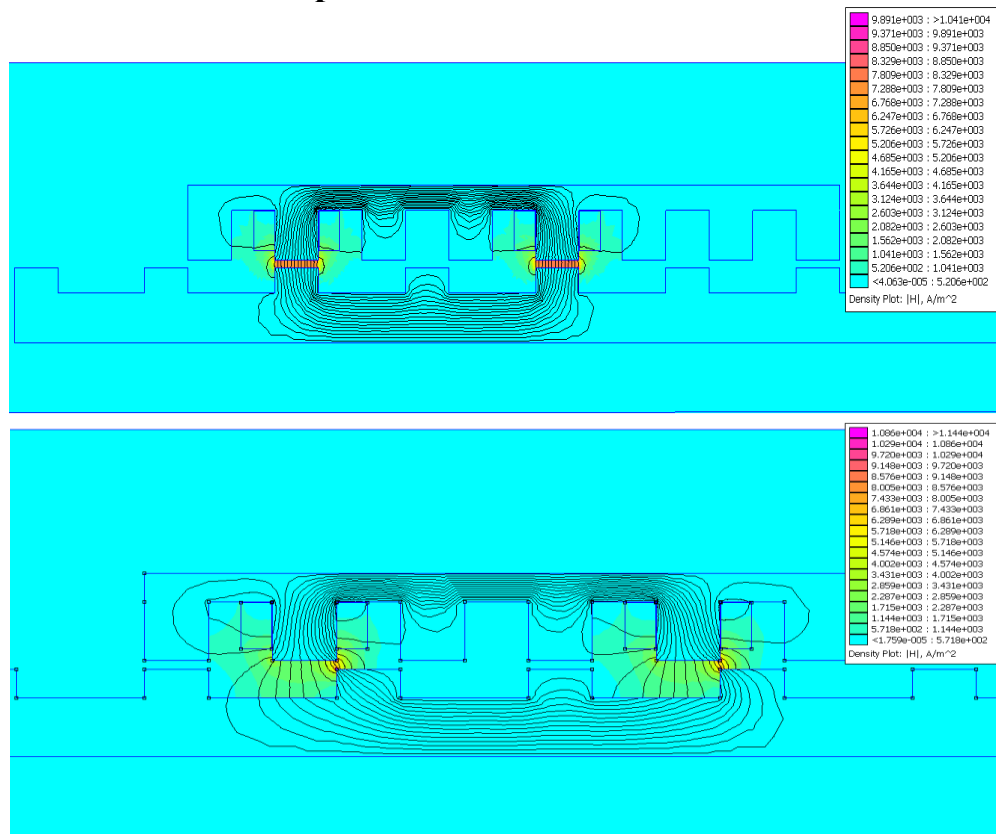


Fig. 33: Distribution du champ d'excitation magnétique Obtenu avec la MEF

Sur les mêmes positions, le champ d'excitation est trop important lorsque les pôles de la partie mobile et de la partie fixe coïncident, et c'est dû à la propriété ferromagnétique de l'acier. Il y a donc une forte attraction qui est traduite par le collage du mobile à cette position jusqu'à la séquence d'alimentation de la bobine suivante.

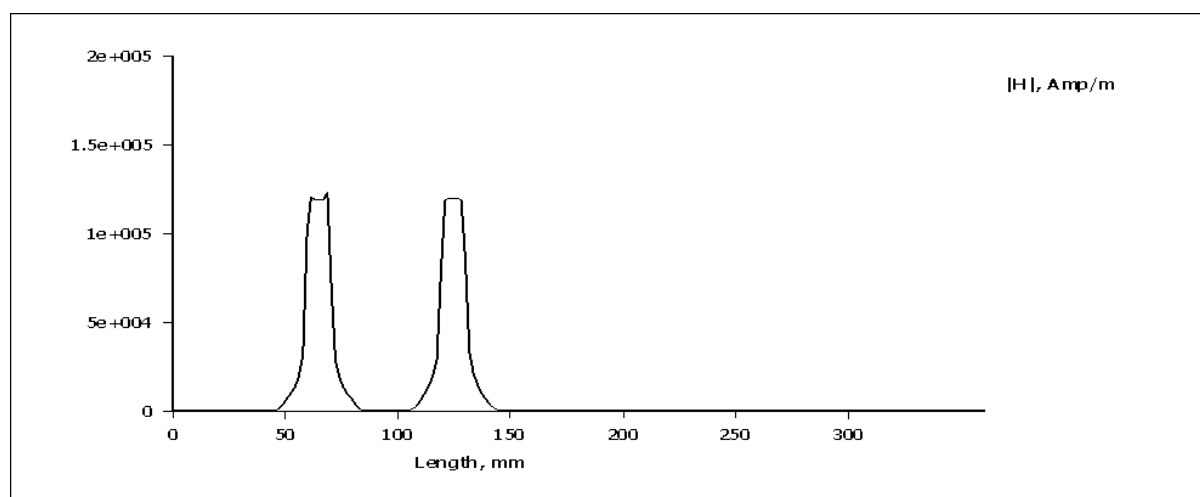


Fig. 34 : Allure du champ d'excitation magnétique en fonction de la position (Obtenu avec FEMM)

De même, en considérant une paire de bobines alimentées, cette simulation nous a permis de valider les calculs théoriques du champ d'excitation : $H_{max} \approx 1,5 \cdot 10^5 \text{ A/m}$. Une légère divergence est observée entre les résultats théoriques et celles issues de la simulation avec la méthode des éléments finis, qui est due à la méthode elle-même, le nombre de maillage adopté, les effets de bords supposés et le cas idéal de la formule théorique.

III.7.6 Représentation des forces

En installant une bibliothèque OctaveFemm sur Matlab, on va pouvoir simuler le fonctionnement de notre actionneur linéaire, cet interfaçage Matlab-Femm se fait par l'exécution d'un script Matlab (.m) qui comprend les mêmes paramètres dimensionnels et physiques adoptés du moteur à réluctance variable, on trace par la suite l'allure des forces en x et en z .

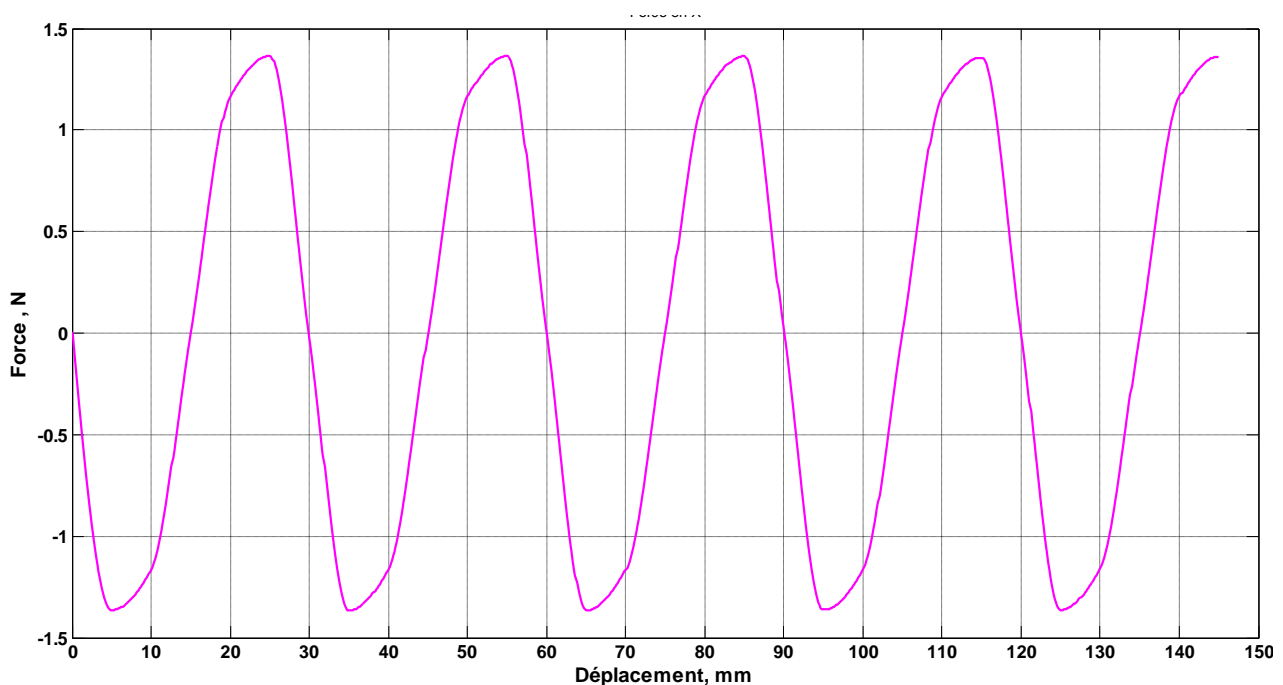


Fig. 35 : Évolution de la force en x

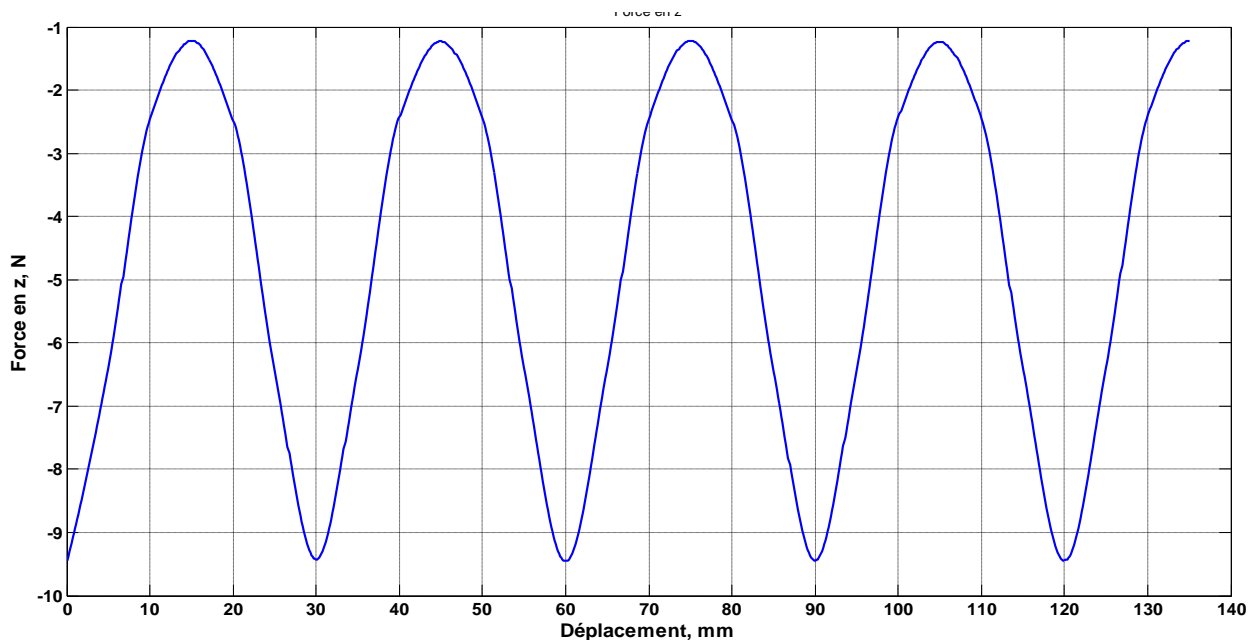


Fig. 36 : Évolution de la force suivant l'axe z

N.B : les forces suivant l'axe z ce sont les forces obtenues avec FEMM dénommée f_y (fig. 31)

Interprétation :

On remarque que les forces en x sont symétriques par rapport à la position de jonction, c.à.d. entre deux positions voisine, la force en x est nulle lorsque la dent alimentée de la partie mobile est en face de la dent de la partie fixe, négative avant et positive après cette position.

La force en z est négative est maximale lorsque les dents sont en face puisque, l'entrefer suit inversement l'évolution de la force en z. Plus l'entrefer est réduit plus la force en z est importante et inversement.

De ce fait, le mobile a tendance à reculer, grâce à la force de collage en z qui est largement plus importante que la force en x et grâce aussi à l'amortissement dû au frottement qui permet un alignement des plots (après plusieurs oscillations) on a une stabilisation de cette position jusqu'au prochain changement de séquence d'alimentation.

La simulation du mouvement de notre MRV linéaire nous permet de montrer son fonctionnement, sauf que dans ce mode c'est toujours la même phase qui reste alimentée, cependant en fonctionnement normal, on commute le courant dans la phase suivante, dès que la dent de la partie mobile passe en face de la dent de la partie fixe.

Ainsi la vraie force qu'exerce le MRV linéaire c'est lorsque $x = -Lx/2$ si on considère chaque paire de bobines séparément (Fig. 37). La force sera en conséquent toujours positive en présence d'une grande ondulation, ce qui permet à notre actionneur d'avancer jusqu'à la dent suivante et une nouvelle commutation de courant se produira.

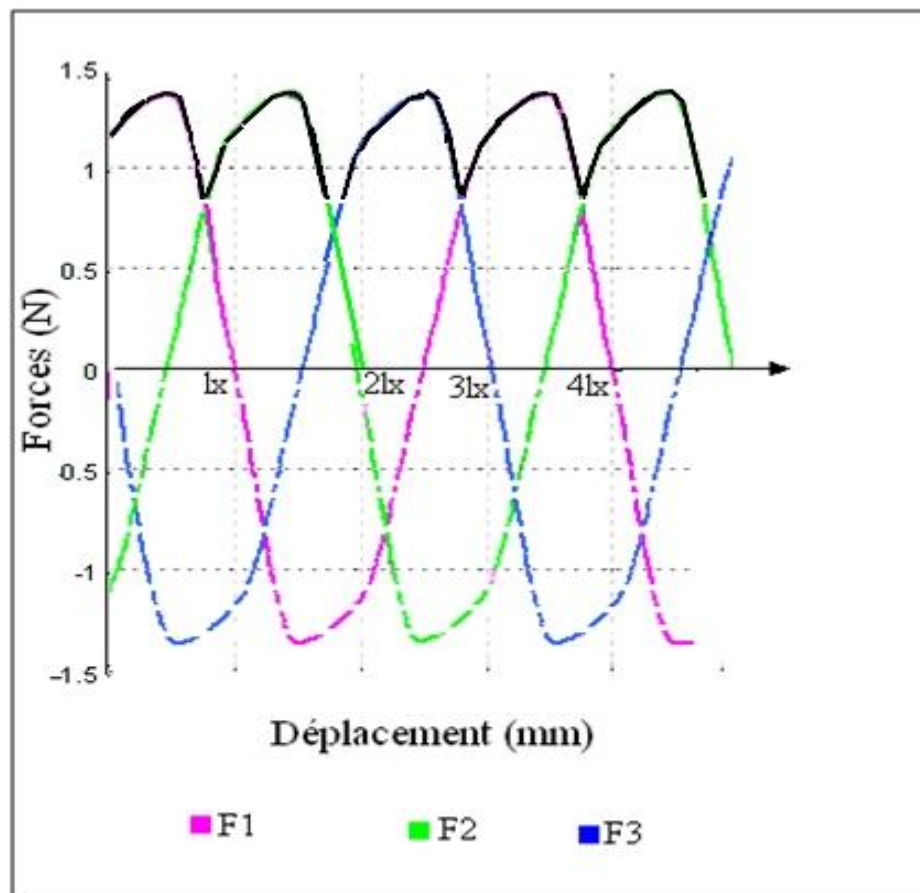


Fig. 37 : Caractéristique des forces en fonction de la position pour les 3 phases

Les caractéristiques des forces associées aux différentes phases sont décalées entre elles d'une distance égale au pas élémentaire lx .

Quand la phase 1 est alimentée, la position d'équilibre est en $x = lx$, si la deuxième phase est alimentée après coupure de la première, la force F_2 amène donc le mobile vers la position $2lx$. Quand la phase 3 est alimentée à son tour, une 3^{ème} force F_3 amène le mobile en $3lx$ et ainsi de suite avec une séquence d'alimentation 1, 2, 3, 1, 2, 3....

La séquence (1,3,2) fait déplacer le mobile dans le sens inverse.

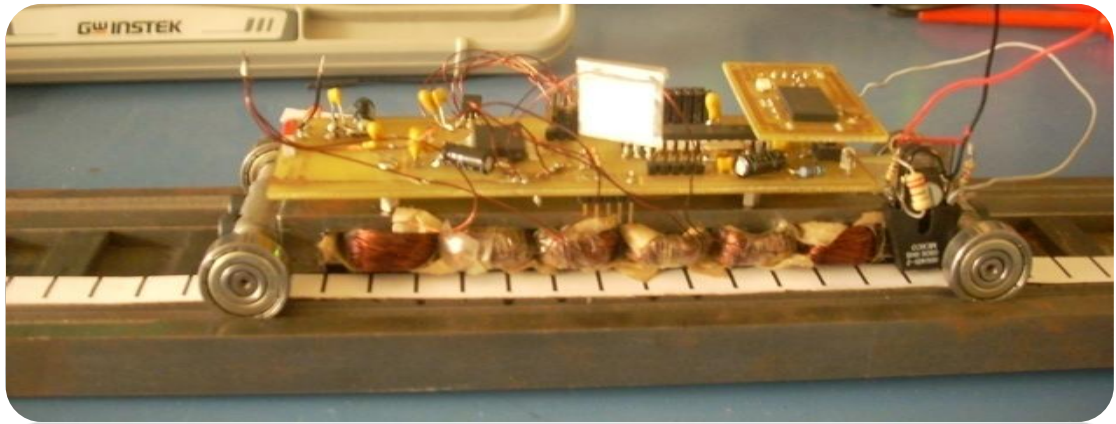


Fig. 38: Prototype de MRV réalisée

4^{ème} CHAPITRE :
ETUDE DE LA PARTIE COMMANDE DE LA MRV

IV.1 Introduction :

Après avoir dimensionné et réalisé la structure de notre moteur à réluctance variable, cette partie traite donc la partie commande et les différents organes que nous avons adopté pour commander et contrôler notre machine MRVlin, en l'occurrence, microcontrôleur, onduleur de tension, capteur infrarouge et module de communication externe avec le PC

IV.2 Méthode de commande :

Les performances d'un positionnement utilisant les moteurs pas à pas linéaires dépendent à la fois de la structure retenue, de la stratégie de commande considérée et du système d'alimentation.

La figure ci-contre représente les différents blocs fonctionnels permettant de créer un mouvement de translation. [13]

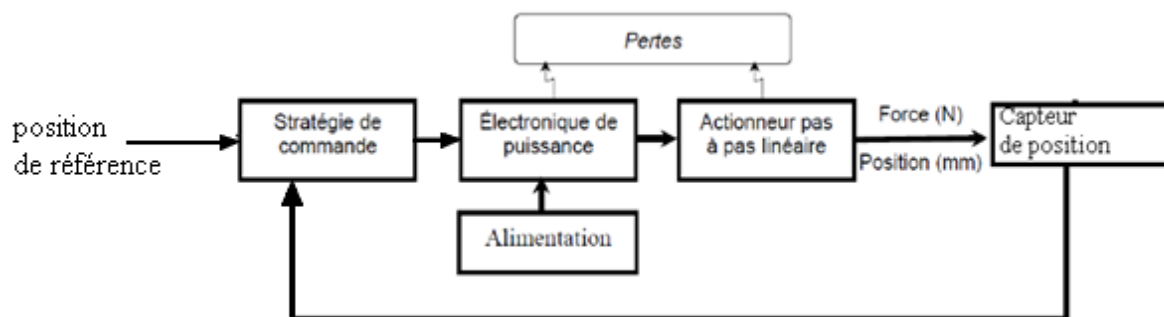


Fig. 39 : Blocs fonctionnels d'un mouvement de translation

La position de référence imposée par l'utilisateur est l'entrée du système global. Le rôle de la stratégie de commande est de conditionner l'alimentation de l'actionneur par action sur l'électronique de puissance afin d'atteindre la position de référence. Une force de poussé linéaire accompagne le mouvement de translation.

Le niveau de tension d'alimentation de notre système sera ($< 15V$) permettrait à l'actionneur de pouvoir être alimenté par une alimentation standard de table de salle de

TP (30V / 2.5A). Ce niveau de tension offre aussi l'avantage de ne pas poser de problème de sécurité et d'isolation particulière.

On peut se passer de cette alimentation, en utilisant une batterie : un pack de 10 accumulateurs NiMH (1.2V) et le système sera entièrement autonome avec puissance et logique de commande embarquées.

IV.3 Organe de commande

On s'intéresse ici à l'organe de commande qui a aussi pour mission de traiter la mesure, de calculer puis de sortir les ordres de commande (signaux MLI dans le cas de l'onduleur).

Le choix d'un microcontrôleur disposant de sorties MLI est donc imposé, notre choix c'est porté vers un microcontrôleur 16 bits de Microchip; fort célèbre pour son microcontrôleur 8bits "PIC". Ces composants sont appelés DSC (Digital Signal Controller) puisqu'ils intègrent un noyau DSP mais ils se rapprochent plus des microcontrôleurs.

Pour notre projet, nous avons adopté le dspic 33FJ128MC202 (Annexe 1). Il dispose d'un convertisseur analogique numérique 10bits, de nombreuses broches d'entrées/sorties (E/S), d'un module MLI (PWM), d'une liaison série asynchrone (UART), d'une liaison série synchrone (SPI), etc.

Les outils de développement sont:

- **Pickit2** : Interface USB pour le brancher à un PC et le programmer (flasher), debugger (exécution pas à pas du programme).
- **MPLAB** : Environnement de développement avec compilateur C.

IV.3.1 Caractéristiques du dsPIC 33FJ128MC202

- ▲ CPU d'architecture RISC modifiée jusqu'à 40 MIPS (sous 3.0-3.6V), jeu d'instruction optimisé pour le compilateur C avec des modes d'adressage flexibles, 83 instructions de base, 24-bit instructions, 16-bit data, CPU.
 - ▲ 128 Kbyte de FLASH (Programme), 16 Kbytes de SRAM (Data).
 - ▲ Une mémoire à accès direct DMA (2Kbytes)
-

- ▲ 28 pins (partagées), 1 entrée codeur incrémental QEP, 2 pins comparateurs, 6 sorties PWM, 4 ports de capture, ICSP (programmation in situ), 2 interfaces série UART, 2 interfaces I2C 2 interfaces SPI, 21 I/O ports, 6 ADC 10-bits, 5 Timers 16-Bit, [9]

Comme il a 28 pattes (pins) et qu'il existe en boîtier DIP, il peut être facilement utilisé pour des petits projets, on le programme en assembleur ou en C. Nous avons choisi le langage C à cause de son universalité et la facilité d'adaptation des algorithmes.

28-Pin SDIP, SOIC

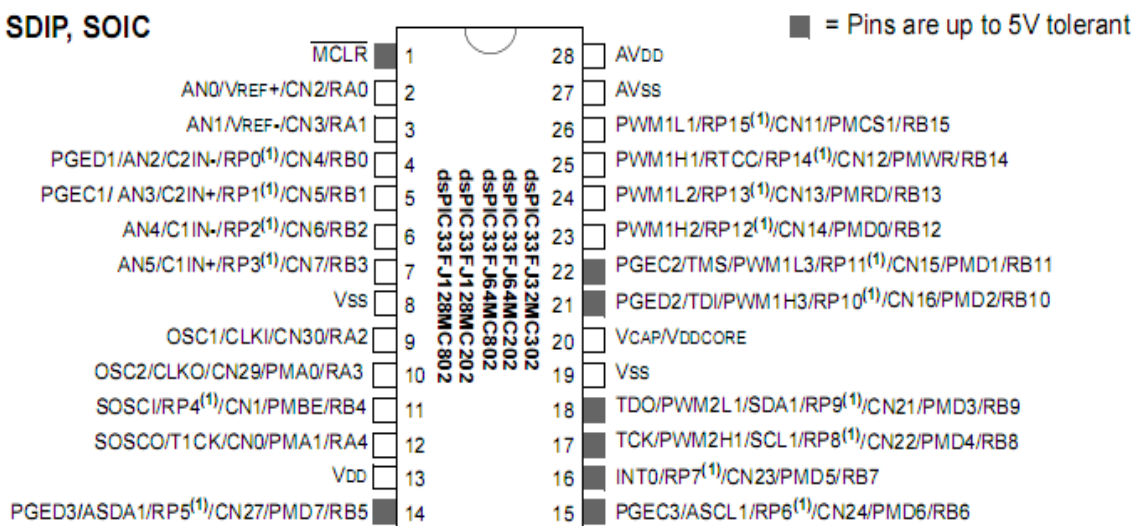


Figure 40 : Brochage du dsPIC33F128MC202

IV.3.2 Module ADC (Convertisseur Analogique Numérique):

Le dsPIC33F contient un convertisseur analogique numérique qui permet de convertir une grandeur continue analogique de tension comprise entre AVSS et AVDD (0 à 3V) en une grandeur numérique. On verra plus loin qu'il est utilisé pour traiter l'information analogique fournie par le capteur infrarouge.

Il existe 2 manières de lancer la conversion (SOC : Start Of Conversion) :

Lancer manuellement la conversion ou de manière automatique sur un évènement (Timer, PWM...).

Le module ADC du dsPIC33F a les caractéristiques suivantes:

- Jusqu'à 1,1 Msps / s de vitesse de conversion
- 06 broches broches d'entrée analogique

- Pin de tension de référence externe en entrée
- Quatre amplificateurs différentiels unipolaires échantillonneur/bloqueur (S & H)
- Échantillonnage simultanée allant jusqu'à quatre broches d'entrée analogique
- Mode de numérisation automatique des canaux
- Sélection de source de déclenchement de conversion

Stockage des résultats de la conversion

Nous utiliserons comme base à notre développement des algorithmes de commande et d'observation de la position du MRVlin, un programme fourni par notre encadrant, qui réalise la conversion de manière automatique sur un événement MLI et qui utilise la DMA pour stocker les résultats de conversion du module ADC sans passer par le noyau dspic. Ceci permet d'optimiser l'utilisation du temps CPU. Ce dernier ne viendra lire les résultats de conversion que lorsqu'il en a réellement besoin.

IV.4 Modulation à largeur d'impulsion (MLI):

Pour imposer la tension aux bobines, nous disposons d'un onduleur de tension sous forme de circuit intégré. Ce dernier se pilote en MLI : Modulation à Largeur d'Impulsion, en anglais **PWM**: Pulse Width Modulation.

Nous pouvons choisir de connecter notre paire de bobine à la source de tension continue (pleine tension) ou la déconnecter de cette source (0).

En agissant rapidement sur ce changement d'état nous modulons la tension moyenne appliquée au bobinage en question.

L'intérêt de la MLI est de pouvoir générer un signal continu à partir d'un système fonctionnant en tout ou rien. Ainsi, à partir d'une succession d'états discrets pendant un temps T , on peut obtenir une valeur continue moyenne pendant ce temps T . [8]

On peut dire que la fonction MLI joue le rôle d'interface entre la partie commande et la machine électrique associée. Cette fonction agit sur l'onduleur de tension de la partie puissance et joue un rôle essentiel avec des conséquences sur toutes les performances du système.

C'est une technique couramment utilisée aussi pour synthétiser des signaux continus à l'aide de circuits à fonctionnement tout ou rien, ou plus généralement à états discrets.

On peut citer en passage d'autres usages les plus fréquents comme :

- . La conversion numérique-analogique
 - . Les amplificateurs de classe D, en audio
- Les alimentations à découpage, variateurs de vitesse, et plus généralement tous les dispositifs d'électronique de puissance utilisant des composants de type MOSFET, IGBT, GTO.

Deux données sont importantes lorsqu'on veut faire de la MLI : la période T et le rapport cyclique α . Le rapport cyclique est le rapport du temps t pendant lequel le système est à l'état haut sur la période. On a : $\alpha = t/T$.

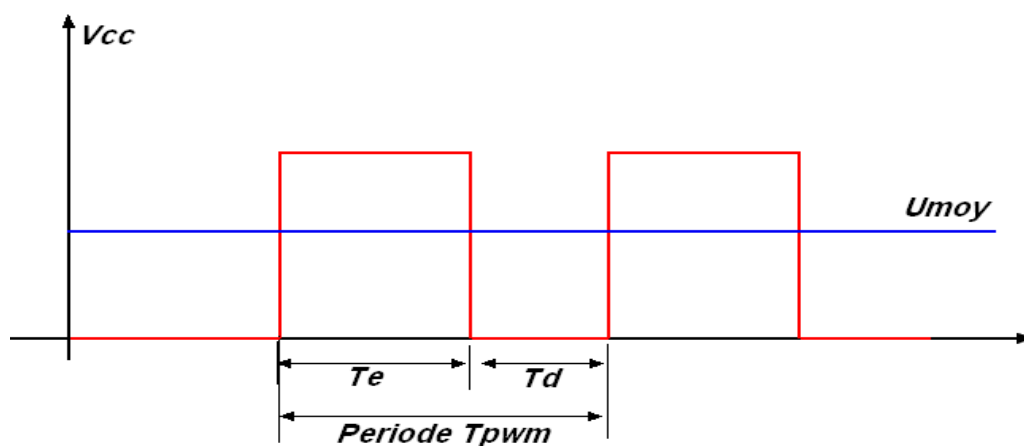


Fig. 41: Principe de la modulation à largeur d'impulsion

Nous définissons ainsi des caractéristiques :

- La période TPWM du PWM. Nous parlons plutôt de fréquence du PWM (l'inverse de la période).
- Le temps d'enclenchement Te (durée pendant laquelle les transistors du pont conduisent (saturés)).
- Le temps de déclenchement Td (durée pendant laquelle les transistors du pont sont bloqués).

On obtient les relations suivantes :

Période : $TPWM = 1/FPWM$ (avec $TPWM = Te + Td$)

Rapport cyclique : $\alpha = Te/TPWM$

Valeur Moyenne : $Umoy = Vcc * \alpha$

PRINCIPE DE REALISATION.

La MLI « intersective » la plus classique, consiste à comparer la modulante (le signal à synthétiser) à une porteuse généralement triangulaire (dent de scie ou symétrique). Le signal de sortie vaut 1 si la modulante est plus grande que la porteuse, 0 sinon ; le signal de sortie change donc d'état à chaque intersection de la modulante et de la porteuse. Cette comparaison se fait en interne au sein du module PWM du dspic Le microcontrôleur se charge de calculer des signaux MLI de commande à la fréquence FPWM.

Les sorties numériques PWM commandent le circuit d'amplification : Onduleur de tension triphasé L6234. Ce dernier génère un signal électrique analogique de même fréquence que le signal MLI mais d'une puissance nettement supérieure à l'étage numérique précédent.

Grace à au registre de contrôle OVDCON que possède le dspic et qui permet d'inhiber ou non les sortie PWM indépendamment l'une de l'autre; nous faisons défiler les séquences d'alimentation des paires de bobines (figure 42).

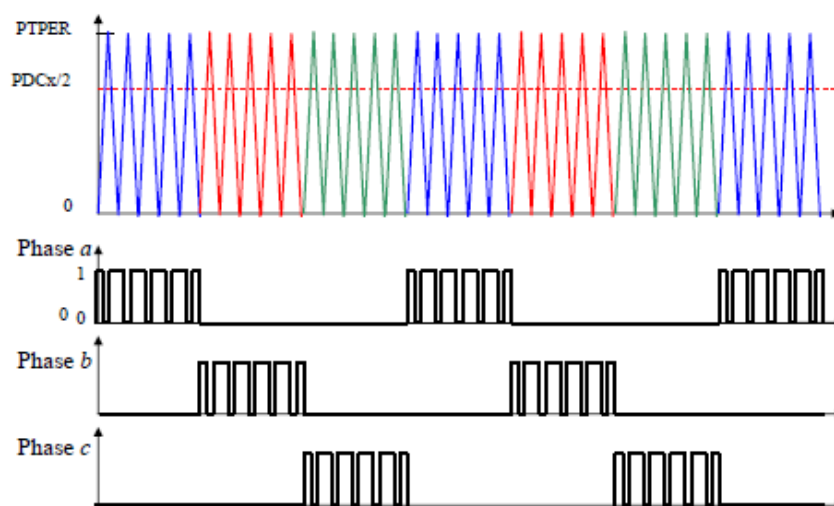


Fig.42 : Séquence d'alimentation des phases, motifs de la MLI [3]

IV.5 Organe de Puissance:

Les moteurs électriques ont besoin de courants importants par rapport à la sortie maximale d'un microcontrôleur. Un moteur ne marcherait pas si on le branchait directement à la sortie d'un microcontrôleur. On a donc besoin d'un convertisseur qui permet de fournir de forts courants au moteur en permettant son contrôle par le microcontrôleur.

Comme on a vu précédemment pour pouvoir Controller les courants il faut un convertisseur statique piloté par une commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Le convertisseur statique associé à notre dspic 33F n'est autre qu'un onduleur de tension triphasé, on a opté pour le L6234 sous forme de circuit intégré qui peut délivrer jusqu'à 4A dans sa version PowerSO 20.

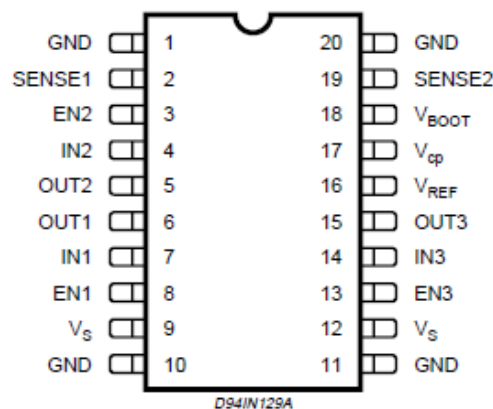


Fig. 43 : Circuit intégré de l'onduleur de tension L6234

La topologie utilisée pour un tel dispositif est une structure d'onduleur de tension triphasé constitué de trois onduleurs monophasés en demi-pont asymétriques.

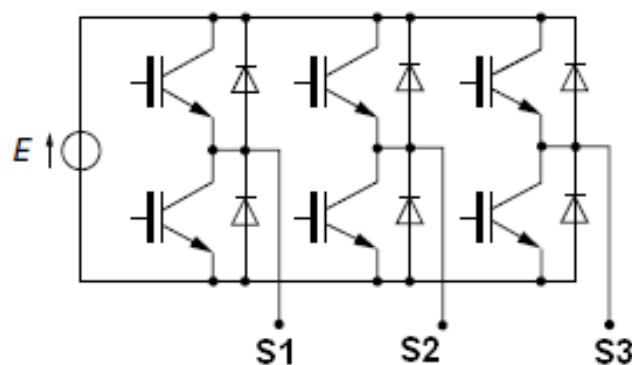


Fig. 44: Schéma général d'un onduleur de tension triphasé en pont

Le L6234 est réalisé en technologie BCD qui combine les transistors de puissance DMOS avec les circuits CMOS et Bipolaire sur le même circuit intégré. [10]

En utilisant une technologie mixte, il a été possible d'optimiser les circuits logiques et l'étage de puissance pour atteindre les meilleures performances possibles.

Selon le sens de polarisation, si l'on coupe brutalement l'alimentation du moteur une surtension va apparaître du fait que le courant, selon la loi de Lenz, va produire une tension $V = L di / dt$ aux bornes du commutateur. L'ajout de diode de roue libre va permettre à ce courant de circuler car, elle sera passante dès que sa tension directe sera atteinte. Sans cette précaution la tension va largement dépasser la tension maximale admissible par le commutateur et le détruire. C'est le même phénomène que sur une bobine de relais commandée par un transistor.

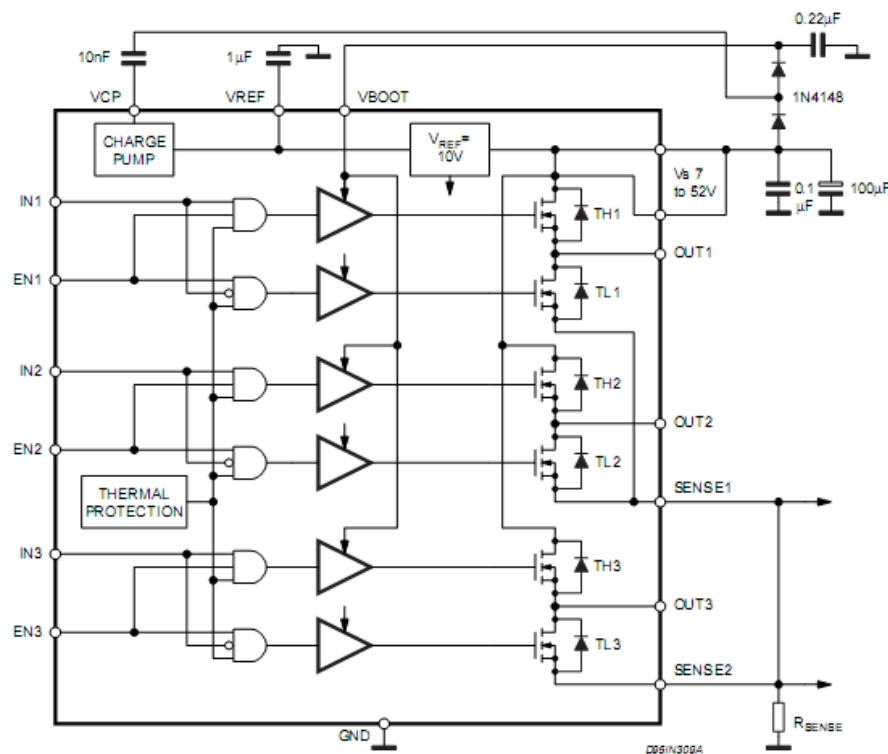


Fig. 45 : Schéma bloc du L6234

Description:

Chaque demi-pont a deux transistors de puissance DMOS. Les 3 demi-ponts peuvent être commandés indépendamment par le biais des 3 entrées IN1, IN2, IN3 et les 3 entrées EN1, EN2, et EN3.

L'étage de contrôle et l'étage logique sont conçus pour fonctionner à partir de 7 V à 52V.

Chaque canal est contrôlé par deux entrées logiques distinctes IN1 et EN1, dans notre application les sorties MLI du dspic: PWM1H, PWM2H et PWM3H sont connectées respectivement aux entrées IN1, IN2 et IN3 tandis que les entrées EN1, EN2 et EN3 sont utilisées pour inhiber ou non l'onduleur.

Le fonctionnement de chaque transistor dans un même demi-pont est complémentaire, c.à.d. lorsque l'un conduit l'autre et bloqué est inversement. Ainsi lorsque TH1 conduit, TL1 est bloqué on voit sur la charge une tension $+V_s$ et lorsque TL1 conduit, TH1 bloqué la tension au borne de la charge est nulle.

Ce mode de fonctionnement est répété pour les trois bras de notre onduleur triphasé, on aura ainsi les trois tensions de sortie qui vont alimenter les bobine de notre MRV linéaire (fig47).

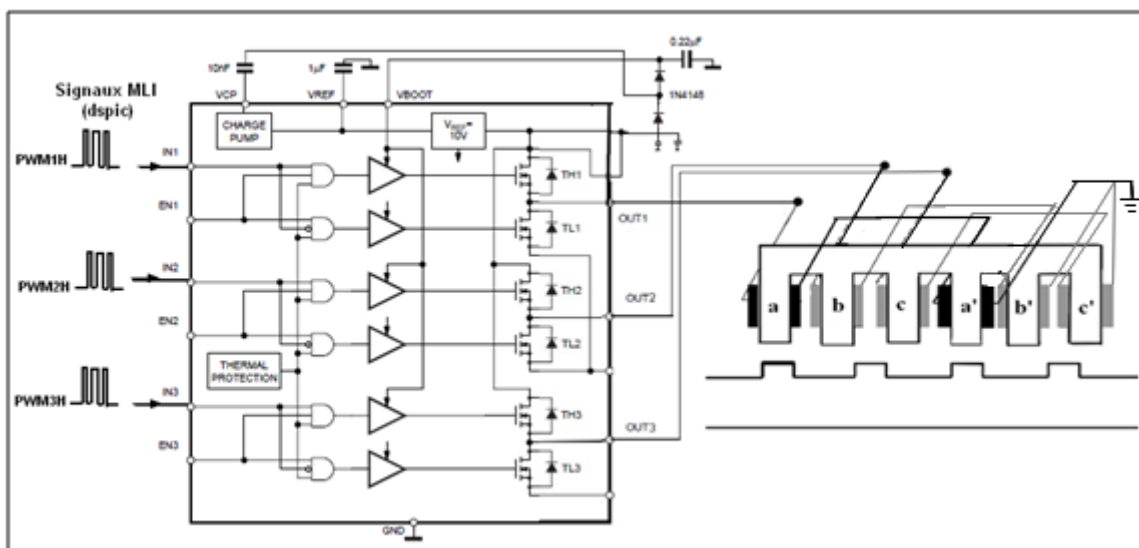


Fig. 46: Branchement des entrées-sorties du L6234

Ainsi l'onduleur de tension triphasé L6234 aurait transformé la tension moyenne générée par la MLI en une tension de forme carrée de même fréquence mais d'une amplitude nettement supérieure et d'un courant pouvant atteindre 4A en fonction de l'impédance des bobines. Pour chaque phase la forme du signal sera la suivante :

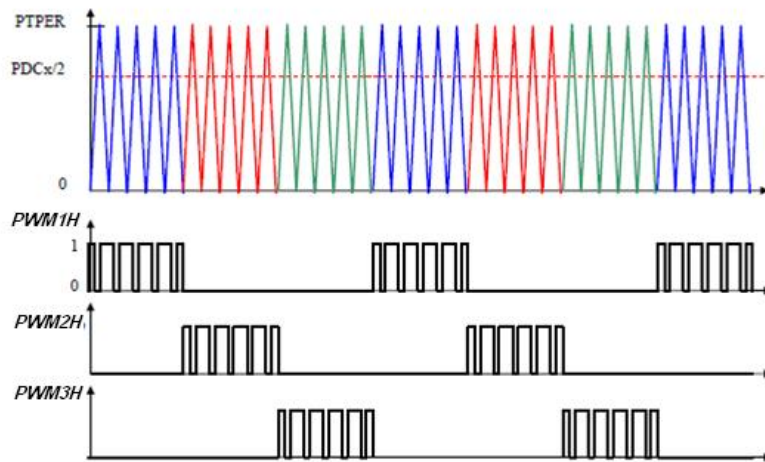


Fig. 47: Signaux MLI du dspic

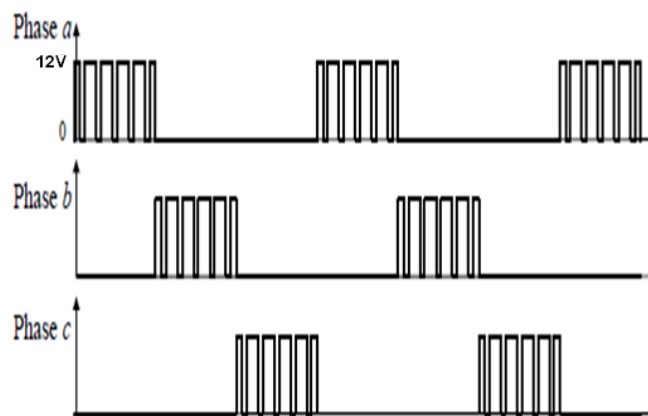


Fig. 48: Signal de sortie de l'onduleur L6234

IV.6 Liaison Bluetooth

Afin de pouvoir commander notre MRV à distance et supprimer les connexions entre la maquette qui comporte le MRVlin, et le PC, nous avons décidé d'installer une liaison sans fil à courte distance ; une liaison Bluetooth, nous gagnons ainsi en souplesse et autonomie.

Bluetooth est une spécification de l'industrie des télécommunications. Elle utilise une technique radio courte distance destinée à simplifier les connexions entre les appareils électroniques. Elle a été conçue effectivement dans le but de remplacer les câbles entre les ordinateurs et les périphériques associés. [12]

Le standard Bluetooth définit un certain nombre de profils d'application (*Bluetooth profiles*), permettant de définir le type de services offerts par un périphérique Bluetooth.

IV.6.1 Profil SPP : (*Serial Peripheral Profil*) définit la façon de configurer des ports série virtuels et de connecter deux périphériques compatibles Bluetooth. Il émule exactement ce qui se passe lors d'une liaison série classique. C'est ce profil qui est utilisé dans notre application pour pouvoir communiquer entre le dspic et le PC via le port COM.

Le détail et tout le protocole de la liaison Bluetooth est décrit en annexe n°15.

La liaison Bluetooth permet dans notre application de remplacer le câble de liaison série asynchrone (UART / RS232) entre le MRVlin et le PC.

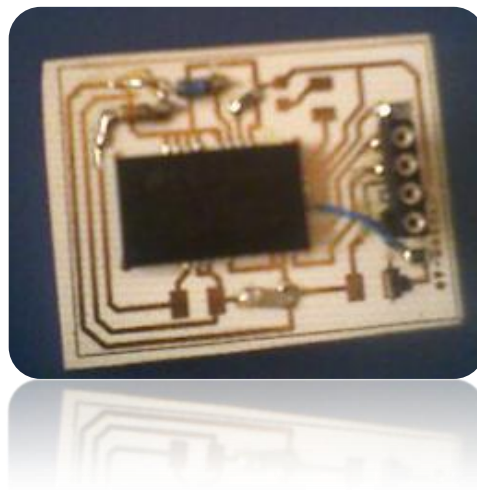


Fig. 49 : Module Bluetooth (LMX9838) assurant la communication PC-UART (dspic)

IV.6.2 Description d'une communication série

Le protocole de communication engagé dans notre application est donc conforme à une liaison série traditionnelle. Contrairement à une transmission parallèle, où les 8 bits de données d'un octet sont transmis sur 8 lignes différentes, dans une liaison série, ils sont transmis les uns à la suite des autres sur une seule ligne. Cela permet de faire des liaisons plus simples, plus longues et faciles à mettre en œuvre entre deux équipements.

Elle est de type asynchrone, c'est à dire qu'elle ne transmet pas de signal horloge, les deux équipements doivent être configurés avec une même vitesse de transmission identique. Ils doivent par ailleurs utiliser le même protocole.

La vitesse de transmission caractérise le nombre de bits transmis par secondes. Elle s'exprime en bauds. Dans notre application, la communication dspic33F – BT LMX9838

se fait à 115200 bauds. Il convient alors de choisir une vitesse égale ou supérieure entre de port COM du PC sur son interface BT afin de ne pas rater des données en provenance du dspic et de son module BT.

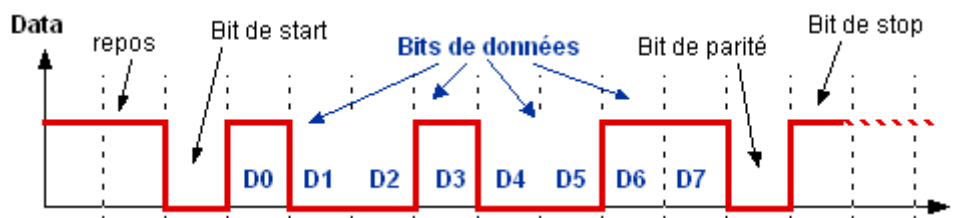
Format des trames

Au repos, la ligne est à 1. Un passage à 0 indique que la transmission va commencer, c'est le bit de start.

Les bits de données sont ensuite transmis sur un format de 7 ou 8 bits.

Un bit de parité peut être ajouté pour vérifier la validité des données.

Un ou deux bits de stop terminent la transmission pour le retour au repos de la ligne.



Le bit de parité est tel que la somme des bits à l'état 1 est paire, dans le cas contraire, il y a eu une erreur de transmission. Il est aussi possible de travailler avec un nombre impair de bits.

IV.7 Capteur infrarouge HOA1405:

Pour déterminer la position du mobile, on choisit d'intégrer un capteur optique à notre actionneur linéaire, qui émet un rayon infrarouge qui se reflète sur une surface plus ou moins sombre. Le flux lumineux est ensuite capté par un phototransistor infrarouge, intégré au capteur, dont la focale est centrée sur un point à 5 mm en dessous du capteur. La zone sombre qui doit absorber les rayons infrarouges est représentée par une série de traits noirs espacés exactement de $lx = 10$ mm (un pas). Ainsi grâce à l'ADC de notre dspic (Convertisseur Analogique Numérique) le signal reçu sera traité pour savoir si l'on se trouve devant un plot ou non. Cette information sera utilisée pour réaliser l'autopilotage et pour calculer la position x intermédiaire entre deux passages ainsi que la vitesse du MRVlin.



Fig. 50: Implantation du capteur optique

Un capteur simple et bon marché qui s'adapte parfaitement à notre application par sa taille et ses caractéristiques; Le HOA1405 a été utilisé.

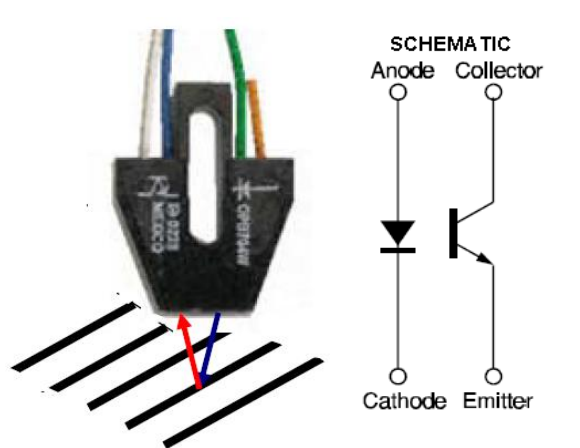


Fig. 51: Principe du capteur optique HOA1405

Le capteur HOA1405 se compose d'une diode électroluminescente infrarouge et un phototransistor en silicium NPN encastré côte à côte sur la convergence de l'axe optique dans un boîtier thermoplastique noir. Le phototransistor répond au rayonnement de la diode infrarouge seulement quand un objet réfléchissant passe dans son champ de vision. La série HOA1405 utilise un filtre IR de transmission afin de minimiser les effets de la lumière ambiante visibles et d'offrir une physionomie optique lisse qui évite l'accumulation de contaminants atmosphériques dans le chemin optique. [14]

Plusieurs difficultés sont avérées après, dans sa mise en œuvre, notamment sa sensibilité au parcours du mobile donc on doit avoir un parfait lissage de la bande de roulements pour ne pas perturber le signal. C'est le premier problème de la réalisation expérimentale du rail. En effet, sa longueur étant de 1.5 m, il a été bridé plusieurs fois pour pouvoir fraiser sur toute sa longueur, malheureusement, le niveau de référence a été mal refait à chaque fois, ce qui nous occasionne

des trous plus ou moins profonds dans le rail de guidage (bande de roulement). Ceci cause un changement de hauteur et un blocage du roulement à ces niveaux.

On doit également veiller à respecter la distance de la focale (environ 5 mm) pour une lecture optimale de la quantité de rayonnement IR réfléchis.

Pour limiter le courant du collecteur, quand le phototransistor sature, à 0,8 mA, une résistance est placée $R_c = 4.1 \text{ k}\Omega$

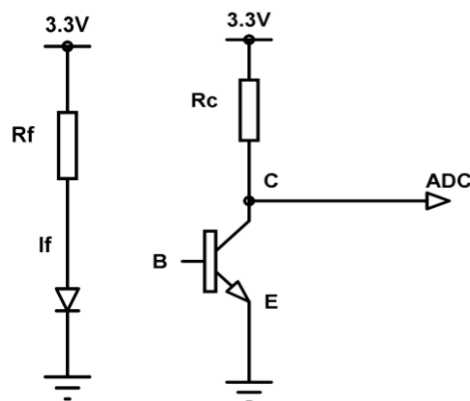


Fig52: Diode et phototransistor du capteur IR

Pour limiter le courant $I_f = 20 \text{ mA}$, une résistance $R_f = 120 \Omega$ est à mettre en série avec la diode IR.

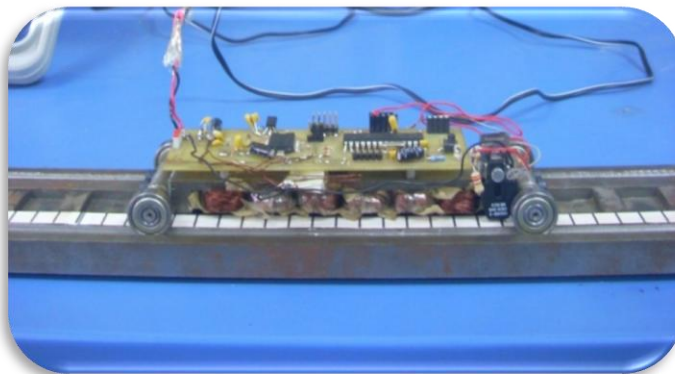


Fig. 53: Capteur infrarouge détectant les traits noirs de la bandelette de papier.

IV.8 La carte électronique de commande :

La carte électronique utilisée pour la commande de notre moteur à réluctance variable, nous a été fournie par notre encadrant. Elle comporte les composants suivants :

- Le dspic 33FJ128MC202
- L'onduleur de tension L6234 sous sa forme PowerSO 20
- Un module Bluetooth LMX9838 qui se connecte sur un SIL 4
- Régulateur de tension 3,3V

- D'autres composants annexes pour le bon fonctionnement de la carte tels que les résistances, des capacités, un bouton poussoir pour le Reset, des transistors.

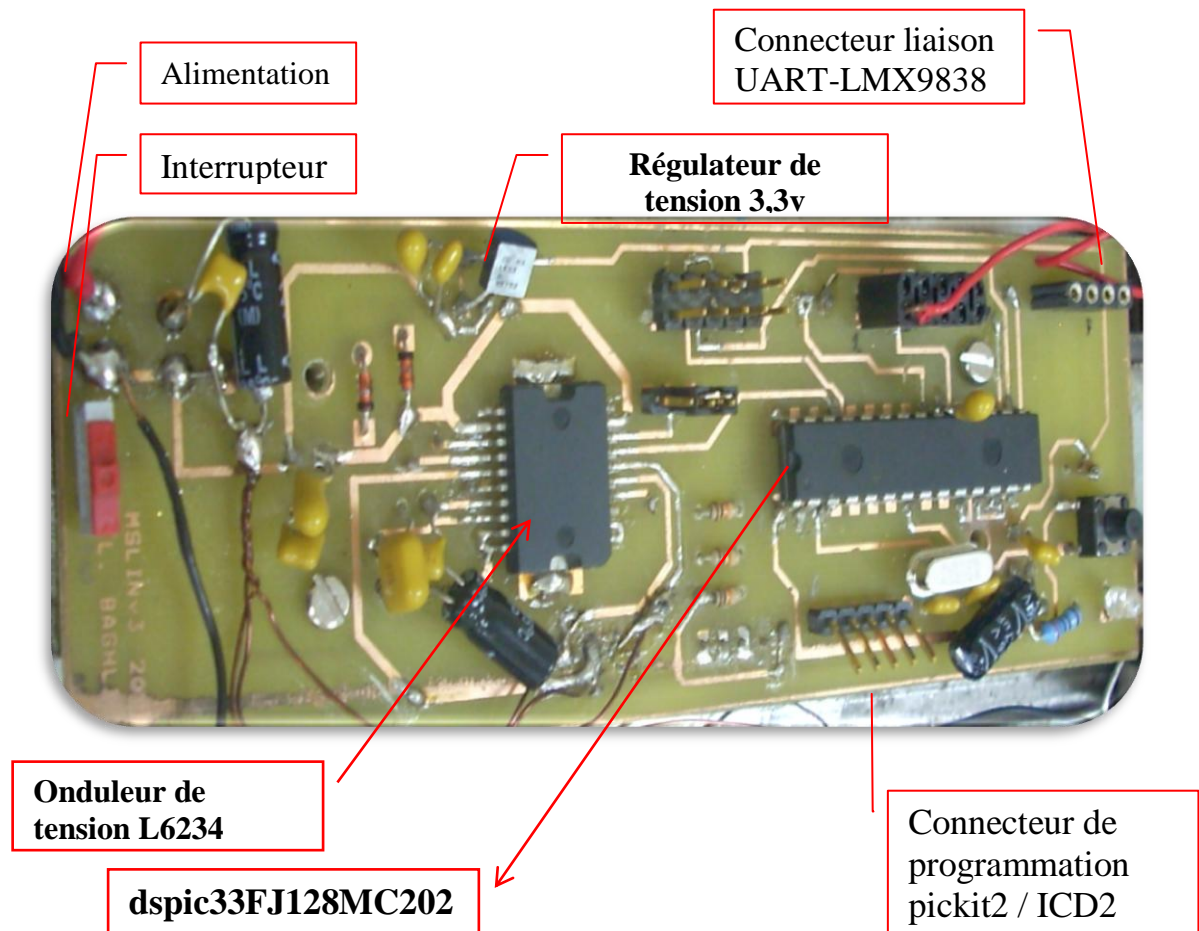


Fig. 54 : Carte électronique de commande

IV.9 Programmation du Microcontrôleur :

Pour pouvoir prendre en charge tout les événements qui apparaitrons sur notre dspic, et gagner en souplesse dans la programmation on a eu recours à utiliser des routines d'interruptions ISR (Interrupt Service Routine).

Ainsi, le microcontrôleur sauvegarde les registres CPU sur la pile, avant l'appel de la routine, à la fin de la routine, l'état du CPU est restauré donc reprise de l'exécution "normale" du programme principal.

Le programme principal initialise donc les différentes fonctions et variables puis leur fait appel.

La carte de commande et d'électronique de puissance (dspic, onduleur, BT) étant fournie, ainsi que le programme dspic correspondant, notre tâche consiste à implanter l'autopilotage et l'observation de la position x et de la vitesse instantanées en mesurant les instants de passage du capteur devant les traits noirs de la bande réfléchissante. Nous avons aussi réalisé une interface de communication graphique sous Matlab (GUI) pour capturer les variables en temps réel et commander le dspic à distance en utilisant le port COM et le module Bluetooth.

Nous présentons dans ce qui suit le programme de la fonction **regul** qui intervient au milieu d'une routine d'interruption ISR, c'est la fonction qui se charge du changement des séquences d'alimentation des bobines.

Routine Regul () du programme :

(Elle est appelée par l'ISR toutes les 1 ms)

```
//-----
void Regul()
TimeStamp++;
    if (CaptIR>512)          //si le capteur perçoit le trait noir
                            Flags.CaptIRState=1;
    else                      Flags.CaptIRState=0;
    if (Flags.CaptIRState!=Flags.OldCaptIRState && Flags.CaptIRState) //détection d'un
trait noir au milieu de 2 surfaces blanches
    {
        pas=Oldpas+10; // le mobile a déplacé de 10mm = position absolue
        vitesse=(pas-Oldpas)/TimeStamp;
        TimeStamp=0;
        x_obs=0;
    }
if (Flags.MRV_autopilotage) //si le mode autopilotage est choisi via le GUI
    {
        if (Flags.CaptIRState!=Flags.OldCaptIRState && Flags.CaptIRState) //
        {
if (++Sequence>=3) Sequence=0;
            if (Sequence==0) OVDCON=0x0C00; // phase A alimentée
```

```

        if (Sequence==1)  OVDCON=0x3000; // phase B alimentée
        if (Sequence==2)  OVDCON=0x0300; // phase C alimentée
    }
    Flags.OldCaptIRState=Flags.CaptIRState;
}
//-----
if (Flags.FrontRev) //Avance choisie via GUI
{
    SeqMaxDelay=1000;
    if (!--SeqDelayCounter)
    {
        SeqDelayCounter=SeqMaxDelay;
        if (++Sequence>=3) Sequence=0;
        if (Sequence==0)  OVDCON=0x0300; // phase A alimentée seule
        if (Sequence==1)  OVDCON=0x0C00; // phase B alimentée seule
        if (Sequence==2)  OVDCON=0x3000; // phase C alimentée seule
    }
}

else //Recule
{
    SeqMaxDelay=1000;
    if (!--SeqDelayCounter)
    {
        SeqDelayCounter=SeqMaxDelay;
        if (++Sequence>=3) Sequence=0;
        if (Sequence==0)  OVDCON=0x0300; // phase A alimentée seule
        if (Sequence==1)  OVDCON=0x3000; // phase C alimentée seule
        if (Sequence==2)  OVDCON=0x0C00; // phase B alimentée seule
    }
}
//-----

```

Description de la Routine Regul()

Le programme se déroule de telle sorte qu'il soit en permanence lié avec l'interface graphique grâce à l'UART du microcontrôleur, il reçoit les ordres de

- ✓ Inhibé ou non l'onduleur de tension L6234
- ✓ Le sens du mouvement : avance ou recule
- ✓ Prise en charge ou non du signal du capteur infrarouge.

Grace au registre de contrôle du dspic OVDCON qui permet d'inhiber ou non les sorties MLI on va pouvoir défiler les séquences d'alimentation des bobines permettant au mobile d'avancer selon le sens de marche choisi et émis depuis une interface graphique utilisateur développée sur Matlab, (1, 2,3 marche avant, 1, 3,2 marche arrière).

Le traitement de l'information fournie par le capteur infrarouge se fait au moyen de la variable CaptIR qui est prise en compte via l'ADC du dspic.

5^{ème} CHAPITRE: ANALYSE ET DISCUSSION DES RESULTATS

V.1 Analyse des résultats :

V.1.1 Acquisition de données via une interface graphique Matlab :

Afin de pouvoir visualiser les grandeurs traitées par le dspic telles que, la séquence d'alimentation, l'état du capteur IR, la position et la vitesse. On a décidé de concevoir une interface graphique interactive pour une meilleure communication entre l'utilisateur et le système (dspic - MRVlin).

Un outil dédié à cette application existe déjà sous Matlab qui n'est autre que le GUI (Graphical User Interface).

L'intérêt de l'utilisation d'un GUI pour l'acquisition de données série est de pouvoir paramétrer de façon simple la connexion et de pouvoir sauvegarder facilement le résultat pour permettre un traitement ultérieur.

Présentation

L'interface utilisateur graphique de Matlab (GUI) est une interface graphique qui contient des dispositifs et des composants, qui permettent à un utilisateur d'effectuer des tâches interactives. Pour effectuer ces tâches, l'utilisateur de l'interface n'a pas à créer un script de commandes ou taper une ligne de commande.

Les composants d'interface graphique peuvent être des menus, des barres d'outils, des boutons poussoirs, des boutons radio, des cases à cocher et des curseurs...

Elle peut également afficher les données sous forme de tableau ou sous forme de tracés.

Chaque composant, et l'interface graphique elle-même, est associé à un ou plusieurs routines écrites par l'utilisateur. L'exécution de chaque routine est déclenchée par une action particulière de l'utilisateur, comme un bouton poussoir, clic sur la souris, la sélection d'un élément de menu ou le curseur passe sur un composant. Le créateur de l'interface graphique, est sensé de fournir ces rappels.

Ce type de programmation est souvent désigné comme la programmation événementielle. L'événement dans l'exemple est un clic de bouton. En programmation événementielle, l'exécution des callbaks est asynchrone, contrôlé par des événements externes au logiciel. Dans le cas du GUI de Matlab, ces événements prennent généralement la forme d'interactions de l'utilisateur avec l'interface graphique.

Le GUI utilisé ici a été créé dans un but de simplicité. Il doit permettre l'ouverture d'un port série directement depuis Matlab et proposer la configuration de la vitesse et du port à utiliser.

Note : Matlab n'est pas en mesure de détecter directement les ports connectés à un périphérique. Il est nécessaire d'avoir identifié au préalable, via le système d'exploitation par exemple, le port série concerné.

On a donc les fonctionnalités suivantes :

- ✓ Ouverture, fermeture d'un port série
- ✓ Configuration des paramètres de bases de la liaison (vitesse, port)
- ✓ Lancement, et arrêt de l'acquisition
- ✓ Envoi des différents ordres au dspic : inhiber ou non l'onduleur de tension, prise en compte de l'autopilotage / boucle ouverte, avance ou recul du moteur linéaire.

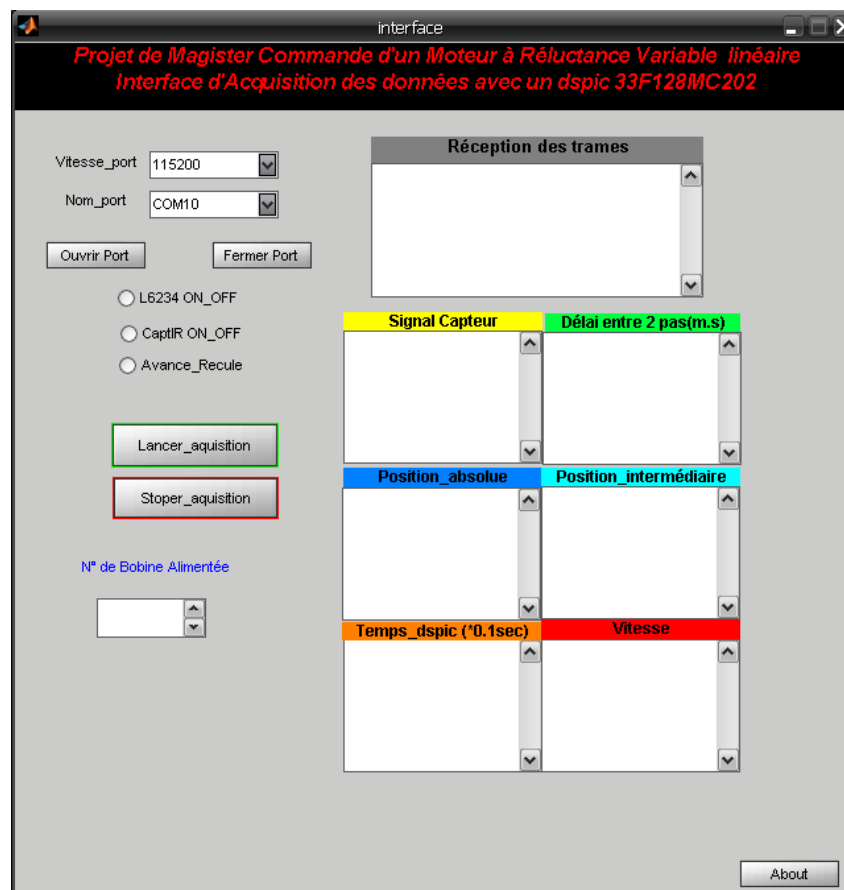


Fig. 55 : Interface graphique réalisée avec Matlab

V.1.2 Réception des trames :

A travers l'UART, le dspic communique avec l'extérieur c.à.d. le PC (interface graphique). On va donc pouvoir recevoir les données transmises par le dspic au PC et vice versa.

En temps réel, le dspic envoie une trame de bits selon une fréquence d'échantillonnage bien définie, cette trame est déclarée en interne sous la variable chaîne OutData

OutData = {"\$R0 0000 0000 0000 0000 0000R\r"}; c'est une ligne de 24 colonnes (espaces non compris) qui comporte les données comme suit :

\$	R																					R
début	Séquence d'alimentation	Vref	Capteur IR	Temps	Position	Vitesse																L6234 inhibe ou pas

- Séquence d'alimentation: renvoie l'ordre des bobines alimentées à l'instant d'échantillonnage.
- Capteur IR : envoie le signal du capteur infrarouge HOA1405 (codé en hexadécimal).
- Temps : Est une variante déclarée en interne qui renvoie le délai entre deux pics du signal HOA et s'incrémente à chaque pas.
- Position : Renvoie la position absolue entre deux plots grâce au signal du capteur infrarouge.
- Vitesse : C'est la position par unité de temps.

De cette trame on va donc rapatrier et traiter chaque donnée séparément.

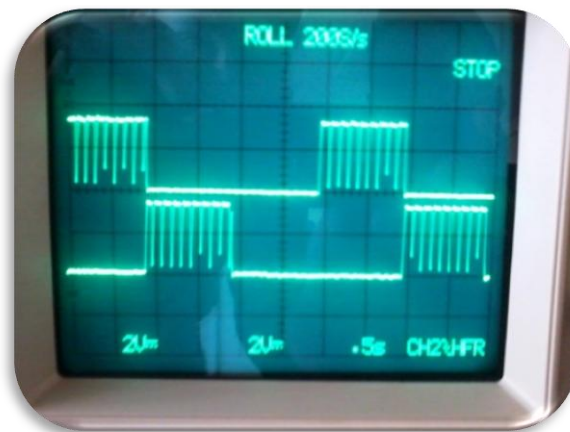


Figure 56: Visualisation des signaux MLI du dspic sur l'oscilloscope (PWM1H et PWM2H)

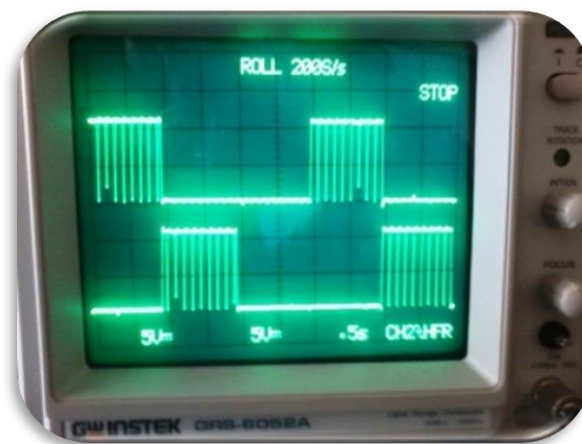


Figure 57: Visualisation des signaux à la sortie de l'onduleur L6234 sur l'oscilloscope (phase a et phase b)

L'observation des signaux sur l'oscilloscope (figure 56 et 57) nous permet de confirmer les figures déjà évoquées auparavant (figure 47 et 48), en conséquence la tension de sortie aux bornes de chaque bobine est une tension de forme carrée de même fréquence que la tension MLI fournie par le dspic et d'une amplitude bien supérieure.

V.2 Mode de pilotage du MRVlin

Le moteur à réluctance variable linéaire peut avoir deux modes de positionnement, un positionnement par à-coups et un positionnement en continu.

Dans le premier mode le mobile s'amortit entre chaque pas après quelques oscillations, dans le second on aura un positionnement direct avec moins d'oscillations.

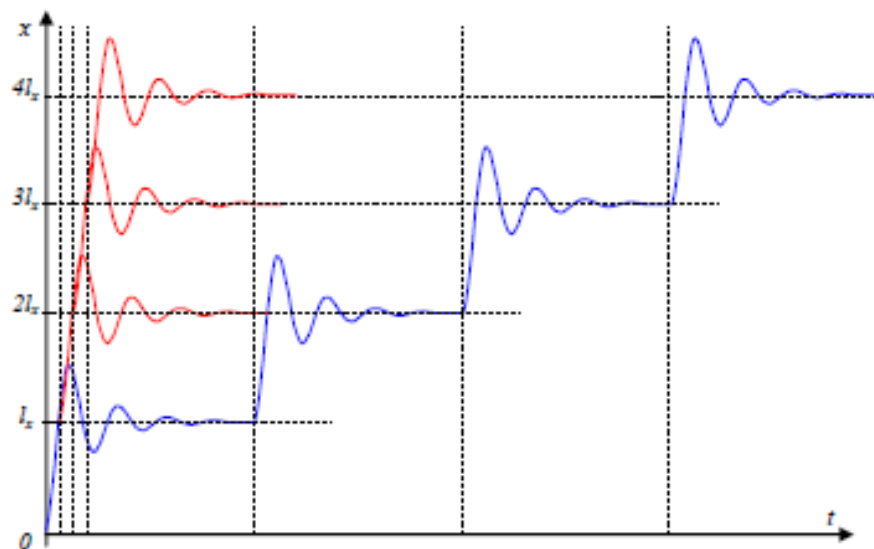


Fig. 58 : Oscillations autour des positions d'équilibre lors du déroulement des séquences : mode boucle ouverte (en bleu), autopilotage (en rouge) [3].

V.2.1 Boucle ouverte:

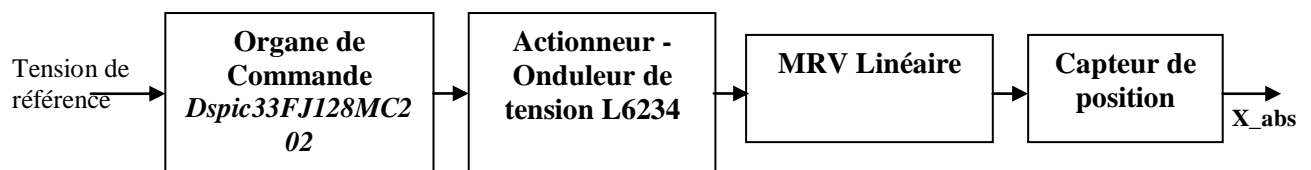


Fig. 59 : Schéma fonctionnel de la boucle ouverte

En premier lieu on va exécuter le programme de notre MRV sans prendre en considération le signal CaptIR dans la commande (donc en boucle ouverte) mais ce même signal et capté juste pour avoir l'information de la position absolue suivant qu'il détecte ou non les traits noirs de la bandelette de papier collée sur le rail.

On aura ainsi le signal suivant :

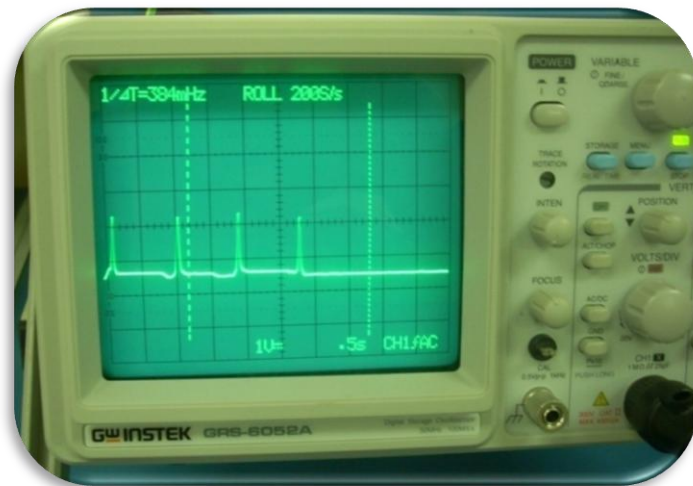


Fig. 60 : Signal HOA1405 observé sur l'oscilloscope

On remarque que le signal du capteur infrarouge forme un train d'impulsions, en effet à chaque passage sur un trait noir, donc une couleur sombre non réfléchissante, le capteur fournit une tension en dessus de 1 volt. En ajustant la règle des traits noirs en face des plots on peut traiter cette information pour déterminer la position absolue.

A chaque impulsion correspond un pas, donc une position de $lx=10$ mm selon que le mobile se déplace par 10 mm à chaque pas.

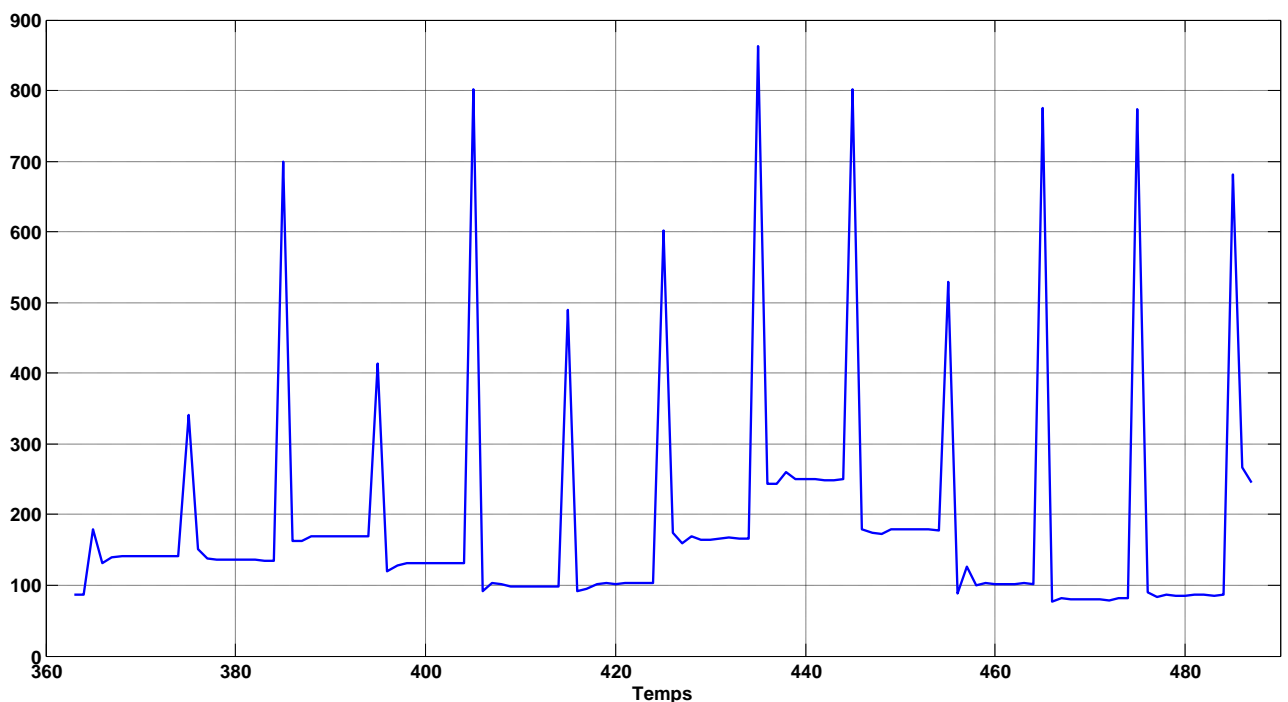


Fig. 61 : Signal du capteur reçu sur le GUI

Le signal du capteur enregistré via l'UART/MATLAB GUI reprend la forme du signal observé à l'oscilloscope.

On note que ce signal est un signal sous échantillonné par rapport au vrais signal traité par le dspic. Le traitement de la position se fait dans la routine Regul() qui s'exécute à chaque 1ms, or l'envoi par l'UART se fait à $T_s=0.1$ s.

On remarque que sa valeur varie entre 70 et 550, en effet le dspic (à travers l'ADC) fourni une valeur continu en hexadécimal qui sera converti en décimal, cette valeur n'est pas constante par le fait de la sensibilité du capteur, lorsque c'est une couleur blanche (moins sombre) la valeur est comprise entre 60 et 80 en HEX, lorsque c'est une couleur sombre elle est supérieure ou égal à 256 correspond à 100 en Hexadécimal.

L'allure de la position absolue en fonction du temps, à vitesse constante, devrait être la suivante:

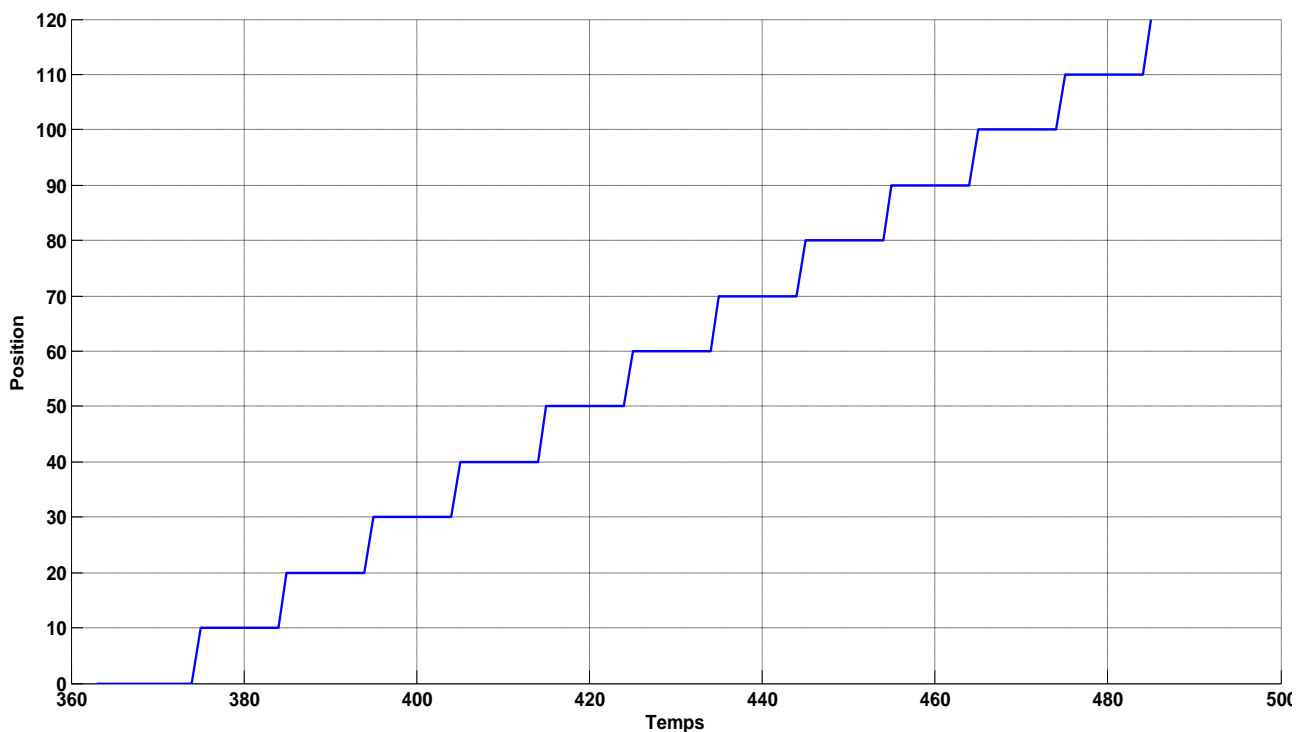


Fig. 62: Caractéristique de la position absolue en fonction du temps

Dans ce mode de fonctionnement, un phénomène d'oscillation est engendré (non observé sur l'allure de la position) après chaque pas de déplacement (figure 58 en bleu). On doit impérativement attendre que le mobile soit stabilisé au dessus du plot, avant de lui fournir une nouvelle impulsion et le deuxième pas se reproduira identique au premier,

ainsi le mobile avancera vers les positions suivantes avec des oscillations autour de chaque plot. Si on augmente assez la fréquence d'alimentation des bobines, pour améliorer la vitesse de l'actionneur, on arrive à un régime de vitesse quasi constant. C'est la vitesse limite du bon fonctionnement du moteur au delà de laquelle le mobile est freiné et peut même reculer au lieu d'avancer vers la position suivante par le fait que les deux positions sont identiques sur le plan électromagnétique. De ce fait, ce mode de pilotage en boucle ouverte ne permet pas d'atteindre des vitesses de déplacement élevées, l'idée est de tenir compte de la position du mobile au moment de l'impulsion juste avant la première oscillation et dès que la dent du mobile se retrouve devant la dent correspondante du rail, réalisant ainsi l'autopilotage.

V.2.2 L'autopilotage (avec capteur) :

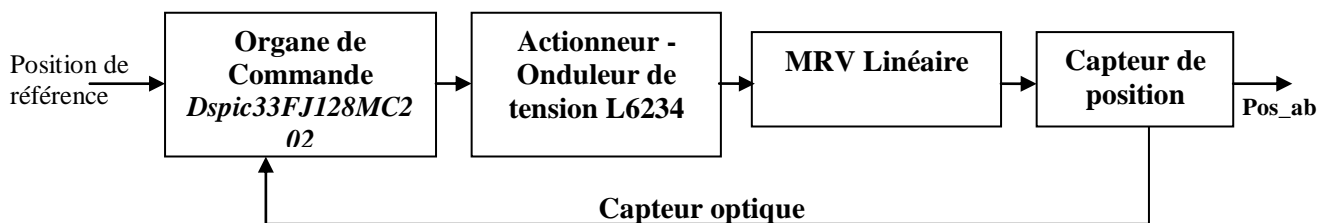


Fig. 63 : Schéma fonctionnel de l'autopilotage

Une connaissance de la position du mobile serait alors la solution qu'on a adoptée afin d'éliminer cette lacune et avoir un déplacement sans oscillations (élimination des à-coups).

En utilisant le signal du capteur infrarouge dans la commande ; le changement des séquences d'alimentation des bobines se fait automatiquement dès qu'il détecte la première impulsion et donc le premier trait noir qui est en face du plot.

L'intérêt de ce choix est de savoir quand est-ce que la dent du mobile se trouve devant la dent correspondante du rail, afin de commuter la séquence, on profite alors d'une vitesse positive pour aller encore plus vite vers la dent suivante, ainsi le mobile accélère avec une force constante F_x .

Le signal que fournit le capteur dans ce mode de commande observé à l'oscilloscope est le suivant :

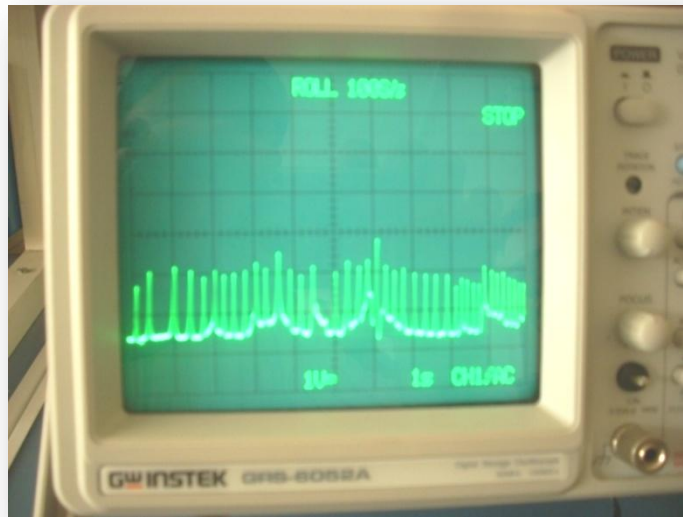


Fig. 64: Signal du capteur HOA1405 observé à l'oscilloscope (fonctionnement autopiloté)

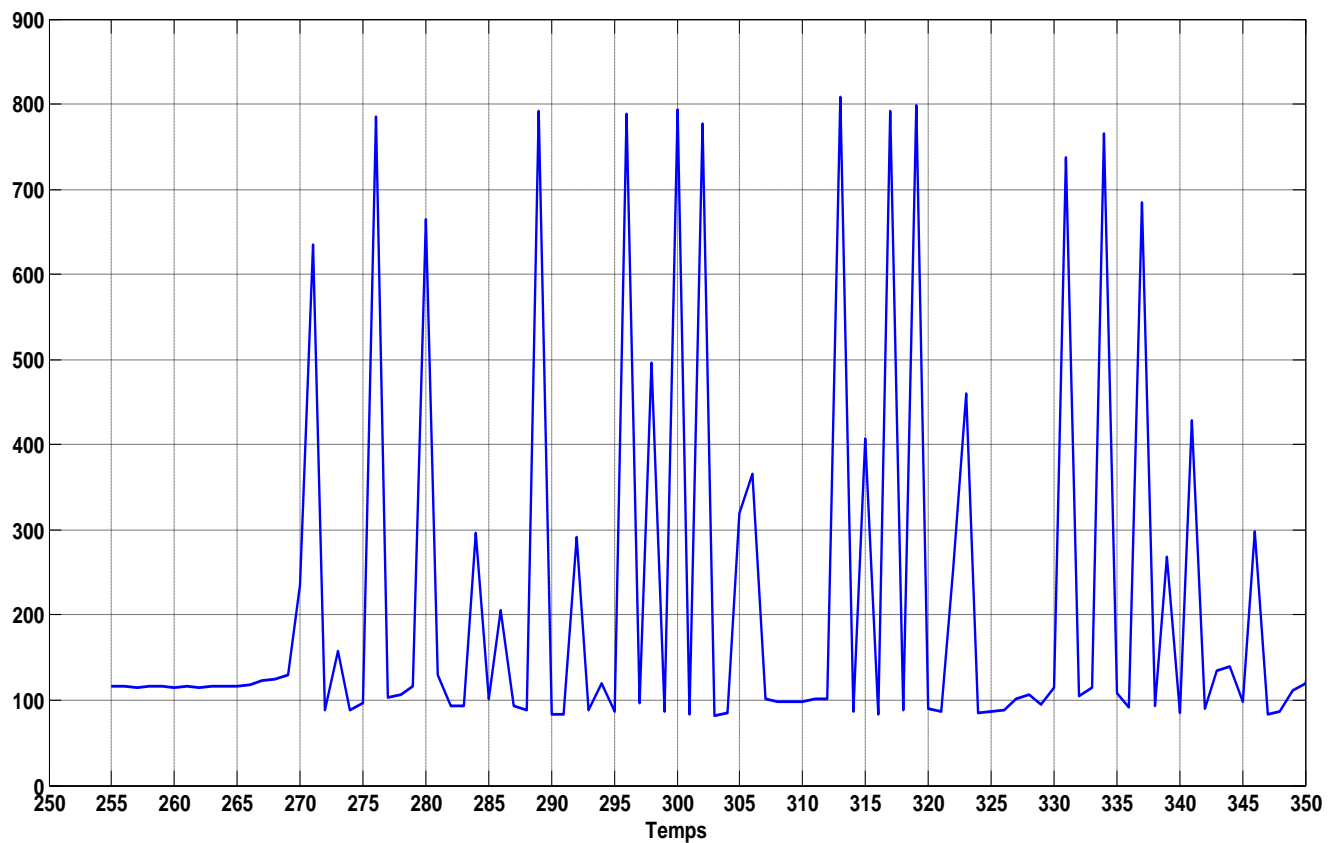


Fig. 65 : Signal du capteur perçu sur le GUI

On remarque que les écarts ne sont plus constants comme dans le fonctionnement en boucle ouverte, et pour une même période de temps le nombre des impulsions est plus important.

La caractéristique de la position serait la suivante :

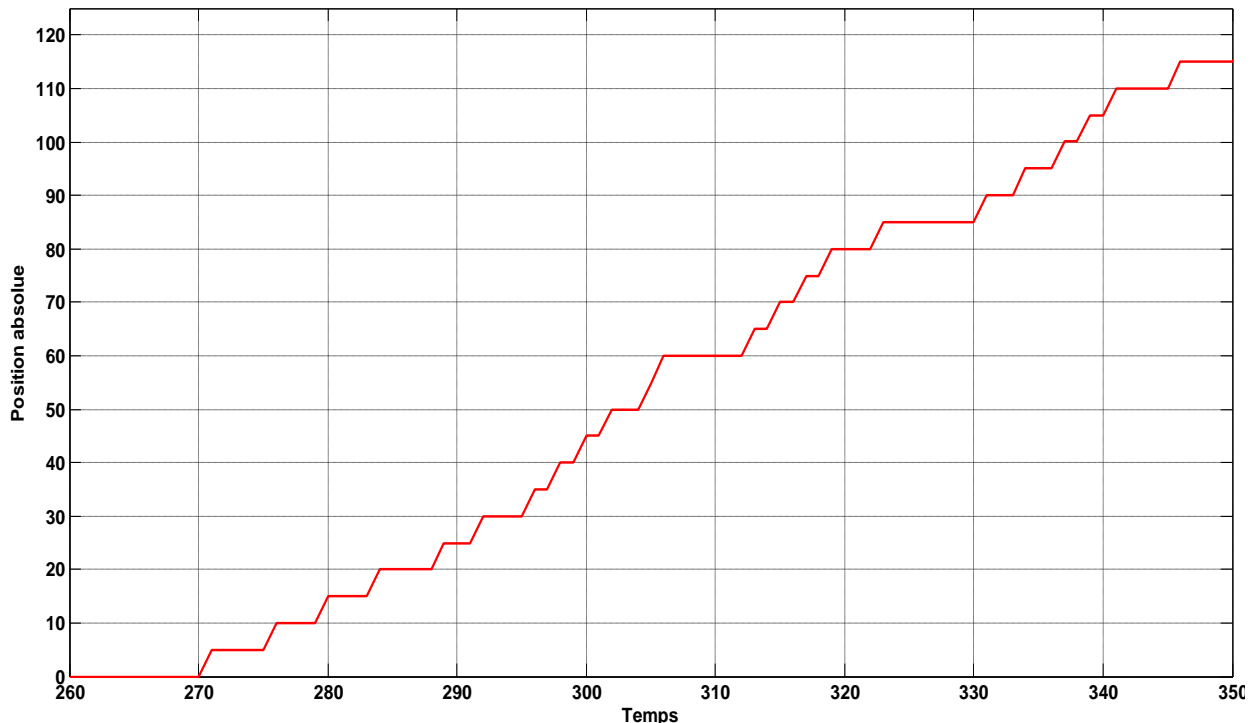


Fig. 66: Position en fonction du temps mode autopilotage

Dans ce mode de pilotage, l'effet escalier ne disparaît pas totalement, cela est dû à la première impulsion que génère le capteur lorsqu'il doit détecter le trait noir donc forcément un positionnement au dessus du plot.

En revanche, la vitesse est nettement supérieure à celle obtenue en boucle ouverte, d'où l'amélioration du positionnement de notre machine.

Cette technique permet en conséquence de réduire d'une part, les oscillations autour de la position d'équilibre qui sont à peine visible lors de mouvement de notre actionneur. (Élimination du positionnement par à-coups) et d'autre part la diminution du temps de réponse de notre système, pour une même période de temps, on aura une réponse en position nettement plus rapide qu'en boucle ouverte.

V.3 Observation de la position :

Dans certaines applications, le contrôle de la grandeur de sortie par des méthodes dite à mesure directe de l'information, faisant appel à des capteurs physiques (position, vitesse, accélération ... etc.), s'avère délicat, lorsque le coût direct de ces capteurs est relativement cher et se répercute aussitôt sur le coût global du système ou encore lorsque le signal traité par ces capteurs ne fournit pas l'information réelle du fonctionnement du système.

Ainsi un contrôle logiciel est utilisé, à travers une méthode de mesure indirecte de l'information, basée sur l'estimation ou l'observation de la grandeur de sortie.

Actuellement, avec les microcontrôleurs DSC (*Digital Signal Controller*), capables de faire des millions d'instructions par seconde, ces méthodes peuvent être utilisées avec beaucoup d'efficacité et de précision.

Pour notre système et à défaut de ne pas utiliser un accéléromètre (voir conclusion et perspectives), l'utilisation du capteur infrarouge rudimentaire ici ne permettait pas d'avoir une caractéristique de la position avec les oscillations, de plus le capteur optique fournit une position absolue entre deux traits noirs c.à.d. lorsque les dents du mobile sont en vis-à-vis des dents du rail, la vraie information de la position serait de l'avoir en tout point y compris les positions intermédiaires aux traits noirs, donc à tout instant.

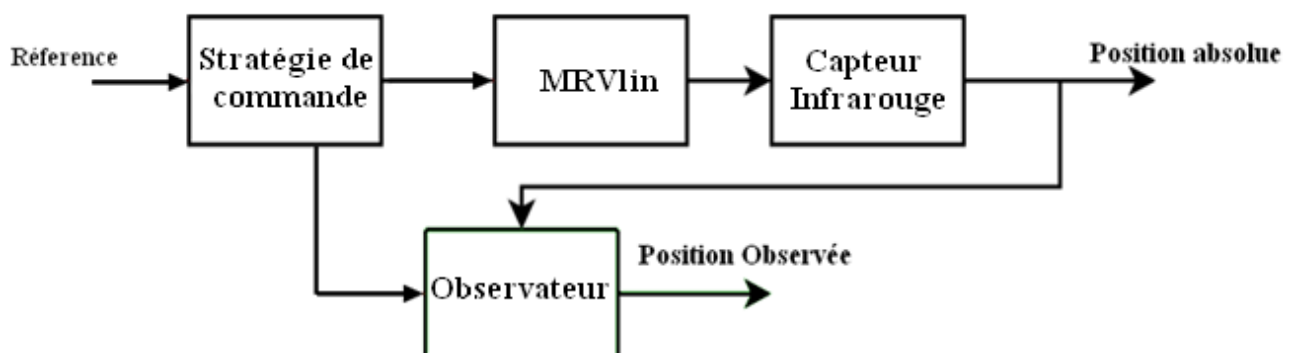


Fig. 67: Schéma de principe de l'observation de la position

V.3.1 Méthode d'observation

Pour se rapprocher au plus juste de la position réelle de notre machine à réluctance variable MRVlin, on définit la position observée "x_obs" comme étant la position entre deux traits successifs. On doit donc estimer les positions intermédiaires aux positions absolues, Cette estimation est basée sur l'information fournie par le capteur infrarouge, et la période de temps (calculé en interne par le dspic) pour chaque pas.

On peut déterminer la vitesse qui sera supposée comme étant la vitesse de déplacement de l'actionneur tout au long de son parcours. On calcul ainsi les positions intermédiaires (fig66).

La position réelle de l'actionneur serait donc l'association des deux informations, la position absolue et la position intermédiaire.

Par définition, la vitesse est la dérivée de la position par rapport au temps, elle peut être approximée par l'écart entre deux positions consécutives divisé par le délai de temps entre elles.

$$v = \frac{dx}{dt} \leftrightarrow v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

$$v = \frac{pos - oldpos}{\Delta t}$$

À partir de cette vitesse on définit la position observée qui est la position intermédiaire entre deux raies par :

$$x_obs = x_obs + vitesse * t$$

La position finale que doit fournir le dspic et qui sera récupérée sur Matlab est définie par la somme de la position absolue (fournie par le capteur infrarouge) définie comme étant le pas du moteur et la position intermédiaire

$$position = pas + x_obs$$

V.3.2 Routine de l'observation

La routine qu'on a implanté pour avoir cette estimation est la suivante :

```
//=====
TimeStamp++; //délai entre deux pas
  if (CaptIR>512)      Flags.CaptIRState=1;
    else              Flags.CaptIRState=0;
  if (Flags.CaptIRState!=Flags.OldCaptIRState && Flags.CaptIRState) //le
mobile franchit le trait noir
  {
  pas=Oldpas+10; // change de position absolue
  vitesse=(pas-Oldpas)/TimeStamp; //définition de la vitesse selon l'eq (**)
  TimeStamp=0; //réinitialisation du délai entre 2 pas dc 2 traits noirs
  x_obs=0; //initialisation de la position intermédiaire
  }
  x_obs=x_obs+vitesse*TimeStamp; //calcul de la position estimée à partir
de la position absolue et de la vitesse eq (***)
  position=pas+x_obs; //calcul de la nouvelle position = somme de la
position absolue et de la position intermédiaire eq (****)
//=====
```

V.3.3 Résultats :

Les figures ci-dessous représentent les résultats obtenus après implémentation de la routine de l'observation de la position, elles reprennent les mêmes séquences de mouvement que celles des figures 62 et 66.

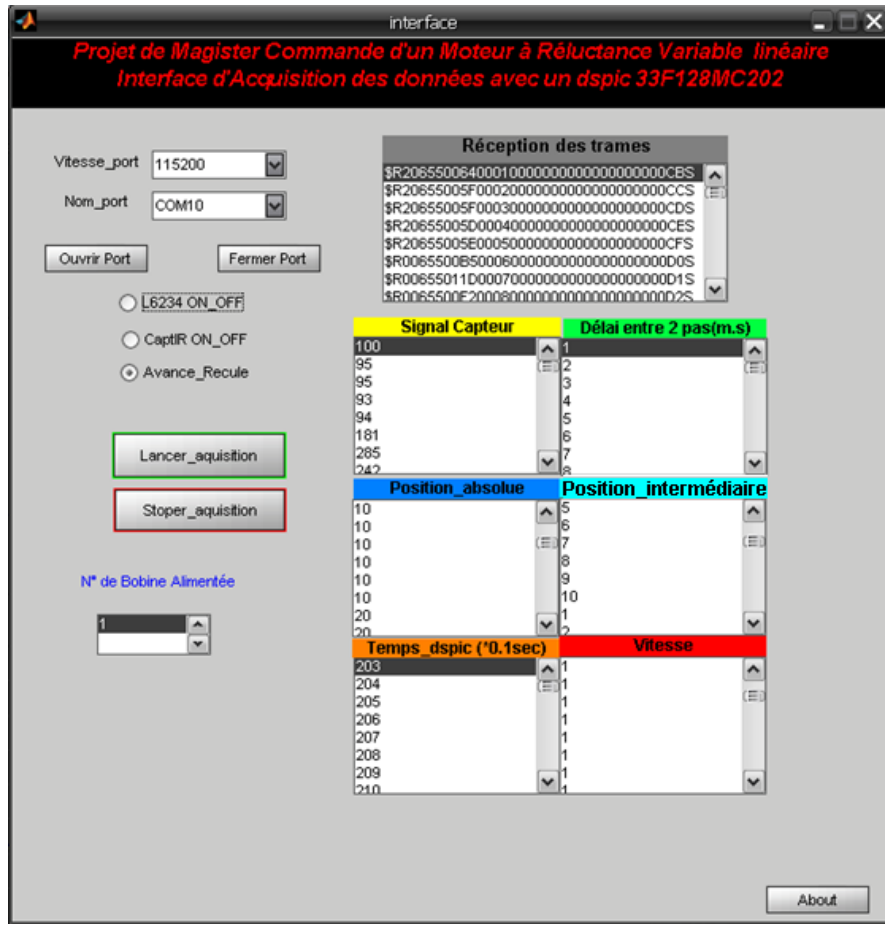


Fig.68 : Réception des grandeurs estimées sur l'interface graphique

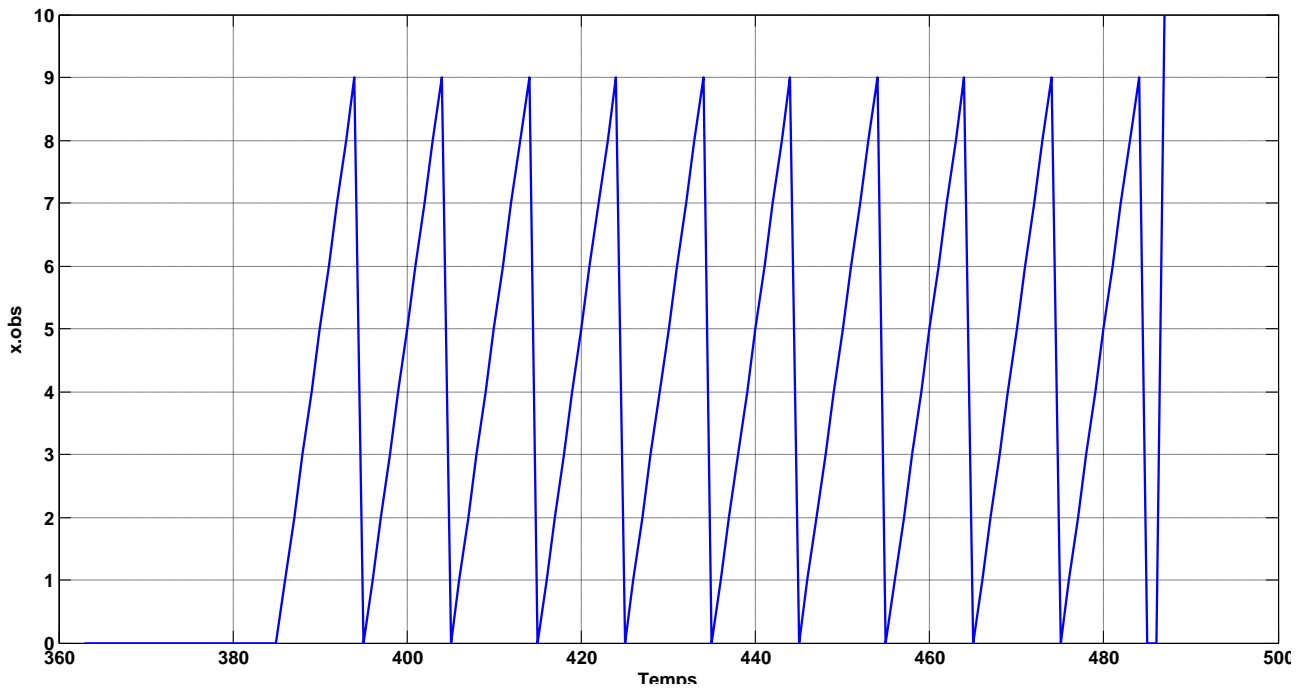


Fig.69 : Estimation des positions intermédiaires (mode normal)

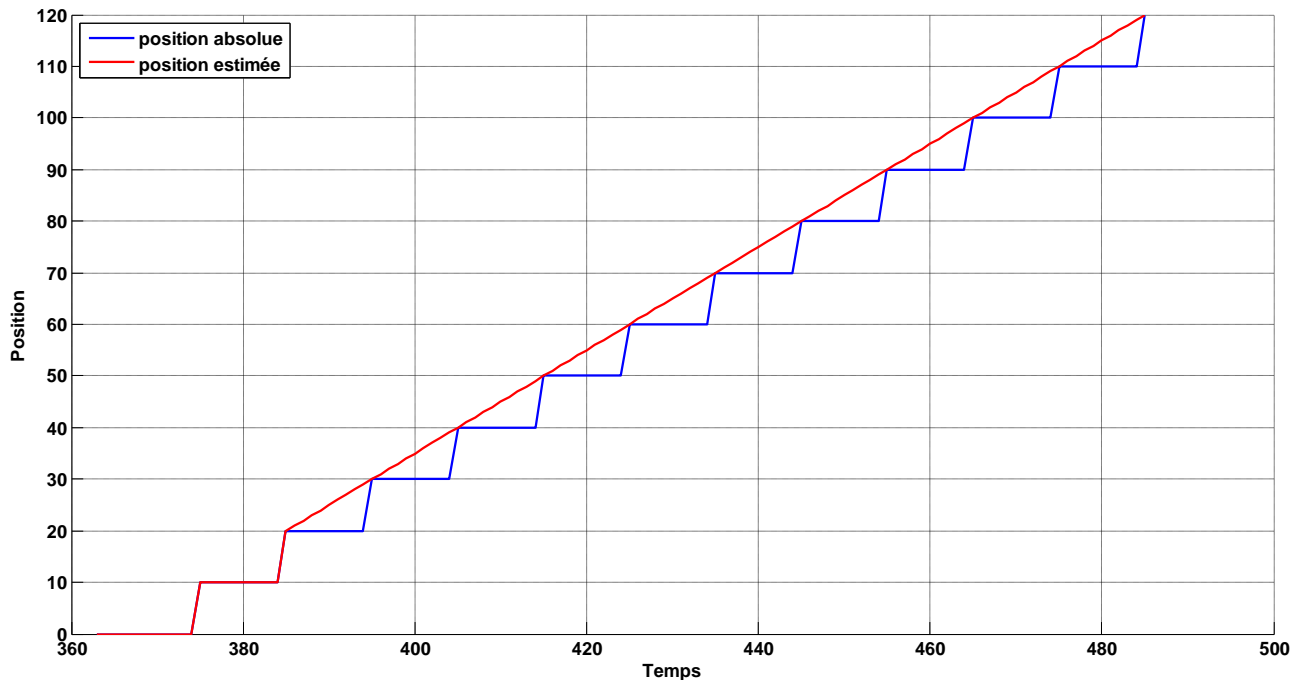


Fig.70 : Position absolue et position estimée (mode normal)

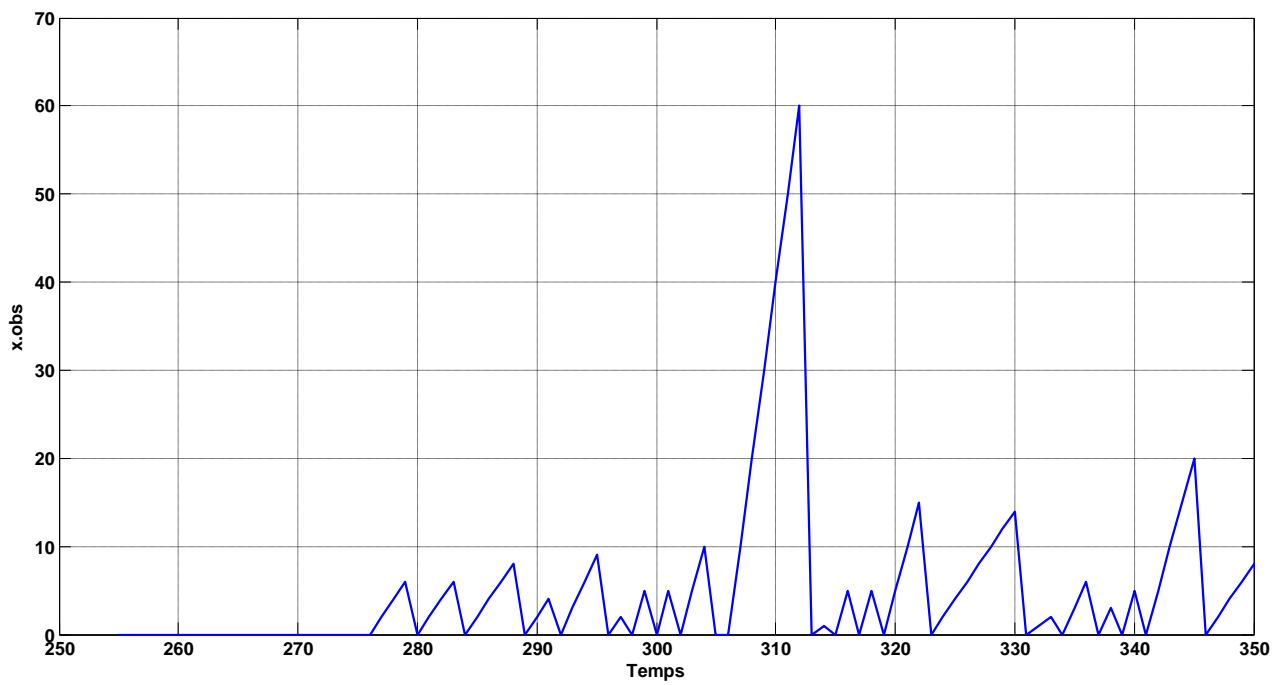


Fig.71 Estimation des positions intermédiaires (autopilotage)

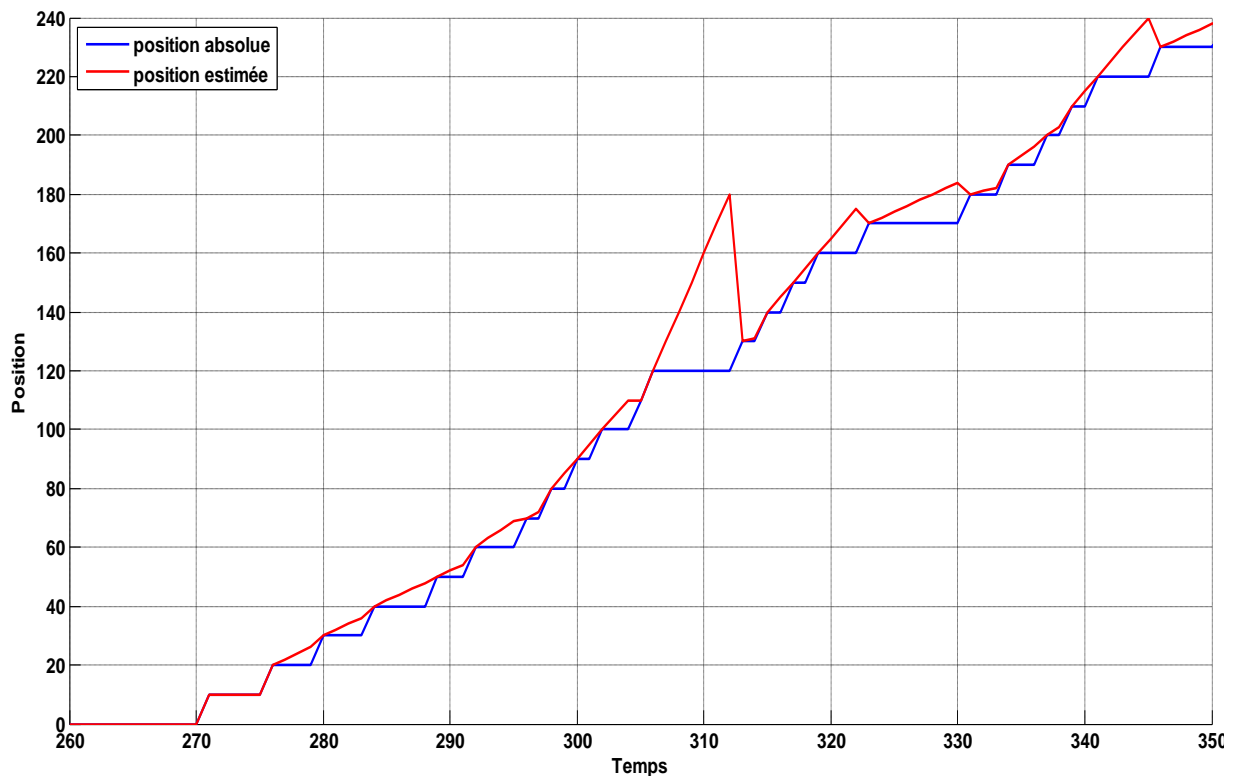


Fig.72 : Position absolue et position estimée (autopilotage)

V.3.4 Commentaires :

Grace au calcul instantané de la vitesse, on calcul (en interne dans le dspic) la position intermédiaire définie dans la routine par la variande "x_obs ", cette grandeur est affichée en temps réel sur l'interface graphique puis tracée en fonction du temps sur la figure 69 (dans le fonctionnement en boucle ouverte sans capteur), on voit bien que cette valeur se remis à zéro à chaque pas, c.à.d. à chaque passage sur un trait noir et elle ne peut dépassée 10mm, l'écart entre deux positions adjacente, au premier pas (c.à.d à t=380) sa valeur est nulle du fait qu'elle dépend du signal du capteur de la position précédente et que celui-ci n'a pas encore détecté le trait noir (valeur inferieure à 256 figure 61).

Sur la figure 70 sont représentées les positions absolues (en bleu) obtenues grâce à l'information fournie par le capteur infrarouge et les positions estimées (en rouge) obtenue par la somme des deux informations; absolue et intermédiaire, c'est une droite linéaire qui transmet la même position du mobile lorsque les dents de celui-ci sont en face de celle du rail en plus elle nous fournie l'information au plus près lorsque les dents

du mobile sont entre les dents du rail. On a donc une convergence entre la réponse en position fournie par cet observateur et la position réelle dans ce mode de pilotage.

Dans le mode autopiloté représenté sur la figure 71 et 72, l'allure de la position estimée est différente que celle représentée dans le mode précédent, en effet l'incrément de la position intermédiaire peut dépasser la vraie position du mobile (figure 71) par le fait que la détection des traits noir par le capteur est plus rapide est a délais non égaux (figure65), par conséquent la vitesse par laquelle le mobile se déplace dans ce mode de pilotage est non constante, étant donné que le calcul de la position intermédiaire se fait en se basant sur la vitesse du mobile à la position antérieure :

$$x_{obs} = x_{obs} + vitesse * t$$

La caractéristique de la position obtenue par cette méthode ne traduit pas le vrais comportement de notre moteur à réluctance variable linéaire par le fait de l'absence d'oscillations d'une part et la présence d'erreurs relatives entre la grandeur de sortie de cet observateur et celle de la position concrète d'autre part, néanmoins elle nous a permis de recopier d'une façon virtuelle la dynamique de notre système par le biais d'une estimation des positions intermédiaires.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce travail nous a permis de mettre en exergue les actionneurs linéaires et leurs principes de fonctionnement, le moteur pas à pas qui demeure un actionneur de choix pour la robotique. Par son principe, il permet d'éviter dans beaucoup de cas le réducteur mécanique.

Le moteur à réluctance variable à double saillance qui présente de sérieux atouts en termes de compromis économie / performances / sûreté de fonctionnement.

Sa commande en boucle ouverte minimise le coût global de l'entraînement et convient particulièrement aux applications pour lesquelles les paramètres de charge sont bien connus et invariants au cours du fonctionnement. L'utilisation de microcontrôleurs avec un noyau DSP permet d'implanter des commandes plus complexes de façon très économique étendant ainsi le domaine d'application du moteur pas à pas. Dans plusieurs applications, des commandes en boucle fermée ou adaptative plus complexes peuvent être mises en œuvre.

Après un premier chapitre qui a élaboré un bref historique sur les moteurs à réluctance variable, le second chapitre nous a permis de se familiariser avec ce type d'actionneurs en se consacrant aux équations mécaniques, électriques et magnétiques qui le régissent. Le troisième chapitre nous a montré le dimensionnement et le calcul des grandeurs de la machine par la méthode des éléments finis, à l'aide du logiciel FEMM. Cette étude nous a permis d'analyser la grandeur de sortie qui est la force de traction de notre MRV linéaire.

Le quatrième chapitre a traité la partie commande de notre système et de son implantation sur dspic 33F.

Un dernier chapitre traite les résultats expérimentaux notamment les réponses en positions dans deux modes de pilotage différent ; en boucle ouverte et en boucle fermée qui utilisait un capteur optique infrarouge.

Toutefois nous n'avons pas eu le temps d'atteindre tous les objectifs de notre sujet, à cause de la partie expérimentale qui a pris beaucoup de temps notamment l'usinage de la pièce ferromagnétique (plus de 6 mois), le bobinage et les essais. Aussi, il nous a fallu étudier la programmation du dspic et à se familiariser avec FEMM, de plus la date butoir

de soutenance a précipité la fin de la recherche d'un observateur adéquat de la position entre les positions données par le capteur optique IR.

D'autres obstacles ont été rencontrés dans la réalisation de ce travail, engendrant quelques désagréments notamment:

- La force électromagnétique relativement faible qui peut être un handicap lorsque le moteur est en charge.
- La structure elle-même pose un problème majeur celui de la précision dans la réalisation et l'usinage des pièces mécaniques : partie mobile, partie fixe, bande de roulement, encoche et bobinage. Une grande précision dans la réalisation de la structure permet d'exploiter au maximum les phénomènes électromagnétique de la machine et par la suite de meilleures performances dans sa commande.
- Le choix du matériau est limité par sa disponibilité et son prix sur le marché local.

L'autre intérêt, de ce projet, est que l'on peut approfondir plusieurs thématiques connexes:

- Électromagnétisme.
- Électronique de puissance.
- Automatique.
- Modélisation.
- Programmation.
- Systèmes embarqués, Microcontrôleurs et programmation temps réel.
- Interface homme-machine et protocoles de communication.

Ce modeste travail, nous a donné plusieurs idées pour améliorer et développer notre machine et sa commande. De ce fait, d'autres approches, peuvent être envisagées :

- Disposer d'une batterie NiMH et rendre ainsi notre machine totalement autonome.
 - Ajouter un accéléromètre MEMS (capteur d'accélération) à notre MRV afin d'élever les performances de notre système et faire la comparaison avec l'observateur de position issu du capteur IR.
-

- Implanter un observateur de la position qui permet de l'avoir à n'importe quel moment par le calcul de la vitesse moyenne entre deux raies (CaptIR) et son intégration numérique.
 - Développé un modèle du MRV en 3D avec la réalité virtuelle sous Matlab et l'introduire à l'actuelle interface graphique pour une simulation en temps réel.
 - Ajout d'autres capteurs comme un détecteur de fin de parcours.
-

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

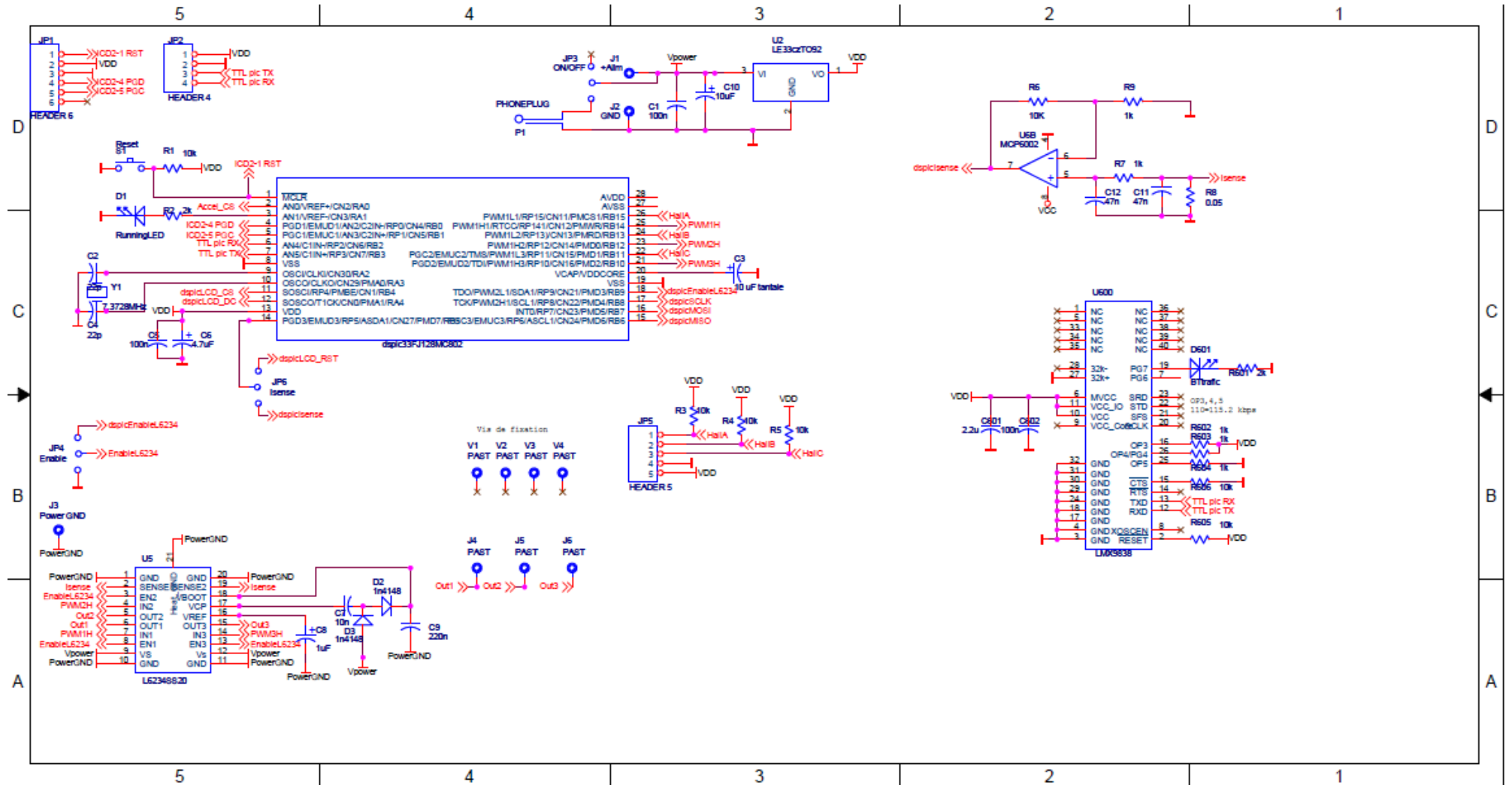
- [1]. J. JAQUIN, "les moteurs pas à pas – Principe et application" – Directeur général de la société française des moteurs à induction – DUNOD.
 - [2]. P. OGUIC, "Moteurs pas-à-pas et PC" (2e édition) Avril 2004
 - [3]. L. BAGHLI, A. REZZOUG, "Actionneurs linéaires : MRVlin et MSlin, un projet pédagogique", J3eA, Vol. 7 No. HORS SÉRIE 1 (février 2008), Special Edition: CETSIS 2007. ISSN (version électronique) : 1638-1963.
 - [4]. M. ABIGNOLI, C. GOELDEL " Moteurs pas à pas " Document Techniques de l'Ingénieur, Traité de Génie Électrique Doc D3690, 1991.
 - [5]. H. Ben Ahmed, B. Multon et P.E. Cavarec, "Actionneurs linéaires directs et indirects : performances limites", J3eA Vol, 4, Hors-Série 1, (Mai 2005).
 - [6]. B. MULTON, "MOTEURS PAS A PAS Structures électromagnétiques et alimentations" Notes de cours Agrégation Génie Électrique, ENS de Cachan Antenne de Bretagne, (Février 2006).
 - [7]. J. VOLLAND, G. MONNIER, "Projet de réalisation technique: conception d'une machine à réluctance variable" INSA Lyon.
 - [8]. V. GIES, " Systèmes mécatroniques asservis - Actionneurs: Modélisation", ENSTA.
 - [9]. D. C. Meeker, Finite Element Method Magnetics, Version 4.0.1 (03Dec2006): <http://femm.foster-miller.net>
 - [10]. J. GAUMOND, "Modélisation, identification et commande expérimentale d'un moteur synchrone linéaire à aimant permanent", Master recherche, École nationale des arts et métiers LILE.
 - [11]. dsPIC33FJ32MC302/304, dsPIC33FJ64MCX02/X04, and dsPIC33FJ128MCX02/X04 Data Sheet - High-Performance, 16-bit Digital Signal Controllers – MICROCHIP.
-

- [12]. G. GOMILA, "Le moteur linéaire, sans rival en vitesse et précision"
www.mesures.com, le magazine de l'instrumentation et des automatismes
industriels, Art., N° 774, (Avril 2005).
- [13]. L6234 THREE PHASE MOTOR DRIVER – DATASHEET,
<http://www.alldatashett.com/view>
- [14]. HOA1405 Reflective Sensor DATASHEET, <http://www.alldatasheet.com>
- [15]. J.-C. Mauclerc, Y. Aubert, A. Domenach, Guide du technicien en
électrotechnique, édition Hachette Technique, 1995.
- [16]. S. L. CAPITANEANU, "Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de
tension deux-niveaux", thèse de doctorat, INP Toulouse. Novembre 2002.
- [17]. G. CHAGNON Cours de Génie Électrique.
- [18]. J-C. SABONNADIÈRE, J-L. COULOMB - Calcul des champs
électromagnétiques – document technique de l'ingénieur, Doc 3020.
- [19]. O. FRANCAIS, "Introduction aux circuits magnétiques", ESIEE-2000.
- [20]. M. JUFER – ELECTROMEQUANIQUE – Traité d'électricité,
d'électronique, et d'électrotechnique 1995 - DUNOD.
- [21]. S. MOUELLEF, "Contribution à l'étude d'une machine à reluctance
Variable: Conception, Modélisation & Simulation d'une MRVDS 6-4",
université de Constantine, Juin 2008.
- [22]. L.El AMRAOUI, "Conception électromécanique d'une gamme
d'actionneurs linéaires tubulaires à réluctance variable", thèse de doctorat,
École centrale de Lille 2002.<https://www.univ-lille1.fr>.
- [23]. B.MULTON, F.CAMUS, E. HOANG, J-Y. LE CHENADEC, J-C.
MOUCHOUX, " Possibilités du moteur à réluctance variable à double saillance
pour la motorisation de véhicules électriques", C-VELEC'95, Grenoble, Février
1995.
- [24]. <http://www.telecom-robotics.org/>
- [25]. F.POURROY, " Apport des éléments finis à la conception mécanique"
document techniques de l'ingénieur. Doc AG2530.
-

- [26]. R.Bichet, J.Estivie, E. Molto et F. Tovo, "PWM ET PONTS EN H", Étude de cas Rose 2010.
- [27]. H.sondes, A.BEN AMOR, M. GASMI, "Improvement characterization Resulting from the Losses Reduction in a Linear Stepping Motor", J. Electrical Systems, regular paper.
- [28]. O. RADU, C.CARPEN, "Contribution à la commande numérique Bangbang d'un moteur linéaire à réluctance variable (MLRV) par Dspic".
- [29]. NEC- Application Note, "Switch reluctance Motor control with μ PD78K0/KX2", Document No. U18498EE1V0AN00, Date published December 2006.
- [30]. P.F DESESQUELLES, "Étude paramétrique des performances intrinsèques des machines multi entrefer à réluctance variable et aimants altérés", Thèse de Docteur-ès Sciences, Université de Paris VI, 1998.
- [31]. F.LEONARD, G.ABBA, "Commande non linéaire et observateurs : application à la MRV en grande vitesse", 2008.
- [32]. H. FOCH, F. FOREST et T. MEYNARD, "Onduleurs de tension Structures. Principes. Applications", document Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, Doc D 3176.
-

ANNEXE

Annexe 1



Schématic de la carte électronique de commande

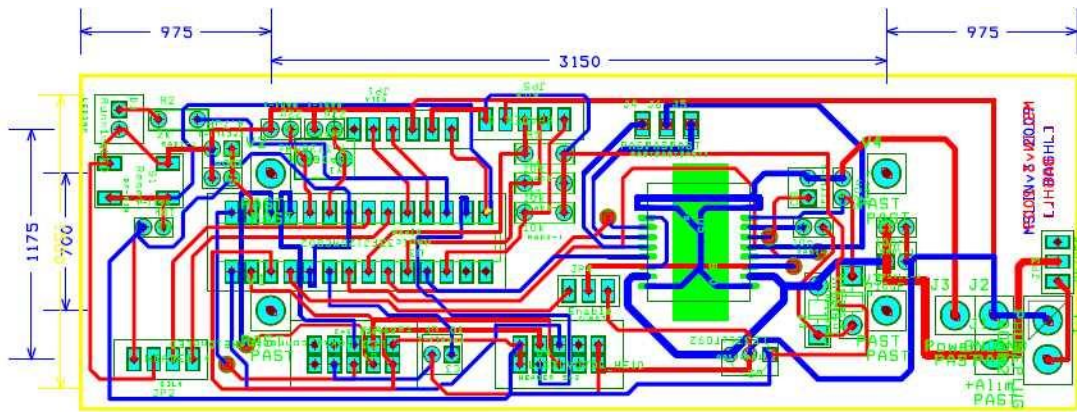


Fig. : Typon de la carte électronique de commande

Description du dspic33F128MC202

ENTREES/ SORTIES (I/O):

Sur les 28 broches qu'il contient il y a 21 broches d'entrées sorties partagées. Il faut donc choisir celles qui vont rester sur les fonctions primaires (ADC, SPI, PWM...) et celles qui seront en fonctionnement I/O logique.

En général, un port parallèle (Entrés/Sorties) qui partage une broche avec un périphérique est soumis au périphérique. Les données de sortie tampons et les signaux de contrôle du périphérique sont fournis par une paire de multiplexeurs. Les multiplexeurs choisissent le périphérique ou le port associé qui a la propriété des données de sortie et des signaux de commande de la broche E / S.

Ce dsPIC comporte deux ports (Port **A** et **B**). Pour chacun, 3 registres sont associés (TRIS_x, PRT_x, LAT_x).

TRIS_x : Chaque bit indique la direction du port correspondant : 1 pour input, 0 pour output

PORT_x : Accède aux données sur le port : Une lecture donne l'état du pin d'entrée/sortie, une écriture impose cet état sur le latch.

LAT_x : Même fonctionnement que PORT_x mais à la lecture, elle donne la valeur qui se trouve sur le port latch et non pas sur la pin elle-même.

Annexe 3

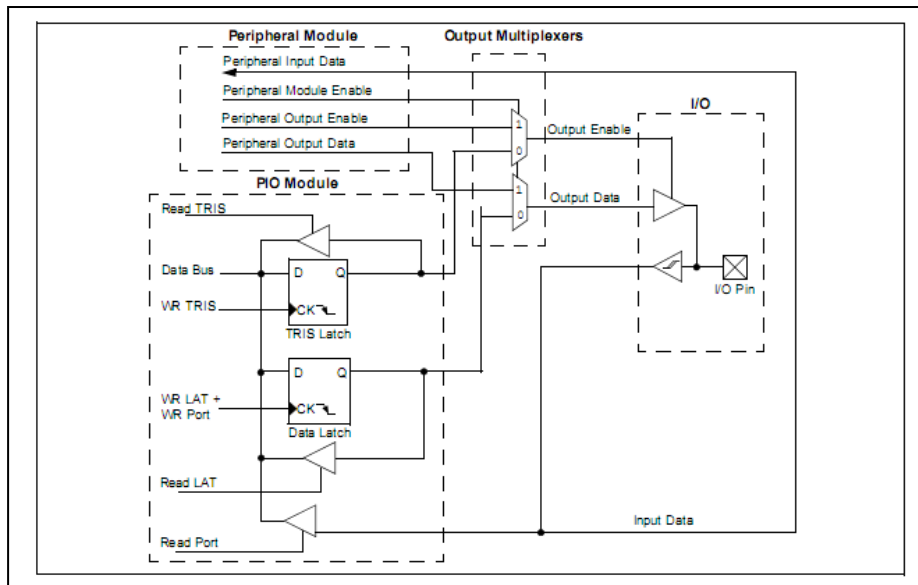


Fig : Schéma d'une structure typique d'un port partagé

MCLR: Pin spécifique pour le RESET (active au niveau bas).

AVDD: Alimentation positive pour les modules analogiques. (doit être connecté à tout moment).

AVSS: Masse de référence pour les modules analogiques.

VDD: Alimentation positive pour les périphériques et broches E / S logique.

VSS: Masse de référence pour les périphériques et broches E / S logique.

VCAP/VDDCORE: filtre logique de connexion du condensateur du CPU.

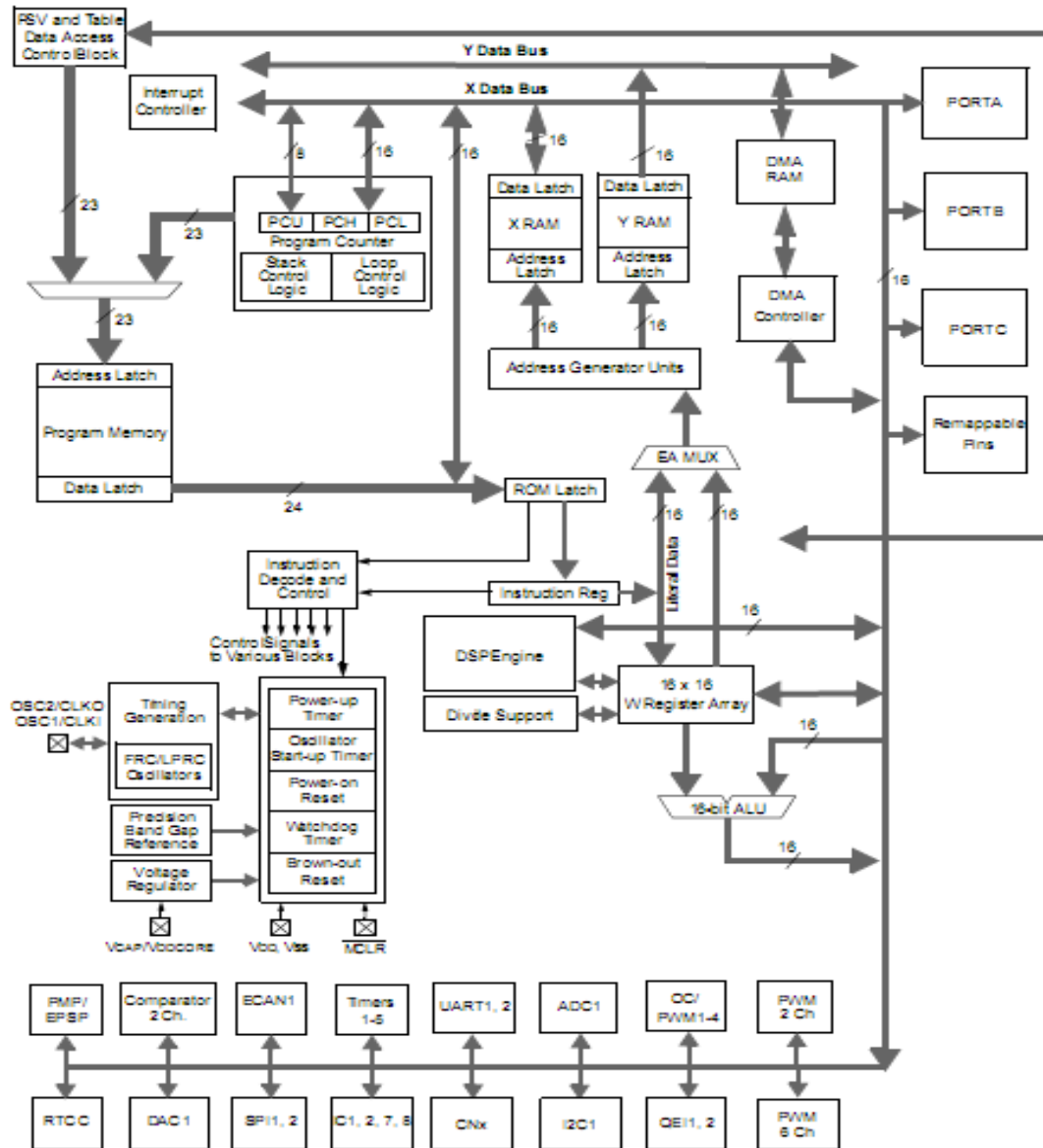


Schéma fonctionnel du dspic

ADC:

Selon la variante de l'appareil, le module ADC peut avoir jusqu'à 32 broches d'entrée analogique, désigné 0E-AN31. Ces entrées analogiques sont reliées par des multiplexeurs à quatre **échantillonneurs bloqueurs (S & H)**, désigné CH0-CH3. Les multiplexeurs d'entrée analogique sont deux ensembles de bits de contrôle, désignés par MUXA (CHySA / Chyna) et MUXB (CHySB / CHyNB).

Ces bits de contrôle sélectionnent une entrée analogique particulière pour la conversion. Les bits de contrôle et MUXA, MUXB peuvent aussi sélectionner l'entrée analogique pour la conversion.

L'échantillonneur bloqueur a un double rôle :

- Acquérir une valeur donnée de la tension présente à l'entrée du CAN à un instant donné.
- Maintenir cette valeur stable pendant toute la durée de la conversion.

Registres de contrôles:

Les registres ADxCON1, ADxCON2 et ADxCON3 contrôlent le fonctionnement du module ADC. Le registre ADxCON4 définit le nombre de résultats de la conversion stockées dans une mémoire tampon DMA pour chaque entrée analogique pour les périphériques avec DMA. Les registres ADxCHS123 et ADxCHS0 sélectionne les broches d'entrée pour être connecté à l'indice de l'amplificateur Échantillonneur/Bloqueur. Le registre ADCSSH / L sélectionne les entrées à séquences numérisées. Le registre ADxPCFGH / L configure les broches d'entrée analogique comme entrées analogiques ou I / O numériques.

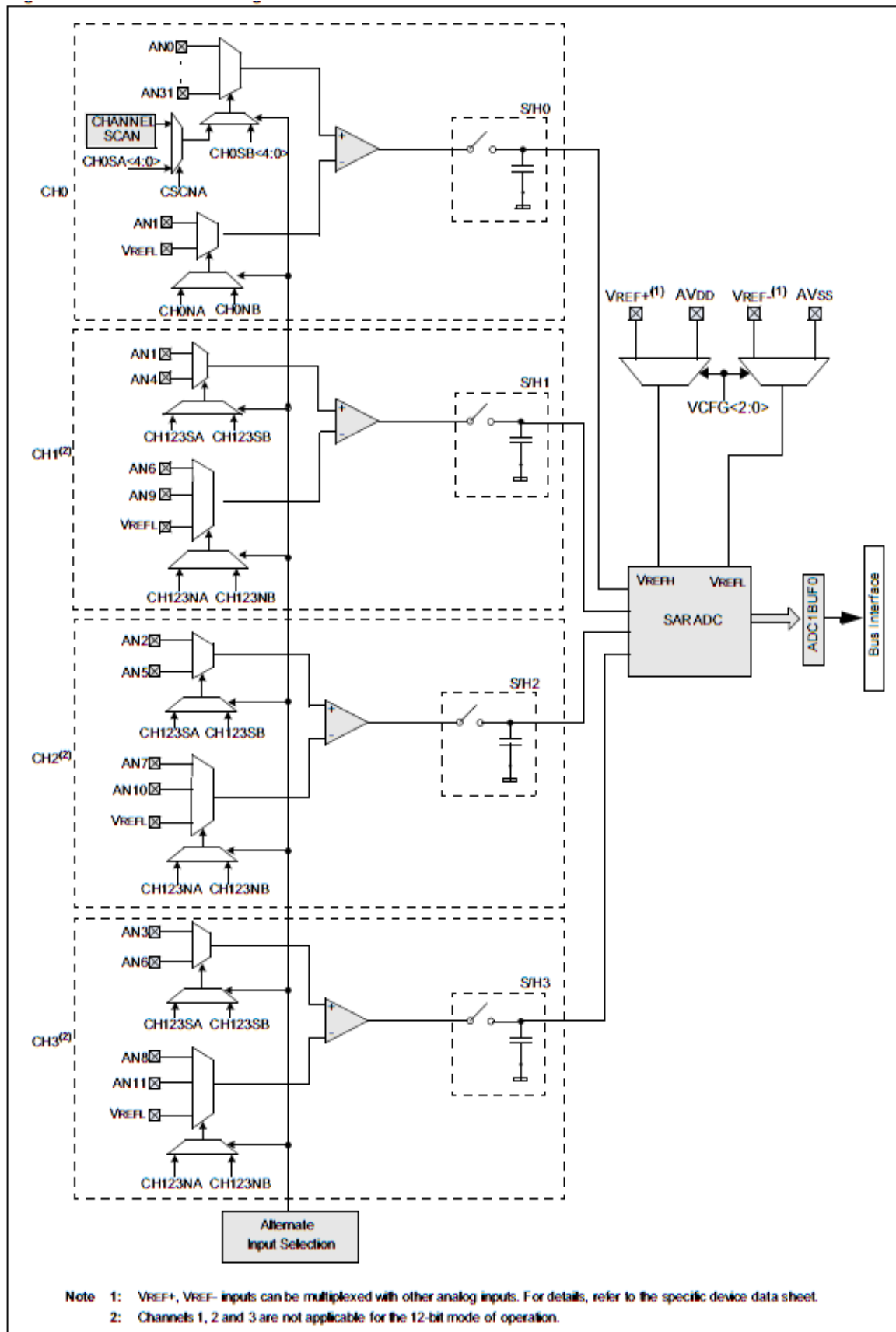


Schéma de l'ADC

DMA

Le contrôleur DMA (Direct Memory Access) est un sous-système important dans les microcontrôleurs 16-bit qui sont munis d'un DSC. Ce sous-système facilite le transfert de données entre le processeur et ses périphériques sans l'aide du processeur).

Le contrôleur DMA du dsPIC33F est optimisé pour une meilleure performance, en temps réel, les applications embarquées et le temps de réponse du système sont des priorités.

Le contrôleur DMA transfère les données entre les registres de données de périphérique et la SRAM de données. Le sous-système dsPIC33F DMA utilise de la mémoire SRAM à double port (DPSRAM) et enregistre des structures qui permettent à la DMA pour opérer à travers sa propre adresse indépendante du bus de données, et cela sans impact sur le fonctionnement du processeur. Cette architecture élimine le besoin de cycle à la volée, ce qui arrête la CPU quand une plus grande priorité de transfert DMA est demandée. Tant le processeur et le contrôleur DMA peut écrire et lire vers / à partir d'adresses dans l'espace de données, sans interférence, ce qui maximise, la performance en temps réel. Sinon, le fonctionnement DMA et le transfert de données vers / depuis la mémoire et les périphériques ne sont pas touchés par le traitement du processeur. Par exemple, quand une opération d'auto-programmation (RTSP) est effectuée, le processeur n'exécute pas les instructions jusqu'à ce que RTSP soit terminée. Cette condition, toutefois, n'a pas d'incidence sur les données transférées de / vers la mémoire et les périphériques.

Le contrôleur DMA prend en charge huit canaux indépendants. Chaque canal peut être configurée pour les transferts vers ou à partir de certains périphériques.

Les périphériques pris en charge par le contrôleur DMA comprennent:

- ECAN™ Technology
 - Interface convertisseur de données (DCI)
 - 10-bit/12-bit convertisseur analogique-numérique (ADC)
 - Interface Serial Peripheral (SPI)
 - UART
 - Capture d'entrée
 - Sortie Comparateur
-

En outre, les transferts DMA peuvent être déclenchés par des (TIMER) ainsi que les interruptions externes. Chaque canal DMA est unidirectionnel. Deux canaux DMA doit être attribué à lire et à écrire à un périphérique.

Si plus d'un canal reçoit une demande de transfert de données, un système de priorité simple, basé sur le nombre de canaux, qui dicte chaîne complète le transfert et le canal, ou canaux, sont laissées en suspens.

Chaque canal DMA se déplace par bloc jusqu'à 1024 éléments de données, après quoi il génère une interruption à la CPU pour indiquer que le bloc est disponible pour le traitement.

PWM:

Le dsPIC33F contient un module MLI qui permet de générer des signaux de commande de transistors de puissance (0-3,3V). Ces signaux peuvent être directement utilisés pour attaquer des circuits onduleur triphasés. Ceci se fait en interne par comparaison de la référence avec un timer qui compte (et décompte).

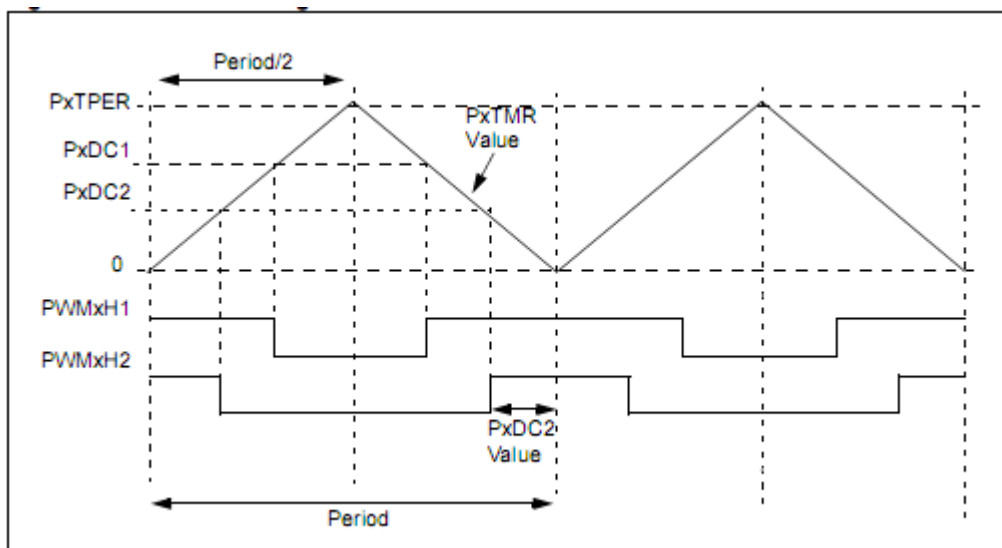


Fig. : principe du module PWM du dsPIC33F128MC202

Le module MCPWM agit comme une minuterie pour compter jusqu'à une valeur de comptage périodique. La période de temps et le rapport cyclique des impulsions sont à la fois programmable.

Dans le dsPIC33F128MC202, il ya jusqu'à deux modules PWM, MCPWM1 et MCPWM2.

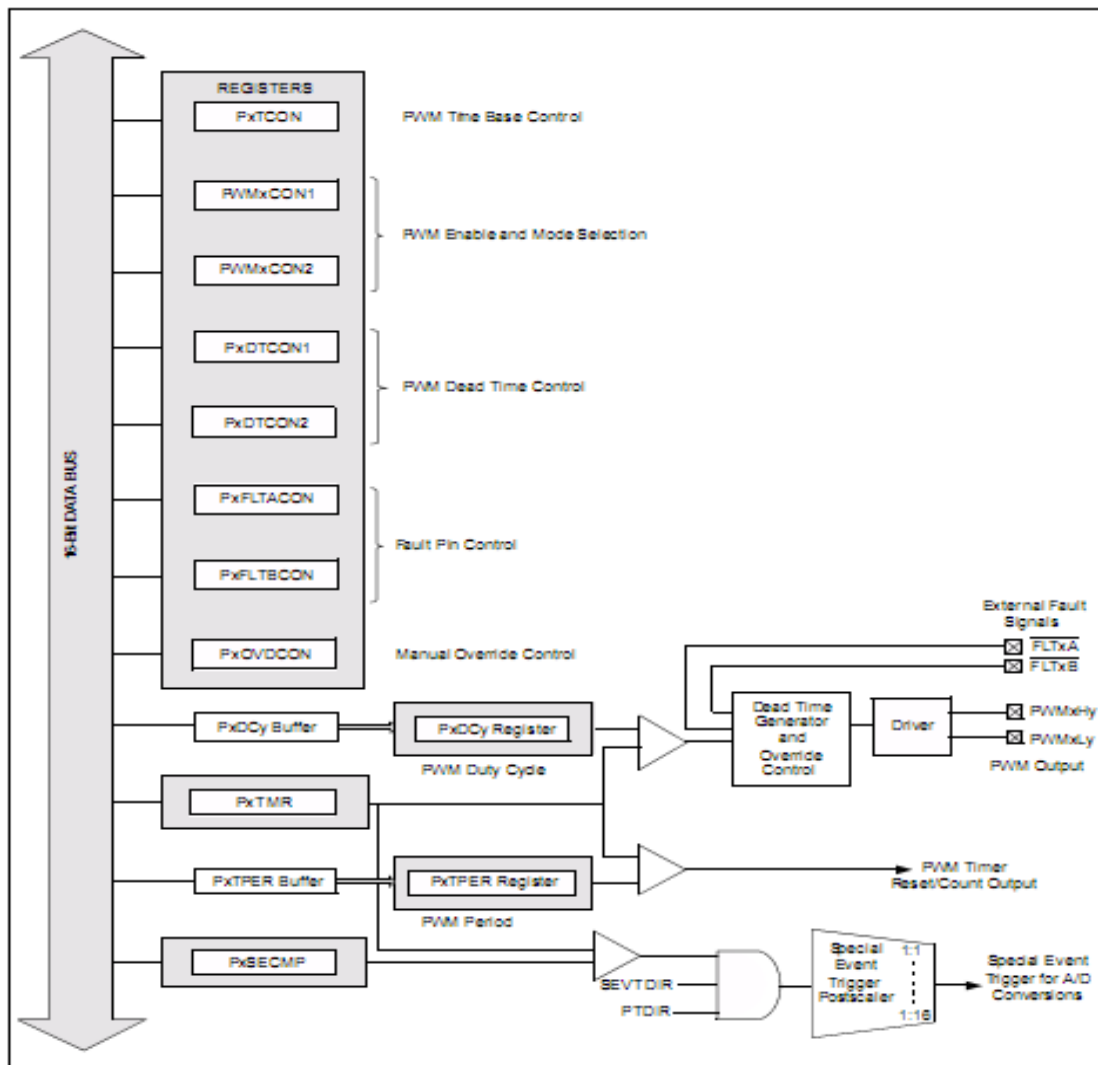


Fig. UART: Interface série asynchrone:

UART : C'est le composant utilisé pour faire la liaison entre le processeur et le port série pour communiquer avec les périphériques et ordinateurs personnels. Le processeur envoie les données en parallèle (autant de fils que de bits de données). Il faut donc transformer ces données pour les faire passer à travers une liaison série qui utilise un même fil pour faire passer tous les bits de données.

Une trame UART est constituée des bits suivants :

Un bit de *start* toujours à 0 : servant à la synchronisation du récepteur

Les données : la taille peut varier (généralement entre 5 et 9 bits)

Éventuellement un bit de parité paire ou impaire

et un bit de *stop* toujours à 1 (la durée peut varier entre 1, 1,5 et 2 temps bit)

Afin de faciliter l'interopérabilité entre périphériques (PC, microcontrôleur,...) des vitesses de transmission sont normalisées allant de 110 jusqu'à 3 686 400 BAUD, l'unité baud correspondant à bits par seconde :

Le module supporte également les protocoles usuels, tels que RS-232, RS-485, LIN, IrDA et le matériel de flux de contrôle avec option UxCTS et épingles UxRTS et comprend le codeur et le décodeur IrDA

Le module UART se compose des éléments clé suivants:

Baud Rate Générateur

Transmetteur asynchrone.

Le récepteur asynchrone.

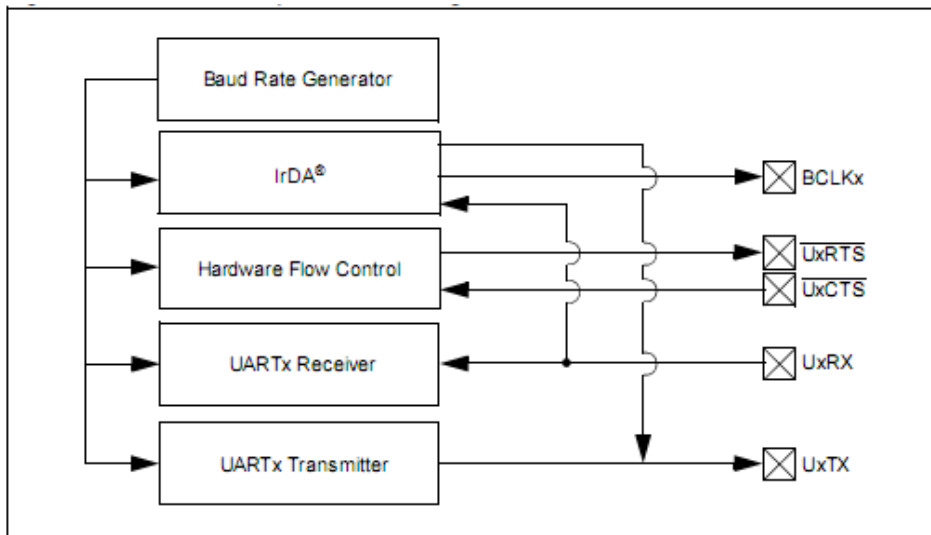
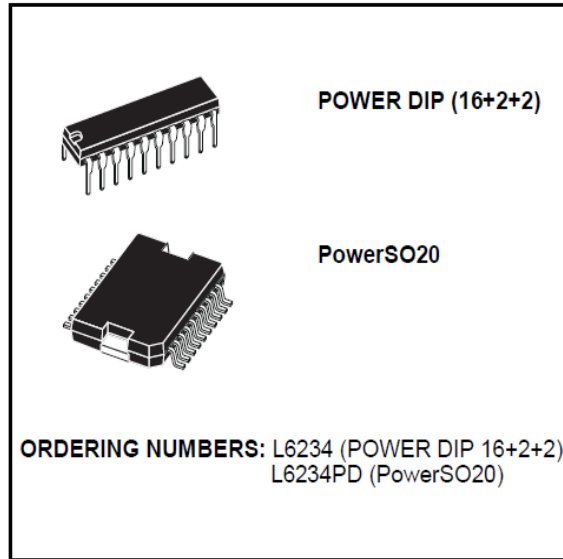
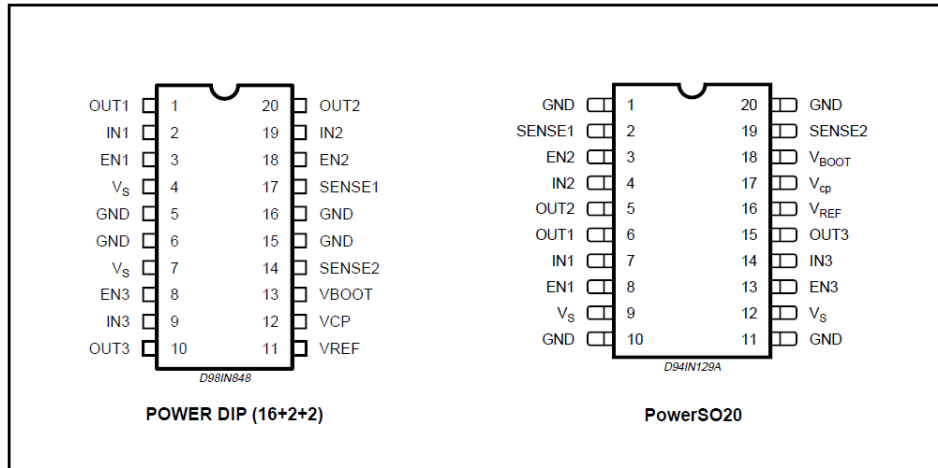


Fig: UART Schéma simplifié

Caractéristiques du L6234



PIN CONNECTION (Top view)



THERMAL DATA

Symbol	Parameter	DIP16+2+2	PowerSO20	Unit
R _{th j-pin}	Thermal Resistance, Junction to Pin	12	–	°C/W
R _{th j-amb1}	Thermal Resistance, Junction to Ambient (see Thermal Characteristics)	40	–	°C/W
R _{th j-amb2}	Thermal Resistance, Junction to Ambient (see Thermal Characteristics)	50	–	°C/W
R _{th j-case}	Thermal Resistance Junction-case	–	1.5	°C/W

Annexe 12

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

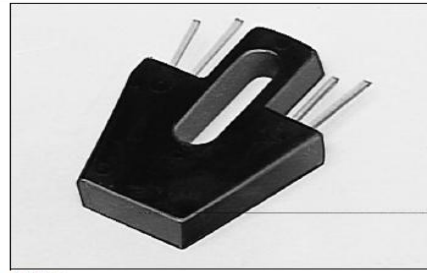
Symbol	Parameter	Value	Unit
V_S	Power Supply Voltage	52	V
$V_{IN, VEN}$	Input Enable Voltage	- 0.3 to 7	V
I_{peak}	Pulsed Output Current (note 1)	5	A
V_{SENSE}	Sensing Voltage (DC Voltage)	-1 to 4	V
V_b	Bootstrap Peak Voltage	62	V
V_{OD}	Differential Output Voltage (between any of the 3 OUT pins)	60	V
f_C	Commutation Frequency	50	KHz
V_{REF}	Reference Voltage	12	V
P_{tot}	Total Power Dissipation L6234PD $T_{amb} = 70^\circ\text{C}$	2.3	W
P_{tot}	Total Power Dissipation L6234 $T_{amb} = 70^\circ\text{C}$	1.6 (*)	W
T_{stg}, T_J	Storage and Junction Temperature Range	-40 to 150	$^\circ\text{C}$

PIN FUNCTIONS

Powerdip	PowerSO20	Name	Function
1 20 10	6 5 15	OUT 1 OUT 2 OUT 3	Output of the channels 1/2/3.
2 19 9	7 4 14	IN 1 IN 2 IN 3	Logic input of channels 1/2/3. A logic HIGH level (when the corresponding EN pin is HIGH) switches ON the upper DMOS Power Transistor, while a logic LOW switches ON the corresponding low side DMOS Power.
3 18 8	8 3 13	EN 1 EN 2 EN 3	Enable of the channels 1/2/3. A logic LOW level on this pin switches off both power DMOS of the related channel.
4,7	9, 12	V_S	Power Supply Voltage.
14	19	SENSE2	A resistance R_{sense} connected to this pin provides feedback for motor current control for the bridge 3.
17	2	SENSE1	A resistance R_{sense} connected to this pin provides feedback for motor current control for the bridges 1 and 2.
11	16	V_{ref}	Internal Voltage Reference. A capacitor connected from this pin to GND increases the stability of the Power DMOS drive circuit.
12	17	V_{cp}	Bootstrap Oscillator. Oscillator output for the external charge pump.
13	18	V_{BOOT}	Oversvoltage input to drive the upper DMOS
5,6 15,16	1,10 11,20	GND	Common Ground Terminal. In Powerdip and SO packages these pins are used to dissipate the heat forward the PCB.

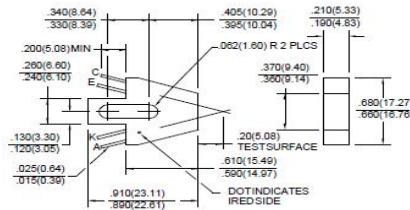
Description des PINs de l'onduleur

Caractéristiques du capteur infrarouge HOA1405



INFR-68.TF

OUTLINE DIMENSIONS in inches (mm)
 Tolerance 3 plc decimals ±0.010(0.25)
 2 plc decimals ±0.020(0.51)



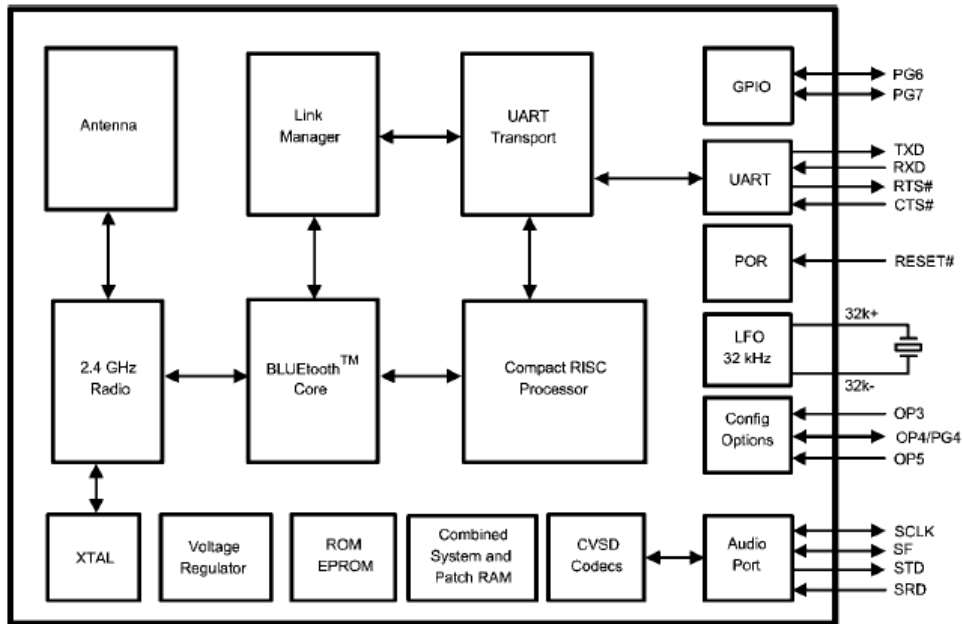
HOA1405

Reflective Sensor

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (25°C unless otherwise noted)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	TEST CONDITIONS
IR EMITTER						
Forward Voltage	V_F			1.6	V	$I_F=20\text{ mA}$
Reverse Leakage Current	I_R			10	μA	$V_R=3\text{ V}$
DETECTOR						
Collector-Emitter Breakdown Voltage	$V_{(BR)CEO}$	30			V	$I_C=100\ \mu\text{A}$
Emitter-Collector Breakdown Voltage	$V_{(BR)ECO}$	5.0			V	$I_E=100\ \mu\text{A}$
Collector Dark Current	I_{CEO}			100	nA	$V_{CE}=10\text{ V}, I_F=0$
COUPLED CHARACTERISTICS						
On-State Collector Current	$I_{C(ON)}$				mA	$V_{CE}=5\text{ V}$ $I_F=30\text{ mA}$ (1)
HOA1405-001		0.2				
HOA1405-002		0.8				
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$				V	$I_F=30\text{ mA}$ (1)
HOA1405-001	$V_{(BR)CEO}$			0.4		$I_C=30\ \mu\text{A}$
HOA1405-002				0.4		$I_C=100\ \mu\text{A}$
Rise And Fall Time	t_r, t_f		15		μs	$V_{CC}=5\text{ V}, I_C=1\text{ mA}$ $R_L=1000\ \Omega$

Module Bluetooth LMX 98398



Principe de la liaison Bluetooth

Dans sa version actuelle, largement répandue, essentiellement dans les appareils mobiles, comme les téléphones portables, la liaison *Bluetooth* exploite les caractéristiques suivantes :

Très faible consommation d'énergie

Très faible portée (sur un rayon de l'ordre d'une dizaine de mètres)

Faible débit

Très bon marché et peu encombrant.

Spécification :

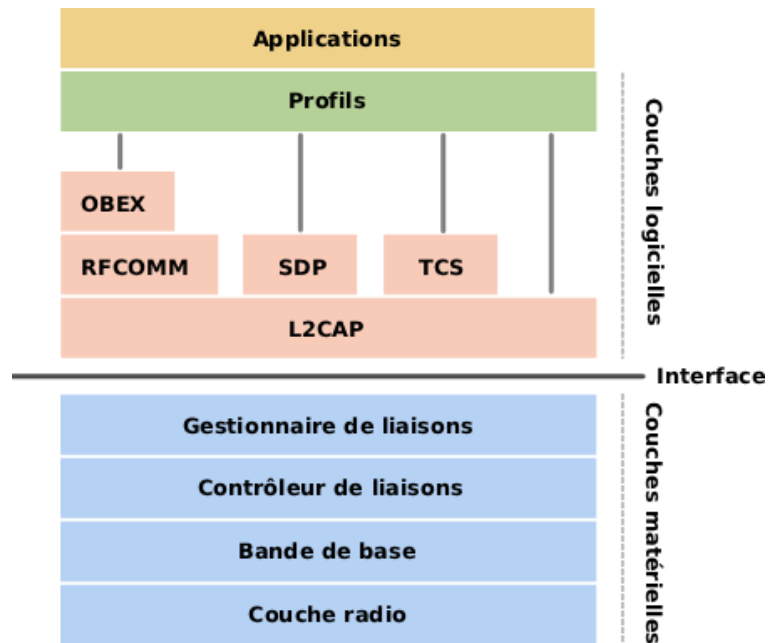


Fig. : Principe de la liaison Bluetooth

Les éléments fondamentaux d'un produit *Bluetooth* sont définis dans les deux premières couches protocolaires, la couche *radio* et la couche *bande de base*. Ces couches prennent en charge les tâches matérielles comme le contrôle du saut de fréquence et la synchronisation des horloges.

La couche radio (la couche la plus basse) est gérée au niveau *matériel*. C'est elle qui s'occupe de l'émission et de la réception des ondes radio.

Elle définit les caractéristiques telles que la bande de fréquence et l'arrangement des canaux, les caractéristiques du transmetteur, de la modulation, du récepteur, etc.

Le système *Bluetooth* opère dans les bandes de fréquences ISM (*Industrialo, Scientific and Medical*) 2,4 GHz dont l'exploitation ne nécessite pas de licence. Cette bande de fréquences est comprise entre 2 400 et 2 483,5 MHz.

Deux modulations sont définies : une modulation obligatoire utilise une modulation de fréquence binaire pour minimiser la complexité de l'émetteur ; une modulation optionnelle utilise une modulation de phase. La rapidité de modulation est de 1 Mbaud pour toutes les modulations. La transmission duplex utilise une division temporelle.

Les 79 canaux RF sont numérotés de 0 à 78 et séparés par 1 MHz en commençant par 2 402 MHz.

Le codage de l'information se fait par sauts de fréquence. La période est de 625 μ s, ce qui permet 1 600 sauts par seconde.

Il existe trois classes de modules radio *Bluetooth* sur le marché ayant des puissances différentes et donc des portées différentes :

Classe	Puissance	Portée
1	100 mW (20 dBm)	100 mètres
2	2,5 mW (4 dBm)	10 à 20 mètres
3	1 mW (0 dBm)	Quelques mètres

La plupart des fabricants d'appareils électroniques utilisent des modules de classe 2.

Mise en oeuvre de la liaison série

On a vu que le module Bluetooth émule une liaison série classique, ainsi l'utilisation de l'objet serial permet l'accès aux différents ports série de la machine. Plusieurs possibilités existent pour l'ouverture d'un port, suivant le système d'exploitation.

Système d'exploitation	Constructeur type
Linux / Linux 64	<code>serial('/dev/ttyS0');</code>
Mac OS	<code>serial('/dev/tty.KeySerial1');</code>
Solaris 64	<code>serial('/dev/term/a');</code>
Windows 32/64	<code>serial('com1');</code>

L'appel de la primitive « serial » renvoie un identifieur contenant tous les paramètres de la liaison série.

Dans le cas où nous l'utilisons :

- 8 bits
- pas de parité
- un bit de stop et vis à vis des valeurs par défaut des propriétés de l'objet serial, il faut configurer au minimum les champs Port, BaudRate, InputBuffer (choix de la taille du buffer d'entrée) et Timeout (si la valeur par défaut de 0.01s ne convient pas à l'application).

Allocation dynamique/Pré allocation :

Ce point est critique dans la réception des données. L'acquisition série sous Matlab, en flux continu et avec un débit élevé (au delà de quelques ko.s-1), ne peut pas se faire directement sur un vecteur de taille inconnue au départ. L'augmentation constante de la taille du vecteur force une série de réallocations qui ont pour effet de provoquer une perte de données à chaque fois.

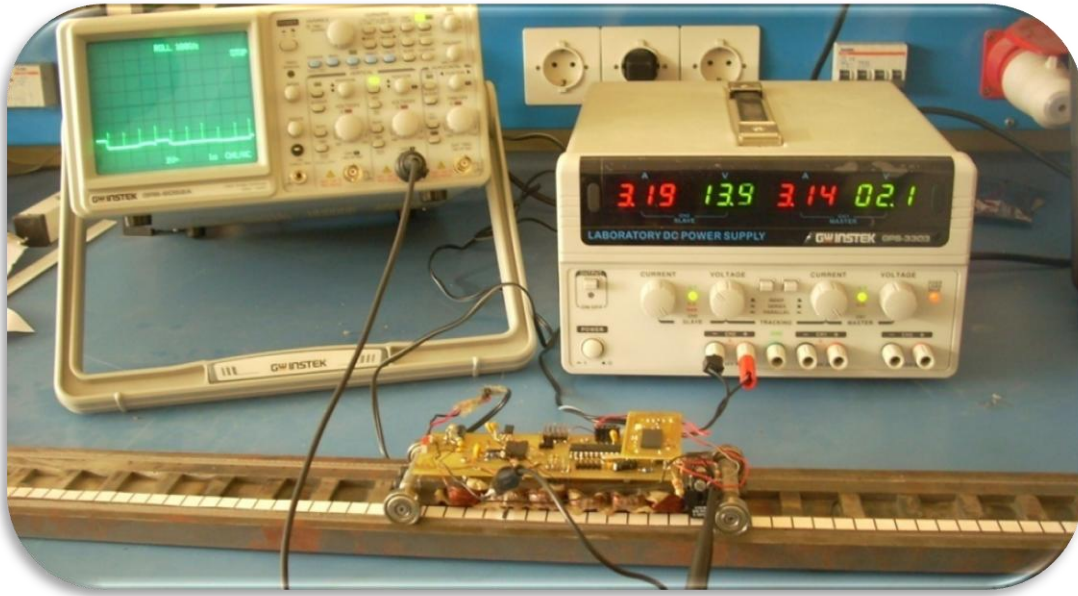
La technique la plus simple consiste à pré allouer un vecteur de taille suffisante au regard du débit et de la durée d'acquisition.

Ouverture/fermeture de ports

La gestion des ports série est rigoureuse dans Matlab. Il est important de toujours respecter la séquence suivante :

1. ouverture du port
2. lancement de l'acquisition
3. arrêt de l'acquisition
4. mise en forme ou près traitement si nécessaire
5. fermeture du port et en particulier, il faut impérativement éviter (sous peine de devoir relancer Matlab):

- d'ouvrir deux fois le même port
 - d'ouvrir un port qui n'est pas connecté
 - de quitter le GUI sans avoir fermé le port
-



MRVlin : Observation des signaux sur l'oscilloscope



Le Programmeur USB du dspic : Pickit2

Annexe 19

Programme C configuration et exploitation des fonctions

```
//La fonction principale de notre programme (fonction main), fait uniquement appelle à
//d'autres sous fonction définit auparavant :
//Fonction Initialisation des variables : Elle se déclare de la manière suivante :
//-----
//          void InitVar()
//-----
{
Flags.UARTIRef=1;          // Pas de potar donc, le PC commande
IRef_UART=HalfDUTY/3.0;   // 2/3 de la tension disponible
Vrefmin=0;
Vrefmax=FullDUTY;        // limiteur de tension
Flags.Running = 0;        // clear running flag
RunningLED=0;            // LED run = Off
TimeStamp=0;
Tl_dsCount=0;
Sequence=0; // init des variables du deroulement de la séquence //d'alimentation des
//enroulements
SeqMaxDelay=10;
SeqDelayCounter=SeqMaxDelay;
Flags.OldCaptIRState=0;
Flags.OldTogglesAlimState=0;
Flags.ModeFrontRev=0;
Flags.FrontRev=1;
Flags.Running=1;
EnableL6234=Flags.Running;
}
//-----
//La configuration des ports se fait de la manière suivante :
//-----
void setup_ports()
{
_PLLPRE=0; // old /2
_PLLPOST=0; // old /2
_PLLDIV=30; // old /32
// Clock switching to incorporate PLL
__builtin_write_OSCCONH(0x03); // Initiate Clock Switch to Primary
// Oscillator with PLL (NOSC=0b011)
__builtin_write_OSCCONL(0x01); // Start clock switching
while (OSCCONbits.COSC != 0b011); // Wait for Clock switch to occur
// Clear All Ports Prior to defining I/O
AD1PCFGL = 0xFFFFE; // all PORT A/B = Digital(1) ADC AN0 = analog(0)
PORTA=0; //Initialize LED pin data to off state
PORTB=0; //Initialize LED pin data to off state
// registres de direction :
TRISA = 0xFFED; // RA0 in ADC for test, RunningLED RA1 Out, CaptIR in RA4      1110|1101
TRISB = 0xA9CF; // RB des PWM en sortie à 0, modif 27/06/2010
__builtin_write_OSCCONL(OSCCON & ~0x40); //clear the bit 6 of OSCCONL to unlock pin remap
//rem : unlock inutile si on programme juste une fois
_U1RXR = 2; // RP2 is UART1 RX
_RP3R = 3; // RP3 is UART1 TX (U1TX)
```

Annexe 20

```
_SDI1R = 6;    // RP6 is SPI1 MISO
_RP8R = 8;    // RP8 is SPI1 CLK (SCK1OUT)
_RP7R = 7;    // RP7 is SPI1 MOSI (SDO1)
__builtin_write_OSCCONL(OSCCON | 0x40); //set the bit 6 of OSCCONL to lock pin re-map
}
//-----
// Configuration et exploitation du convertisseur analogique numérique ADC 10 bits.
//-----
void InitADC10()
{
//Set up ADC1 for Channel 0-3 sampling:
AD1CON1bits.FORM = 0; // Data Output Format: Signed Fraction (Q15 format)
AD1CON1bits.SSRC = 3; // Sample Clock Source: 3=PWM      , 2=GP Timer starts conversion
AD1CON1bits.ASAM = 1; // Sampling begins immediately after conversion
AD1CON1bits.AD12B = 0; // 10-bit ADC operation
AD1CON1bits.SIMSAM = 0; // Samples multiple channels sequentially
AD1CON2bits.BUFM = 0;
AD1CON2bits.CSCNA = 1; // Scan CH0+ Input Selections during Sample A bit
AD1CON2bits.CHPS = 0; // Converts CH0
AD1CON3bits.ADRC = 0; // ADC Clock is derived from Systems Clock
AD1CON3bits.ADCS = 63; // ADC Conversion Clock
AD1CHS0bits.CH0SA = 0; // MUXA +ve input selection (AIN0) for CH0
AD1CHS0bits.CH0NA = 0; // MUXA -ve input selection (VREF-) for CH0
AD1CHS123bits.CH123SA = 0; // MUXA +ve input selection (AIN0) for CH1
AD1CHS123bits.CH123NA = 0; // MUXA -ve input selection (VREF-) for CH1
AD1CSSL = 0x000F;
AD1CON1bits.ADDMABM = 0; // DMA buffers are built in scatter/gather mode
AD1CON2bits.SMPI = 1; // 2 ADC buffers
AD1CON4bits.DMABL = 3; // Each buffer contains 8 words
_AD1IF = 0;    // Adc int flag Off
_AD1IE = 0;    // Adc int Off
_ADON = 1;    // turn ADC ON
}
//-----
//          Configuration du DMA :
//-----
void InitDMA0(void)
{
DMA0CONbits.AMODE = 2; // Configure DMA for Peripheral indirect mode
DMA0CONbits.MODE = 2; // Configure DMA for Continuous Ping-Pong mode
DMA0PAD = (int)&ADC1BUF0; //0x0300; // Point DMA to ADC1BUF0
// DMA0CNT = 31; // 32 DMA request (4 buffers, each with 8 words)
DMA0CNT = 15; // 16 DMA request (2 buffers, each with 8 word)
// DMA0CNT = 7; // 8 DMA request (2 buffers, each with 4 word)
DMA0REQ = 13; // Select ADC1 as DMA Request source
DMA0STA = __builtin_dmaoffset(&BufferA);
DMA0STB = __builtin_dmaoffset(&BufferB);
IFS0bits.DMA0IF = 0; //Clear the DMA interrupt flag bit
IEC0bits.DMA0IE = 1; //Set the DMA interrupt enable bit
DMA0CONbits.CHEN=1; // Enable DMA}
//-----
//Configuration et exploitation des signaux à modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM).
```

Annexe 21

```
void InitMCPWM()
{
PTPER = HalfDUTY;// set the pwm period register, ne pas oublier la double précision
ENABLE_FIRING;      //Enable PWMs tt le tps sauf RE0, RE1, RE2 qui restent en
PDC1=HalfDUTY; PDC2=HalfDUTY; PDC3=HalfDUTY;    // apres une regul ça change
EnableL6234=0;      // disable L6234
OVDCON = 0x0000;    // permettre un contrôle à l'aide du registre OVDCON
PWMCN2 = 0x0000;    // 1 PWM values
PTCON = 0x8002;     // PWM symetrique
}
//-----
// Lecture ADC via DMA :
//-----
void __attribute__((interrupt, auto_psv)) _DMA0Interrupt (void(
{
if(DmaBuffer == 0)
if(DmaBuffer == 0)
{
CaptIR=BufferA.Adc1Ch0[0];// 0à 1023 ou moyenne 0, 1, 2, 3...7
ISense=BufferA.Adc1Ch1[0];    // 0à 1023
}
else
{
CaptIR=BufferB.Adc1Ch0[0];// 0à 1023 ou moyenne 0, 1, 2, 3...7
ISense=BufferB.Adc1Ch1[0];// 0à 1023
}
DmaBuffer = 1;
_DMA0IF = 0;
}
//-----
//      Fonction configuration du Timer :
//-----
void InitTimer()
{
// Timer1 pour 1 ISR des 250 us
TlCON = 0; // ensure Timer 1 is in reset state, internal timer clock Fosc/4, no prescale
TMR1 = 0;      // RAZ Timer1
_TlIF = 0; // reset Timer 1 interrupt flag
_TlIP = 4; // set Timer1 interrupt priority level to 4
_TlIE = 1; // enable Timer 1 interrupt
PR1 = TlPeriod; // set Timer 1 period register
TlCONbits.TON = 1; // enable Timer 1 and start the count
}
//-----
// Fonction pour la transmission vers le port série (Bluetooth)
//-----
void InitUART()
{
U1MODE = 0x8000; // enable UART1, 8 bits, 1 stop bit, no parity, RX normal
U1STA = 0x0000;
U1BRG = ((FCY/16)/BAUD) - 1; // set baud rate
```

Annexe 22

```
RXPtr = &InData[0];    // point to first char in receive buffer
Flags.CheckRX = 0;     // clear rx and tx flags
_U1RXIF = 0;          // clear interrupt flag
_U1RXIE = 1;          // enable RX interrupt
Flags.SendTX = 0;
Flags.SendData = 0;    // clear flag
SeqComm=SeqCommMax;
_UTXEN = 1;           // Initiate transmission
}
//-----
// Fonction qui converti et envoi les infos sur l UART à 115200 baud
//-----
void SendData()
{
ConvHexa( Vref, OffsetPWM, OutData);    // Vref en Hexa
ConvHexa( CaptIR, OffsetCaptIR, OutData);
ConvHexa( Vit, OffsetVit, OutData);    // Vit en Hexa
ConvHexa( PosRef, OffsetPosRef, OutData); // PosRef en Hexa
ConvHexa( Pos, OffsetPos, OutData);    // Pos en Hexa
OutData[OffsetSequence]= '0'+Sequence; // Running
TXPtr = &OutData[0];
SendMsg();
}
//-----
// Fonction pour la Réception de données depuis le port série (Bluetooth):
//-----
void ReceiveData()
{
TXPtr = &InData[0];
SendinputMsg();
Flags.CheckRX=0;
// traite la commande
if (InData[0] != 'C')    return;
switch (InData[1])
{
case 'E' : if (InData[2] == '1')    Flags.Running=1;
else    Flags.Running=0;
EnableL6234=Flags.Running; // enable or not L6234 principal
RunningLED = Flags.Running; // set or clear running LED
Flags.RefreshAll=1;
case 'M' : if (InData[2] == '1')    Flags.MRV_autopilotage=1;
else    Flags.MRV_autopilotage=0;
EnableL6234=Flags.Running; // enable or not L6234 principal
RunningLED = Flags.Running; // set or clear running LED
Flags.RefreshAll=1;
case 'R' : if (InData[2] == '1')    Flags.FrontRev=1;
else    Flags.FrontRev=0;
EnableL6234=Flags.Running; // enable or not L6234
RunningLED = Flags.Running; // set or clear running LED
Flags.RefreshAll=1;
}
// Timer1 interrupt fait le calcul
```

Annexe 23

```
// ISR toutes les 250 us
//-----
void __attribute__((interrupt, auto_psv)) _T1Interrupt( void )
{
// RunningLED=0;
_T1IF = 0;
if (++T1_dsCount == T1_dsCountMax) T1_dsCount=0;
//-----
if (T1_dsCount==0) // Read Accel
{
Flags.ReadAccel=1;
}
//-----
if (T1_dsCount==1) // Regul
{
Regul();
}
//-----
if (T1_dsCount==2) // LCD
{
if ( ++CountAffichage == PeriodCountAffichage )
{
CountAffichage=0;
Flags.RefreshLCD=1;
}
}
//-----
if (T1_dsCount==3) // UART
{
if (!--SeqComm) { // communication dsPIC -> PC
SeqComm=SeqCommMax;
Flags.SendData=1;
}
}
// RunningLED=1;
}
//-----
//Partie réception des ordres via le port COM (GUI):
//-----
void ReceiveData()
{
TXPtr = &InData[0];
SendinputMsg();
Flags.CheckRX=0;
// traite la commande
if (InData[0] != 'C') return;
switch (InData[1])
{
case 'E' : if (InData[2] == '1') Flags.Running=1;
else Flags.Running=0;

```

Annexe 24

```
                EnableL6234=Flags.Running;           // enable or not L6234
principal
                RunningLED = Flags.Running;         // set or clear running LED
                Flags.RefreshAll=1;
                case 'M' : if (InData[2] == '1')      Flags.MRV_autopilotage=1;
                        else                          Flags.MRV_autopilotage=0;
                EnableL6234=Flags.Running;           // enable or not L6234
principal
                RunningLED = Flags.Running;         // set or clear running LED
                Flags.RefreshAll=1;

                case 'R' : if (InData[2] == '1')    Flags.FrontRev=1;
                        else                          Flags.FrontRev=0;
                EnableL6234=Flags.Running;           // enable or not L6234
principal
                RunningLED = Flags.Running;         // set or clear running LED

                Flags.RefreshAll=1;

        }
}

//-----
//          La fonction principale main :
//-----
int main()
{
    setup_ports();
    InitMCPWM();
    Flags.RefreshAll=1;
    InitVar();
    InitUART();
    InitTimer();
    InitADC10();
    InitDMA0();
    RunningLED=0;
    while(1)
    {
        Check();
    } // end of while (1)
} // end of main
```
